



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**GABRIEL SOUZA E SILVA**

**ESTUDO DO CUSTO DE FABRICAÇÃO DE UM CUBO DE RODA DE BICICLETA**  
**URBANA**

**FORTALEZA**

**2024**

GABRIEL SOUZA E SILVA

ESTUDO DO CUSTO DE FABRICAÇÃO DE UM CUBO DE RODA DE BICICLETA  
URBANA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Elicivaldo Lima

FORTALEZA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- S58e Silva, Gabriel Souza e.  
Estudo do custo de fabricação de um cubo de roda de bicicleta urbana / Gabriel Souza e Silva. – 2024.  
62 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,  
Curso de Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2024.  
Orientação: Prof. Dr. Francisco Elicivaldo Lima.
1. Cubo de roda de bicicleta. 2. Custos de fabricação. 3. Usinagem. 4. Viabilidade econômica. I. Título.  
CDD 620.1
-

GABRIEL SOUZA E SILVA

ESTUDO DO CUSTO DE FABRICAÇÃO DE UM CUBO DE RODA DE BICICLETA  
URBANA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: 1º de Março de 2024

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Francisco Elicivaldo Lima (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Luiz Soares Júnior  
Universidade Federal do Ceará

---

Prof. Me. Antonio Philipi Alves Moreira  
Centro Universitário Farias Brito

Aos meus pais, familiares e amigos.

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos que contribuíram de alguma maneira com a minha graduação no curso de Engenharia Mecânica. Certamente, foram anos de muito aprendizado profissional e pessoal. Desde o meu ingresso nesta formação em 2018, foram inúmeras pessoas que passaram por minha trajetória, às quais tenho eterna gratidão.

Primeiramente, aos meus colegas da Universidade Federal do Ceará e aos meus colegas da École Centrale de Lille, com os quais compartilhei muitos momentos de aprendizado. Além disso, gostaria de agradecer às associações universitárias das quais pude participar durante minha vida acadêmica: *Programação de Educação Tutorial (PET)*, Delphos Project Centrale Lille e BRASA Lille.

Um agradecimento especial ao Prof. Dr. Francisco Elicivaldo Lima, pela disponibilidade em orientar meu Trabalho de Conclusão de Curso, sem dúvidas, foi fundamental para essa minha última etapa na graduação.

Aos docentes que participaram da minha graduação. Em especial, aos professores da UFC Rômulo Rodrigues, Maria Alexandra, Clodoaldo Carvalho e aos professores da Centrale Lille Armand Toguyéni, Véronique Dziwniel e Abdelkader El Kamel.

Absolutamente, à minha família, por terem me apoiado, mesmo nos momentos de dificuldade. Sem seu suporte nenhuma das minhas conquistas ao longo desses anos seria possível.

Por fim, à *Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)* por financiar meu programa de Duplo Diploma na França por meio do projeto *Brasil France Ingénieur Technologie (BRAFITTEC)*, o qual me proporcionou uma experiência engrandecedora e imensos aprendizados.

“Mas esse é o começo de uma nova história... a história da gradual renovação de um homem, a história de sua gradual regeneração, de sua passagem de um mundo para o outro, de sua iniciação numa nova vida desconhecida. Esse poderia ser o tema de uma nova história, mas a presente chega ao fim.”

(Fiódor Dostoiévski)

## RESUMO

A economia global está cada vez mais competitiva, exigindo que todos seus setores sejam mais ágeis, eficientes e econômicos. Com a grande competição por investimentos, em especial na indústria, é necessário que as fábricas apresentem projetos de elevada qualidade, mas que possuam viabilidade econômica e atratividade financeira. Além disso, o mercado está exigindo que os profissionais desempenhem multitarefas, ou seja, um engenheiro precisa saber projetar uma construção, uma máquina, um circuito, mas também deve entender como funciona o processo de execução de seus projetos e os custos relacionados a eles. Este estudo se concentra no cálculo e análise dos custos de fabricação de um cubo de roda de bicicleta por usinagem. Ele apresenta os métodos de usinagem mais adequados para a produção dessa peça, as etapas de execução de cada método e um estudo com o cálculo dos custos de cada etapa de produção, dependendo do número de peças fabricadas. A fabricação da peça foi realizada no Atelier de Fabrication Mécanique da École Centrale de Lille, onde foi possível coletar os dados das máquinas e ferramentas utilizadas no processo e o tempo gasto em cada etapa da produção. Foi realizada uma pesquisa bibliográfica que embasa as equações apresentadas e o método de cálculo utilizado. Ao longo deste estudo prático, foram analisados custos fixos e variáveis relacionados à fabricação de um cubo de roda e, por fim, foi possível comparar o custo de cada etapa do processo de fabricação em função do número de peças, possibilitando a análise do comportamento dos custos, identificação dos custos mais relevantes da fabricação e a elaboração de possíveis medidas para otimizar financeiramente o processo fabril.

**Palavras-chave:** Cubo de roda de bicicleta. Custos de fabricação. Usinagem. Viabilidade econômica.

## ABSTRACT

The global economy is becoming increasingly competitive, demanding that all its sectors be more agile, efficient, and cost-effective. With intense competition for investments, especially in the manufacturing industry, it is essential for factories to present high-quality projects that are economically viable and financially attractive. Moreover, the market is demanding that professionals perform multitasking roles; for instance, an engineer needs to be able to design a building, a machine, a circuit, but also understand the process execution of their projects and the associated costs. This study focuses on the calculation and analysis of manufacturing costs for a bicycle wheel hub produced by machining. It presents the most suitable machining methods for producing this part, the execution steps for each method, and a study involving the calculation of costs for each production stage, depending on the number of pieces manufactured. The part's manufacturing was conducted at the Atelier de Fabrication Mécanique of the École Centrale de Lille, where data on the machines and tools used in the process and the time spent on each production step were collected. A literature review was conducted to support the equations presented and the calculation method used. Throughout this practical study, fixed and variable costs related to the manufacturing of a wheel hub were analyzed. Finally, it was possible to compare the cost of each stage of the manufacturing process based on the number of pieces, enabling the analysis of cost behavior, identification of the most relevant manufacturing costs, and the development of possible measures to optimize the manufacturing process financially.

**Keywords:** Bicycle wheel hub. Manufacturing costs. Machining. Economic viability.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Cubo de roda padrão com 6 furos . . . . .	15
Figura 2 – Bicicleta urbana da cidade de Lille, França . . . . .	16
Figura 3 – Regiões de contato entre a ferramenta e a peça. $F_r$ é a força resultante, $F_{p'}$ é força requerida para remoção do cavaco e $F_p$ é a força de deformação . . .	19
Figura 4 – Visão geral de um torno convencional, com diversos componentes . . . . .	20
Figura 5 – Fixação de peças empregando a placa de 3 castanhas simultâneas . . . . .	21
Figura 6 – Exemplo de placa de 4 castanhas independentes . . . . .	22
Figura 7 – Exemplo de fixação por meio de pinças . . . . .	22
Figura 8 – Ferramenta fixada no porta-ferramenta de um torno universal . . . . .	23
Figura 9 – Inserto com sistema de fixação central . . . . .	24
Figura 10 – Diferentes tendências para cada geometria de inserto . . . . .	24
Figura 11 – Ilustração esquemática de (a) fresadora horizontal e (b) fresadora vertical . .	25
Figura 12 – Exemplos de ferramentas para fresamento . . . . .	26
Figura 13 – Centro de usinagem de eixo vertical . . . . .	27
Figura 14 – Domínio dos centros de usinagem CNC em relação a produção de peças em série . . . . .	28
Figura 15 – Valores de mercado, em relação ao número de habitantes, das máquinas-ferramenta produzidas em 1975 e 1995, nos principais países desenvolvidos	29
Figura 16 – Troca de ferramenta em um centro de usinagem . . . . .	29
Figura 17 – Etapas do plano de fabricação . . . . .	35
Figura 18 – Modelagem 3D do cubo de roda de bicicleta estudado . . . . .	36
Figura 19 – Barra maciça de alumínio . . . . .	40
Figura 20 – Custo por peça ( $C_p$ ) em função do número de peças ( $n$ ) . . . . .	44
Figura 21 – Participação do custo fixo . . . . .	45

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Custo de mão de obra por hora por cargo . . . . .	38
Tabela 2 – Custo de maquinário . . . . .	38
Tabela 3 – Tempo de atividades ( $T_s$ e $T_c$ ) . . . . .	38
Tabela 4 – Custo de desenvolvimento ( $C_d$ ) . . . . .	39
Tabela 5 – Custo de preparação ( $C_l$ ) . . . . .	40
Tabela 6 – Custo fixo total ( $C_f$ ) . . . . .	40
Tabela 7 – Custo do bruto por peça ( $C_b$ ) . . . . .	41
Tabela 8 – Custo de corte ( $C_c$ ) . . . . .	41
Tabela 9 – Custo de matéria-prima ( $C_r$ ) . . . . .	41
Tabela 10 – Operações Fase 2 - Torno Cazeneuve CT200 . . . . .	42
Tabela 11 – Operações Fase 3 - <i>Centro de Usinagem Vertical</i> (CUV) Sabre 1250 . . . . .	42
Tabela 12 – Resumo do custo operacional por fase . . . . .	42
Tabela 13 – Custo operacional de usinagem por peça ( $C_m$ ) . . . . .	43
Tabela 14 – Cálculo do custo de ferramenta por peça . . . . .	43
Tabela 15 – Custo de ferramenta total por peça ( $C_l$ ) . . . . .	43
Tabela 16 – Resumo dos custos de fabricação . . . . .	43
Tabela 17 – Custo em função do número de peças ( $n$ ) . . . . .	44
Tabela 18 – Participação do custos . . . . .	45

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PET	<i>Programação de Educação Tutorial</i>
CAPES	<i>Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior</i>
BRAFITEC	<i>Brasil France Ingénieur Technologie</i>
CUV	<i>Centro de Usinagem Vertical</i>
CNC	<i>Controle Numérico Computadorizado</i>
DML	<i>Dedicated Manufacturing Lines</i>
CUH	<i>Centro de Usinagem Horizontal</i>
CAM	<i>Computer-Aided Manufacturing</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
SELIC	<i>Sistema Especial de Liquidação e de Custódia</i>
STF	<i>Supremo Tribunal Federal</i>
FGTS	<i>Fundo de Garantia do Tempo de Serviço</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

<i>R\$</i>	Real Brasileiro - unidade monetária
<i>\$</i>	Dólar americano - unidade monetária
<i>mm</i>	Milímetros - unidade de distância
<i>m</i>	Metros - unidade de distância
<i>rpm</i>	Rotações por minuto - unidade de frequência
<i>kg</i>	Quilograma - unidade de massa
<i>h</i>	Horas - unidade de tempo
<i>min</i>	Minutos - unidade de tempo
<i>s</i>	Segundos - unidade de tempo
<i>m<sup>2</sup></i>	Metro quadrado - unidade de área
<i>kW</i>	Quilowatt - unidade de potência
<i>kWh</i>	Quilowatt-hora - unidade de energia

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	15
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b>	16
<b>1.2</b>	<b>Estruturação do trabalho</b>	17
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	18
<b>2.1</b>	<b>Evolução dos métodos de fabricação</b>	18
<b>2.2</b>	<b>Usinagem</b>	19
<b>2.2.1</b>	<b><i>Tornos para metal</i></b>	20
2.2.1.1	<i>Funcionamento de um torno</i>	20
2.2.1.2	<i>Fixação das peças</i>	21
2.2.1.3	<i>Ferramentas de torneamento</i>	23
<b>2.2.2</b>	<b><i>Fresadoras para metal</i></b>	24
2.2.2.1	<i>Fresadora horizontal</i>	25
2.2.2.2	<i>Fresadora vertical</i>	25
2.2.2.3	<i>Ferramentas de fresamento</i>	26
<b>2.2.3</b>	<b><i>Centros de usinagem Controle Numérico Computadorizado (CNC)</i></b>	26
<b>2.3</b>	<b>Custo de usinagem por peça</b>	30
<b>2.3.1</b>	<b><i>Custos fixos</i></b>	31
<b>2.3.2</b>	<b><i>Custos variáveis</i></b>	32
2.3.2.1	<i>Custo de matéria-prima</i>	32
2.3.2.2	<i>Custo operacional de usinagem</i>	33
2.3.2.3	<i>Custo das ferramentas</i>	33
2.3.2.4	<i>Cálculo do tempo de vida de uma ferramenta</i>	34
<b>3</b>	<b>ESTUDO DE CASO</b>	35
<b>3.1</b>	<b>Premissas gerais do estudo de caso</b>	36
3.1.1	<i>Premissas de custo de mão de obra (<math>L_m</math>)</i>	37
3.1.2	<i>Premissas de custo de utilização das máquinas (<math>B_m</math>)</i>	38
3.1.3	<i>Tempo de troca de ferramenta (<math>T_s</math>) e tempo de corte do bruto (<math>T_c</math>)</i>	38
<b>3.2</b>	<b>Gama A</b>	39
3.2.1	<i>Custos fixos (<math>C_f</math>)</i>	39
3.2.2	<i>Custos variáveis (<math>C_v</math>)</i>	40

3.2.2.1	<i>Custo de matéria-prima (<math>C_r</math>)</i> . . . . .	40
3.2.2.2	<i>Custo operacional de usinagem (<math>C_m</math>)</i> . . . . .	41
3.2.2.3	<i>Custo de ferramenta (<math>C_t</math>)</i> . . . . .	43
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> . . . . .	44
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS</b> . . . . .	47
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	48
	<b>APÊNDICES</b> . . . . .	49
	<b>APÊNDICE A–SERRA DE FITA SCIE KASTO MODELO SSB 260</b> .	49
	<b>APÊNDICE B–CENTRO DE TORNEAMENTO CAZENEUVE MO- DELO CT200</b> . . . . .	51
	<b>APÊNDICE C–CENTRO DE USINAGEM VERTICAL CINCINNATI MILACRON MODELO SABRE 1250</b> . . . . .	53
	<b>ANEXOS</b> . . . . .	54
	<b>ANEXO A–SUPERFÍCIES FUNCIONAIS DO CUBO DE RODA DE BICICLETA</b> . . . . .	55
	<b>ANEXO B–OPERAÇÕES DE USINAGEM DAS FASES 2 E 3</b> . . . . .	57
	<b>ANEXO C–POSICIONAMENTO DA PEÇA NAS MÁQUINAS NAS FASES 2 E 3</b> . . . . .	61

## 1 INTRODUÇÃO

Neste trabalho, foi feito um estudo de cálculo de custos de um processo de fabricação de um cubo de roda de uma bicicleta urbana por meio de usinagem. Os métodos de fabricação escolhidos para o estudo foram o torneamento e a fresagem. O cubo de roda é a parte central da roda da bicicleta, em que são fixados os raios que se conectam aos aros. O cubo de bicicleta garante o apoio necessário para que o usuário pedale tranquilo e com mais segurança.

Figura 1 – Cubo de roda padrão com 6 furos



Fonte: École Centrale de Lille

Um processo de fabricação, neste trabalho chamado de Gama, é composto de métodos de fabricação populares no meio da engenharia mecânica como o torneamento, a fresagem e a furação. O intuito foi fazer um estudo de custos destes métodos comumente utilizados para que os engenheiros tenham mais noções financeiras e maior acurácia em calcular os gastos envolvidos em seus projetos mecânicos. Saber calcular os custos de um projeto é uma competência cada vez mais exigida no mercado de trabalho atual e, infelizmente, este tema ainda é pouco abordado na maior parte das escolas de Engenharia do Brasil, exigindo que os profissionais pesquisem e aprendam sobre o assunto por outros meios que não sejam a graduação.

O cubo de roda de bicicleta foi escolhido por ser uma peça de relativa simplicidade que pode ser fabricado sem a necessidade de matéria-prima especial ou de máquinas muito sofisticadas. O cubo de roda utilizado no projeto foi o de 6 furos, isto é, que possui 6 furos que prendem o cubo ao disco, como pode ser visto na figura 1. Este cubo é o mais fácil de encontrar nas bicicletas, principalmente nas bicicletas urbanas. As bicicletas urbanas são modelos populares normalmente usados como alternativa ao transporte público. Aqui no Brasil, elas são populares nas principais metrópoles como São Paulo, Rio de Janeiro e Fortaleza. Como essas bicicletas têm o intuito de serem populares e amplamente utilizadas, é necessário que a sua fabricação seja feita com peças de baixo custo, mas que possuam uma resistência adequada ao esforço que irão sofrer.

Figura 2 – Bicicleta urbana da cidade de Lille, França



Fonte: Ilevia, 2023.

O objetivo é calcular os principais custos envolvidos na gama de fabricação em função da quantidade de peças produzidas, podendo assim analisar sua composição e encontrar quais são os mais relevantes e que assim, merecem maior foco.

O custo de fabricação total de uma peça pode ser dividido em custos variáveis e fixos. O custo variável depende da quantidade de peças a serem fabricadas: horas de uso de máquinas, ferramentas, mão de obra, material. Ou seja, é um custo por peça proporcional ao número de peças.

O custo fixo não depende da quantidade de peças a serem fabricadas, neste estudo foi utilizado como custo fixo apenas o custo de desenvolvimento: o trabalho do engenheiro para o projeto da peça e a programação da máquina, o trabalho dos técnicos e trabalhadores para montar e calibrar as máquinas antes da fabricação.

Para definir o custo total de fabricação foi calculado o custo fixo e variável por peça e esse valor multiplicado pelo total de peças fabricadas.

Para calcular os custos da gama de fabricação primeiro foram definidos os métodos de fabricação a serem utilizados nela (torneamento, fresagem, furação etc). Após essa definição foi feita uma pesquisa dos custos médios de matéria-prima, ferramentas, manutenção e operação de cada método.

## 1.1 Objetivos

Este trabalho tem como fim calcular todos os custos envolvidos na fabricação de um cubo de roda de bicicleta. O intuito é desenvolver um modelo prático de cálculo de custos de

fabricação para que engenheiros possam definir com maior precisão os métodos de fabricação que irão utilizar em seus projetos.

## 1.2 Estruturação do trabalho

Este trabalho está estruturado com os seguintes capítulos:

**Capítulo 1:** Neste primeiro capítulo é apresentada uma ideia geral do estudo realizado, os objetivos traçados e a estrutura no qual o trabalho foi organizado.

**Capítulo 2:** O segundo capítulo apresenta algumas definições dos métodos de fabricação analisados no estudo. Ilustrando aspectos técnicos das máquinas, ferramentas, matérias-primas e dos processos operacionais necessários para a fabricação de peças. Assim como apresenta uma metodologia para o cálculo dos custos de fabricação de uma peça.

**Capítulo 3:** Nessa seção, é apresentado um estudo de caso, o qual mostrará o cálculo de custos de uma gama de fabricação de uma peça: um cubo de roda dianteira de uma bicicleta urbana. Serão apresentados todos os parâmetros utilizados na gama, as etapas de fabricação e os custos relacionados a cada etapa.

**Capítulo 4:** Nesse capítulo, são expostos os resultados das simulações de custo da gama de fabricação em função do número de peças fabricadas. Assim, é possível analisar o custo de produção de cada método e definir quais os custos mais relevantes durante a fabricação, podendo assim, desenvolver medidas para reduzi-los.

**Capítulo 5:** Por fim, são apresentadas as considerações finais deste trabalho e sugestões de trabalhos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Como citado no capítulo anterior, para se produzir uma peça, como um cubo de roda de bicicleta, são necessários métodos de fabricação específicos. Esses métodos possuem características próprias que os definem. Cada método possui etapas diferentes, utiliza máquinas distintas e possui finalidades variáveis. Ao longo dos séculos, houve uma grande mudança dos métodos de fabricação largamente utilizados na manufatura e na indústria e os próprios processos sofreram mudanças significativas. Atualmente, existem métodos de complexidades distintas que contemplam uma larga gama de finalidades.

### 2.1 Evolução dos métodos de fabricação

A evolução dos métodos de fabricação ao longo da história tem sido um processo dinâmico, impulsionado por avanços tecnológicos, demandas industriais e inovações nos materiais.

Os primórdios da fabricação envolviam métodos rudimentares, como forjamento manual e moldagem direta. Estes processos eram intensivos em mão de obra e limitados em precisão, resultando em produtos com propriedades variáveis. Com o avanço da Revolução Industrial, técnicas como a fundição em areia e forjamento mecânico começaram a ser adotadas em larga escala, marcando uma transição significativa na fabricação de peças metálicas. (ASCHBY M. F., 1973)

O advento da máquina-ferramenta durante o século XIX permitiu a automação de processos de usinagem, como torneamento e fresamento. A usinagem assumiu um papel crucial na produção de peças complexas e precisas, impulsionando setores como aeroespacial e automotivo. A introdução de técnicas não tradicionais, como a usinagem por CNC, elevou a precisão e a eficiência dos processos. (KALPAKJIAN S., 2009)

Nos dias atuais, a fabricação é caracterizada pela integração de tecnologias avançadas. A Indústria 4.0 promove a digitalização e a conectividade em processos de fabricação, permitindo a fabricação aditiva, também conhecida como impressão 3D, que redefine a abordagem convencional para a produção de componentes. (KUSIAK, 2018)

Nas próximas seções serão abordados com mais profundidade os métodos de fabricação analisados neste estudo, os quais desempenham papéis fundamentais no atual cenário dinâmico de busca contínua por eficiência, precisão e inovação.

## 2.2 Usinagem

O processo de usinagem é uma técnica de fabricação por remoção de material, onde ferramentas cortantes retiram excessos de matéria-prima para criar peças com precisão dimensional e acabamento desejados. Essa técnica é amplamente utilizada na indústria para produzir componentes críticos em termos de tolerâncias e qualidade. (GROOVER, 2018)

Para que ocorra a usinagem é necessário utilizar ferramentas de material mais duro que o material da peça a ser usinada. Como é mostrado na figura 3, no momento do contato entre a ferramenta e a peça é aplicada uma força que resulta na remoção de material. (FELDER, 2023)

Para realizar uma boa usinagem são necessárias algumas etapas:

**(i):** Possuir um design detalhado da peça a ser usinada, selecionar os materiais e escolher as ferramentas apropriadas;

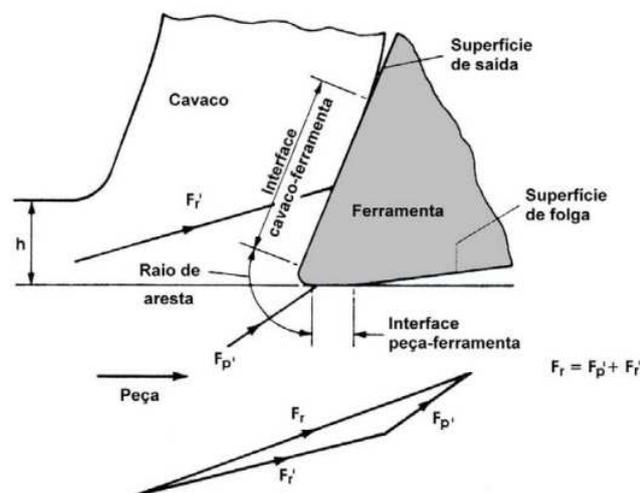
**(ii):** A peça a ser usinada deve ser devidamente fixada na máquina para evitar movimentos indesejados durante a usinagem;

**(iii):** Realizar as trocas das ferramentas pois diferentes operações de usinagem requerem ferramentas específicas como brocas, fresas ou insertos;

**(iv):** Monitorar precisamente a velocidade de corte, avanço e profundidade de corte para garantir a qualidade do produto final;

**(v):** Inspeccionar rigorosamente para garantir a conformidade com as tolerâncias especificadas.

Figura 3 – Regiões de contato entre a ferramenta e a peça.  $F_r$  é a força resultante,  $F_{p'}$  é força requerida para remoção do cavaco e  $F_{f'}$  é a força de deformação



Fonte: (RODRIGUES, 2005)

Existem diferentes máquinas que realizam processos de usinagem, como retíficas, serras, furadeiras, mandrilhadoras, tornos, fresadoras etc. Dentre elas, o torno e a fresadora são as máquinas mais presentes em fábricas, oficinas e laboratórios devido as suas grandes versatilidades, que possibilitam a fabricação de uma enorme gama de peças e podem exercer funções de outras máquinas como a furação, que muitas vezes é realizada em tornos ou fresadoras ao invés de se utilizar furadeiras. Cada uma delas é utilizada em etapas distintas da produção de uma peça e normalmente são combinadas na gama de fabricação.

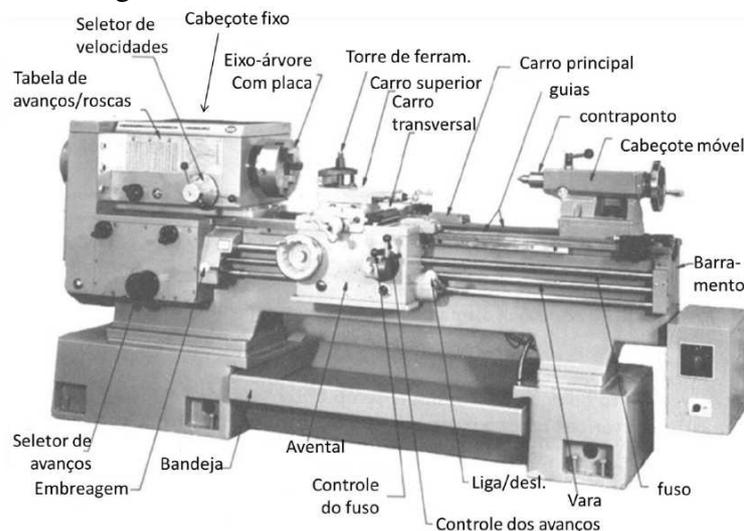
### 2.2.1 Tornos para metal

O torno é uma máquina-ferramenta muito versátil utilizada comumente na fabricação de eixos, polias, pinos, roscas, peças cilíndricas internas e externas, além de cones, esferas e diversas outras peças mecânicas para indústrias das mais variadas naturezas. Os tornos desempenham um papel crucial na indústria de usinagem, proporcionando a capacidade de moldar peças metálicas com precisão.

#### 2.2.1.1 Funcionamento de um torno

A figura 4 ilustra um torno para metal, o qual consiste em várias partes essenciais, tais como o cabeçote fixo e móvel, placa de torno, barramento, carro transversal, carro principal e caixa de engrenagens. O cabeçote fixo contém o motor e fornece suporte estável, enquanto o cabeçote móvel permite ajustes para diferentes diâmetros de peças. (KALPAKJIAN S., 2009)

Figura 4 – Visão geral de um torno convencional, com diversos componentes



Fonte: Adaptado de (KALPAKJIAN S., 2009)

O funcionamento de um torno de metal envolve a fixação da peça na placa de torno e sua rotação enquanto a ferramenta de corte se move longitudinal e transversalmente. O movimento combinado da peça e da ferramenta permite a remoção controlada de material, moldando a peça de acordo com as especificações desejadas. (KALPAKJIAN S., 2009)

Existem vários tipos de tornos para metal, cada um projetado para finalidades específicas. O torno horizontal é comum para operações gerais, enquanto o torno vertical é preferido para peças pesadas. Tornos por CNC integram automação e programação, aumentando a precisão e eficiência.

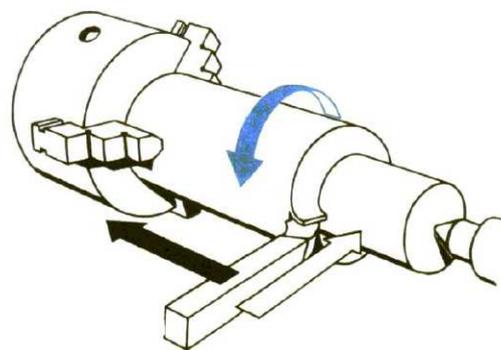
### 2.2.1.2 Fixação das peças

Uma importante etapa do torneamento é a fixação das peças para as devidas operações. Essa fixação pode ser feita de 4 maneiras: placa de 3 castanhas simultâneas, placa de 4 castanhas independentes, placa com ponto de centro e pinça. A placa de 3 castanhas simultâneas permite a fixação de peças centradas, desde que a forma inicial cilíndrica seja de boa qualidade, ou seja poligonal com número de lados múltiplo de 3 e com boa simetria em relação ao centro. Este tipo de placa é principalmente usado em casos onde a peça fica fora da placa a uma distância menor do que 3 vezes o diâmetro. Distâncias maiores que 3 vezes o diâmetro, a fixação preferida deve ser placa e contraponto. (COELHO, 2015)

Figura 5 – Fixação de peças empregando a placa de 3 castanhas simultâneas



(a) placa de 3 castanhas



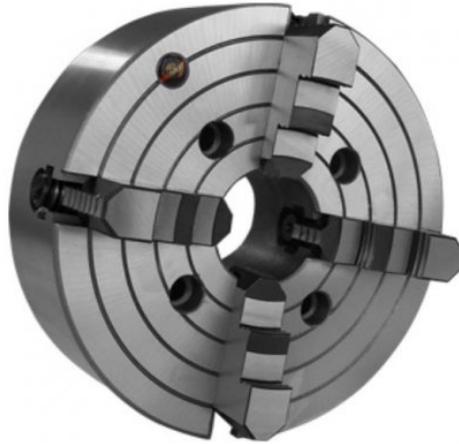
(b) Placa de 3 castanhas e contraponto

Fonte: (COELHO, 2015)

Para operações em peças não cilíndricas, em formas que não se ajustam à placa de 3 castanhas simultâneas, furos fora do centro, ou de formas muito irregulares a placa de 4

castanhas independentes pode ser a solução de fixação.

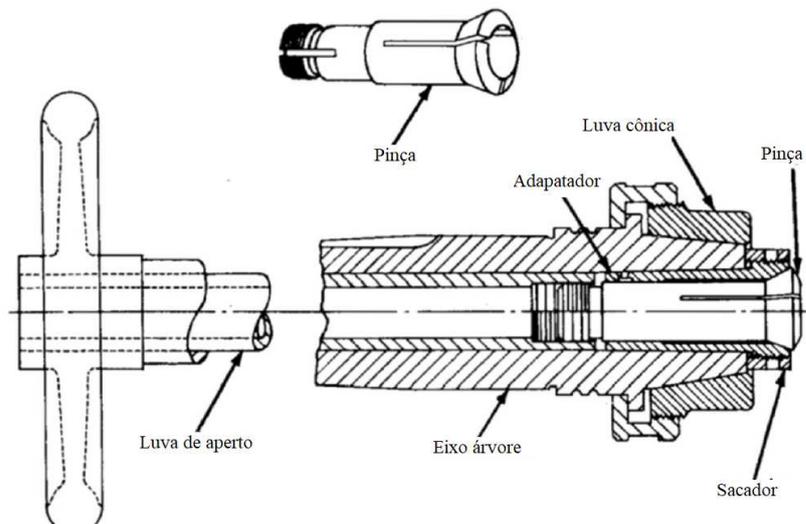
Figura 6 – Exemplo de placa de 4 castanhas independentes



Fonte: (COELHO, 2015)

Quando a fixação de uma peça cilíndrica para o torneamento deve ser com giro precisamente centrado, sem batimento, o sistema de pinças é normalmente a solução. As pinças são fabricadas em aço com efeito de mola, com um diâmetro ligeiramente maior que aquele no qual a peça deve ser fixada e com formato de cone na parte externa. A parte cônica externa da pinça é montada dentro de um cone interno de forma que um deslocamento axial faz com que o diâmetro interno se contraia, fixando a peça. Tal procedimento garante que a peça seja precisamente centrada para uma operação de acabamento ou em barras com excelente acabamento superficial e cilindridade. (COELHO, 2015)

Figura 7 – Exemplo de fixação por meio de pinças



Fonte: Adaptado de (COELHO, 2015)

### 2.2.1.3 Ferramentas de torneamento

A fixação das ferramentas de corte a serem usadas no torneamento é feita pelo carro porta-ferramenta, ou torre porta-ferramenta. Nos modelos universais, normalmente, tem espaço para 4 ferramentas e pode ser indexado para que cada ferramenta atue separadamente.

Figura 8 – Ferramenta fixada no porta-ferramenta de um torno universal



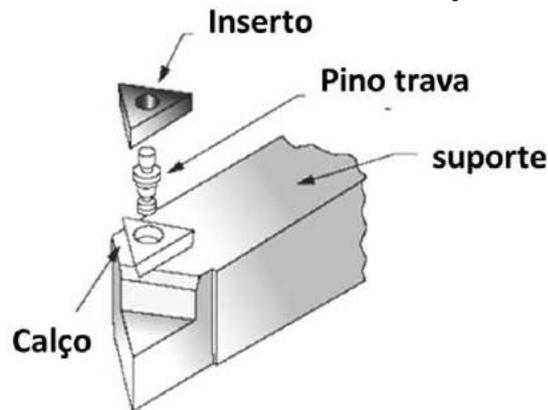
Fonte: (COELHO, 2015)

As operações de torneamento são executadas por ferramentas de torneamento, em geral, compostas de um suporte de aço no qual é fixado um inserto intercambiável de metal duro, responsável pela remoção de material por usinagem, como mostrado na figura 9. Tanto o suporte quanto o inserto possuem determinadas características geométricas que são mais adequadas a cada operação de torneamento. Para cada operação de torneamento deve-se selecionar o suporte adequado, assim como a geometria do inserto, para que se obtenham os melhores resultados possíveis em termos de qualidade e produtividade.

Como pode ser visto na figura 10, ao diminuir o ângulo da aresta de corte do inserto ocorre uma redução na força necessária para retirar material da peça. Entretanto, insertos com ângulos mais agudos tendem a romper ou se danificarem mais facilmente. Além disso, insertos com ângulos menores são mais indicados para processos de acabamento ou torneamento de peças mais complexas. Enquanto que as ferramentas com ângulos maiores são mais indicadas para usinagem de materiais mais duros, de maior tamanho e com menos detalhes.

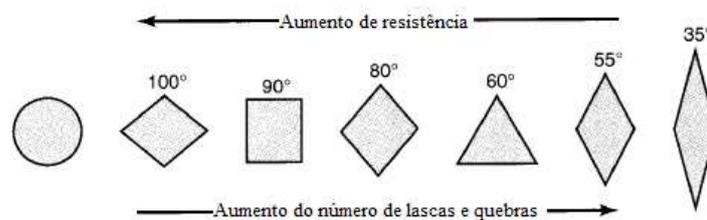
Como foi possível constatar nesta seção, cada tipo de torneamento demanda um

Figura 9 – Inseto com sistema de fixação central



Fonte: Adaptado de (COELHO, 2015)

Figura 10 – Diferentes tendências para cada geometria de inserto



Fonte: Adaptado de (KALPAKJIAN S., 2009)

método específico de fixação de peças e de ferramentas e cada um desses componentes possui um preço. Por isso, quando a fabricação de uma peça possui várias etapas de torneamento é necessário mais de um tipo de fixação e de ferramenta. Por esse motivo, quanto mais complexa a superfície da peça, maior serão os custos necessários para fabricá-la.

### 2.2.2 Fresadoras para metal

As fresadoras para metal são equipamentos fundamentais na indústria de usinagem, permitindo a obtenção de precisão na criação de peças metálicas complexas. Uma fresadora é composta por componentes cruciais, tais como a base, a coluna, o cabeçote, a mesa, o carro transversal e o eixo árvore. O eixo árvore, em particular, desempenha um papel central, permitindo o movimento rotativo da ferramenta de corte.

O funcionamento básico envolve a fixação da peça na mesa da fresadora e o posicionamento preciso da ferramenta de corte. Durante a operação, a ferramenta é acionada para girar enquanto a mesa e/ou o cabeçote se movem, permitindo cortes precisos e controlados. (KALPAKJIAN S., 2009)

Existem vários tipos de fresadoras, cada uma adaptada a diferentes tarefas. Os principais tipos de fresadoras são as horizontais e as verticais.

### 2.2.2.1 Fresadora horizontal

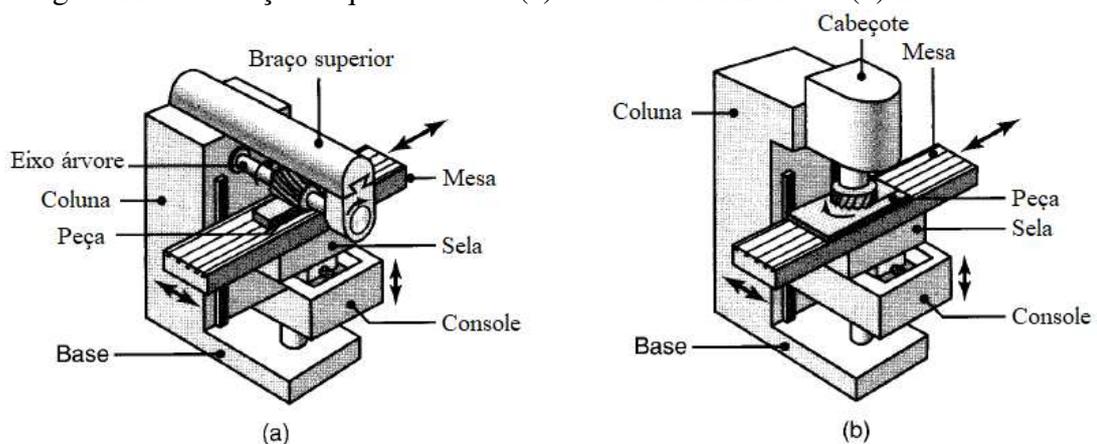
Na fresadora horizontal o eixo árvore está orientado horizontalmente, sendo paralelo à mesa da máquina. A ferramenta de corte move-se ao longo da horizontal. Por esse motivo, ela é mais adequada para operações que exigem remoção de material ao longo de superfícies horizontais, como aplainamento, faceamento e fresamento de engrenagens. A fresadora horizontal pode ser mais longa e requer uma estrutura mais robusta para suportar a orientação horizontal do eixo árvore. Ela pode ser menos flexível para determinados trabalhos, mas é altamente eficaz em operações específicas, como fresamento de superfícies planas. (GROOVER, 2018)

### 2.2.2.2 Fresadora vertical

Na fresadora vertical, por outro lado, o eixo árvore está orientado verticalmente em relação à mesa da máquina. Isso significa que a ferramenta de corte desce diretamente sobre a peça. Por isso, ela é ideal para operações que envolvem usinagem de superfícies planas, criação de características verticais, como ranhuras e sulcos. Também é usada para perfis tridimensionais, contornos complexos e usinagem de peças mais intrincadas. (GROOVER, 2018)

A fresadora vertical é considerada geralmente mais versátil para peças de geometria complexa devido à sua capacidade de ajustar a posição da ferramenta em três eixos (X, Y e Z). Além disso, ela tende a ser mais compacta, ocupando menos espaço horizontalmente.

Figura 11 – Ilustração esquemática de (a) fresadora horizontal e (b) fresadora vertical

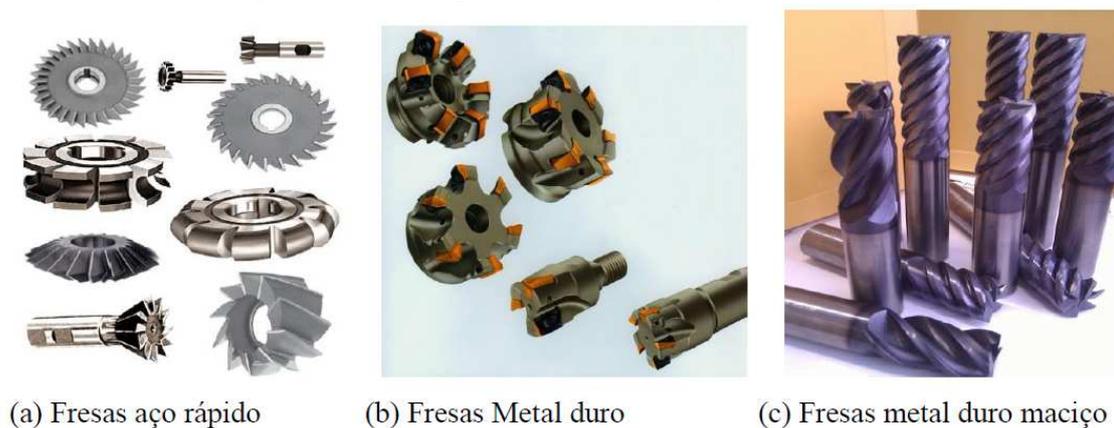


Fonte: Adaptado de (BOOTHROYD G., 2005)

### 2.2.2.3 Ferramentas de fresamento

As ferramentas utilizadas nos processos de fresamento podem ser fabricadas de forma maciça, em geral de aço rápido, o que limita sua aplicação ao corte de materiais não endurecidos e de baixa dureza. Devido aos altos custos, o diâmetro dessas ferramentas não passa de aproximadamente 200-250 mm. Outra opção são os cortadores fabricados com aço que contêm insertos intercambiáveis de metal duro. Neste caso, o limite para o diâmetro máximo depende da capacidade da fresadora em comportar tais ferramentas. Por outro lado, há limitações quanto ao diâmetro mínimo possível de se conseguir fixas insertos, que atualmente está em torno de 10 mm. Para diâmetros menores, usam-se ferramentas maciças de aço rápido ou de metal duro, como é o caso das fresas de topo. (COELHO, 2015)

Figura 12 – Exemplos de ferramentas para fresamento



(a) Fresas aço rápido

(b) Fresas Metal duro

(c) Fresas metal duro maciço

Fonte: (COELHO, 2015)

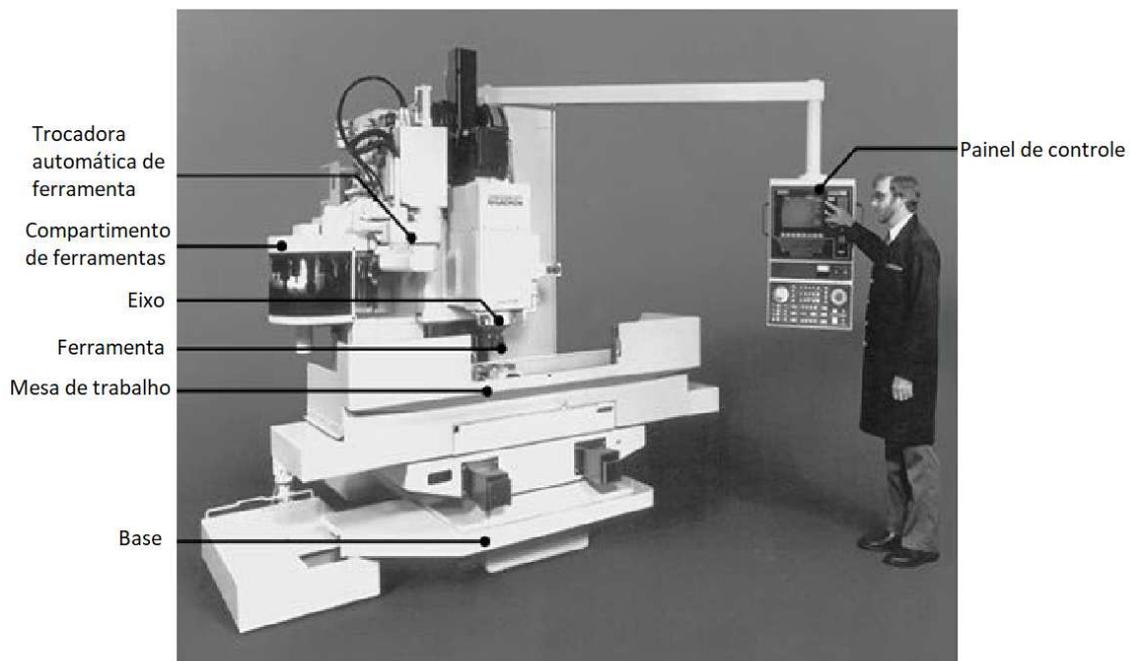
### 2.2.3 Centros de usinagem CNC

Analisando os processos de fabricação e ferramentas nas seções anteriores, é possível analisar que cada máquina é desenhada para performar basicamente o mesmo tipo de operação, como torneamento, fresagem, furação etc. No entanto, muitas peças requerem várias operações para serem finalizadas, logo, muitas delas não podem ser fabricadas por um único tipo de máquina. Desse modo, ao utilizar máquinas-ferramentas tradicionais, seria necessário um transporte da peça de uma máquina para outra até que todas as etapas de fabricação fossem completadas.

O tradicional método de fabricação de peças usando diferentes tipos de máquinas tem sido, e ainda é, um método viável e eficiente. Ele pode ser altamente automatizado no intuito de aumentar a produtividade, que é o princípio por trás das linhas de produção, chamadas em inglês

de *Dedicated Manufacturing Lines* (DML), criadas por Henri Ford no começo do século XX, e que comumente são utilizadas em produções de larga escala. Linhas de produção consistem em um conjunto de máquinas específicas organizadas em uma sequência lógica. A peça de trabalho, como um cubo de roda, é movida de estação em estação, com uma operação de fabricação em cada estação, e vai sendo transferida para próximas estações para operações cada vez mais específicas. Existem situações, entretanto, em que linhas de produção não são viáveis economicamente, particularmente quando os tipos de produto a serem fabricados mudam rapidamente devido a fatores como a demanda pelo produto ou uma mudança no design do produto. É dispendioso e demorado o processo de reorganizar as máquinas para responder às necessidades para o novo ciclo de produção. Um importante conceito que visa a flexibilidade de produção, desenvolvida no final dos anos 1950, é o de Centros de Usinagem CNC. (KALPAKJIAN S., 2009)

Figura 13 – Centro de usinagem de eixo vertical

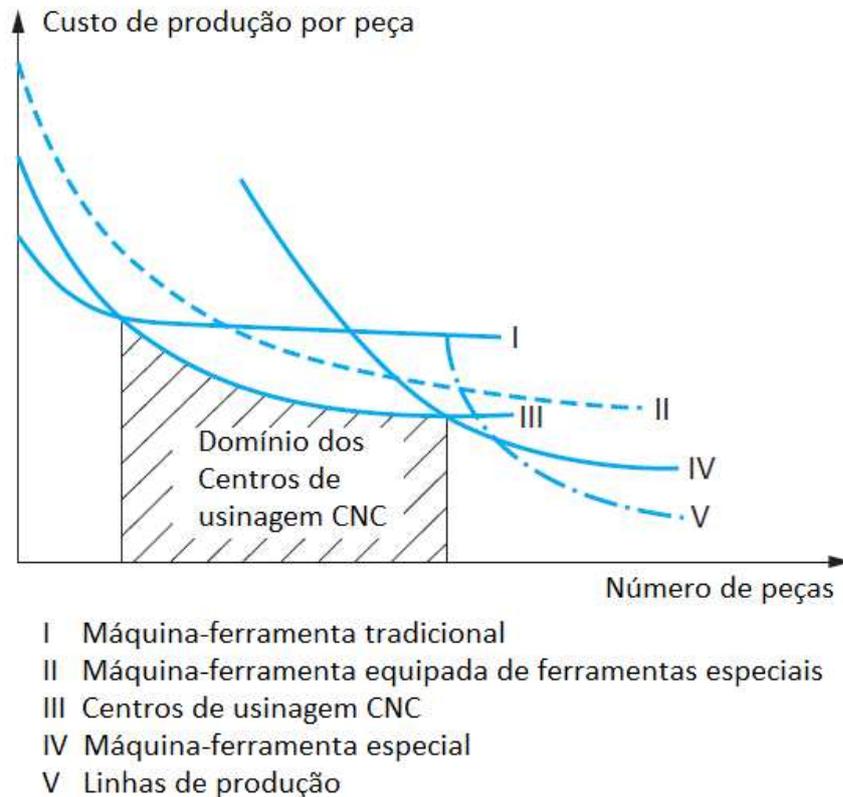


Fonte: Adaptado de (KALPAKJIAN S., 2009)

Um centro de usinagem CNC é uma máquina avançada controlada por computador que é capaz de performar uma variedade de operações de usinagem em diferentes superfícies e diferentes orientações de uma peça de trabalho sem ter que mudá-la de posição. A peça de trabalho normalmente se mantém fixa e as ferramentas que se movimentam para realizar fresagem, torneamento, furação e operações similares. Nas linhas de produção, a peça é levada até a máquina, nos centros de usinagem é a máquina que é levada até a peça.

Como pode ser visto na figura 14, os centros de usinagem CNC permitem a realização de séries médias de peças com menor custo em relação às máquinas-ferramentas tradicionais, que são mais indicadas para fabricação de poucas unidades e em relação às linhas de produção que são a melhor solução para produção de grande séries de peças.

Figura 14 – Domínio dos centros de usinagem CNC em relação a produção de peças em série

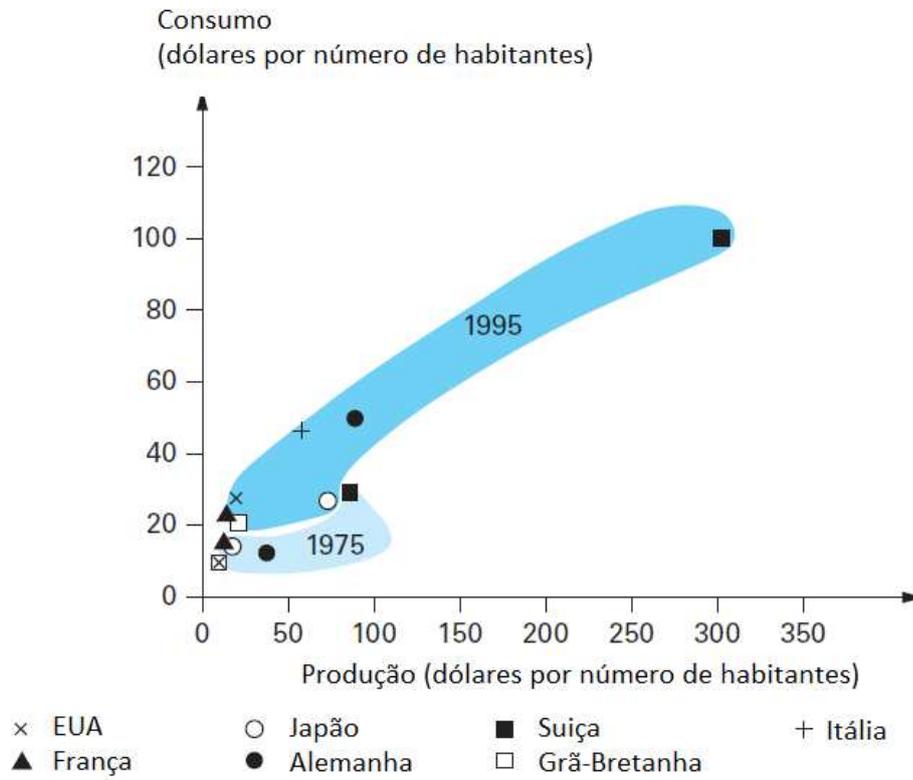


Fonte: Adaptado de (FELDER, 2023)

Assim, de acordo com a figura 15, de 1975 à 1995, a maior parte dos países desenvolvidos aumentou fortemente suas produções de utilização de centros de usinagem CNC. (FELDER, 2023)

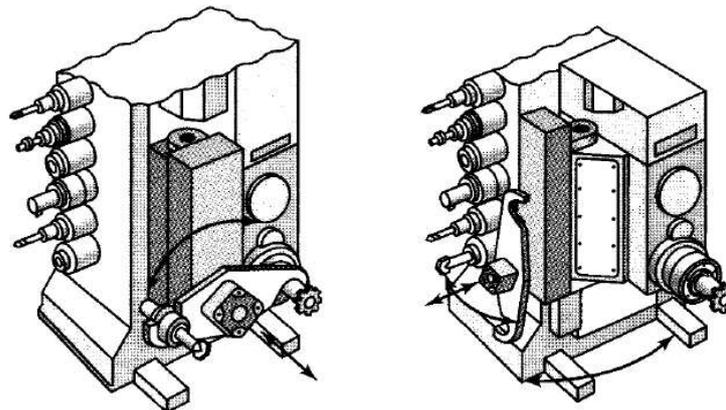
Os centros de usinagem permitem que várias ferramentas sejam armazenadas em seu interior e elas realizam diferentes processos de usinagem. A trocadora automática de ferramenta presente no centro de usinagem, ilustrada na figura 16, realiza a troca de cada ferramenta e o seu acoplamento no eixo árvore da máquina. Cada ferramenta é ligada ao seu suporte específico, o que torna a troca de ferramentas durante a fabricação mais eficiente. As ferramentas são identificadas por códigos de barra, *tags* ou *chips* acoplados diretamente ao suporte. O tempo de troca de ferramenta é normalmente entre 5 a 10 segundos, mas pode chegar a 30 segundos para ferramentas maiores e mais pesadas. (KALPAKJIAN S., 2009)

Figura 15 – Valores de mercado, em relação ao número de habitantes, das máquinas-ferramenta produzidas em 1975 e 1995, nos principais países desenvolvidos



Fonte: Adaptado de (FELDER, 2023)

Figura 16 – Troca de ferramenta em um centro de usinagem



Fonte: (KALPAKJIAN S., 2009)

Existem diversas configurações de centros de usinagem. Os dois tipos básicos são os de eixo horizontal e os de eixo vertical, no entanto, muitas máquinas são capazes de operar nos dois eixos, os chamados centros de usinagem universais. O *Centro de Usinagem Horizontal* (CUH) normalmente é utilizado em grandes peças e pode trabalhar em posições de diversos ângulos. Uma categoria de CUH é o centro de torneamento, que também é comandado por CNC.

Já o CUV, que é semelhante a uma fresadora vertical, é capaz de realizar diversas operações de usinagem em peças de cavidades profundas, como moldes ou matrizes e normalmente mais baratas que os de eixo horizontal.

Os centros de usinagem CNC são normalmente configurados por softwares *Computer-Aided Manufacturing* (CAM), que são responsáveis pelo controle da máquina. Para que uma peça seja fabricada corretamente em um centro de usinagem, primeiro é necessário que haja um desenho com as especificações da peça. Esses desenhos de especificação são normalmente realizados em softwares *Computer-Aided Design* (CAD). Após carregar o desenho de especificação é preciso que o operador configure os processos de operação no software CAM. Atualmente já existem diversos softwares que desempenham as duas funções CAD e CAM. Além disso, nos softwares CAM é possível salvar a configuração de diferentes peças, aumentando ainda mais a sua versatilidade.

Os centros de usinagem CNC estão disponíveis numa grande variedade de tamanhos e características, e os seus custos variam entre cerca de \$ 50.000 e \$ 1 milhão ou mais. As capacidades típicas variam até 75 kW. As velocidades máximas do fuso estão normalmente na faixa de 4.000 a 8.000 rpm, e algumas chegam a atingir as 75.000 rpm para aplicações especiais com fresas de pequeno diâmetro. Os fusos modernos podem acelerar para uma velocidade de 20.000 rpm em apenas 1,5 segundos. Algumas mesas são capazes de suportar peças com peso até 7.000 kg, embora estejam disponíveis capacidades ainda mais elevadas para aplicações especiais. (KALPAKJIAN S., 2009)

### 2.3 Custo de usinagem por peça

Nesta seção será demonstrado um método de se calcular o custo de produção de uma peça por usinagem, levando em conta o custo de desenvolvimento da peça pelo engenheiro, de compra da matéria-prima e da fabricação da peça. Como já citado em seções anteriores e demonstrado em (DUVERLIE, 1999), o custo de usinagem por peça,  $C_p$ , é composto por custos fixos e custos variáveis.

$$C_p = \frac{C_f}{n} + C_v \quad (2.1)$$

Com

$$C_f \text{ [R\$]} = \text{Custos fixos}$$

$C_v$  [R\$] = Custos variáveis

$n$  = Número de peças fabricadas

### 2.3.1 Custos fixos

O custo fixo pode ser resumido ao trabalho de desenvolvimento do projeto e à preparação necessária para começar o processo de usinagem. O trabalho de desenvolvimento do projeto consiste no trabalho do engenheiro em desenvolver o desenho da peça em CAD, concepção das gamas de fabricação e a configuração dos centros usinagens CNC por meio de um software CAM. Já o trabalho de preparação é composto pela calibração das máquinas, checagem das ferramentas, organização do ambiente de trabalho e fabricação de peças de teste. Por esse motivo, é possível definir que o custo fixo,  $C_f$ , é dado por:

$$C_f = C_d + C_l \quad (2.2)$$

Em que,

$C_d$  [R\$] = Custo de desenvolvimento do projeto

$C_l$  [R\$] = Custo de preparação dos processos de usinagem.

O custo de desenvolvimento do projeto,  $C_d$ , pode ser calculado por:

$$C_d = T_d * L_m \quad (2.3)$$

Onde,

$T_d$  [h] = Carga horária de trabalho

$L_m$  [R\$/h] = Custo da mão de obra responsável por hora

Já o custo de preparação do projeto,  $C_l$ , é:

$$C_l = T_l(L_m + B_m) \quad (2.4)$$

Onde  $T_l$  é o tempo envolvido na preparação para o processo de usinagem, que compreende a calibração das máquinas, checagem das ferramentas, fabricação de peças teste etc. E  $B_m$  é o custo de utilização da máquina, que inclui os gastos com energia elétrica, lubrificação, manutenção periódica, depreciação etc.

Segundo (DUVERLIE, 1999), é possível calcular o custo de utilização da máquina  $B_m$  em R\$/h por meio da seguinte equação:

$$B_m = \frac{P}{HA} + \frac{P * i}{2H} + \frac{I_m}{H} + \frac{I_r * S}{H} + 0,6 * eW \quad (2.5)$$

Sendo,

$P$  [R\$] = Preço de compra da máquina

$H$  [h] = Número de horas de utilização por ano

$A$  [ano] = Duração em anos da máquina

$i$  [%/ano] = Taxa de juros ao ano. Pode-se utilizar a taxa *Sistema Especial de Liquidação e de Custódia* (SELIC)

$I_m$  [R\$/ano] = Custo de manutenção. Cerca de 1,5% do preço da máquina ao ano

$S$  [m<sup>2</sup>] = Área ocupada pela máquina

$I_r$  [R\$/m<sup>2</sup>] = Preço de locação da área por ano

$e$  [R\$/kWh] = Custo da energia elétrica

$W$  [kW] = Potência da máquina. Utilização média de 60% da potência

A utilização média da potência da máquina depende do estado de operação da máquina e do contexto de fabricação da indústria. Máquinas novas e que possuem manutenção eficiente em uma indústria otimizada, podem operar entre 90% e 95% de sua potência máxima.

### 2.3.2 Custos variáveis

O custo variável de usinagem é todo aquele que é proporcional ao número de peças fabricadas, como compra de matéria-prima, custo de utilização das máquinas, mão de obra dos operadores e quantidade de ferramentas utilizadas.

Como demonstra (KALPAKJIAN S., 2009), o custo variável de usinagem por peça,  $C_v$ , pode ser definido por:

$$C_v = C_r + C_m + C_t \quad (2.6)$$

Em que,

$C_r$  [R\$] = Custo de matéria-prima

$C_m$  [R\$] = Custo operacional de usinagem

$C_t$  [R\$] = Custo das ferramentas

#### 2.3.2.1 Custo de matéria-prima

Para usinagem, o custo de matéria-prima,  $C_r$ , é o custo de compra do material bruto. Para peças de metal, é comum comprar um grande bloco ou barra e cortá-lo em pedaços menores. Logo, o custo por peça será o valor de compra do bruto por peça,  $C_b$ , mais o custo de corte do

desse bruto,  $C_c$ .

$$C_r = C_b + C_c \quad (2.7)$$

O custo de corte,  $C_c$ , pode ser calculado como:

$$C_c = T_c(L_m + B_m) \quad (2.8)$$

Em que  $T_c$  é tempo de corte do bruto por peça.

### 2.3.2.2 Custo operacional de usinagem

O custo operacional de usinagem,  $C_m$ , é dado por:

$$C_m = T_m(L_m + B_m) \quad (2.9)$$

Onde  $T_m$  é o tempo de usinagem da peça em segundos.

### 2.3.2.3 Custo das ferramentas

O custo das ferramentas,  $C_t$ , é dado por:

$$C_t = \frac{1}{N_i}[T_s(L_m + B_m) + P_i] + \frac{1}{N_f}[T_i(L_m + B_m)] \quad (2.10)$$

Em que,

$N_i$  = Número de peças usinadas por ferramenta

$N_f$  = Número de peças usinadas por aresta da ferramenta

$T_s$  [s] = Tempo necessário para troca de ferramenta

$T_i$  [s] = Tempo necessário para troca de aresta

$P_i$  [R\$] = Preço de compra da ferramenta

Portanto, podemos definir que o tempo total,  $T_p$ , necessário para a produção de uma peça é:

$$T_p = T_m + T_l + \frac{T_s}{N_i} + \frac{T_i}{N_f} \quad (2.11)$$

O tempo de usinagem por peça,  $T_m$ , deve ser calculado para cada operação particular.

Por exemplo, em uma operação de torneamento, o tempo de usinagem é:

$$T_m = \frac{L}{fN} = \frac{\pi LD}{fV} \quad (2.12)$$

Onde  $L$  é o comprimento do corte ( $mm$ ),  $f$  é o avanço ( $mm/rotação$ ),  $N$  é a velocidade angular ( $rpm$ ) da peça de trabalho,  $D$  é o diâmetro da peça ( $mm$ ) e  $V$  a velocidade de corte ( $m/min$ ).

### 2.3.2.4 Cálculo do tempo de vida de uma ferramenta

Durante os processos de usinagem não é só a peça que sofre desgaste. Devido ao atrito e à fadiga, as ferramentas utilizadas também são desgastadas. Com o tempo de uso, a ferramenta perde o poder de corte, o que aumenta o tempo necessário para a operação, além disso, caso a ferramenta seja utilizada por mais tempo do que deve, ela pode cisalhar ou torcer. Essa falha pode gerar danos maiores que apenas a troca da ferramenta, o rompimento durante uma operação pode danificar outros componentes da máquina. Por esse motivo, é necessário definir o tempo de vida de uma ferramenta para que ela seja substituída antes de ser totalmente desgastada.

Para calcular o tempo de vida de uma ferramenta é possível se basear no trabalho de Frederick Winslow Taylor, engenheiro mecânico estadunidense, conhecido por ser o criador do Taylorismo. Da equação de ciclo de vida de ferramenta de Taylor tem-se:

$$T = \left(\frac{C}{V}\right)^{1/k} \quad (2.13)$$

$T$  é o tempo, em minutos, necessário para que a ferramenta atinja um grau de desgaste acima do permitido, depois do qual a ferramenta deve ser trocada.  $C$  é uma constante e  $k$  é um expoente que depende do material da peça de trabalho e da ferramenta e das condições de corte. Cada combinação de material de peça e ferramenta e cada condição de corte tem valores de  $k$  e  $C$  próprios.

Com o valor de  $T$  é possível assim determinar o número de peças usinadas por aresta de ferramenta,  $N_f$ .

$$N_f = \frac{T}{T_m} \quad (2.14)$$

E o número de peças usinadas por ferramenta,  $N_i$ .

$$N_i = m * N_f = \frac{mT}{T_m} \quad (2.15)$$

Algumas vezes nem todas as arestas são usadas antes que a ferramenta seja descartada, então deve ser considerado que  $m$  corresponde ao número de arestas que de fato foram usadas, não propriamente o número de arestas presente na ferramenta.

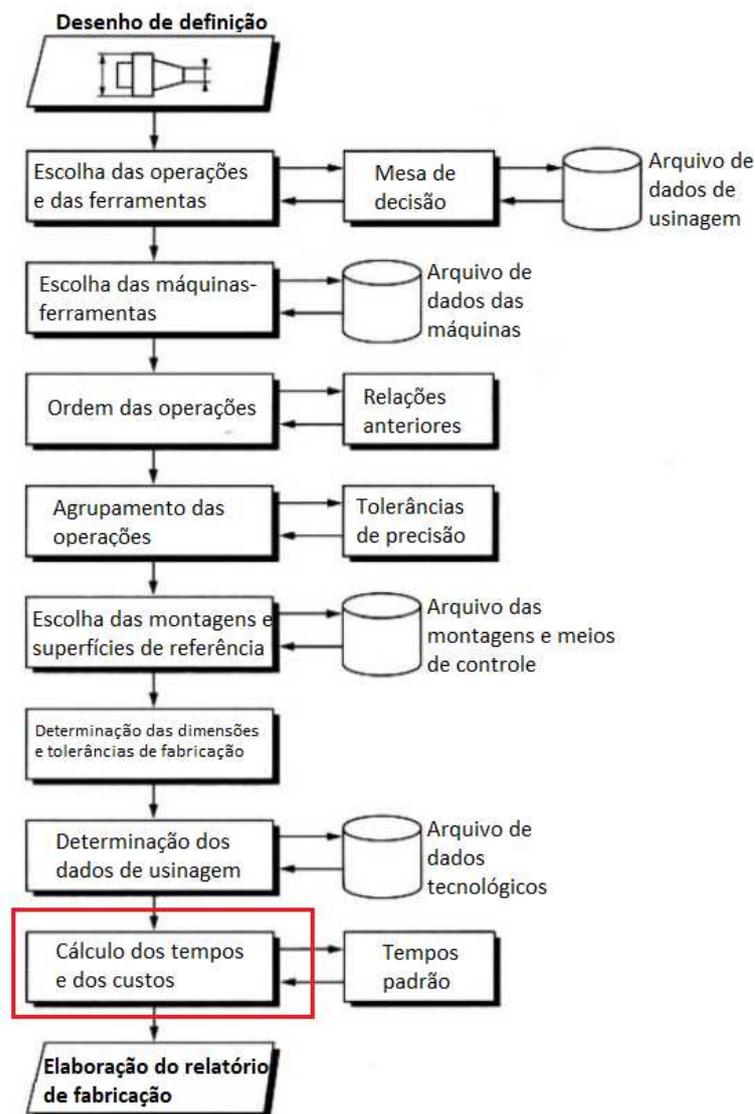
### 3 ESTUDO DE CASO

Para exemplificar o cálculo dos custos de produção de uma peça foi elaborado o seguinte estudo de caso.

Como já descrito anteriormente, a peça escolhida foi um cubo de roda de bicicleta urbana. Foi elaborada uma gama de fabricação para a produção chamada de gama A. A gama A consiste na fabricação da peça exclusivamente por usinagem, utilizando os métodos de torneamento, fresagem e furação.

Segundo (WEILL, 1993), para o desenvolvimento de uma gama de usinagem são necessárias algumas etapas:

Figura 17 – Etapas do plano de fabricação



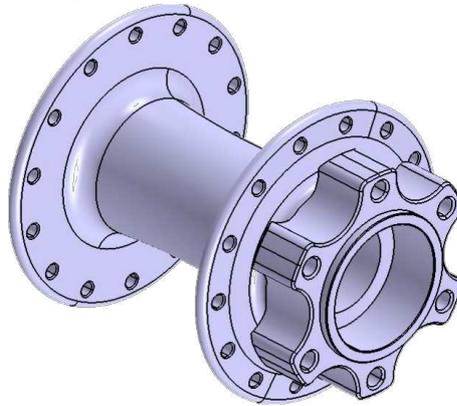
Fonte: Adaptado de (WEILL, 1993)

Este estudo de caso se concentrará na etapa em destaque, o cálculo dos tempos e dos custos. A escolha das máquinas, ferramentas e operações será tratada como sendo os dados iniciais do projeto.

### 3.1 Premissas gerais do estudo de caso

Todos os processos de fabricação foram realizados no *Atelier de Fabrication Mécanique* (Oficina de Fabricação Mecânica), da *École Centrale de Lille* na França, como atividade prática da disciplina de *Spécification des Produits et Fabrication* (Especificação de Produtos e Fabricação). Por isso, foram utilizadas apenas as máquinas e ferramentas disponíveis na oficina.

Figura 18 – Modelagem 3D do cubo de roda de bicicleta estudado



Fonte: Autor

O cubo de roda de bicicleta estudado é fabricado em liga de alumínio  $AlSi9Cu3$ , a qual possui entre 8 e 11% de silício e de 2 e 4% de cobre em sua composição. É uma liga amplamente utilizada na produção de peças automotivas e é uma das mais utilizadas na fundição injetada devido às suas propriedades mecânicas.

Como o intuito deste estudo de caso é demonstrar um método para se calcular os custos do processo de fabricação de um cubo de roda e assim analisar a viabilidade de fabricação de um único tipo de peça, os custos com compra de máquina e estrutura de uma indústria não foram contabilizados. Pressupõe-se que a peça seja fabricada em um local que já possui toda a estrutura necessária para a sua fabricação. Esses custos poderiam ser levados em conta caso o estudo fosse sobre a viabilidade de uma indústria, que produzisse diversos produtos.

### 3.1.1 Premissas de custo de mão de obra ( $L_m$ )

Para realização da gama de fabricação são necessários, no mínimo, um engenheiro, um técnico em mecânica e um operário.

De acordo com os Art. 5º e 6º da Lei nº 4950-A, de 22 de abril de 1966, que dispõe sobre a remuneração de profissionais diplomados em Engenharia, Química, Arquitetura, Agronomia e Veterinária, o salário de um engenheiro com carga-horária de 8 horas diárias deve ser de, no mínimo, 8.5 vezes o salário mínimo vigente. (BRASIL, 1966). O salário mínimo vigente em 2024 é de R\$ 1.412,00.

No entanto, no dia 3 de fevereiro de 2022, o *Supremo Tribunal Federal* (STF) julgou sobre a Lei 4950-A e decidiu por congelar o salário mínimo usado como base de cálculo no valor referente ao de 2022, que era de R\$ 1.212,00. Portanto,

$$\text{Salário do engenheiro} = 8,5 \times \text{R\$ } 1.212,00 = \text{R\$ } 10.302,00$$

De acordo com pesquisa de (VAGAS, 2023), o salário médio de um técnico em mecânica no Brasil é de R\$ 3.109,00. Também segundo (VAGAS, 2023), o salário de um operador de máquinas de produção é de R\$ 1.886,00.

Todavia, para calcular o custo horário de um trabalhador para uma empresa, é necessário analisar outras variáveis, que são o *Fundo de Garantia do Tempo de Serviço* (FGTS), que possui uma alíquota de 8% do salário e que deve ser depositado pelo empregador, o 13º salário e o adicional de férias, que no caso é de 1/3 do salário. Com isso, defini-se que o custo horário da mão de obra é o custo anual do funcionário dividido pelo número de horas trabalhadas no ano:

$$\text{Custo de mão de obra por hora [R\$/h]} = \frac{\text{Custo anual}}{\text{Carga-horária anual}} \quad (3.1)$$

Em que,

$$\text{Custo anual [R\$]} = \text{Salário}(\text{Meses pagos} + \text{Adicional de férias})(1 + \text{FGTS}) \quad (3.2)$$

$$\text{Carga-horária anual [h]} = \text{Meses trabalhados} * \text{Dias úteis mês} * \text{Carga-horária diária} \quad (3.3)$$

Desta forma, é possível calcular o custo horário da mão de obra para os três cargos:

Tabela 1 – Custo de mão de obra por hora por cargo

Custo de mão de obra (R\$/h)				
Cargo	Salário base	Custo anual	Carga-horária anual	Valor da hora
Engenheiro	R\$ 10.302,00	R\$ 148.348,80	1936	R\$ 76,63
Técnico	R\$ 3.109,00	R\$ 44.769,60	1936	R\$ 23,12
Operário	R\$ 1.886,00	R\$ 27.158,40	1936	R\$ 14,03

Fonte: Autor

### 3.1.2 Premissas de custo de utilização das máquinas ( $B_m$ )

Para este estudo foram utilizadas 1 máquina de corte e 2 máquinas de usinagem, 1 torno e 1 centro de usinagem:

(i): Serra de fita Scie KASTO modelo SSB 260

(ii): Centro de torneamento Cazeneuve modelo CT200

(iii): Centro de Usinagem Vertical Cincinnati Milacron modelo Sabre 1250

Para as máquinas citadas acima, foram realizadas cotações no mercado, por meio de pesquisa na internet e consulta a oficinas de fabricação.

Tabela 2 – Custo de maquinário

Custo de maquinário (R\$)		
Máquina	Preço de compra	Custo horário
Serra de fita Scie KASTO modelo SSB 260	R\$ 23.404,83	R\$ 7,06
Torno Cazeneuve modelo CT200	R\$ 269.766,18	R\$ 40,41
Centro de Usinagem Vertical Cincinnati Milacron modelo Sabre 1250	R\$ 177.283,09	R\$ 28,57

Fonte: Autor

Os cálculos dos custos horários da Serra de fita Scie KASTO, do torno Cazeneuve CT200 e do CUV Sabre 1250 estão nos apêndices A, B e C, respectivamente.

### 3.1.3 Tempo de troca de ferramenta ( $T_s$ ) e tempo de corte do bruto ( $T_c$ )

Tabela 3 – Tempo de atividades ( $T_s$  e  $T_c$ )

Tempo de atividades		
Atividade	Duração (min)	Duração (s)
Tempo de troca da ferramenta ( $T_s$ )	3	180
Tempo de corte do bruto ( $T_c$ )	1,5	90

Fonte: Autor

Foi considerado que o tempo de troca de ferramenta  $T_s$  e troca de aresta de corte  $T_i$  são equivalentes e iguais à 3 minutos. Além disso, definiu-se o tempo de corte do bruto  $T_c$  como sendo de 1,5 minutos.

### 3.2 Gama A

A gama A é composto por uma combinação de 3 processos de usinagem: torneamento, fresagem e furação. A produção da peça é feita em 3 grandes etapas:

**Fase 1:** Corte do tarugo de alumínio em pedaços menores com a Serra Scie KASTO

**Fase 2:** Uso do torno Cazeneuve CT200 para dar formato à peça

**Fase 3:** Uso do CUV Sabre 1250 para finalização da peça

Para calcular o custo de produção da peça pela gama A serão usadas as equações apresentadas no capítulo 2.

#### 3.2.1 Custos fixos ( $C_f$ )

No capítulo 2 tem-se que os custos fixos podem ser divididos em custo de desenvolvimento  $C_d$  e custo de preparação para o processo de usinagem  $C_l$ .

O processo de desenvolvimento é realizado por um engenheiro e consiste em:

(i) Desenvolvimento do projeto da peça em CAD. 8 horas de trabalho

(ii): Estudo das gamas de usinagem. 16 horas de trabalho

(iii): Programação em CAM da fase 2. 4 horas de trabalho

(iv): Programação em CAM da fase 3. 4 horas de trabalho

Já a preparação para o processo de usinagem é feito por um técnico em mecânica e um operário.

(v) Calibração das máquinas e instalação das ferramentas. 8 horas de trabalho

(vi): Montagem do processo de usinagem das fases 2 e 3 e realização de uma peça teste. 8 horas de trabalho

Usando a equação 2.3, calcula-se o custo de desenvolvimento para cada atividade.

Tabela 4 – Custo de desenvolvimento ( $C_d$ )

Custo de desenvolvimento			
Atividade	Responsável	Duração (h)	Custo (R\$)
Desenvolvimento do projeto da peça	Engenheiro	8	613,01
Estudo das gamas de usinagem	Engenheiro	16	1.226,02
Programação CAM da fase 2	Engenheiro	4	306,51
Programação CAM da fase 3	Engenheiro	4	306,51

Fonte: Autor

Para calcular o custo de preparação utiliza-se a equação 2.4. Os valores de  $B_m$  são referentes ao custo de utilização do Torno Cazeneuve CT200 e do Centro de usinagem vertical Sabre 1250.

Tabela 5 – Custo de preparação ( $C_l$ )

Custo de preparação			
Atividade	Responsável	Duração (h)	Custo (R\$)
Montagem do processo de usinagem das fases 2 e 3 e realização de uma peça teste	Operário	8	664,04
Calibração das máquinas e instalação das ferramentas	Técnico	8	736,81

Fonte: Autor

Com isso, por meio da equação 2.2 calcula-se o custo fixo total  $C_f$ .

Tabela 6 – Custo fixo total ( $C_f$ )

Custo de desenvolvimento total (Cd)	R\$ 2.452,05
Custo de preparação total (Cl)	R\$ 1.400,85
<b>Custo fixo total (Cf)</b>	<b>R\$ 3.852,90</b>

Fonte: Autor

### 3.2.2 Custos variáveis ( $C_v$ )

Como visto na equação 2.6 os custos variáveis foram divididos em custo de matéria-prima, custo operacional de usinagem e custo de ferramenta.

#### 3.2.2.1 Custo de matéria-prima ( $C_r$ )

Como presente na equação 2.7, o custo de matéria-prima é dividido no custo de compra do bruto por peça,  $C_b$ , e custo de corte desse bruto,  $C_c$ .

A peça a ser usinada possui maior diâmetro de 69 mm e comprimento de 85 mm, por isso, é necessário uma barra de alumínio maciça com dimensões superiores às citadas.

Figura 19 – Barra maciça de alumínio



Fonte: webmetal.com.br

Para definir o custo de compra do bruto por peça foram cotados no mercado valores de barras redondas maciças de alumínio. A melhor cotação encontrada foi de uma barra de 2 3/4" de diâmetro (equivalente à 69,85 mm) e comprimento de 3 metros no valor de R\$ 1.069,33. Como a peça final deve possuir 85 mm de comprimento, é necessário que o bruto inicial seja um pouco maior, assim, foi considerado um valor comprimento inicial de 87 mm. Como a barra possui comprimento de 3 metros e a peça de 87 mm, cada barra pode gerar até 34 peças. Assim, o custo do bruto por peça é o valor de compra da barra dividido pelo número de peças que ela pode gerar.

Tabela 7 – Custo do bruto por peça ( $C_b$ )

Custo do bruto				
Preço barra de alumínio (R\$)	Lo barra (mm)	L peça (mm)	# peças/barra	Custo por peça (R\$)
1.069,33	3.000	87	34	31,01

Fonte: Autor

Utilizando a equação 2.8 e sabendo que a máquina utilizada foi a serra de fita Scie KASTO modelo SSB260, é possível calcular o custo de corte,  $C_c$ .

Tabela 8 – Custo de corte ( $C_c$ )

Custo de corte			
Atividade	Responsável	Duração (min)	Custo por peça (R\$)
Corte com serra Scie Kasto	Operário	1,5	0,53

Fonte: Autor

Com esses dados, é possível determinar o custo de matéria-prima por peça.

Tabela 9 – Custo de matéria-prima ( $C_r$ )

<b>Custo de matéria-prima por peça (Cr)</b>	R\$ 31,54
---	-----------

Fonte: Autor

### 3.2.2.2 *Custo operacional de usinagem ( $C_m$ )*

Como mencionado no início da seção 3.2, a fabricação da peça é dividida em 3 fases, sendo duas delas, fases 2 e 3, compostas por usinagem. Assim, para determinar o custo operacional de usinagem é necessário definir todas as operações de usinagem, em que máquinas elas são realizadas, o responsável pela operação e a duração de cada uma.

Para realizar as operações de usinagem, foram definidas as superfícies funcionais da peça a ser usinada, que constam no anexo A. Os desenhos técnicos com as operações realizadas nas fase 2 e 3 constam no anexo B.

Nas fases 2 e 3, as máquinas são controladas por um operário. Para a fase 2 que é realizada no centro de torneamento Cazeneuve CT200 tem-se:

Tabela 10 – Operações Fase 2 - Torno Cazeneuve CT200

Operações Fase 2 - Torno Cazeneuve CT200			
No	Operação	Ferramenta	Tm (s)
1	Faceamento P6	Inserto 80°	11
2	Torneamento externo cilíndrico	Inserto 80°	10
3	Furação C8	Broca de 20,5 mm	73
4	Inverter posição da peça		10
5	Sangria X4	Inserto redondo, raio 2 mm	17
6	Torneamento interno C2, P2	Inserto 80°	11
7	Faceamento P5	Inserto 80°	11
8	Inverter posição da peça		10
9	Furação diâmetro 3 mm	Broca de 3 mm	98
10	Torneamento X2	Inserto 35°	25
11	Perfilamento central X3	Inserto lâmina 4mm	146
12	Perfilamento X3 direita	Inserto 35°	12
13	Perfilamento X3 esquerda	Inserto 35°	12
14	Torneamento interno C4, P4, C1, P1	Inserto triangular 12 mm	16

Fonte: Autor

Para a fase 3, que é realizada no CUV Sabre 1250.

Tabela 11 – Operações Fase 3 - CUV Sabre 1250

Operação Fase 3 - CUV Sabre 1250			
No	Operação	Ferramenta	Tm (s)
1	Contornar C3, P3	Fresa 2 cortes, 3 dentes, 20 mm	42
2	Contornar X1	Fresa 2 cortes, 3 dentes, 16 mm	720
3	Chanfro X1	Fresa 2 cortes, 3 dentes, 16 mm	20
4	Furação C7	Broca de 4,2 mm	55
5	Furação C6	Broca de 3 mm	56
6	Rosca M5 em C7	Broca rosca macho M5	30

Fonte: Autor

À partir desses dados e com a equação 2.1 é possível calcular o custo operacional de usinagem por peça por fase.

Tabela 12 – Resumo do custo operacional por fase

Resumo do custo operacional por fase				
Fase	Responsável	Máquina	Tempo de usinagem (s)	Custo por peça (R\$)
Fase 2	Operário	Torno Cazeneuve CT200	462	6,99
Fase 3	Operário	CUV Sabre 1250	923	10,92

Fonte: Autor

Destá forma tem-se que o custo operacional de usinagem por peça.

Tabela 13 – Custo operacional de usinagem por peça ( $C_m$ )

<b>Custo operacional por peça (<math>C_m</math>)</b>	<b>R\$ 17,91</b>
--	------------------

Fonte: Autor

3.2.2.3 *Custo de ferramenta ( $C_f$ )*

À partir dos dados das tabelas 10 e 11 é possível determinar o tempo de uso de cada ferramenta  $T_m$ . O preço  $P_i$ , tempo de vida  $T$  e o número de arestas de corte  $m$  foram definidos com base em pesquisa de mercado.

Com os dados citados acima e com as equações 2.10, 2.14 e 2.15 é possível determinar o custo de cada ferramenta por peça e no final o custo total das ferramentas por peça  $C_f$ .

Tabela 14 – Cálculo do custo de ferramenta por peça

Cálculo do custo de ferramenta por peça ( $C_f$ )											
Ferramenta	$T_m$ (s)	T (min)	m	$P_i$ (R\$)	$N_f$	$N_i$	$T_s$ (s)	$T_l$ (s)	Lm (R\$/h)	Bm (R\$/h)	$C_f$ (R\$)
Inserto 80°	43	60	4	25,90	84	335	180	180	14,03	40,41	0,12
Broca de 20,5 mm	73	300	1	59,90	247	247	180	180	14,03	40,41	0,27
Inserto triangular 12 mm	16	60	3	25,90	225	675	180	180	14,03	40,41	0,05
Inserto arredondado, raio 2 mm	17	60	1	19,90	212	212	180	180	14,03	40,41	0,12
Broca de 3 mm	98	300	1	6,49	184	184	180	180	14,03	40,41	0,06
Inserto 35° à esquerda	37	60	2	39,20	97	195	180	180	14,03	40,41	0,24
Inserto lâmina 4mm	146	60	1	26,15	25	25	180	180	14,03	40,41	1,28
Inserto 35° à direita	12	60	2	39,20	300	600	180	180	14,03	40,41	0,08
Fresa 2 cortes, 3 dentes, 20 mm	42	300	1	98,80	429	429	180	180	14,03	28,57	0,24
Fresa 2 cortes, 3 dentes, 16 mm	740	300	1	73,15	24	24	180	180	14,03	28,57	3,18
Broca de 4,2 mm	55	300	1	7,99	327	327	180	180	14,03	28,57	0,04
Broca de 3 mm	56	300	1	6,49	321	321	180	180	14,03	28,57	0,03
Broca rosca macho M5	30	60	1	38,90	120	120	180	180	14,03	28,57	0,36

Fonte: Autor

Tabela 15 – Custo de ferramenta total por peça ( $C_f$ )

<b>Custo de ferramenta por peça (<math>C_f</math>)</b>	<b>R\$ 6,08</b>
--	-----------------

Fonte: Autor

Por fim, temos o resumo dos custos calculados:

Tabela 16 – Resumo dos custos de fabricação

Resumo dos custos de fabricação	
<b>Custo de desenvolvimento (<math>C_d</math>)</b>	<b>R\$ 2.452,05</b>
<b>Custo de preparação (<math>C_l</math>)</b>	<b>R\$ 1.400,85</b>
<b>Custo de matéria prima (<math>C_r</math>)</b>	<b>R\$ 31,54</b>
<b>Custo operacional (<math>C_m</math>)</b>	<b>R\$ 17,91</b>
<b>Custo de ferramenta (<math>C_f</math>)</b>	<b>R\$ 6,08</b>
<b>Custo fixo (<math>C_f</math>)</b>	<b>R\$ 3.852,90</b>
<b>Custo variável por peça (<math>C_v</math>)</b>	<b>R\$ 55,52</b>

Fonte: Autor

## 4 RESULTADOS

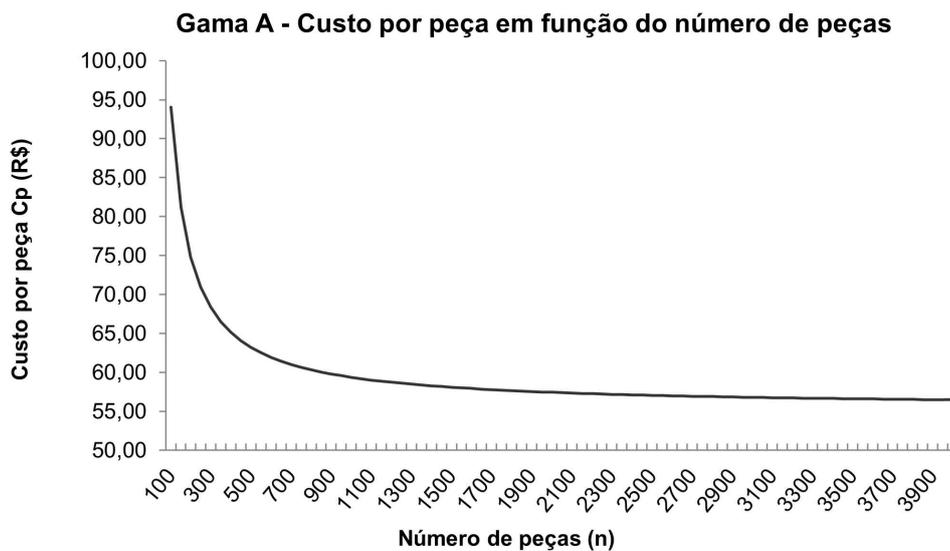
Após o cálculo de todos os custos envolvidos na fabricação do cubo de roda é possível analisar o comportamento do custo total por peça em função do número de peças fabricadas.

Tabela 17 – Custo em função do número de peças ( $n$ )

$n$	Custo por peça ( $C_p$ )	Custo total
1	R\$ 3.908,42	R\$ 3.908,42
500	R\$ 63,23	R\$ 31.615,02
1000	R\$ 59,38	R\$ 59.377,14
1500	R\$ 58,09	R\$ 87.139,26
2000	R\$ 57,45	R\$ 114.901,38
2500	R\$ 57,07	R\$ 142.663,50
3000	R\$ 56,81	R\$ 170.425,62
3500	R\$ 56,63	R\$ 198.187,74
4000	R\$ 56,49	R\$ 225.949,86

Fonte: Autor

Figura 20 – Custo por peça ( $C_p$ ) em função do número de peças ( $n$ )

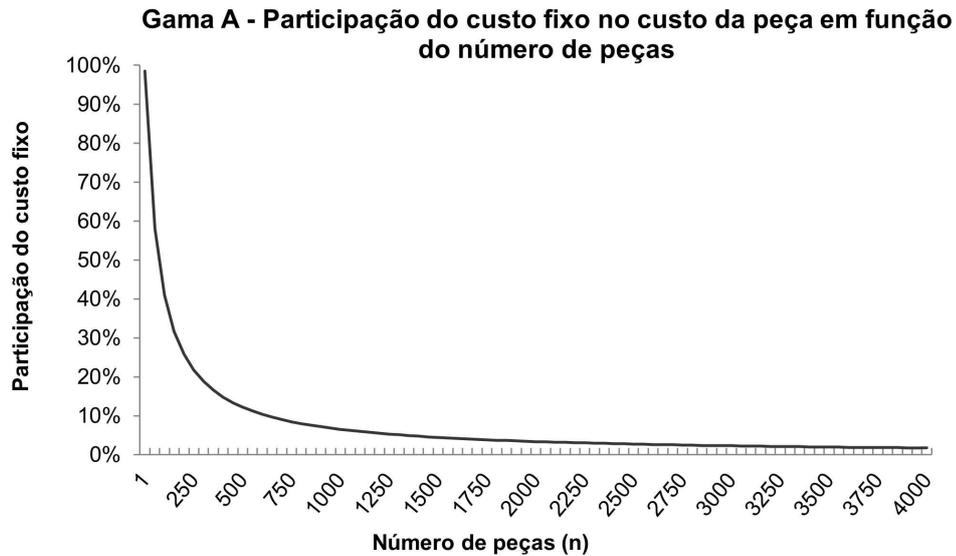


Fonte: Autor

Ao analisar a tabela e o gráfico é possível constatar que o custo de fabricação por peça é alto para uma pequena produção. No entanto, à medida em que o número de peças fabricadas ( $n$ ) aumenta, ocorre uma estabilização do custo em R\$56,49.

O decaimento do custo por peça com o aumento do número de peças fabricadas está de acordo com o visto na equação 2.1, em que o custo de fabricação por peça  $C_p$  leva em conta os custos fixos  $C_f$  e variáveis  $C_v$ . Como o custo fixo  $C_f$  permanece o mesmo, a medida que o número de peças fabricadas ( $n$ ) aumenta, a parcela de composição do custo fixo diminui.

Figura 21 – Participação do custo fixo



Fonte: Autor

Para uma pequena produção o custo fixo, composto pelo custo de desenvolvimento do projeto e pela preparação da usinagem, chega a representar quase 100% do custo da peça. Entretanto, com o aumento da produção esse valor reduz para cerca de 1,7% do custo total da peça.

Tabela 18 – Participação do custos

Total de peças	4000	Participação
Custo fixo (Cf)	R\$ 0,96	1,7%
Custo de matéria prima (Cr)	R\$ 31,54	55,8%
Custo operacional (Cm)	R\$ 17,91	31,7%
Custo de ferramenta (Ct)	R\$ 6,08	10,8%
<b>Custo total</b>	<b>R\$ 56,49</b>	<b>100%</b>

Fonte: Autor

Para uma produção de 4000 peças o custo por peça é de R\$ 56,49. Ao analisar a composição desse valor, destacam-se o custo com matéria-prima, que representa 55,8% do valor total, e o custo operacional de usinagem, com 31,7% de representatividade. Já o custo fixo e o custo de ferramenta, com 1,7% e 10,8% de participação respectivamente, influenciam menos o custo da peça.

À partir da análise da participação de cada etapa de fabricação na composição do custo final da peça é possível chegar em 3 resultados principais:

1) O custo fixo, composto pelo desenvolvimento do projeto e pela preparação do projeto tem baixa representatividade no custo final da peça para grandes produções. Por isso, é

uma boa prática investir no desenvolvimento de um projeto de qualidade, com bons profissionais, e na sua preparação, ou seja, na calibração das máquinas, organização do ambiente de trabalho e preparação de peças teste. O investimento nessas etapas geram maior confiabilidade no projeto e consequentemente maior qualidade da peça final

2) O custo com ferramenta também não possui expressiva participação no custo total da peça. Assim, utilizar ferramentas baratas, de baixa qualidade, não irá trazer grandes economias ao projeto. Ao contrário, é possível que o custo seja até maior visto que ferramentas de menor qualidade possuem menor tempo de vida. Por isso, serão necessárias mais trocas de ferramenta, o que aumentará o tempo perdido na substituição da ferramenta, o que gera mais tempo improdutivo da máquina de usinagem e mais trabalho do operador.

3) Ao fazer a fabricação da peça utilizando usinagem em 100% dos processos, o gasto com matéria-prima e com maquinário é expressivo, totalizando 87,5% do custo total da peça. O gasto com matéria-prima é alto porque é preciso comprar uma barra de alumínio maciça com dimensões iguais ou maiores que as maiores dimensões da peça final. Como a usinagem é um processo de fabricação que realiza a retirada de material, é produzido um volume expressivo de cavaco de alumínio durante a fabricação. Além disso, devido aos muitos processos necessários para chegar à peça final, ocorre um alto gasto com a operação de usinagem, visto que os centros de usinagem CNC possuem um custo de utilização superior às máquinas tradicionais de usinagem

Por tanto, para reduzir os dois principais custos do processo, é possível utilizar outros meios para produção do bruto inicial. Uma alternativa viável é a produção de moldes da peça, moldes em areia por exemplo, e fabricar um bruto inicial por meio de fundição. Essa alternativa reduziria o desperdício de material pois seria usado um volume de alumínio mais próximo ao volume final da peça e diminuiria o número de processos de usinagem para finalização da peça, visto que o bruto inicial já teria um formato mais parecido com o da peça final. Essa redução do número de processos, resultaria em uma redução no gasto com maquinário. Uma outra alternativa seria utilizar o forjamento, que é um método mais utilizado em produções de larga escala, principalmente em peças de alumínio, que possuem boa maleabilidade.

## 5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi realizado um estudo do custo de fabricação de um cubo de roda de bicicleta urbana. Ao longo dele foi possível entender melhor como funciona o processo de fabricação de uma peça. Foram analisados diversos fatores como o desenvolvimento do projeto da peça em CAD e CAM, a escolha da matéria-prima da peça e o estudo da gama de usinagem a ser realizada.

Com base na fundamentação teórica foi possível analisar que a melhor alternativa de produção depende do número de peças a serem fabricadas. Pequenas produções podem ser feitas com máquinas-ferramentas tradicionais, médias produções com centros de usinagem CNC e grandes produções com linhas de produção. Foi possível também entender melhor o conceito de centros de usinagem CNC, para quê eles servem, quais seus tipos e como funcionam.

Além disso, foram apresentadas as ferramenta utilizadas nas máquinas de usinagem, quais os seus princípios de funcionamento, quais seus tipos e suas características, como o material de confecção e o tempo de vida útil.

Ao longo do trabalho, foram apresentadas diversas equações que explicam como calcular todos os custos envolvidos no processo fabril, como o desenvolvimento da peça, a compra de matéria-prima, a utilização do maquinário, a substituição das ferramentas e a mão de obra necessária para realizar os processos.

Para exemplificar todos os conceitos teóricos apresentados ao longo do trabalho, foi realizado um estudo de caso que detalhou os cálculos necessários para se determinar o custo de fabricação por peça.

Por fim, conclui-se que o objetivo principal deste trabalho foi alcançado, fornecer aos engenheiros mecânicos um método eficiente para se calcular os custos envolvidos em seus projetos. Conhecimento este indispensável no atual cenário competitivo do mercado de trabalho. Em adição, ressalta-se que a análise dos custos também é importante para refletir sobre possíveis pontos de melhora no processo fabril, ao identificar processos com alto custo envolvido e que podem ser otimizados.

Como sugestão de trabalho de futuro, seria interessante analisar o comportamento do custo de produção da mesma peça utilizando uma composição dos processos de fundição e usinagem. Como exposto no capítulo de resultados, essa poderia ser uma alternativa para reduzir o custo de produção da peça.

## REFERÊNCIAS

- ASCHBY M. F., . J. K. **Materials and Manufacturing Selection for Engineering Design**. [S. l.]: Prentice-Hall, 1973.
- BOOTHROYD G., . K. W. **Fundamentals of Machining and Machine Tools**. [S. l.]: Marcel Dekker, 2005.
- BRASIL, C. N. **Lei n. 4950-A**. 1966. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l4950a.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l4950a.htm). Acesso em: 15 de janeiro de 2024.
- COELHO, J. F. O. . E. J. D. S. R. T. **Introdução aos processos de torneamento, fresamento e furação**. 2015. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7832897/mod\\_resource/content/1/Introdu%C3%A7%C3%A3o%20aos%20processos%20de\\_Torno-fresa-furad.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7832897/mod_resource/content/1/Introdu%C3%A7%C3%A3o%20aos%20processos%20de_Torno-fresa-furad.pdf). Acesso em: 10 de janeiro de 2024.
- DUVERLIE, J.-M. C. . T. F. P. Estimation des coûts en production mécanique. **Technique de l'ingénieur**, v. 1, n. BM7076, p. 2–17, 1999.
- FELDER Éric. Procédés d'usinage - présentation. **Technique de l'ingénieur**, v. 1, n. BM7000, p. 2–17, 2023.
- GROOVER, M. P. **Fundamentals of Modern Manufacturing**. [S. l.]: John Wiley Sons, 2018.
- KALPAKJIAN S., . S. S. R. **Manufacturing Engineering and Technology**. [S. l.]: Pearson, 2009.
- KUSIAK, A. **Smart Manufacturing**. [S. l.]: Wiley, 2018.
- RODRIGUES, A. R. **Estudo da geometria de arestas de corte aplicadas em usinagem com altas velocidades de corte**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, 2005.
- VAGAS. **Técnico Mecânico**. 2023. Disponível em: <https://www.vagas.com.br/cargo/tecnico-mecanico>. Acesso em: 17 de janeiro de 2024.
- WEILL, R. D. Conception des gammes d'usinage. **Technique de l'ingénieur**, v. 1, n. BM7025, p. 2–21, 1993.

## APÊNDICE A – SERRA DE FITA SCIE KASTO MODELO SSB 260



Fonte: <https://unimachines.com.br/serra-de-fita-m%C3%A1quina-kasto-ssb-260-va-1984-2725.html>

Dados técnicos da Serra de fita Scie KASTO modelo SSB 260 utilizado na fase 1 da fabricação.

Gama de corte:	redondo até 260 mm
Diâmetro mín.:	10 mm
Comprimento de corte mais pequeno:	5 mm
Comprimento de corte máximo:	600 mm
Avanço automático máx.:	600 mm
Velocidade de corte:	15 m/min até 125 m/min
Comprimento da fita:	4115 mm
Largura da fita:	41 mm
Espessura da folha:	1,3 mm
Tensão:	50 Hz 3x 380 Volt
Potência de acionamento do motor da serra:	4 kW
Potência:	8 kW
Peso da máquina:	2200 kg
Comprimento:	2400 mm
Largura:	1600 mm
Altura:	2500 mm
Comprimento do suporte de material:	1 m
Avanço automático Transportador de rolos Sistema de refrigeração Transportador de aparas	

Fonte: Adaptado de <https://unimachines.com.br/serra-de-fita-m%C3%A1quina-kasto-ssb-260-va-1984-2725.html>

Para o cálculo do custo horário da máquina foi considerado uma utilização média de 2000 horas por ano, uma vida útil da máquina de 20 anos, a taxa de juros é a SELIC em janeiro de 2024 e o preço de locação da área de R\$ 250,00/m<sup>2</sup> por ano, uma estimativa do valor do aluguel padrão de uma fábrica no Ceará. O custo de manutenção é equivalente à 1,5% do preço da máquina ao ano e a tarifa de energia é a vigente no Ceará em janeiro de 2024.

<b>Custo de utilização da máquina - Bm</b>	
Preço de compra - P (R\$)	23.404,83
Número de horas de utilização - H (h)	2.000
Duração em anos da máquina - A (ano)	20
Taxa de juros ao ano - I (%/ano)	11,75%
Custo de manutenção - Im (R\$)	3.510,72
Área ocupada pela máquina - S (m <sup>2</sup> )	3,84
Preço de locação da área - Ir (R\$/m <sup>2</sup> /ano)	250
Custo de energia elétrica - e (R\$/kWh)	0,74
Potência da máquina - W (kW)	8,0
<b>Custo de utilização da máquina - Bm</b>	<b>R\$ 7,06</b>

Fonte: Autor

## APÊNDICE B – CENTRO DE TORNEAMENTO CAZENEUVE MODELO CT200



Fonte: <https://www.westmachinesoutils.fr/product/tour-cnc-2-axes-cazeneuve-ct-200-370-x-350-mm-cnc-num-1060>

Dados técnicos do Centro de torneamento Cazeneuve modelo CT200 utilizado na fase 2 da fabricação.

Marca:	Cazeneuve
Tipo:	CT 200
Diâmetro máximo de corte:	ø 370 mm
Comprimento máximo de corte:	350 mm
Passagem da barra:	ø 44 mm
Velocidade do fuso:	4000 rpm
Potência do mandril:	11 kw
Torre VDI de 12 estações	
Armário NUM 1060	
Volante eletrônico	
Torno CNC de 2 eixos	

Fonte: Adaptado de <https://www.westmachinesoutils.fr/product/tour-cnc-2-axes-cazeneuve-ct-200-370-x-350-mm-cnc-num-1060>

Para o cálculo do custo horário da máquina foi considerado uma utilização média de 2000 horas por ano, uma vida útil da máquina de 20 anos, a taxa de juros é a SELIC em janeiro de 2024 e o preço de locação da área de R\$ 250,00/m<sup>2</sup> por ano, uma estimativa do valor do

aluguel padrão de uma fábrica no Ceará. O custo de manutenção é equivalente à 1,5% do preço da máquina ao ano e a tarifa de energia é a vigente no Ceará em janeiro de 2024.

Custo de utilização da máquina - Bm	
Preço de compra - P (R\$)	269.766,18
Número de horas de utilização - H (h)	2.000
Duração em anos da máquina - A (ano)	20
Taxa de juros ao ano - I (%/ano)	11,75%
Custo de manutenção - Im (R\$)	40.464,93
Área ocupada pela máquina - S (m <sup>2</sup> )	5,0
Preço de locação da área - Ir (R\$/m <sup>2</sup> /ano)	250
Custo de energia elétrica - e (R\$/kWh)	0,74
Potência da máquina - W (kW)	11,0
<b>Custo de utilização da máquina - Bm</b>	<b>R\$ 40,41</b>

Fonte: Autor

**APÊNDICE C – CENTRO DE USINAGEM VERTICAL CINCINNATI MILACRON  
MODELO SABRE 1250**



Fonte: <https://machineryline.com.br/-/venda/fresadoras-de-metal/Cincinnati-Milacron-Sabre-1250-22102011212517459600>

Dados técnicos do Centro de Usinagem Vertical Cincinnati Milacron modelo Sabre 1250 utilizado na fase 3 da fabricação.

Fabricado em:	Reino Unido
Unidade de controle:	Cincinnati Milacron Acramatic 2100
Curso do eixo X:	1270 mm
Curso do eixo Y:	660 mm
Curso do eixo Z:	660 mm
Comprimento da mesa:	1370 mm
Largura da mesa:	765 mm
Potência do motor:	11 kW
Velocidade do fuso:	8000 rpm
Cone do fuso:	SK-40
Tensão:	400 V
Fabricante:	Cincinnati Milacron
Metalomecânica - Centro de maquinagem vertical Centro equipado com uma unidade de controle Cincinnati Milacron Acramatic 2100 e tem uma área de trabalho de 1370 x 765 mm Velocidade do fuso de 8000 rpm e potência do motor de 11 kW A máquina inclui uma bomba de refrigeração e um transportador de fixação	

Fonte: Adaptado de <https://machineryline.com.br/-/venda/fresadoras-de-metal/Cincinnati-Milacron-Sabre-1250-22102011212517459600>

Para o cálculo do custo horário da máquina foi considerado uma utilização média de 2000 horas por ano, uma vida útil da máquina de 20 anos, a taxa de juros é a SELIC em janeiro de 2024 e o preço de locação da área de R\$ 250,00/m<sup>2</sup> por ano, uma estimativa do valor do aluguel padrão de uma fábrica no Ceará. O custo de manutenção é equivalente à 1,5% do preço da máquina ao ano e a tarifa de energia é a vigente no Ceará em janeiro de 2024.

<b>Custo de utilização da máquina - Bm</b>	
Preço de compra - P (R\$)	177.283,09
Número de horas de utilização - H (h)	2.000
Duração em anos da máquina - A (ano)	20
Taxa de juros ao ano - I (%/ano)	11,75%
Custo de manutenção - Im (R\$)	26.592,46
Área ocupada pela máquina - S (m <sup>2</sup> )	6,0
Preço de locação da área - Ir (R\$/m <sup>2</sup> /ano)	250
Custo de energia elétrica - e (R\$/kWh)	0,74
Potência da máquina - W (kW)	11,0
<b>Custo de utilização da máquina - Bm</b>	<b>R\$ 28,57</b>

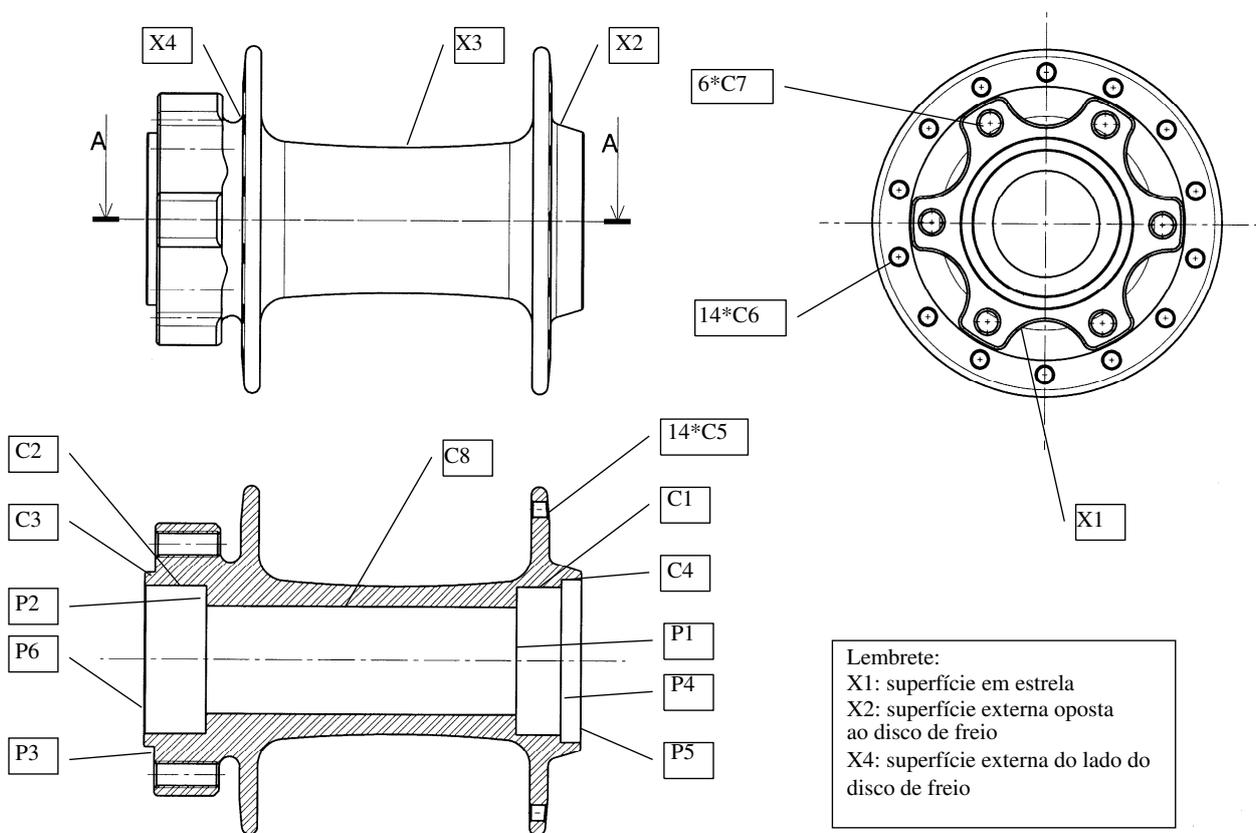
Fonte: Autor

## **ANEXO A – SUPERFÍCIES FUNCIONAIS DO CUBO DE RODA DE BICICLETA**

Desenho com a indicação de cada superfície funcional do cubo de roda de bicicleta fabricado. As superfícies são importantes para compreender onde são realizadas cada operação de usinagem na peça.

## SUPERFÍCIES FUNCIONAIS

Gama A



## **ANEXO B – OPERAÇÕES DE USINAGEM DAS FASES 2 E 3**

Desenho técnico com as operações de usinagem realizadas na fase 2, realizada no Centro de torneamento Cazeneuve modelo CT200, e na fase 3, realizada no Centro de Usinagem Vertical Cincinnati Milacron modelo Sabre 1250. O desenho também inclui as ferramentas utilizadas em cada operação e dados operacionais como velocidade de corte, avanço etc.







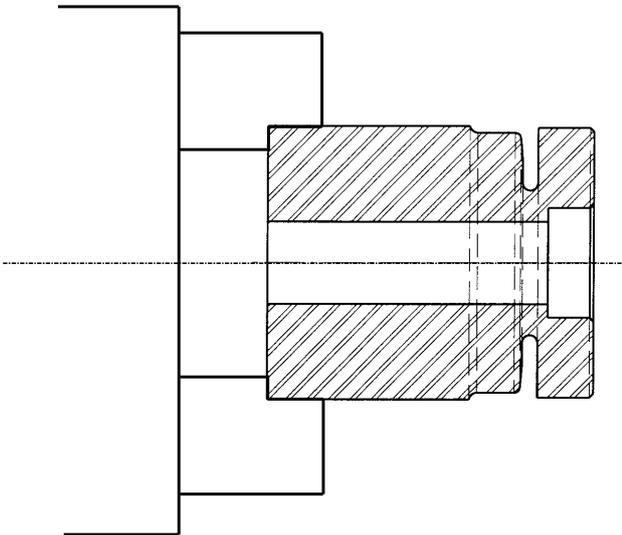
## **ANEXO C – POSICIONAMENTO DA PEÇA NAS MÁQUINAS NAS FASES 2 E 3**

Desenho com a montagem e posicionamento da peça durante os processos de usinagem na fase 2, realizada no Centro de torneamento Cazeneuve modelo CT200, e na fase 3, realizada no Centro de Usinagem Vertical Cincinnati Milacron modelo Sabre 1250.

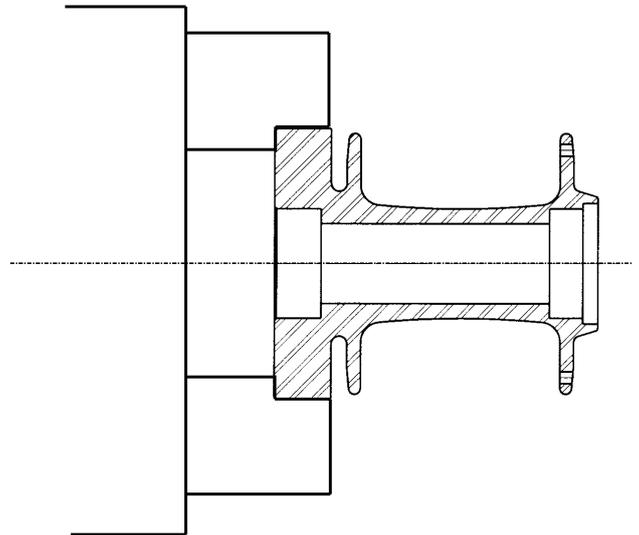
## Posicionamento da peça no torno Cazeneuve

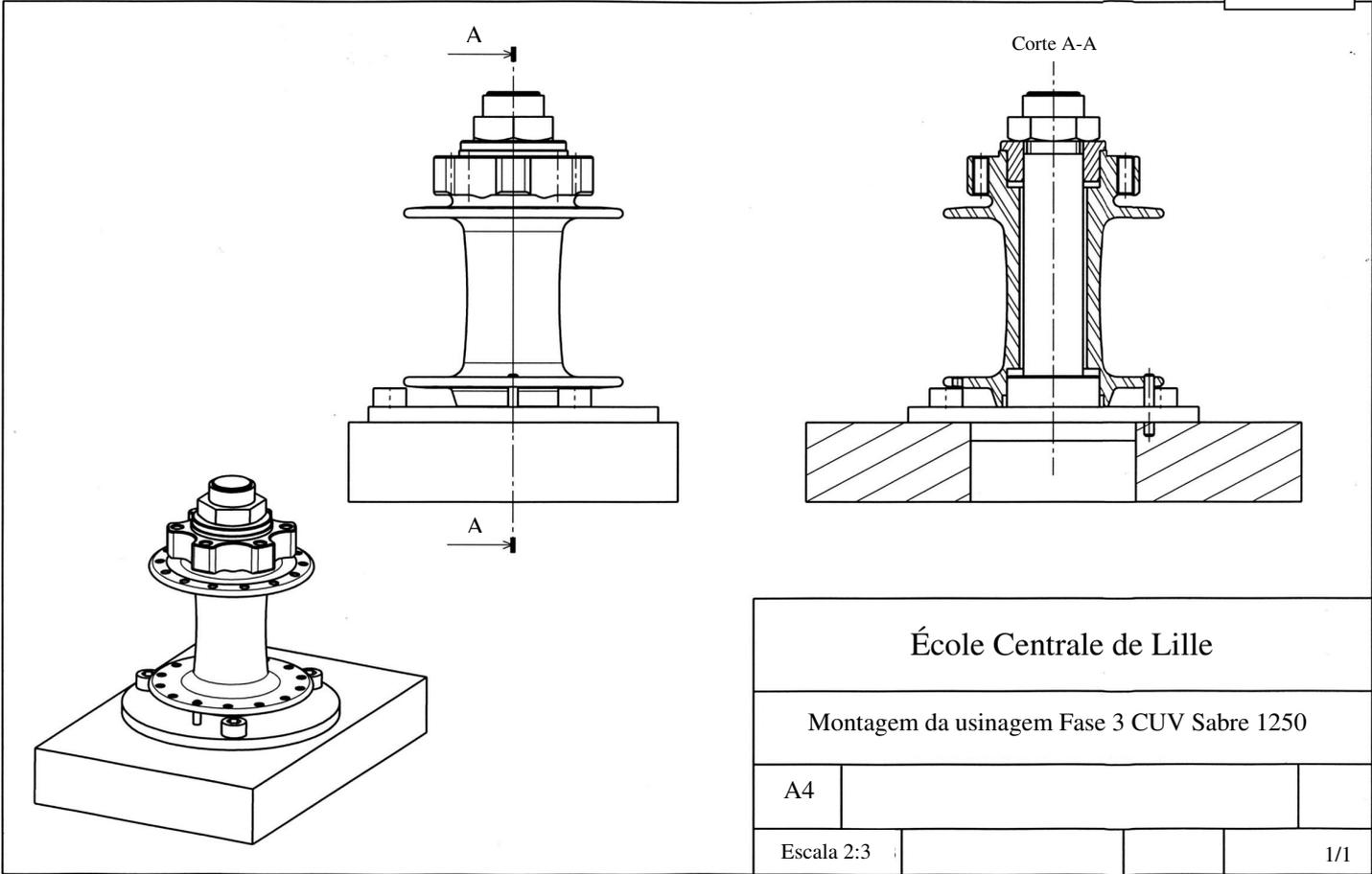
Gama A

*Fase 2, subfase 2.1*



*Fase 2, subfase 2.2*





École Centrale de Lille			
Montagem da usinagem Fase 3 CUV Sabre 1250			
A4			
Escala 2:3			1/1