



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Tainara Pedrosa de Lima**

**MEDIÇÃO E ANÁLISE DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS DE ENGRENAGENS  
CILINDRÍCAS DE DENTES RETOS USANDO UMA MÁQUINA DE MEDIÇÃO  
POR COORDENADAS (MMCs)**

**JOÃO PESSOA**

**2019**

TAINARA PEDROSA DE LIMA

**MEDIÇÃO E ANÁLISE DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS DE ENGRENAGENS  
CILÍNDRICAS DE DENTES RETOS USANDO UMA MÁQUINA DE MEDIÇÃO  
POR COORDENADAS (MMCs)**

Trabalho de Conclusão de Curso que apresenta à Coordenação do Curso Engenharia Mecânica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheira Mecânica

**Orientador:** Professor Dr. Joao Bosco de Aquino Silva

JOÃO PESSOA  
2019

L732m Lima, Tainara Pedrosa de.

Medição e análise dos principais parâmetros de engrenagens cilíndricas de dentes retos usando uma máquina de medição por coordenadas (MMC) / Tainara Pedrosa de Lima. - João Pessoa, 2019.

63 f.

Orientação: João Bosco de Aquino Silva.

TCC (Especialização) - UFPB/CT.

1. Engrenagem, MMC, Metrologia, Precisão. I. Silva, João Bosco de Aquino. II. Título.

UFPB/BC

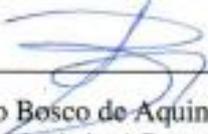
TAINARA PEDROSA DE LIMA

**MEDIÇÃO E ANÁLISE DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS DE ENGRENAGENS  
CILINDRÍCAS DE DENTES RETOS USANDO UMA MÁQUINA DE MEDIÇÃO  
POR COORDENADAS (MMCs)**

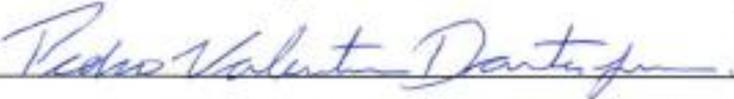
Trabalho de Conclusão de Curso - TCC , apresentado à banca examinadora do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba como parte das exigências à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, tendo obtido o conceito **APROVADO** conforme a apreciação da banca examinadora:

João Pessoa, 17 de maio de 2019

**BANCA EXAMINADORA**

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Joao Bosco de Aquino Silva  
Departamento de Engenharia Mecânica/ Centro de Tecnologia/ UFPB

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. José Carlos de Lima Jr (Examinador interno)  
Departamento de Engenharia Mecânica/ Centro de Tecnologia/ UFPB

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Pedro Valentin Dantas Junior (Examinador Externo)

JOÃO PESSOA

2019

## **AGRADECIMENTOS**

Meus agradecimentos vão primeiramente a Deus que com fé, pude concluir todas as etapas do curso. A minha família, meus pais, Eneide e Antonio, que sempre me apoiaram e acreditaram em mim. Aos meus irmãos Tarso, Itacira, Tuirá, Taiguara e Mayra que me apoiaram.

Ao meu namorado Felipe, que é um companheiro de estudos, superando as dificuldades encontradas juntos. Aos meus amigos: Anny Kerollayny, Clarissa, Reinaldo, Leandro, Roberta, Tatiane, Gláucio, Lucas Daniel, Anne Louise, Dener, Samuel, Marlio que me apoiaram de diferentes maneira ao longa da minha trajetória e me inspiraram.

A todos os professores que fizeram parte da minha formação e me ajudaram no meu crescimento profissional, como também meus colegas de turma que compartilharam conhecimentos adquiridos.

Agradeço o apoio do Professor João Bosco de Aquino Silva por ter me orientado nesse trabalho de conclusão de curso e ter sido uma inspiração profissional. Por fim, e não menos importante os participantes do Laboratório de Engenharia de Precisão (LEP) que me auxiliaram durante todo o trabalho.

## RESUMO

Este trabalho consiste no desenvolvimento de metodologias para a medição de parâmetros de engrenagens utilizando a Máquina de Medição por Coordenadas (MMCs) automática e classificá-las segundo a norma ISO 1328 - 1997. Foram escolhidas três engrenagens para este estudo, nas quais foram analisadas as seguintes seções: perfil do dente da engrenagem; passo e espessura do dente. Para esta avaliação, uma comparação entre estas medidas teóricas foi feita com o auxílio do software CAD *Solidworks* e os dados reais coletados da MMC, que foram plotados no software MCOSMOS. Resultando na classificação da qualidade das engrenagens sem o uso de *software* dedicado de medição de engrenagens.

**Palavras-chave:** Engrenagem cilíndrica de dentes retos, Máquina de Medição por Coordenadas (MMC), MCOSMOS, Precisão.

## **ABSTRACT**

This work consists in the development of methodologies for the measurement of gears parameters using the automatic Coordinate Measuring Machine (CMM) and classifies them according to the norm ISO 1328. Three gears were chosen for this study, in which the following sections were analyzed: the tooth of the gear; pitch and thickness of the tooth. For this evaluation, a comparison between these theoretical measurements was made with the aid of the CAD software Solidworks and the actual data collected from the MMC, which was plotted in the MCOSMOS software. Resulting in the classification of quality of the gears without the use of dedicated gear measurement software.

**Keywords:** Spur Gears, Coordinate Measuring Machine (CMM), MCOSMOS, Accuracy.

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO I .....</b>	<b>1</b>
1.1 INTRODUÇÃO.....	1
1.2 OBJETIVOS GERAL .....	2
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	2
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>4</b>
2.1 TIPOS DE ENGRENAGENS .....	4
2.2 NOMENCLATURA.....	6
2.3 AÇÃO CONJUGADA .....	7
2.4 PROPRIEDADE DA EVOLVENTE .....	9
2.5 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE DENTES DE ENGRENAGENS .....	12
<b>2.5.1 Fresadora.....</b>	<b>12</b>
<b>2.5.2 Geração.....</b>	<b>13</b>
2.6 GRAU DE QUALIDADE .....	14
2.7 FORMAS DE MEDIÇÃO DE ENGRENAGENS .....	16
<b>2.7.1 Runout .....</b>	<b>16</b>
<b>2.7.2 Variação de Passo .....</b>	<b>18</b>
<b>2.7.3 Perfil Total do dente .....</b>	<b>21</b>
2.8 MÁQUINAS DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS.....	22
2.9 TÉCNICA DE MEDIÇÃO PARA INSPEÇÃO DE PEÇAS .....	25
<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>27</b>
3.1 METODOLOGIA.....	27
3.2 SELEÇÃO DAS ENGRENAGENS PARA ESTUDO .....	27

3.3 DESENHO DAS ENGRENAGENS .....	28
3.4 MÁQUINA DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS .....	30
3.5 INSPEÇÃO E QUALIFICAÇÃO DAS ENGRENAGENS.....	31
<b>3.5.1 Perfil da evolvente do dente da engrenagem.....</b>	<b>31</b>
<b>3.5.2 Passo e Espessura do Dente da Engrenagem. ....</b>	<b>34</b>
<b>CAPÍTULO IV.....</b>	<b>39</b>
4.1 PERFIL DA EVOLVENTE DO DENTE DA ENGRENAGEM.....	39
4.2 PASSO E ESPESSURA DO DENTE .....	43
<b>CAPÍTULO V .....</b>	<b>46</b>
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	46
<b>5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>47</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1– (a) Engrenagens cilíndricas de dentes retos. (b) Engrenagens helicoidais (c) Engrenagens cônicas e (d) Engrenagens sem-fim .....	5
Figura 2.2– Nomenclatura para engrenagens cilíndricas de dentes retos.....	6
Figura 2.3– Came A e Came B em ação conjugada produz uma razão de velocidade angular constante. ....	8
Figura 2.4 – (a) Formação de uma curva Evolvente (b) Desenho da Evolvente.....	9
Figura 2.5– Relação para o cálculo do raio do círculo base. ....	10
Figura 2.6 – Círculos fundamentais para o desenho e parâmetros da engrenagem.....	11
Figura 2.7– Fresamento frontal e tangencial. ....	13
Figura 2.8– Fresa módulo para usinagem de engrenagens.....	13
Figura 2. 9 – Processo de Geração. ....	14
Figura 2. 10 – Sensor de medição de runout .....	17
Figura 2.11 – Diagramas para apresentação do runout. ....	18
Figura 2.12 – Os princípios de funcionamento de um instrumento de medição de passo com sensores separados.....	19
Figura 2.13 – Os princípios de funcionamento de um instrumento de medição de passo com sensores separados.....	19
Figura 2.14 – Sensor de triangulação de linha a laser. ....	20
Figura 2.15 – (a) Paquímetro. (b) Micrometro. ....	20
Figura 2.16 – Máquina de medição do perfil da engrenagem. ....	21
Figura 2.17 – Primeira Máquina de Medição por Coordenadas.....	22
Figura 2.18 – Máquina de Medição por coordenadas, seus componentes. ....	24
Figura 2.19 – Magazine de sensores de medição das MMCs.....	25
Figura 2.20 – Touch trigger probes diferentes tamanhos. ....	26
Figura 3. 1– Engrenagens de Estudo .....	28
Figura 3. 2 – Desenhos do perfil das engrenagens selecionadas (a). Engrenagem 1 Tab 3.1 (b) Engrenagem 2 Tab 3.1 (c) Engrenagem 3 Tab 3.1.....	29
Figura 3. 3 – (a) Crysta-Apex S 7106 CNC (b) Sensores de Medição.....	30

Figura 3. 4 – Suporte de apoio para medições das engrenagens. ....	32
Figura 3. 5 – Pontos para a definição do plano e origem da MMC.....	32
Figura 3. 6– O eixo X posicionado no eixo longitudinal de simetria de um dente da engrenagem.....	33
Figura 3. 7– (a) Escaneamento feito pela MMC utilizando o sensor SP25M da Renishaw (b) Escaneamento gerado na tela do software MCOSMO. ....	34
Figura 3. 8– Posicionamento da origem ponto de cor vermelha; plano de cor azul e reta passando pelo ponto de simetria do dente de cor azul, software MCOSMOS.....	35
Figura 3. 9– Contorno 1 do dente 1 software MCOSMOS. ....	36
Figura 3. 10– Contornos do perfil do dente da engrenagem, software MCOSMOS.....	36
Figura 3. 11– Linhas criadas entre o ponto da origem com os pontos p1,p2 e p3, software MCOSMOS. ....	37
Figura 3. 12– Ângulos calculados a partir das linha L1, L2; e L1, L3, para o cálculo da espessura do dente e passo da engrenagem, software MCOSMOS. ....	38
Figura 4. 1– Tela do software MCOSMOS com o limite de tolerância onde todos os perfis dessa engrenagem de enquadram. ....	39
Figura 4.2– Tela do software MCOSMOS com o limite de tolerância $\pm 0.500 \mu\text{m}$ e $\pm 0.350 \mu\text{m}$ . ....	40
Figura 4.3– (a) Tela do software MCOSMOS com o limite de tolerância $\pm 552,2 \mu\text{m}$ . (b) Tela do software MCOSMOS com o limite de tolerância $\pm 400 \mu\text{m}$ e $\pm 200 \mu\text{m}$ . ....	41
Figura 4.4 – (a) Tela do software MCOSMOS com o limite de tolerância $\pm 204,9 \mu\text{m}$ e $\pm 150,0 \mu\text{m}$ . ....	42

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Grau de qualidade para o desvio de perfil (ISO 1328 - 1997).....	15
Tabela 2.2– Grau de qualidade para o passo único (ISO 1328 - 1997).....	15
Tabela 2.3– Exemplos de aplicações de engrenagens de acordo com os graus de qualidade. .	16
Tabela 3.1 – Parâmetros das engrenagens utilizadas.....	28
Tabela 4.2– Resultados encontrados utilizando a MMC do Erro máximo do perfil da envolvente.....	43
Tabela 4.3– Parâmetros da engrenagem 1.....	44
Tabela 4.4– Parâmetros da engrenagem 2.....	44
Tabela 4. 5– Parâmetros da engrenagem 3.....	45

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	Adendo
$b$	Dedendo
$D_e$	Diâmetro Externo
$D_p$	Diâmetro primitivo
$d_{pb}$	Diâmetro concêntrico
$f_{pt}$	Variação de um único passo
$F_r$	Desvio de <i>runout</i>
$F\alpha$	Desvio total de perfil
$h_t$	Altura completa
$L$	Comprimento da região medida
$m$	Modulo
$N$	Número de dentes
$p$	Passo circular
$P$	Passo Diametral
$p_e$	Passo Experimental
$p_t$	Passo Teórico
$r$	Raio do círculo primitivo
$r_b$	Raio do círculo base
$r_1$	Raio do pinhão
$r_2$	Raio da coroa
$t$	Espessura do dente
$t_t$	Espessura do Dente Teórico
$t_e$	Espessura do dente Experimental
$U$	Resolução
$X$	Coordenada do eixo cartesiano X
$Y$	Coordenada do eixo cartesiano Y
$Z$	Coordenada do eixo cartesiano Z

$\alpha_1$	Ângulo do arco da espessura do dente
$\alpha_2$	Ângulo do arco do passo
$\omega_1$	Velocidade angular do pinhão
$\omega_2$	Velocidade angular da coroa
$\phi$	Ângulo de pressão

## **CAPÍTULO I**

### **APRESENTAÇÃO**

#### **1.1 INTRODUÇÃO**

As engrenagens são elementos mecânicos utilizados para a transmissão de movimento, elas geralmente são usadas de maneira acopladas para modificar a velocidade ou direção. Elas podem operar em altas velocidades, mas com limites específicos, tais como: velocidade de rotação uniforme, limites de vibração e especificação de ruído. As condições de operação das engrenagens na maioria dos casos devem ser excelentes e devem ser fabricadas de maneira a atender a esses pré-requisitos.

As engrenagens são elementos complexos para medição e fabricação, mesmo em sua forma básica, como engrenagens cilíndricas de dentes retos. Os intervalos de tolerância das engrenagens devem ser projetados para atender a conformidade das dimensões teoricamente corretas e cada intervalo de tolerância define o nível de qualidade em que a peça se encaixa de acordo com sua aplicação (FARAGO, 1994).

Medir a conformidade das engrenagens requer um equipamento de medição específico no campo da metrologia. Este equipamento garante a qualidade desejada da engrenagem para fornecer engrenamento contínuo com uma engrenagem de acoplamento. Alguns parâmetros que normalmente são inspecionados nas engrenagens são: concentricidade, passo, perfil do dente, espessura do dente, folga entre os dentes da engrenagem, forma do dente da engrenagem (FARAGO, 1994).

Dentre as várias máquinas dedicadas a medir alguns dos parâmetros da engrenagem, ou como um todo, destaca-se a Máquina de Medição por Coordenadas (MMCs), A qual evoluiu muito nas últimas décadas, e hoje é encontrada com frequência no indústria. Por

exemplo, foi recentemente desenvolvido um hexapod não-cartesiano CMM (C ISELI E B SPRENGER, 2019).

Normalmente, uma MMC possui dois tipos de sensores de medição aplicados ao controle dimensional: os sensores de contato e sem contato. Os tipos de contato são *Touch Trigger* e *Sensor de Scanning*. Os tipos sem contato são sistemas de visão de máquina e de varredura a laser. A MMC usada neste trabalho tinha múltiplos sensores: contato e sem contato (Camera CCD e Laser), entretanto nesta pesquisa apenas o sensor de contato do tipo *Touch Trigger* foi usado.

Os parâmetros analisados neste trabalho serão o desvio do perfil evolvente do dente, assim como, o desvio da espessura do dente e do passo da engrenagem. Estes parâmetros foram adquiridos através da MMC e comparados com os respectivos parâmetros teóricos. Foi classificamos a qualidade dimensional das engrenagens de acordo com a norma da Organização Internacional para Padronização (*International Organization for Standardization*) ISO 1328-1.997 - Engrenagens Cilíndricas - Sistema de Precisão ISO. Por meio da metodologia desenvolvida por Nóbrega (2016), foi realizada a análise do perfil evolvente do dente da engrenagem, adicionalmente, outra metodologia foi desenvolvida neste trabalho utilizando a MMC.

## **1.2 OBJETIVOS GERAL**

Desenvolver uma estratégia de medição dos principais parâmetros de engrenagens cilíndricas de dentes retos: perfil evolvente, espessura do dente e passo. Com a utilização da Máquina de Medição por Coordenada (MMC) automática, equipada com sensor de contato *Touch Trigger Probes* (TTP). Tendo como referência a norma ISO 1328-1997.

## **1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Aprender a inspecionar o perfil da evolvente, o passo e espessura do dente de engrenagens cilíndricas de dentes retos, utilizando máquina de Máquina de Medição por Coordenada.

- Estudar os principais parâmetros das engrenagens e as diferentes estratégias usando uma máquina de medição de engrenagem.
- Apresentar uma metodologia de medição e coleta de pontos coordenados para medição dos parâmetros das engrenagens utilizando a MMC.
- Determinar e quantificar o Desvio Total de Perfil ( $F\alpha$ ), Passo e Espessura do dente das engrenagens, comparando o modelo teórico do perfil com o inspecionado pela MMC, seguindo a parâmetros da norma ISO 1328-1997;

## **CAPÍTULO II**

### **FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA: ENGRENAGENS CILINDRÍCAS DE DENTES RETOS E MMCs**

#### **2.1 TIPOS DE ENGRENAGENS**

As engrenagens são utilizadas para a transmissão de movimento entre eixos rotacionais de ampliação ou redução do torque, conversão de movimentos de rotação em movimento de translação. Dessa forma se fazem presentes em vários mecanismos, aparelhos, máquinas e motores (NOBREGA, 2016).

O objetivo da engrenagem é transmitir movimento e /ou potência de um eixo para outro. Esta transferência de movimento pode ser ou não uniforme, e pode também ser acompanhada por direção, velocidade e torque do eixo. Em última análise, mesmo entre os especialistas em engrenagens, existe alguma ambiguidade nos termos usados para descrever as engrenagens e os parâmetros relacionados à engrenagem (RADZEVICH, 2016).

Os tipos mais simples de engrenagem são aqueles que conectam eixos paralelos. Elas são geralmente relativamente de fácil fabricação e são capazes de transmitir grandes quantidades de energia com alta eficiência. Engrenagens de eixos paralelos transmitem potência com maior eficiência do que qualquer outra tipo ou forma de engrenagem (RADZEVICH, 2016).

Engrenagens cilíndricas de dentes retos, (Fig. 2.1a) dentre todas as variedades de engrenagens, possuem a forma mais simples. Apresentam dentes paralelos ao eixo de rotação e são responsáveis por transmitir o movimento entre eixos paralelos (BUDYNAS, 2011).

Engrenagens helicoidais, (Fig. 2.1b) podem transmitir movimento entre eixos não paralelos, como também podem ser utilizadas nas mesmas aplicações das engrenagens de dentes retos e quando utilizadas são mais silenciosas, uma vez que, o engajamento dos dentes é mais gradual durante a rotação. Esse fato acontece devido os dentes serem inclinados com relação ao eixo de rotação (BUDYNAS, 2011).

Engrenagens cônicas, (Fig. 2.1c) operam entre eixos que se interceptam e têm dentes em formatos de superfície cônica. Um par pinhão-cora sem fim, (Fig. 2.1d) é um o conjunto bastante utilizado quando a razão de velocidades dos eixos forem altas. São construídos de maneira que os dentes de um deles, ou de ambos, cubram-se parcialmente um ao outro (BUDYNAS, 2011). Estes são os 4 tipos básicos de engrenagens mostradas na Fig. 2.1.

Figura 2.1– (a) Engrenagens cilíndricas de dentes retos. (b) Engrenagens helicoidais (c) Engrenagens cônicas e (d) Engrenagens sem-fim



(a)



(b)



(c)



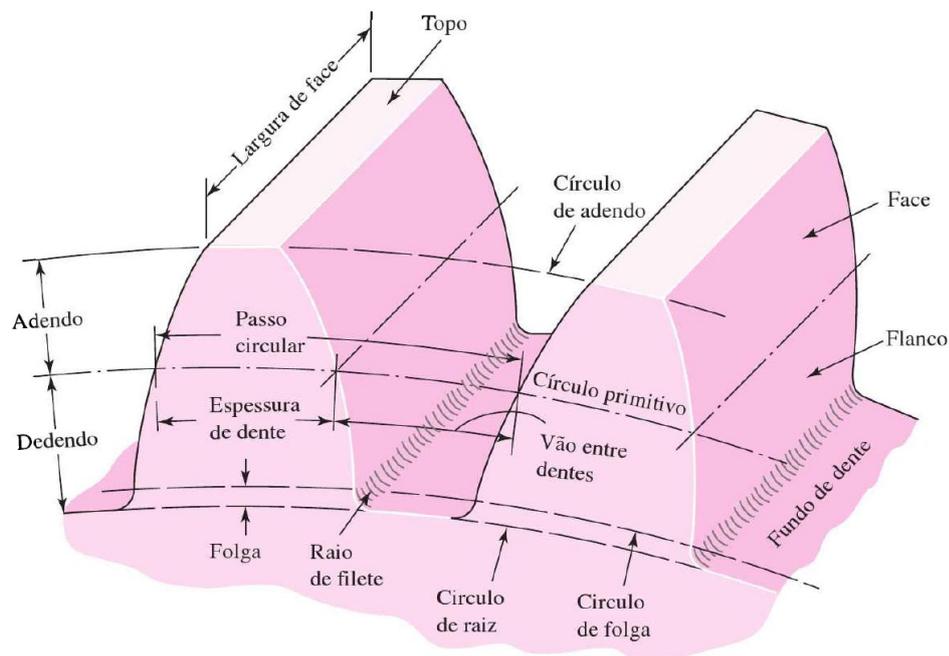
(d)

Fonte: Páginas Acoplastbrasil; Fresadora Hipoyde e Norelem (2019)

## 2.2 NOMENCLATURA

As nomenclaturas utilizadas nas engrenagens cilíndricas de dentes retos são: O círculo primitivo ou de passo, passo circular ( $p$ ), módulo ( $m$ ), passo diametral ( $P$ ), adendo ( $a$ ), dedendo ( $b$ ), altura completa  $h_t$ . Esses são representados pela Fig. 2.2 (BUDYNAS, 2011).

Figura 2.2– Nomenclatura para engrenagens cilíndricas de dentes retos.



Fonte: Budynas, 2011.

No círculo primitivo ou de passo, seu diâmetro é o diâmetro primitivo, é um círculo teórico, ou seja, ele é um parâmetro da engrenagem que maioria dos cálculos se fundamentam, mas não é visível em uma engrenagem, como um dente da engrenagem e pode ser visto na Fig. 2.2 (BUDYNAS, 2011).

O passo circular ( $p$ ) é a distância entre o ponto, formado pela intercepção da curvatura do dente da engrenagem com o círculo primitivo, com o ponto do dente seguinte formado pelo mesmo princípio que o anterior (BUDYNAS, 2011).

O módulo ( $m$ ) é obtido pela razão entre o passo diametral e o número de dentes (BUDYNAS, 2011). A unidade é no SI, em comprimento de milímetro.

O passo diametral ( $P$ ) é obtido pela razão entre o número de dentes da engrenagem e o diâmetro primitivo. É semelhante ao módulo, a diferença que a unidade de comprimento é a polegada, utilizada no sistema inglês (BUDYNAS, 2011). Convém ressaltar que o passo diametral é usado no Sistema Inglês de unidades. Assim devemos usar o parâmetro módulo que é definido no Sistema Internacional de unidades (SI).

O intervalo radial entre o extremo superior do dente da engrenagem e o diâmetro primitivo é o adendo ( $a$ ), e o intervalo radial entre o extremo inferior do dente da engrenagem e o diâmetro primitivo é o dedendo ( $b$ ), e a soma entre o adendo e o dedendo chamasse altura completa ( $h_t$ ) (BUDYNAS, 2011). Nas equações (2.1) a (2.4) é possível relaciona-las as variáveis: passo circular, modulo e o passo diametral.

$$p = \frac{\pi d}{N} = \pi m \quad (2.1)$$

$$pP = \pi \quad (2.2)$$

$$m = \frac{d}{N} \quad (2.3)$$

$$P = \frac{N}{d} \quad (2.4)$$

onde,

$P$ = passo diametral, dentes por polegada

$N$ = número de dentes

$d$ = diâmetro primitivo, in/mm

$m$ = módulo, mm

$p$ = passo circular.

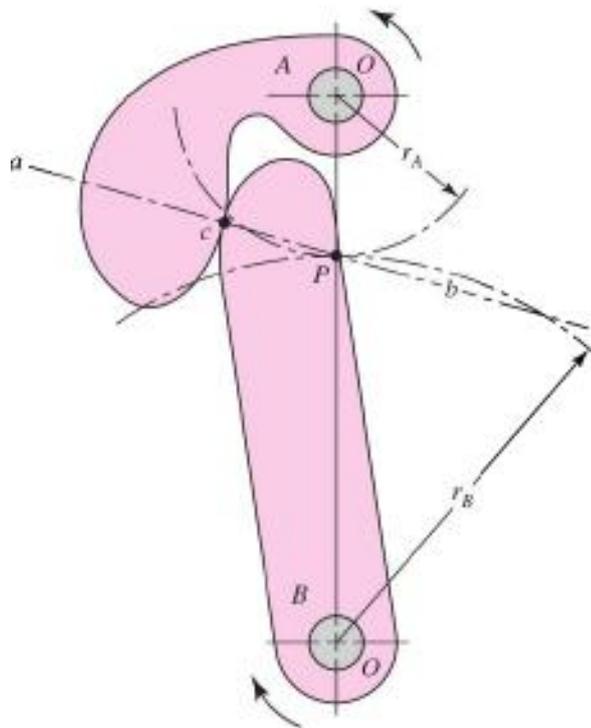
### 2.3 AÇÃO CONJUGADA

Para explicar como funciona a ação conjugada da engrenagem vamos considerar que os dentes da engrenagem são perfeitamente formados, suaves e rígidos. O BUDYNAS (2011), mostra que o movimento rotatório das engrenagens são similares a cames. A ação conjugada

ocorre, durante o engrenamento dos perfis dos dentes das engrenagens, ou cames, possuem uma razão de velocidade angular constante.

A Figura 2.3, o came *A* empurra o came *B* para que ocorra o movimento, o ponto *C* é o ponto de contato entre os cames, onde as duas superfícies de contato são tangentes entre si. E a força gerada do contato, em qualquer instante tem a direção normal às curvas. Na Fig. 2.3 a linha *ab*, que passa pelo ponto de contato *C* é chamada de linha de ação, visto que as forças agem sobre ela (BUDYNAS, 2011).

Figura 2.3– Came *A* e Came *B* em ação conjugada produz uma razão de velocidade angular constante.



Fonte: Budynas, 2011.

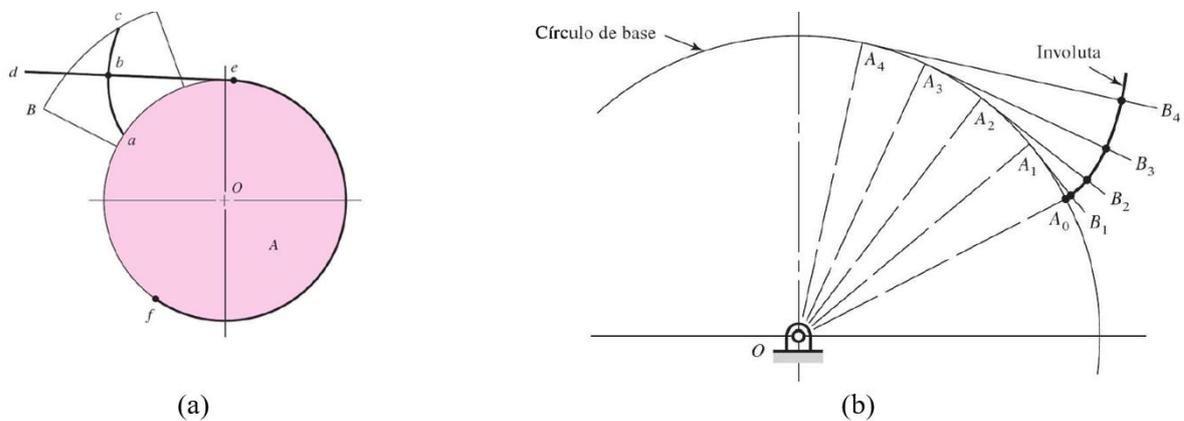
O círculo primitivo tem o raio chamado raio primitivo e esse círculo pode ser definido através de ponto *P* chamado de ponto primitivo, que é a interseção da linha de ação *ab* com a linha *O-O*, daí traçamos um arco de cada origem *O* passando pelo ponto *P*, temos o círculo primitivo. Existe uma relação entre a velocidade angular entre os dois braços e o seus raios ao ponto *P*, são inversamente proporcionais (BUDYNAS, 2011).

Essa configuração transmite uma razão de velocidade angular constante, para isso o ponto primitivo  $P$  deve permanecer fixo, ou seja o ponto de contato ocorre sempre na mesma linha reta  $ab$ , formando o perfil de involuta, esse perfil transmite movimento rotativo uniforme (BUDYNAS, 2011).

## 2.4 PROPRIEDADE DA EVOLVENTE

A Geração da curva evolvente é ilustrada na Fig. 2.4a, um círculo “A”, é enrolado a uma linha formada pelos pontos “d”, “e” e “f”, essa linha é mantida esticada tangente ao círculo “A”. A medida que a linha desenrola e enrola tangente ao círculo “A”, é marcado pontos, o ponto “b” é o traçador, e é o primeiro ponto a ser marcado e a partir dele será construído a curva. A curva formada é chamada de evolvente, e o seu diâmetro varia continuamente sendo zero no ponto “a” e máximo no ponto “c”. O círculo “A” responsável pela formação da evolvente é chamado de círculo base (BUDYNAS, 2011).

Figura 2.4 – (a) Formação de uma curva evolvente (b) Desenho da evolvente.



Fonte: Budynas, 2011.

O entendimento da geração ou desenho do dente da engrenagem, da evolvente é importante para o conhecimento dos possíveis erros e falhas no engajamento do conjunto de engrenagem. A Fig 2.4b mostra a construção de uma curva da evolvente (BUDYNAS, 2011).

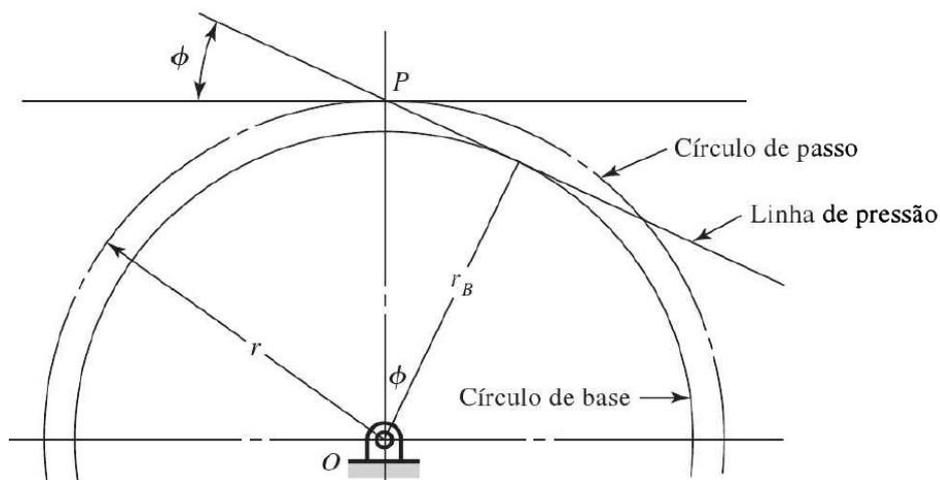
Para a construção da evolvente a partir do círculo base, primeiro passo: divide-se o círculo base em partes iguais, com a criação de linhas radiais mostrada na Fig 2.4b, as linhas:

$OA_0, OA_1, OA_2, etc.$  Em seguida, a construção das linhas tangentes:  $A_0B_1, A_1B_2, etc.$  Ao ligar os pontos:  $A_0, B_1, B_2 e etc.$  a criação da curva da Involuta, esse procedimento pode servir de gabarito para os outros dentes da engrenagem, como também o outro lado do dente a ser construído (BUDYNAS, 2011). As relações entre o raios e a velocidade angulares de um par de engrenagem engrenada é mostrada na Equação 2.5:

$$\left| \frac{\omega_1}{\omega_2} \right| = \frac{r_2}{r_1} \quad (2.5)$$

O Ângulo de pressão ( $\phi$ ) é o ângulo entre a linha de ação, que também pode ser chamada de linha de geração, que é a linha das forças resultantes, com a linha tangente ao círculo primitivo, geralmente os valores usados para esse parâmetro são  $20^\circ$  e  $25^\circ$ , no passado foi utilizado  $14 \frac{1}{2}^\circ$ . É mostrado na Fig. 2.5 (BUDYNAS, 2011).

Figura 2.5– Relação para o cálculo do raio do círculo base.



Fonte: Budynas, 2011.

O raio do círculo de base  $r_b$  pode ser calculado a partir do ângulo de pressão ( $\phi$ ) e o raio do círculo primitivo  $r$  como mostrado na Fig. 2.4. Utilizando a Eq. 2.5

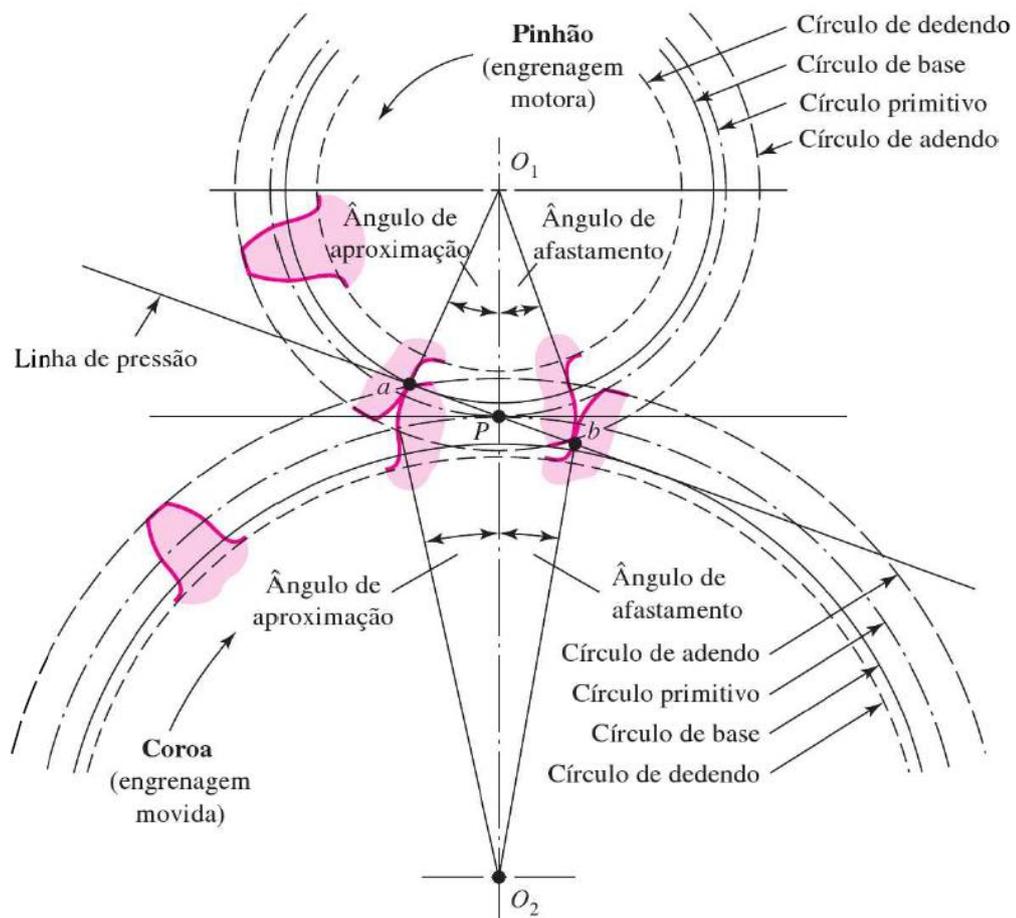
$$r_b = r \cos \phi \quad (2.5)$$

Para a construção total do dente da engrenagem é necessário ter o conhecimento da espessura do dente da engrenagem, que é a metade do passo circular da engrenagem, pode-se usar a Eq. 2.6

$$t = \frac{p}{2} \quad (2.6)$$

O engrenamento entre duas engrenagens se inicia quando a engrenagem motora e a movida entram em contato no ponto “a” mostrado na Fig. 2.6, situado no círculo base da engrenagem motora e na ponta da engrenagem movida e segue até o ponto “b” que é o fim do contato entre os dentes da engrenagem, situado no contato entre o círculo adendo da engrenagem motora e o círculo base da engrenagem movida. A linha de pressão descreve esta trajetória passando pelo ponto primitivo “P” e círculo primitivo. (BUDYNAS, 2011).

Figura 2.6 – Círculos fundamentais para o desenho e parâmetros da engrenagem.



Fonte: Budynas, 2011.

Essa curva de contato durante engajamento entre o círculo base e o círculo do adendo é a curva da evolvente, é a região onde ocorre o contato entre as engrenagens e consequentemente a parte que ocorre maior desgaste, pelas forças ali presentes (BUDYNAS, 2011).

## **2.5 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE DENTES DE ENGRENAGENS**

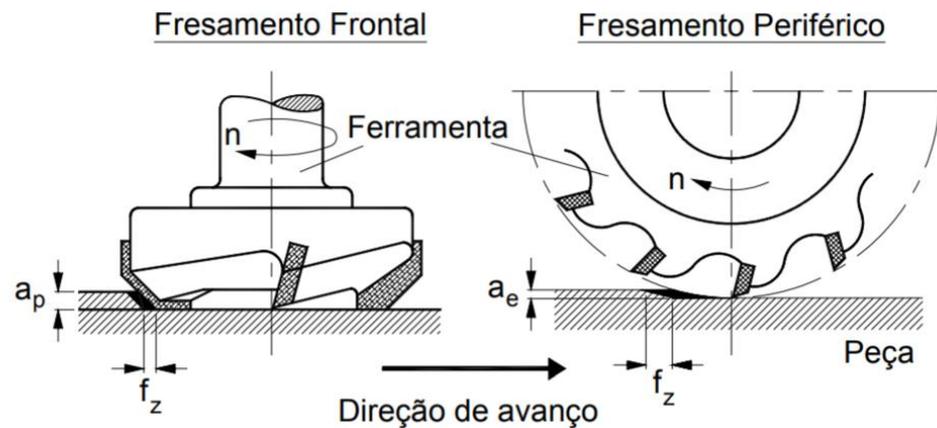
As engrenagens podem ser fabricadas por diversos processos como: fundição em areia, moldagem em casca, fundição de investimento, fundição em molde permanente, fundição em matriz, fundição centrífuga, processo de metalurgia do pó ou a extrusão, cortadores de forma ou cortadores de geração. Como também os dentes de engrenagem podem ser fabricados por conformação a frio, ou laminação a frio, usinados por fresagem, geração ou fresagem-caracol (SHIGLEY, 2011). Como o intuito desse trabalho não é explicar as formas de fabricação de engrenagens, apenas serão citadas as formas usadas para fabricar as engrenagens analisadas: fresagem e geração.

### **2.5.1 Fresadora**

No processo de usinagem chamado de fresamento, a remoção de material da peça de forma intermitente, pelo movimento rotativo da ferramenta, chamada fresa. A peça move-se em direção a fresa. Uma propriedade do processo é que cada gume da fresa remove uma parte de material da peça na forma de pequenos cavacos individuais. Existe dois grupos principais que podem ser dividido os métodos de fresamento, periférico ou tangencial, a Fig. 2.7 ilustra os tipos de fresamento (POLLI, 2005). A Fig. 2.8 mostra um exemplo de fresa.

Engrenagens de dentes retos e engrenagens helicoidais podem ser produzidas pelo processo de fresagem. Engrenagens cônicas são às vezes produzidos por este método, mas as limitações geométricas de tentar produzir dentes chanfrados precisos por este processo restringi muito o seu uso, exceto para cortes de desbaste (RADZEVICH, 2012).

Figura 2.7– Fresamento frontal e tangencial.



Fonte: Polli, 2005.

Figura 2.8– Fresa módulo para usinagem de engrenagens.



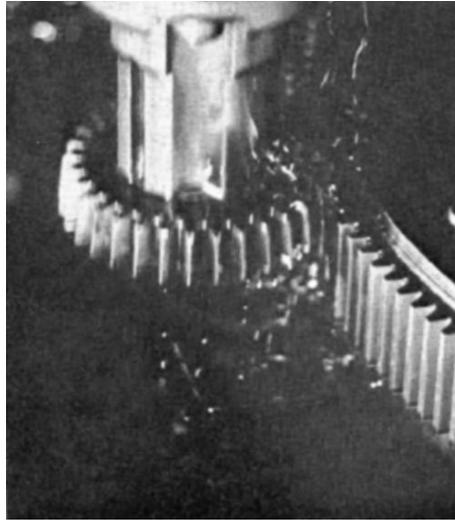
Fonte: Nóbrega, 2016.

### 2.5.2 Geração

O processo de geração de engrenagens é um dos métodos usados para cortar engrenagens cilíndricas. Cortadores podem ser do tipo, pinhão cortador, empregados para cortar engrenagens externas e internas, e do tipo cremalheira, que são utilizados para cortes externos. Estes cortadores também são usados para usinar engrenagens com o acabamento superficial e classe de precisão superiores (SRINIVASAN,1983).

O processo de geração é um método de corte de engrenagem no qual a ferramenta de corte tem a forma de um pinhão. A ferramenta de corte, corta enquanto atravessa a largura de face e rola junto com o disco branco da engrenagem (disco da engrenagem ainda sem dentes). Ilustrado na Fig 2.8 (RADZEVICH, 2012).

Figura 2. 9 – Processo de Geração.



Fonte: Radzevich, 2012.

## 2.6 GRAU DE QUALIDADE

Nos processos de fabricação de engrenagens, podem ocorrer inúmeros erros. Que podem ser causados por excesso de vibração da máquina-ferramenta, não alinhamento entre eixo da engrenagem e o eixo do mandril, falhas ocasionadas por uma fixação ineficaz da ferramenta de corte, erros de lubrificação no processo de fabricação e deformações da máquina ferramenta (NÓBREGA, 2016).

A ISO 1328 – (1997) - Engrenagem cilíndrica - Sistema de classificação ISO de tolerância de flanco está dividida em duas partes. Parte 1 - Definições e valores permitidos de desvios relevantes ao flanco dos dentes de engrenagem e Parte 2 - Definições e valores permitidos de desvios relevantes para a informação radial composta e *runout*. Esta norma foi utilizada como referência nesse trabalho.

A avaliação dos desvios das engrenagens é uma forma de garantir o funcionamento adequando do par pinhão/corona. A ISO 1328 – Parte 1 apresenta um grupo de tabelas que são responsáveis por avaliar cada um dos desvios e, dependendo da tolerância estimada por projeto, torna-se possível ter um determinado grau de qualidade.

Na ISO 1328, sendo esta última referenciada por BRITO NETO (2003), os parâmetros avaliativos possuem 13 graus de qualidade, sendo 0 o grau mais rigoroso e 12, o menos rigoroso. Os parâmetros utilizados pela norma para classificação da engrenagem em seu nível

de qualidade, são o diâmetro de referência, ou diâmetro primitivo e o módulo, como pode ser visto na Tab. 2.1.

Tabela 2.1 – Grau de qualidade para o desvio de perfil (ISO 1328 - 1997).

Diâmetro de Referência d (mm)	Módulo M (mm)	Grau de Qualidade												
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		$F_\alpha$ (µm)												
50 < d ≤ 125	0,5 ≤ m ≤ 2	1,0	1,5	2,1	2,9	4,1	6,0	8,5	12,0	17,0	23,0	33,0	47,0	66,0
	2 < m ≤ 3,5	1,4	2,0	2,8	3,9	5,5	8,0	11,0	16,0	22,0	31,0	44,0	63,0	89,0
	3,5 < m ≤ 6	1,7	2,4	3,4	4,8	6,5	9,5	13,0	19,0	27,0	38,0	54,0	76,0	108,0
	6 < m ≤ 10	2,0	2,9	4,1	6,0	8,0	12,0	16,0	23,0	33,0	46,0	65,0	92,0	131,0
	10 < m ≤ 16	2,5	3,5	5,0	7,0	10,0	14,0	20,0	28,0	40,0	55,0	79,0	112,0	159,0
	16 < m ≤ 25	3,0	4,2	6,0	8,5	12,0	17,0	24,0	34,0	48,0	68,0	96,0	136,0	192,0

Segundo a ISO 1328, variação de um único passo ( $f_{pt}$ ) é a diferença algébrica entre o passo real e o correspondente passo teórico no plano transversal, definido no círculo concêntrico com o eixo da engrenagem aproximadamente no meio do dente. A Tab. 2.2 mostra a avaliação da qualidade da engrenagem com relação ao parâmetro citado.

Tabela 2.2– Grau de qualidade para o passo único (ISO 1328 - 1997).

Diâmetro de Referência d (mm)	Módulo M (mm)	Grau de Qualidade												
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		$f_{pt}$ (µm)												
50 < d ≤ 125	0,5 ≤ m ≤ 2	0,9	1,3	1,9	2,7	3,8	5,5	7,4	11,0	15,0	21,0	30,0	43,0	61,0
	2 < m ≤ 3,5	1,0	1,5	2,1	2,9	4,1	6,0	8,5	12,0	17,0	23,0	33,0	47,0	66,0
	3,5 < m ≤ 6	1,1	1,6	2,3	3,3	4,6	6,5	9,0	13,0	18,0	26,0	36,0	52,0	73,0
	6 < m ≤ 10	1,3	1,8	2,6	3,7	5,0	7,5	10,0	15,0	21,0	30,0	42,0	49,0	84,0
	10 < m ≤ 16	1,6	2,2	3,1	4,4	6,5	9,0	13,0	18,0	25,0	35,0	50,0	71,0	100,0
	16 < m ≤ 25	2,0	2,8	3,9	5,5	8,0	11,0	16,0	22,0	31,0	44,0	63,0	89,0	125,0

BRITO NETO (2003), apresenta exemplos de aplicações de engrenagens de acordo com o nível de qualidade. Essas possibilidades podem ser observadas na Tab. 2.3.

Tabela 2.3– Exemplos de aplicações de engrenagens de acordo com os graus de qualidade.

<b>Graus de Qualidade</b>	<b>Aplicações</b>
<b>00 e 01</b>	Difícilmente é utilizada, tal a dificuldade para sua obtenção. Foi criada prevendo-se uma utilização futura.
<b>02</b>	Utilizadas em indústrias de precisão (relojoaria e aparelhos de precisão).
<b>03</b>	Utilizadas como padrão em laboratórios de controle. São consideradas engrenagens de precisão.
<b>04</b>	Utiliza-se na fabricação de engrenagens padrão, engrenagens para avião, engrenagem de alta precisão para torres de radar.
<b>05</b>	Utilizadas em aviões, máquinas operatrizes, instrumentos de medidas, turbinas, etc.
<b>06</b>	Utiliza-se em automóveis, ônibus, caminhões, navios, em ponte de alta rotação.
<b>07</b>	Empregadas em veículos, máquinas de levantamento e transporte, etc.
<b>08 e 09</b>	Bastante empregadas, pois não precisam ser retificadas. Utilizadas em máquinas em geral.
<b>10 e 12</b>	Engrenagens mais rústicas, normalmente utilizadas em máquinas agrícolas.

## 2.7 FORMAS DE MEDIÇÃO DE ENGRELAGENS

As medições de engrenagem são necessárias para o controle de processo, inspeção final de engrenagens, garantir a conformidade dos seus parâmetros com o projeto e verificar a sua funcionalidade. Em algumas aplicações as engrenagens devem seguir rigorosamente um padrão de qualidade. Os parâmetros de medição normalmente inspecionados são: concentricidade, passo, perfil do dente, espessura do dente, folga entre dentes, entre outros. (FARAGO, 1994).

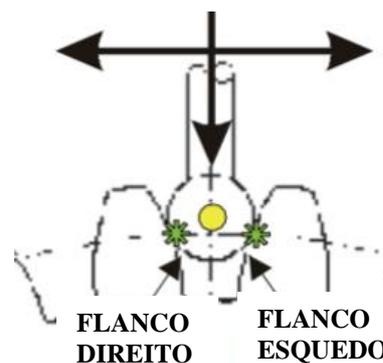
### 2.7.1 Runout

O *runout* da engrenagem é a variação entre os parâmetros específicos das superfícies do dente da engrenagem, com o passo, com relação ao eixo de rotação desta. Pode estar relacionado com irregularidades básicas da engrenagem, excentricidade; erros em diversos parâmetros do dente como; variação do perfil, espaçamento dos dentes ou espessura do dente (FARAGO, 1994).

É uma característica que afeta a qualidade da engrenagem, a transmissão de movimento da engrenagem e sua forma de transmissão ser tangencial por ser um acúmulo de variações radiais. Os parâmetros de qualidade das engrenagens não são independentes, ou seja, um erro em algum parâmetro, pode acarretar outras irregularidades. É comum problemas como a variação do passo não atender as especificações, quando na verdade a causa é o *runout* (SMITH, 1991).

Um instrumento comum para inspecionar o *runout* é chamado de sensor único de bola, ou esférico, Fig. 2.10. Este aparelho, usa um sensor de medição com a extremidade uma esfera de diâmetro que faz contato com os flancos entre dois dentes adjacentes da engrenagem na área do círculo do passo ou círculo primitivo (FARAGO, 1994).

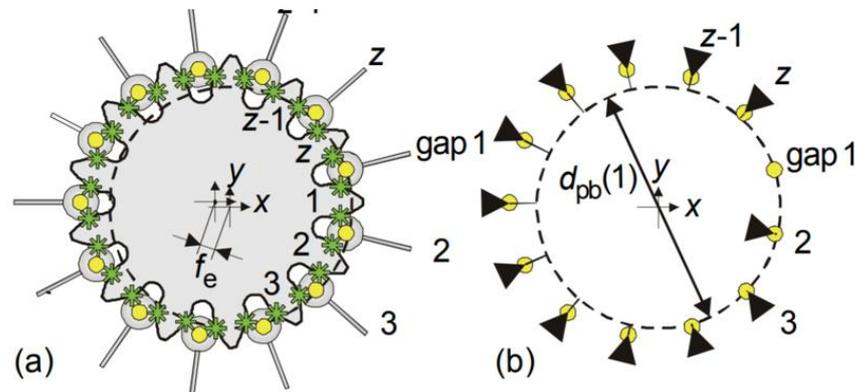
Figura 2. 10 – Sensor de medição de *runout*



Fonte: Adaptado de Guenther, 2006.

A medição de *runout*, é ilustrada pela Fig. 2.11 onde a engrenagem é posicionada em uma excentricidade ( $f_e$ ), como mostrada na Fig. 2.11 (a), cada espaçamento entre os dentes da engrenagem, encontra um sensor esférico único, tocando ambos os flancos simultaneamente. Os pontos que tocam o flanco representado na figura 2.11 (a) cor verde, não são conhecidos. Os pontos centrais da esfera são representados pela cor amarela na figura 2.11 (a) e (b) são registrados e conhecidos. A diâmetro  $d_{pb}$  é o diâmetro concêntrico que passa pelo centro da esfera 1 no ponto 1 (gap 1), este é tido como ponto de referência para a medição do *runout*. O parâmetro de *runout* padronizado  $F_r$  é a diferença entre o máximo desvio positivo e o desvio negativo máximo (GUENTHER, 2006).

Figura 2.11 – Diagramas para apresentação do runout.



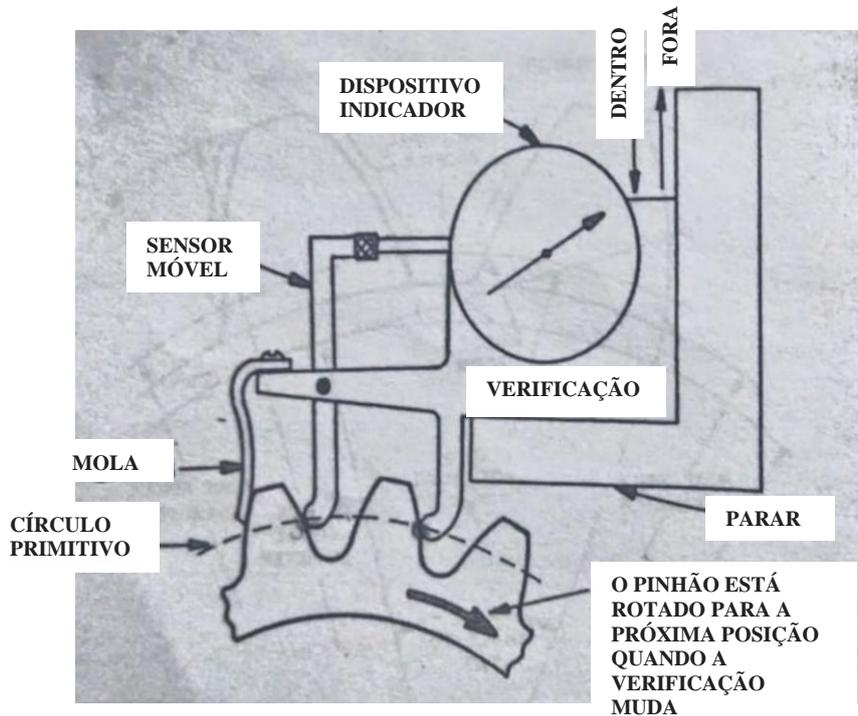
Fonte: Guenther, 2006.

A medição com esse instrumento perdeu sua importância pela baixa precisão de suas medições e tempo gasto para realizá-las, desde o surgimento da MMC. A avaliação do *runout* atualmente está ligada a medição de passo. No caso de engrenagens cilíndricas, esta avaliação é bem definida a partir da superfície dos flancos matematicamente estipulada. Segundo Guenther (2006) existem três formas diferentes de avaliar *runout* em engrenagem cônica, com base na medição do passo, com um algoritmo baseado em planos tangenciais e um algoritmo baseado em semelhança de curvas. No seu trabalho foi utilizado 5 diferentes MMC por 4 diferentes fabricantes e uma engrenagem. Os melhores resultados se deram com o uso do algoritmo baseado em semelhança de curvas.

### 2.7.2 Variação de Passo

Passo é a distância teórica entre os pontos correspondentes nos dentes adjacentes. A distância real entre esses pontos é o espaçamento dente a dente, uma dimensão diretamente mensurável. O Passo pode ser medido por simples instrumentos de medição de passo manual com indicadores; a disposição esquemática de tal dispositivo, projetada para engrenagem de dentes retos, é mostrada na Fig. 2.12. A medição de passo e ou espaçamento do dente por instrumentos manual é um processo lento, e quando a variação de espaçamento de todos os dentes de engrenagem devem ser medidos, o uso de tais instrumentos simples também envolve a gravação manual dos passos individuais. Geralmente para uma medição com tolerâncias muito pequenas é necessário um instrumento de medição automático (FARAGO, 1994)

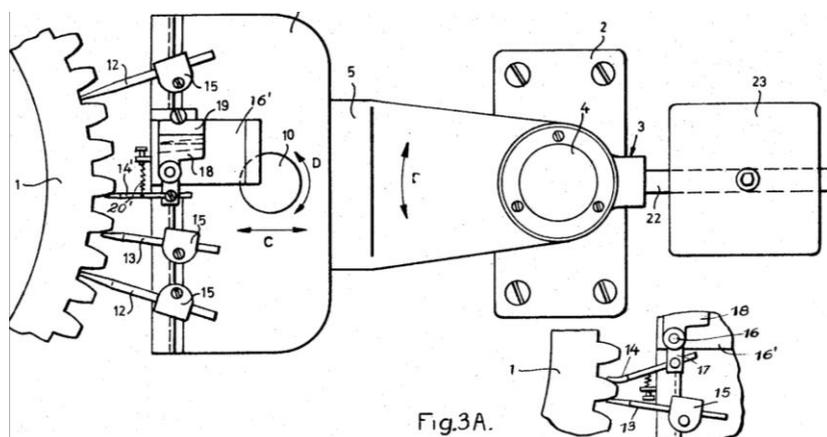
Figura 2.12 – Os princípios de funcionamento de um instrumento de medição de passo com sensores separados.



Fonte: Adaptado de Farago , 1994.

Um instrumento de medição para engrenagem aperfeiçoado e utilizado em 1956. Nessa aplicação, é mostrado na Fig 2.13 um arranjo para a medição de distâncias recorrentes, especialmente a medição do espaçamento dentário, espessura do dente ou distância dentária. Largura das partes dentadas por meio de dois apalpadores, que estão dispostos em um transportador universalmente móvel que se move com o corpo de prova e permanece exatamente na mesma posição relativa durante a medição (WILLY, 1959).

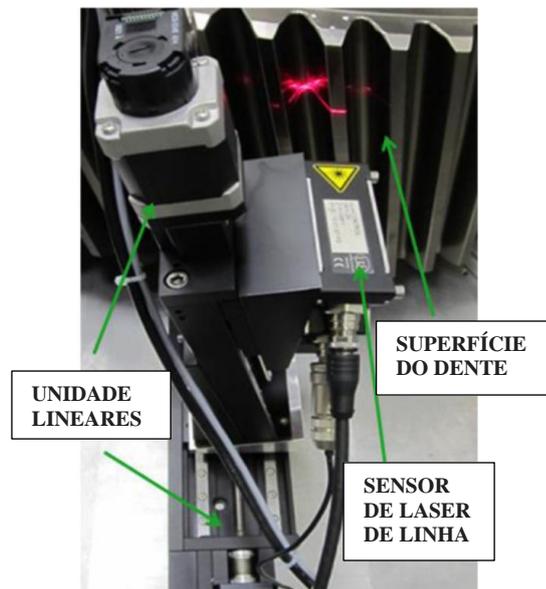
Figura 2.13 – Os princípios de funcionamento de um instrumento de medição de passo com sensores separados.



Fonte: Willy, 1959.

Auerswald (2019), apresenta desvio de passo de engrenagem baseado no perfil de superfície. As causas dos desvios geométricos do processo de produção. O padrão para a inspeção de qualidade de engrenagens é representado por medições dimensionais com um sistema de sensores táteis. Com a finalidade de uma aquisição de superfície mais rápida e mais extensa, um sensor de triangulação de linha a laser é investigado, fornecendo 1280 pontos a uma largura de linha de 25 mm com até 200 linhas/s. Este sensor pode ser visto na Fig. 2.14.

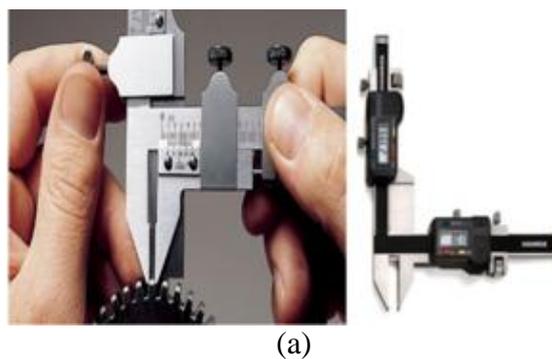
Figura 2.14 – Sensor de triangulação de linha a laser.

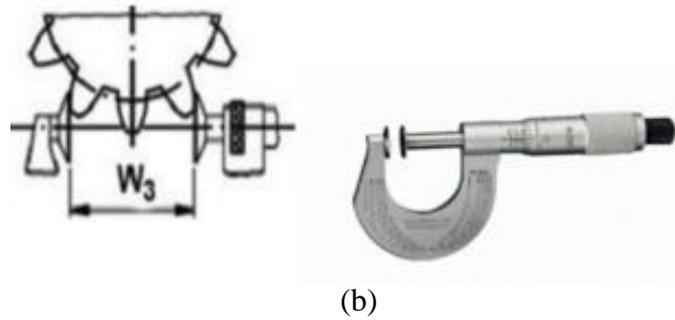


Adaptado de Auerswald, 2019.

O passo e a espessura do dente da engrenagem também pode ser medidos com instrumentos usuais da metrologia como paquímetro Fig. 2.15a e micrometro Fig. 2.15b, que têm uso na indústria mecânica, medindo toda a espécie de objetos.

Figura 2.15 – (a) Paquímetro. (b) Micrometro.

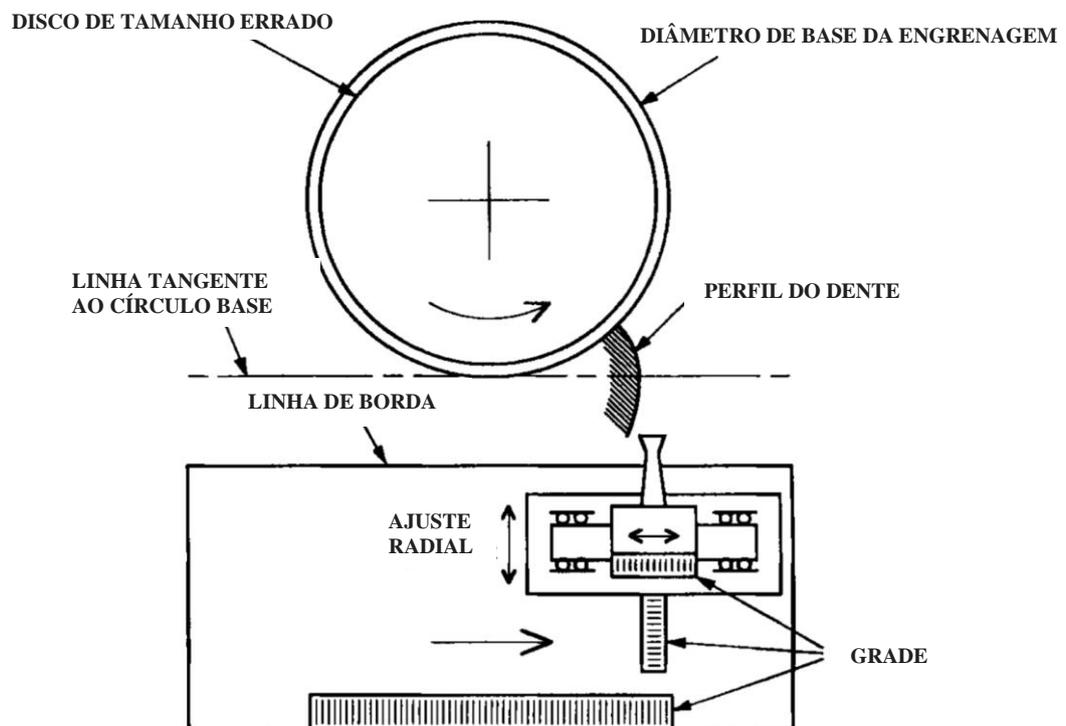




### 2.7.3 Perfil Total do dente

O princípio por trás de todas as máquinas de medição do perfil do dente da engrenagem é organizar os movimentos relativos entre a engrenagem e sensor, de modo que o sensor meça apenas os desvios de uma curva evolvente perfeita. Ao longo dos anos, várias maneiras diferentes foram criadas para produzir os movimentos relativos, envolvendo discos e alavancas e, mais recentemente, controles numéricos de computador (CNC) (MUNRO,1996). A Fig. 2.16 mostra uma máquina responsável por medir o perfil da engrenagem.

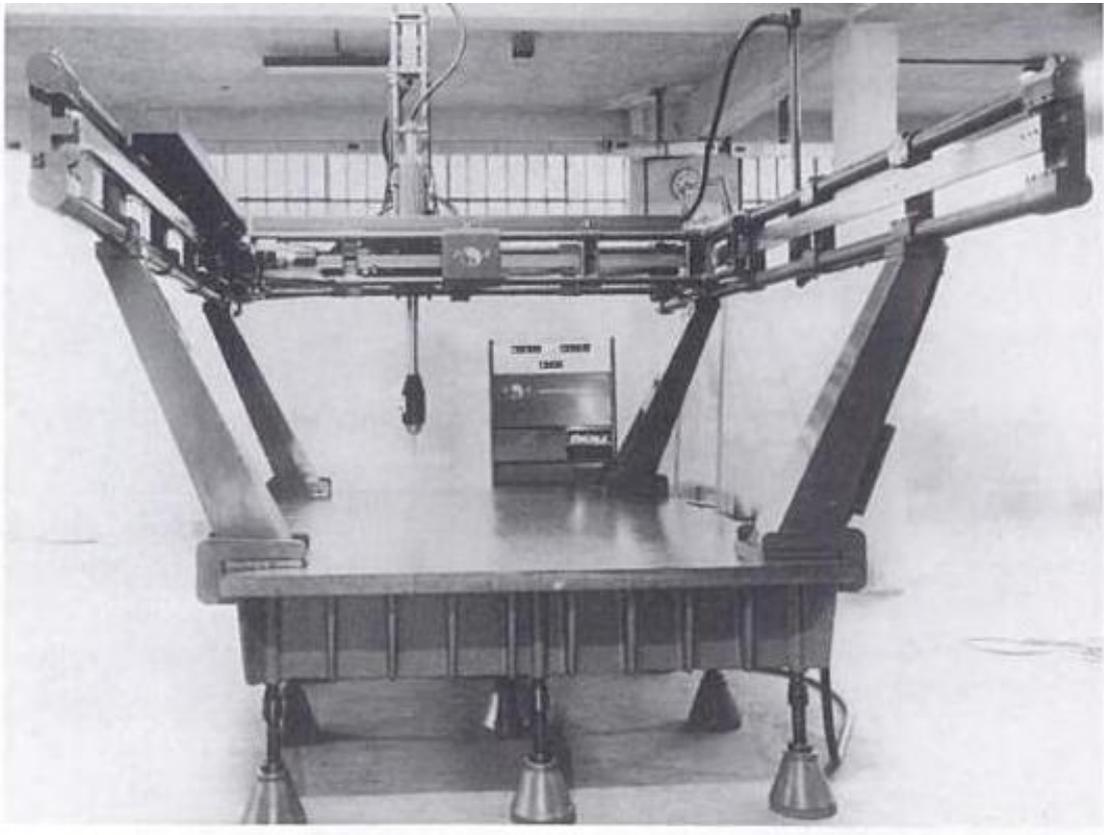
Figura 2.16 – Máquina de medição do perfil da engrenagem.



Adaptado de Munro, 1996.

Atualmente a principal forma de medição do perfil é com o uso das MMCs, pois diante da grande produção nas indústrias, está possui uma rápida medição de peças, com baixo grau de incerteza de medição e flexibilidade. A incerteza de medição depende de muitos fatores, cuja origem é atribuída à MMC, condições de medição, peça a ser medida e operador, estritamente falando a estratégia de medição implementada pelo operador. O termo "estratégia de medição" consiste em: o procedimento de medição, a estratégia de utilização do sensor de medição. A Fig. 2.17 mostra o primeiro protótipo de um CMM 3D exibido pela DEA no European Machine Show em Milão em outubro de 1963. A faixa de medição era de 2500x1600x600 mm

Figura 2.17 – Primeira Máquina de Medição por Coordenadas.



Fonte: página CMMXYZ

## 2.8 MÁQUINAS DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS

Diante de vários sistemas de medição da Metrologia, destaca-se para geometrias complexas, as Máquinas de Medição por Coordenadas (MMCs). Por medir as mais variadas geometrias das mais simples as mais complexas. O primeiro modelo da MMC foi apresentado

em 1960 em uma Feira Internacional de máquinas em Paris, pelo fabricante de máquinas operatrizes inglês, Ferranti (BUENO, 2009).

As engrenagens são um exemplo de geometria complexa, e podem ser medidas utilizando as MMCs. Com o avanço das MMCs, *softwares* dos mais variados foram desenvolvidos para auxiliar no entendimento e melhoria da medição. O *Gearpak* é um exemplo de *software* de inspeção e análise de engrenagens em máquinas tridimensionais (NÓBREGA, 2016).

O princípio de medição por coordenadas engloba a obtenção das coordenadas de pontos sobre a peça a ser inspecionada, em seguida é formada uma geometria substituta, que é o processamento matemático dos pontos adquirido no qual gera uma geometria, a qual pode ser analisada, comparada e assim estudada. (NÓBREGA, 2016). As MMCs são consideradas como garantia da qualidade dimensional de produtos industriais (PORATH, 2002).

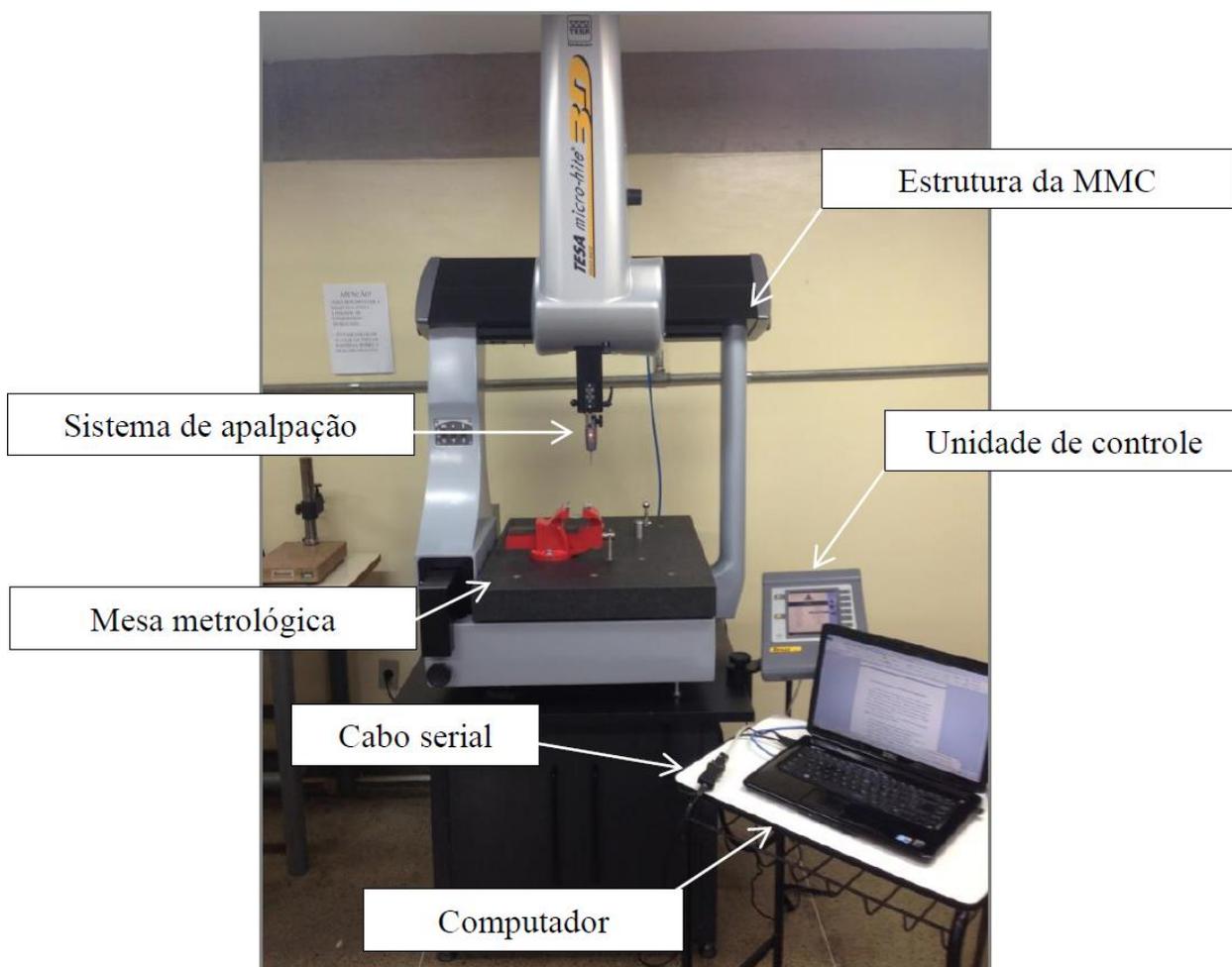
Uma MMC pode ser definida por um conjunto de componentes, que são: Sistema de apalpação, estrutura mecânica da MMC, unidade de controle, cabo serial, mesa metrológica, computador, os componentes são mostrados na Fig. 2.18. Segundo LIMA JR (2007), essas máquinas apesar de possuírem excelência de medição, apresentam erros que são responsáveis pelas incertezas de medições.

Essas máquinas têm movimentos nos três eixos de coordenadas espaciais, seu deslocamento dá-se através de guias ou mancais aerostáticos e se caracterizam em escalas optoeletrônicas. As coordenadas são aferidas pelos sensores de medição que podem ser por contato ou sem contato. (NÓBREGA, 2011). A seguir será citado segundo NÓBREGA (2016), a estrutura mecânica da Máquina de medição por Coordenadas:

- Sensores de Medição: por contato, sistema de apalpação, que entra em contato com a peça por meio de TTP (*Touch Trigger Probe*);
- Unidade de Controle: é nessa unidade que se encontra o *Software* instalado, que permite visualizar os pontos de coordenadas apalpados, a quantidades de pontos e a geometria substituta;
- Mesa metrológica: a mesa onde é apoiada e realizada as medição das peças.

Cabo serial: Envia a unidade de controle as informações da medição realizada.

Figura 2.18 – Máquina de Medição por coordenadas, seus componentes.



Fonte: Nóbrega, 2016.

As MMCs são fabricadas a partir das exigências de mercado como o volume de medição, incertezas da medição, tecnologia necessária, tamanho de peças, aplicação, entre outras. Estas podem ser classificadas como: manual ou automáticas. Nas MMCs manuais o deslocamento do cabeçote até tocar a peça é de forma manual, após o contato as coordenadas dos pontos obtidos pelo palpadores são automaticamente transmitidos para o computador. As MMCs automáticas o deslocamento de seus eixos acontecem via Comando Numérico Computacional (CNC), e utiliza um controle *joystick*, para movimentar o sensor de medição, sendo esse movimento (semiautomático). Esse comando pode ser totalmente automático utilizando uma técnica de aprendizagem de *joystick*. (NÓGREGA, 2016).

O número de pontos obtidos pela MMC da superfície da peça são processados de forma matemática para gera a superfície substituta, quanto maior o número de pontos

adquiridos, mais confiável será o resultado da medição pois a incerteza de medição pode ser afetada pela quantidade de pontos medidos. Muitas indústrias utilizam o número mínimo de pontos coordenados, de modo que, reduza o tempo gasto durante as medições, principalmente quando as medições são realizadas em MMC manuais (NÓBREGA, 2016).

## 2.9 TÉCNICA DE MEDIÇÃO PARA INSPEÇÃO DE PEÇAS

As Máquinas de Medição por Coordenadas possuem uma variedade de sensores de medição que são classificados em dois grupos, por contato e sem contato. Algumas MMC trocam automaticamente os sensores de medição, isso é uma forma de evitar a intervenção do operador no processor de medição, com também podem escolher o sensor que melhor se adequa a determinada tarefa, a Fig 2.19, mostra um magazine com diferentes tipos de sensores. (NÓBREGA, 2016).

Figura 2.19 – Magazine de sensores de medição das MMCs.



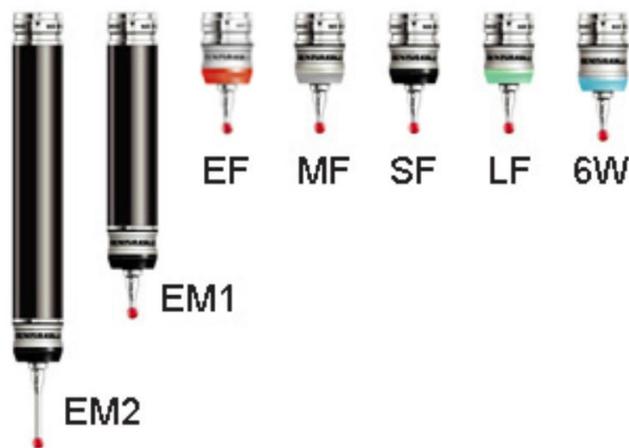
Fonte: Nóbrega, 2016.

A medição por contato pode ser realizada através de duas técnicas, a técnica chamada de ponto a ponto, e a de escaneamento contínuo, utilizam respectivamente os apalpadores *touch trigger* e *scanning probes*. O apalpador *touch trigger* é um sensor de medição encarregado da identificação do ponto na peça a ser medida. O sensor envia a informação adquirida ao controle da MMC. No momento da medição este considera o sistema de

deslocamento individual de coordenada espacial X, Y e Z; e baseia-se na geração de um sinal elétrico. (NÓBREGA, 2016).

O sensor *touch trigger probe* é ilustrado na Fig.2.20, onde mostra os mais variados tamanhos e modelos do dispositivo. A esfera localizada na extremidade da haste, é a região onde entra em contato com a peça a ser medida. Esta é fabricada com material bastante rígido e resistente ao desgaste, geralmente é feita de rubi (BOSCH, 1995).

Figura 2.20 – *touch trigger probes* diferentes tamanhos.



Fonte: Página Renishaw, 2019.

Outro tipo de sensor é o tipo de visão de máquina que é um sensor de medição sem contato, o objetivo dele é equipar a MMC de uma capacidade visual equivalente à dos seres humanos, capaz de visualizar e medir peças de pequenas dimensões. O sensor de medição a *laser*, mede a partir de milhares de pontos recolhido em uma varredura na peça, pode medir geometrias complexa e dos mais variados formatos ou materiais. (NÓBREGA, 2016).

Mesmo as MMCs utilizando as tecnologias avançadas possuem uma incerteza de medição, muito pequena quando comparada com a de outros instrumentos de medição. Mas mesmo assim a incerteza existe e pode estar associada a quatro grupos: MMC, ambiente, peça, operador e seus conhecimentos de medição (NÓBREGA, 2016).

## CAPÍTULO III

### MEDIÇÃO DE ENGRENAGEM CILÍNDRICA DE DENTES RETOS COM A UTILIZAÇÃO DE UMA MMC

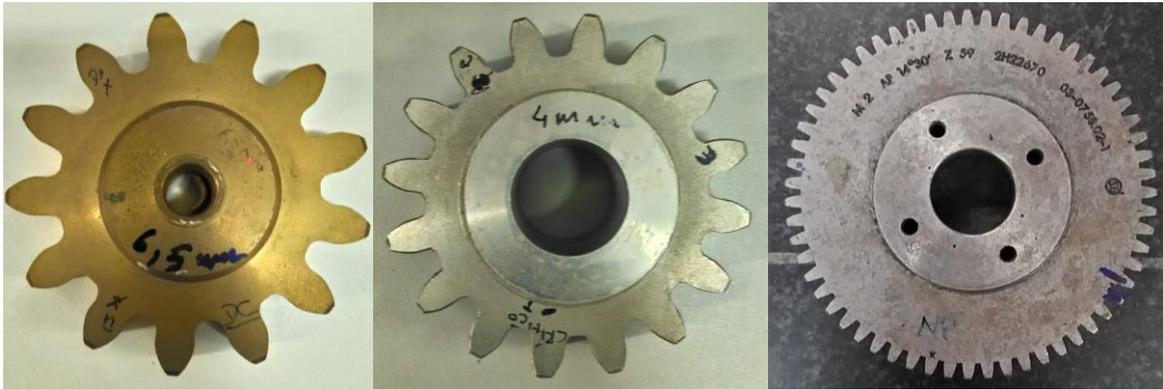
#### 3.1 METODOLOGIA

Neste trabalho foi usada uma metodologia apresentada por Nóbrega (2016) e uma metodologia desenvolvida a partir de experimentos realizados para a análise dos parâmetros: passo, espessura do dente e perfil da evolvente de uma engrenagem cilíndrica de dentes retos. Adicionalmente, foram feitas as qualificações destas engrenagens segundo a norma ISO 1328. Todas as medições foram realizadas com o uso da MMC automática, Mod. CRT – AS7106, resolução  $U = \left(0,6 + \frac{L}{900}\right) \mu m$ , como também do sensor por contato de escaneamento contínuo SP25, TTP (Touch Trigger Probe), existente no Laboratório de Engenharia de Precisão – LEP da Universidade Federal da Paraíba.

#### 3.2 SELEÇÃO DAS ENGRENAGENS PARA ESTUDO

Primeiramente foram selecionadas três engrenagens, mostradas na Fig. 3.1. A Tab. 3.1 mostra os principais parâmetros que as diferenciam nesse trabalho. As engrenagens pertencem ao LEP da Universidade Federal da Paraíba (UFPB). O Objetivo é avaliar o desvio do perfil da evolvente, como também o desvio da espessura do dente e do passo, e compara os dados obtidos experimentalmente com os dados teóricos.

Figura 3.1– Engrenagens de Estudo



Fonte: Próprio autor.

Tabela 3.1 – Parâmetros das engrenagens utilizadas.

Especificações	Modulo (mm)	Nº de Dentes	Ângulo de Pressão ( $\phi$ )
Engrenagem 1	6,5	13	20°
Engrenagem 2	4,0	16	20°
Engrenagem 3	2,0	59	14,5°

As engrenagens 1 e 2 foram fabricadas usando uma fresadora, enquanto a engrenagem 3 foi produzida pelo processo de geração de engrenagens.

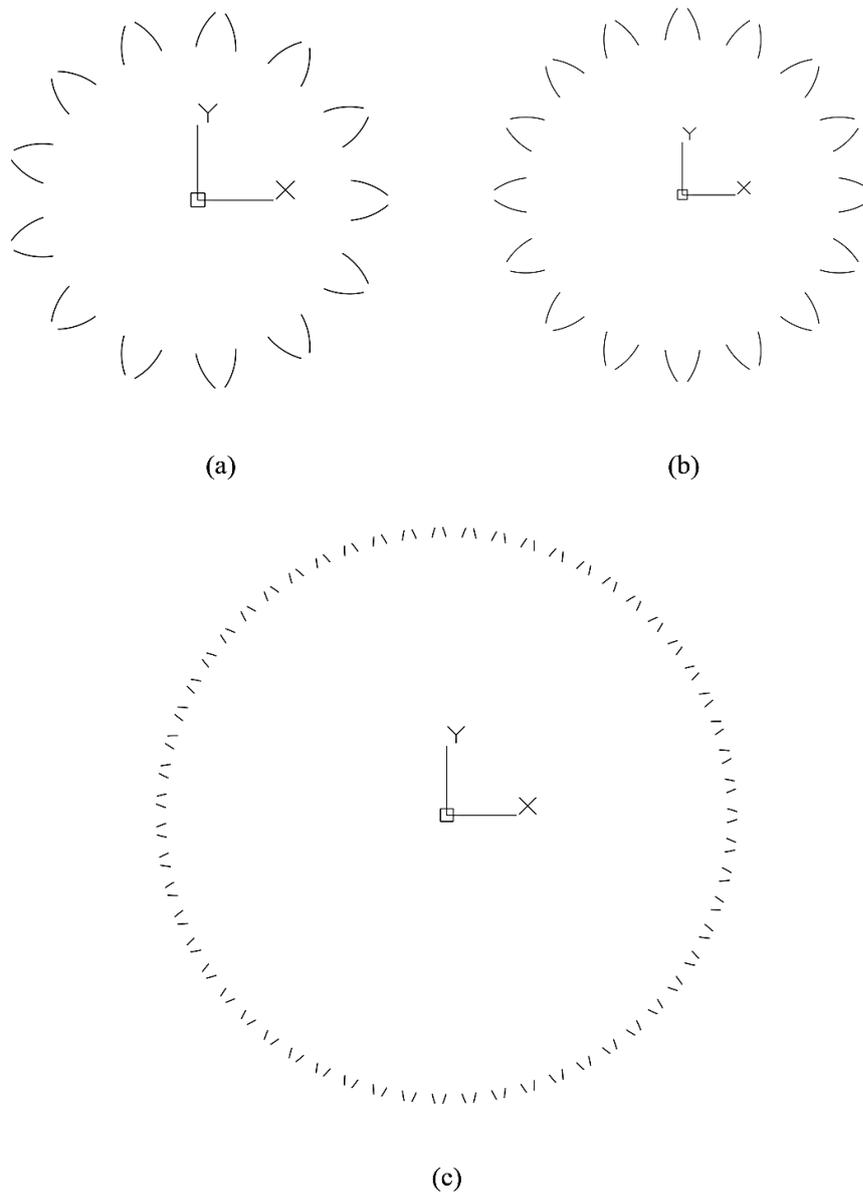
### 3.3 DESENHO DAS ENGRELAGENS

Posteriormente foi realizado o desenho das engrenagens selecionadas utilizando o *software* CAD do pacote *Solidworks*.

1. Foram desenhadas as linhas dos eixos X e Y, houve a essa necessidade pelos pré-requisitos da interseção dos eixos x e y localizar-se no centro da engrenagem e um deles passar pelo ponto médio de um dos dentes da engrenagem. Estes pré-requisitos foram necessários para a comparação do perfil teórico com o existente utilizando a MMC.
2. A engrenagem foi gerada a partir de uma ferramenta do *SolidWorks*, *Toolbox*, que gera automaticamente as engrenagens a partir dos dados iniciais citados na Tab 3.1. Ao gerá-la, seu eixo irá se adequar ao eixo criado no primeiro passo. O desenho se encontra no formato 3D.

3. É necessário salvar o arquivo no formato DFX 2D, pois o interesse em estudar o formato do perfil da evolvente do dente da engrenagem consequentemente o contorno da engrenagem criada pela MMC será em 2D. Dessa forma o arquivo precisa ser convertido. O formato DFX é um dos formatos compatíveis com o *software* da máquina MMC.
4. Foram apagadas as regiões do desenho que se localizava abaixo do diâmetro base da engrenagem e o diâmetro externo. Pois nesse trabalho a região de estudo é a envolvente das engrenagens.

Figura 3.2 – Desenhos do perfil das engrenagens selecionadas (a). Engrenagem 1 Tab 3.1 (b) Engrenagem 2 Tab 3.1 (c) Engrenagem 3 Tab 3.1.



Fonte: Próprio autor.

Vale ressaltar que o passo 4 citado acima para a Fig. 3.2 (c), a metodologia teve uma pequena alteração. Foi apagada a região abaixo do diâmetro primitivo, esse procedimento foi necessário devido as distâncias entre o pé dos dentes da engrenagem e o diâmetro do sensor de contato da máquina MMC, que é relativamente grande para realizar essa medição com precisão.

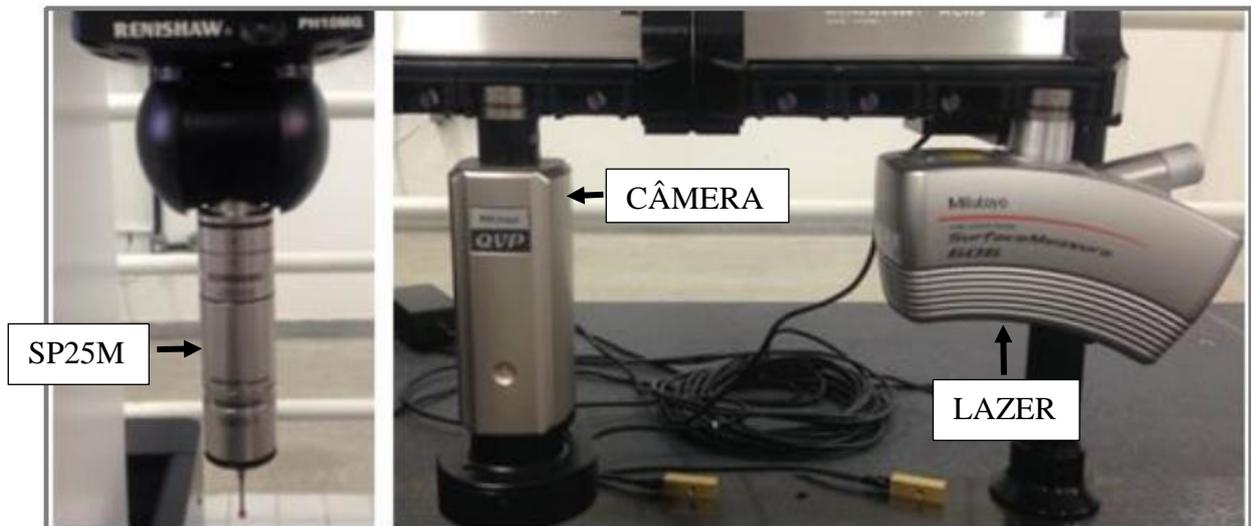
### 3.4 MÁQUINA DE MEDIÇÃO POR COORDENADA

A Máquina de Medição por Coordenadas usada foi a *Crysta-Apex S 7106 CNC* mostrada da Fig. 3.3a e o sensor apalpador equipado na MMC SP25M, a MMC também é equipada com uma câmera de medição de alta precisão que capta pequenas geometrias e um *laser* que mede diferentes geometrias, de formatos complexos mostrado da Fig 3.3b.

Figura 3.3 – (a) Crysta-Apex S 7106 CNC (b) Sensores de Medição



(a)



(b)

Fonte: Nóbrega, 2016

O sensor SP25M que equipa a MMC citado na Fig.3.3a proporciona uma medição contínua do perfil de todos os dentes das engrenagens, de forma rápida, automática e precisa. O *Software* computacional MCOSMOS utilizado pela máquina que gera automaticamente o desenho real da engrenagem a partir que o sensor de contato toca a engrenagem e rapidamente o desenho de toda a engrenagem se formar no *software*. O *software* facilita a comparação entre o perfil teórico (desenho CAD), e o perfil real criado pela MMC, e daí classificá-lo segundo a ISO 1328.

### 3.5 INSPEÇÃO E QUALIFICAÇÃO DAS ENGRENAGENS

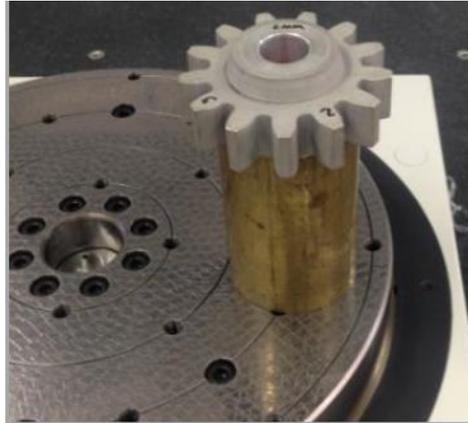
#### 3.5.1 Perfil da evolvente do dente da engrenagem

A etapa citada nesse tópico mostra o procedimento de inspeção do perfil e a qualificação das engrenagens. De acordo com Nóbrega (2016) só é necessário posicionar o sensor de contato das MMCs automáticas apenas uma única vez, e o procedimento ficará armazenado na memória.

Seguindo os procedimentos a MMC é acionada juntamente com o computador acoplado que executa o *software* computacional MCOSMOS. O *software* é responsável por integrar todas as ferramentas dentro deste que integram o funcionamento das suas partes,

coordenadas e banco de dados. (LIMA JR, 2007). Para as medições foi necessário um suporte de apoio no formato cilíndrico para as engrenagens, no qual foi posto em cima da mesa metrológica rotativa. A Fig. 3.4 ilustra o procedimento.

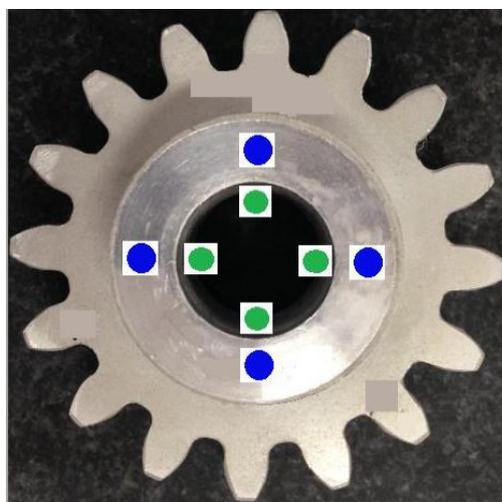
Figura 3.4 – Suporte de apoio para medições das engrenagens.



Fonte: Nóbrega, 2016

A criação do plano e origem utilizada para medição será reposicionada para a engrenagem que irão ser compatibilizados com os planos e origens do desenho citado no tópico 3.1. O padrão da MMC *Crysta-Apex S 7106 CNC*, define o sistema de coordenadas na extremidade superior da máquina. O plano é definido quando o sensor de contato toca quatro pontos na superfície da engrenagem e a origem toca-se quatro pontos do furo da engrenagem. A Fig. 3.5 ilustra as afirmações, onde os pontos da cor azul é para definir o plano e os da cor verde a origem.

Figura 3.5 – Pontos para a definição do plano e origem da MMC

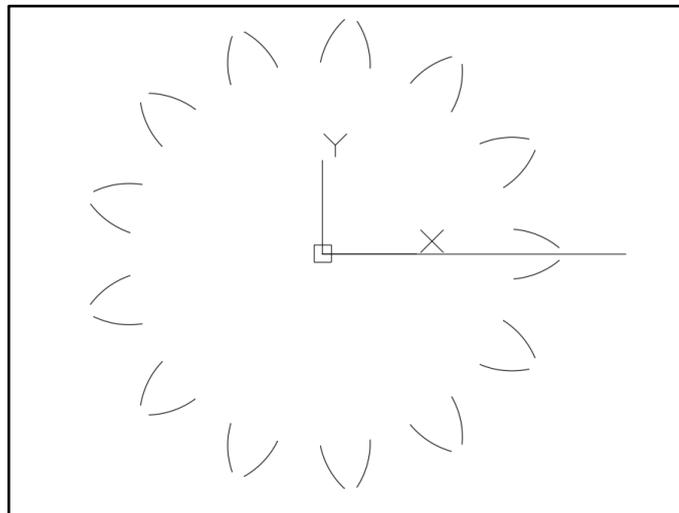


Fonte: Nóbrega, 2016

Seguindo a metodologia desenvolvida por NÓBREGA (2016), para o alinhamento do eixo “X” do perfil real gerado pela MMC, com o do desenho CAD ao propósito de ter a sobreposição dos desenhos. Além de posicionar a origem no centro do furo da engrenagem, o eixo horizontal “X” foi posicionado passando no eixo de simetria longitudinal de um dos dentes da engrenagem, observado na Figura 3.6.

Foi criado uma linha no lado esquerdo e outra do lado direito do dente da engrenagem, a partir de dois pontos de cada lado selecionados pelo sensor de contato da MMC, no qual essas linhas criadas se cruzam e dão origem a um ponto que se localiza no eixo de simetria do dente. Ao ligar o ponto de origem no centro do furo da engrenagem com esse ponto que acabamos de citar, damos origem a uma terceira linha, que será nominada como o eixo “X” da máquina e automaticamente a MMC cria os outros eixos perpendiculares ao eixo “X”.

Figura 3.6 – O eixo X posicionado no eixo longitudinal de simetria de um dente da engrenagem.



Fonte: Próprio autor.

Essa metodologia foi criada com a finalidade de sobrepôr os dois desenhos a serem estudados e comparados. E então foi realizado o escaneamento contínuo de todos os dentes das engrenagens 1, 2 e 3, houve a geração do contorno que será utilizado para o estudo do perfil da engrenagens. O sensor utilizado foi SP25M da *Renishaw*, com esfera de rubi de

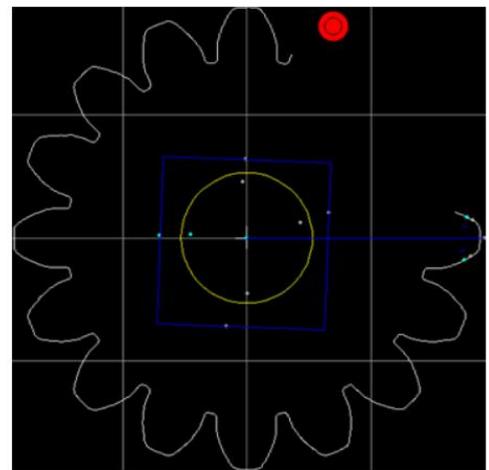
diâmetro de 3 mm. A Fig. 3.7, ilustra o escaneamento contínuo e o desenho gerado pelo *software* MCOSMOS.

Vale ressaltar novamente a diferença no estudo da engrenagem 3, por ter um espaçamento entre o pé dos dentes inferior a 3 mm, foi necessário utilizar uma região de medição entre o diâmetro primitivo e o diâmetro externo da engrenagem, para conseguir um resultado aceitável e similar ao da fábrica que foi projetada.

Figura 3.7 – (a) Escaneamento feito pela MMC utilizando o sensor SP25M da *Renishaw* (b) Escaneamento gerado na tela do *software* MCOSMO.



(a)



(b)

Fonte: Nóbrega, 2016.

### 3.5.2 Passo e Espessura do Dente da Engrenagem.

Esta metodologia foi desenvolvida a partir de experimentos no LEP, com a utilização da Máquina de Medição por Coordenada (MMC). Os primeiros passos foram: posicionar a origem, os planos e o plano “X” passando pelo ponto de simetria de um dos dentes da engrenagem. Este algoritmo inicial segue semelhante ao da inspeção do perfil citado no tópico anterior, a Figura 3.8 ilustra os passos.

Os passos seguintes foram:

1. Criação de um círculo teórico com diâmetro do círculo primitivo da engrenagem em questão, esse diâmetro é facilmente calculado usando os dados da Tabela 3.1 e a Equação 3.1;

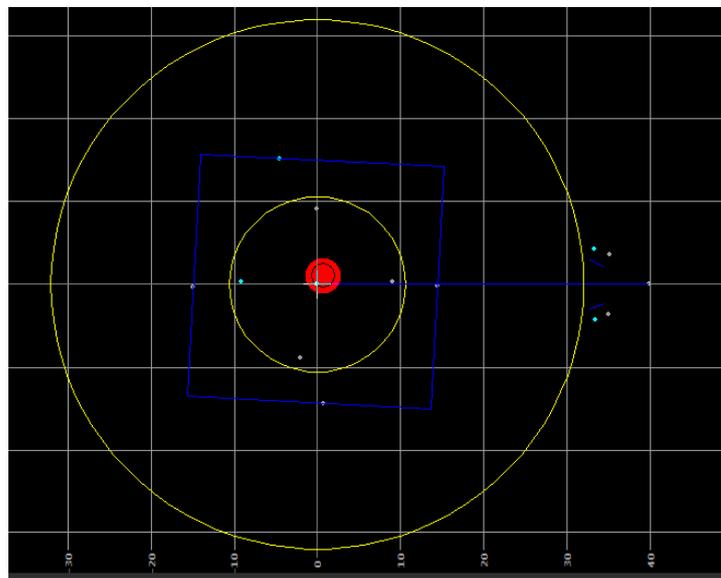
$$D_p = m \times N \quad (3.1)$$

$m$  – módulo da engrenagem

$N$  – Número de dente da engrenagem

$D_p$  - Diâmetro primitivo da engrenagem

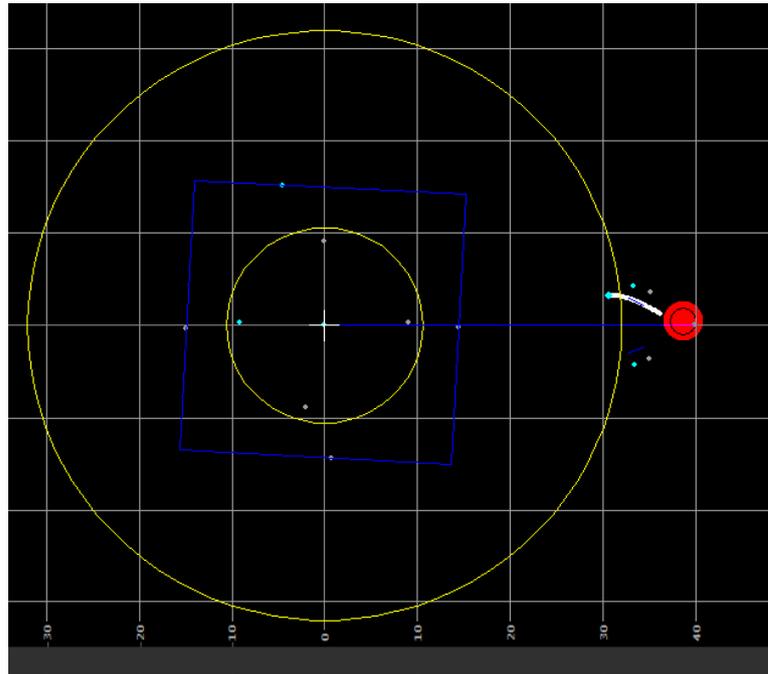
Figura 3.8– Posicionamento da origem ponto de cor vermelha; plano de cor azul e reta passando pelo ponto de simetria do dente de cor azul, software MCOSMOS.



Fonte: Próprio autor.

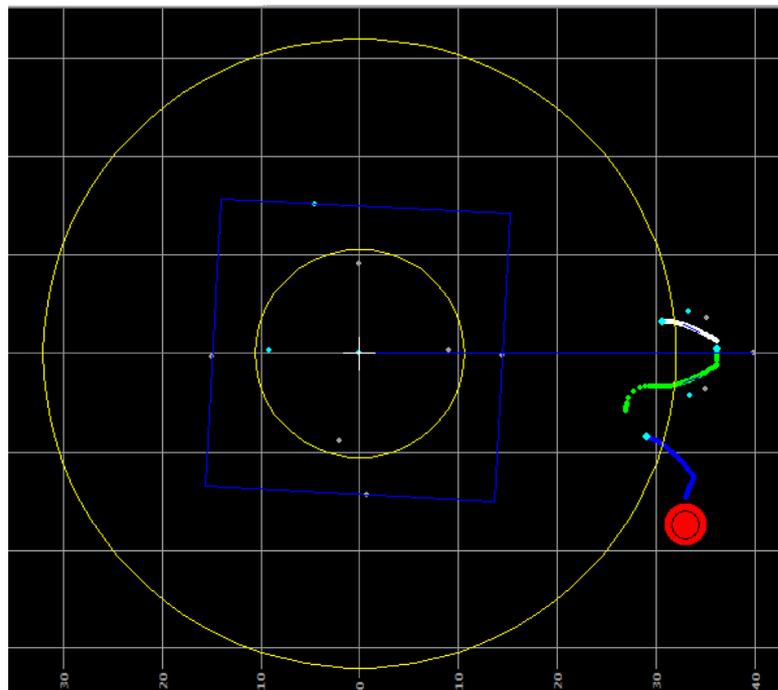
2. Contorno 1 do dente 1, é o contorno do perfil do lado esquerdo do dente da engrenagem ele foi feito a partir da definição do ponto inicial do escaneamento que fica localizado próximo ao pé do dente, e o ponto final localizado no círculo base. A partir de então a MMC automática faz esse contorno, mostrado na Fig. 3.9;
3. Contorno 2 do dente 1, é o contorno do perfil do lado direito do dente da engrenagem escolhido inicialmente, semelhante ao passo número 2;
4. Contorno 1 do dente 2, é o contorno do dente seguinte da engrenagem, o perfil do lado direito do dente seguinte. Os passos são similares aos utilizados no tópico 2, a Fig. 3.10 ilustra melhor todos os contornos criados;

Figura 3.9– Contorno 1 do dente 1 software MCOSMOS.



Fonte: Próprio autor.

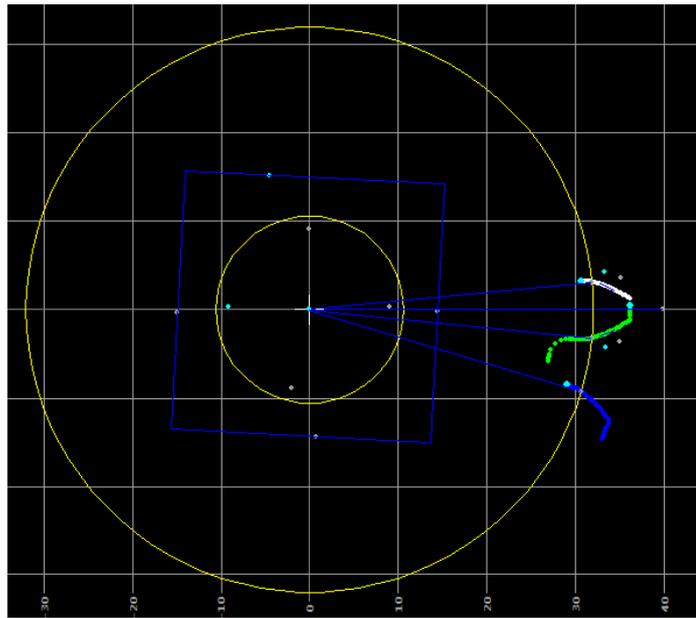
Figura 3. 10 – Contornos do perfil do dente da engrenagem, software MCOSMOS.



Fonte: Próprio autor.

5. Criação dos pontos: p1, p2 e p3 que é a intercepção entre o círculo teórico de diâmetro semelhante ao do círculo primitivo em análise, com os contornos criados citados anteriormente;
6. Linhas criadas (L1, L2 e L3) entre a origem e os pontos p1, p2 e p3 esse passo é mostrado na Fig. 5.11;

Figura 3.11 – Linhas criadas entre o ponto da origem com os pontos p1,p2 e p3, software MCOSMOS.



Fonte: Próprio autor.

7. O ângulo  $\alpha_1$  entre as linhas L1 e L2 é utilizado para o cálculo da espessura do dente da engrenagem a partir da equação 3.2;

$$t = \frac{\alpha_1 \times \pi \times D_p}{360} \quad (3.2)$$

onde,

$t$  – Espessura do dente da engrenagem;

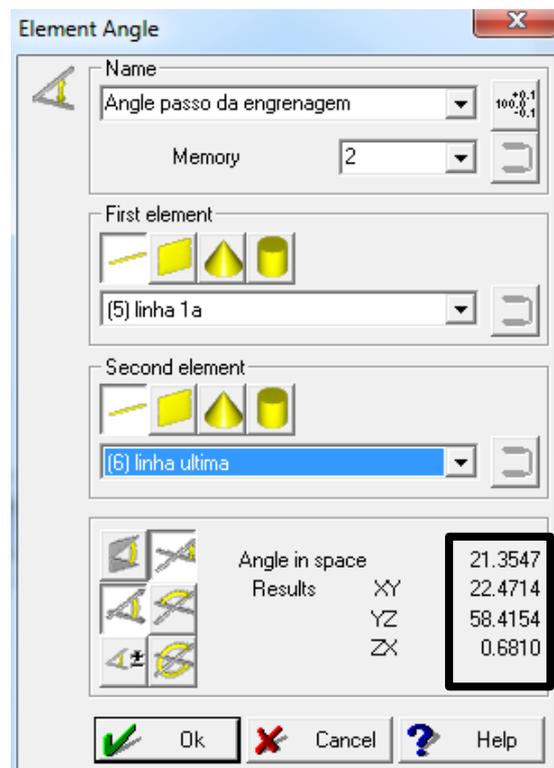
$\alpha_2$  – ângulo entre a linha L1 e L2;

$D_p$  – Diâmetro primitivo;

8. O ângulo,  $\alpha_2$ , é o angulo criado entre a linha L1 e L3 é utilizado para o cálculo do passo real, com a utilização da equação 3.3, a Figura 3.12 mostra os ângulos em questão.

$$p = \frac{\alpha_2 \times \pi \times D_p}{360} \quad (3.3)$$

Figura 3.12– Ângulos calculados a partir das linha L1, L2; e L1, L3, para o cálculo da espessura do dente e passo da engrenagem, software MCOSMOS.



Fonte: Próprio autor.

9. Todas essas informações são guardadas na memória de uma MMC automática. Com o auxílio da mesa rotativa acoplada da máquina, podemos programá-la para que gire  $(360/N)^\circ$  e repita todos os procedimentos citados anteriormente para todos os dentes da engrenagem. Esse procedimento permite o cálculo automático dos ângulos para o cálculo do passo e espessura do dente real da engrenagem.

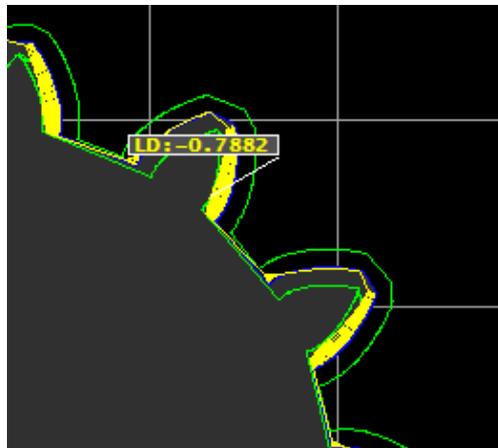
## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 4.1 PERFIL DA EVOLVENTE DO DENTE DA ENGRENAGEM

Diante dos procedimentos realizados com a utilização da MMC automática, foi possível a medição do perfil real do dente das engrenagens, como também importar o desenho dos perfis teóricos no formato de arquivo .DFX para o *software* MCOSMOS e daí compará-los. A partir de então com resultados mostrados na tela do MCOSMOS pode-se qualificá-las segundo a norma ISO 1328 e estudar todos os resultados apresentados. A Figura 4.1 mostra a Engrenagem 1, com a tolerância máxima do perfil quando comparada com o perfil teórico (desenho CAD).

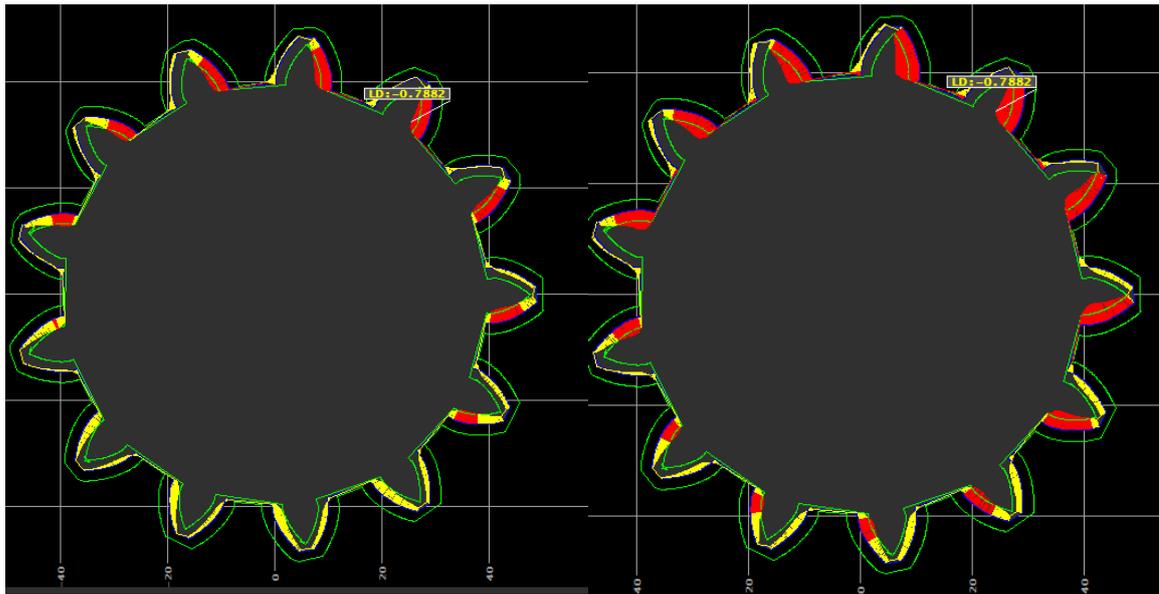
Figura 4. 1– Tela do software MCOSMOS com o limite de tolerância onde todos os perfis dessa engrenagem de enquadram.



Fonte: Próprio autor.

Durante a comparação foi testado para a Engrenagem 1 as Tolerâncias Máxima de  $\pm 0.500 \mu m$  e  $\pm 0.350 \mu m$ , mostrado na Figura 4.2, no qual apresentou uma tendência no processo de fabricação, na fresadora. Por apresentar perfis fora do padrão em apenas um dos lado do dente da engrenagem e uma região mais agravada na parte superior mostrada na Figura 4.2.

Figura 4.2– Tela do software MCOSMOS com o limite de tolerância  $\pm 0.500 \mu m$  e  $\pm 0.350 \mu m$ .

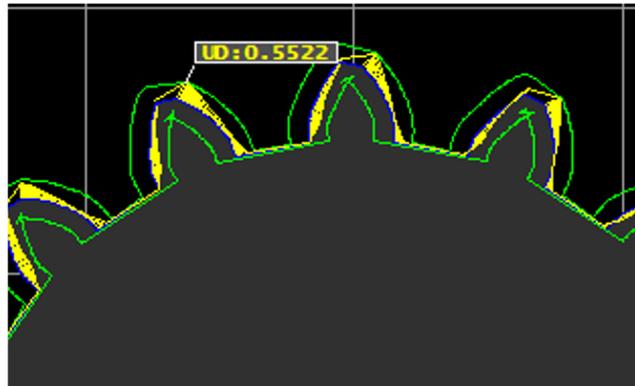


Fonte: Próprio autor.

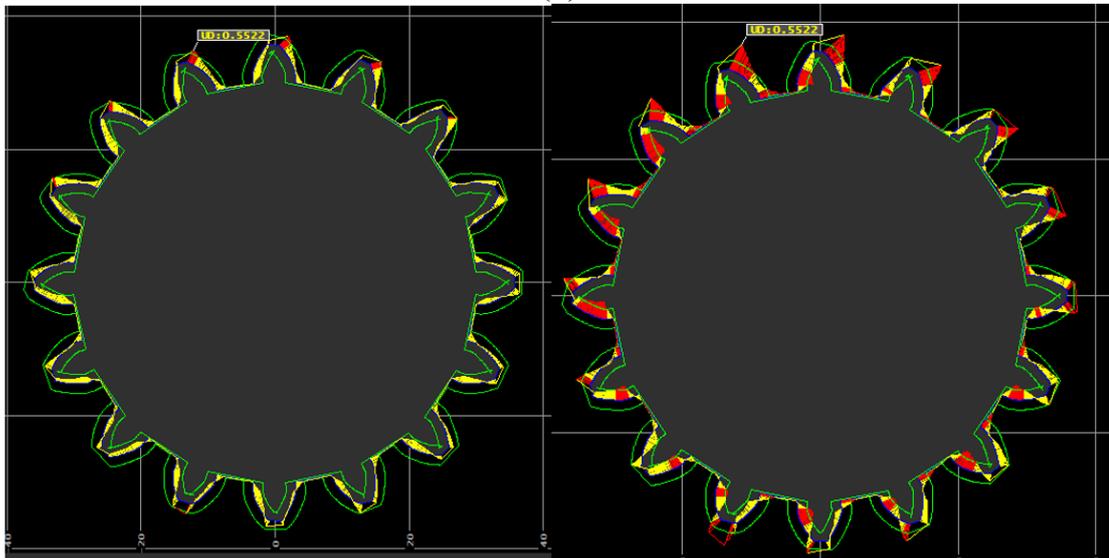
A Tolerância Máxima do perfil da Engrenagem 2 no qual todos os perfis se enquadram é de  $\pm 552,2 \mu m$ , a partir dessa tolerância podemos considerá-la de qualidade caso ela tenha sido fabricada para atender esse limite, vale ressaltar que é menor comparada a engrenagem 1.

Quando medimos com uma Tolerância máxima de  $\pm 400,0 \mu m$  e  $\pm 200,0 \mu m$  respectivamente, a primeira medição mostra uma repetição com a fresadora pois os perfis que não se enquadram, o erro se encontra próximo ao círculo base da engrenagem como mostrado na Fig. 4.3. Posteriormente notamos que não existe uma tendência específica pois o erro é completamente aleatório.

Figura 4.3– (a) Tela do software MCOSMOS com o limite de tolerância  $\pm 552,2 \mu\text{m}$ . (b) Tela do software MCOSMOS com o limite de tolerância  $\pm 400 \mu\text{m}$  e  $\pm 200 \mu\text{m}$ .



(a)



(b)

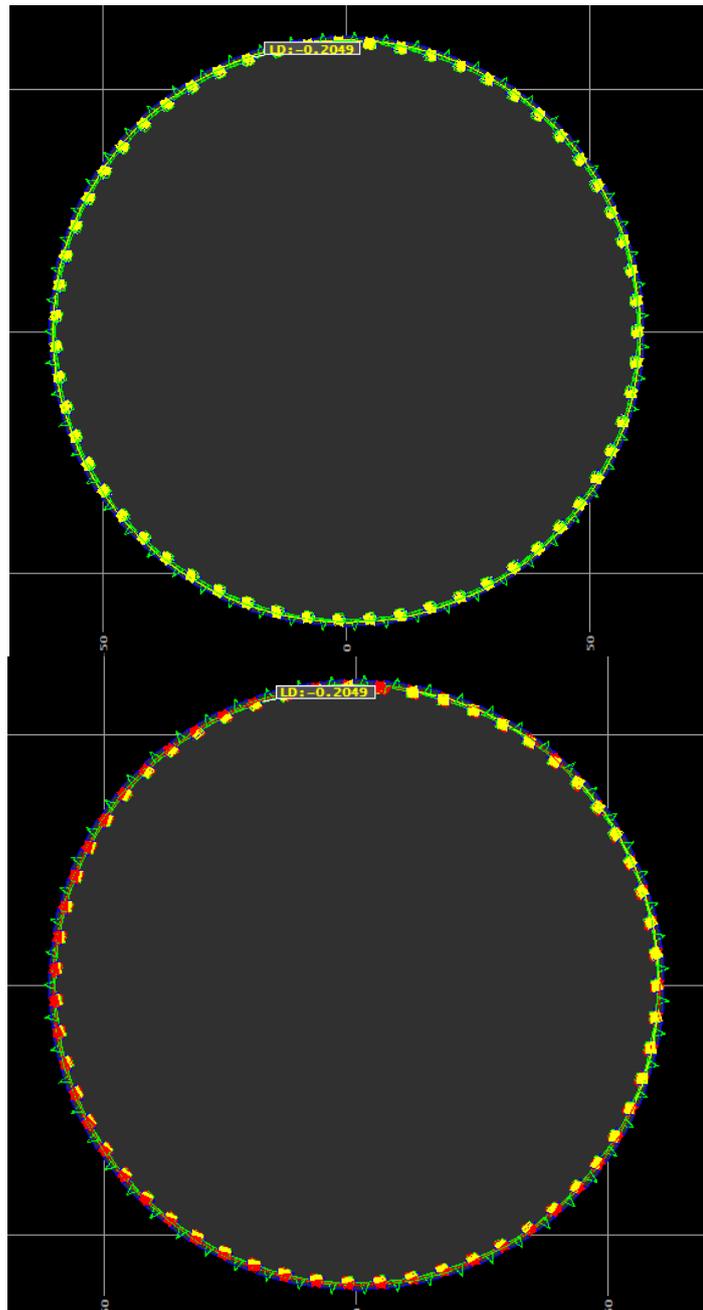
Fonte: Próprio autor.

A Engrenagem 3, foi doada ao Laboratório de Engenharia de Precisão – LEP, por uma empresa especializada em fabricação de engrenagens porém, não foi fornecido um relatório de inspeção de perfil da evolvente do dente da engrenagem, apenas obtive-se a informação que o objetivo era ter um  $F_\alpha$  máximo de  $61,9 \mu\text{m}$ .

Vale ressaltar novamente que para conseguirmos fazer a comparação entre o perfil teórico e o real, foi necessário fazer uma adaptação no desenho CAD arquivo. DFX. Pois o sensor de contato era maior que a distância do pé do dente da engrenagem, dificultando assim a medição e a comparação então foi feita uma adaptação medindo uma parte do perfil entre o círculo primitivo e o círculo externo.

Também podemos ressaltar que existe a probabilidade da engrenagem doada não estivesse atendendo as exigências de qualidade da empresa, por esse motivo foi possível realizar a doação para estudo. Isso justificaria a diferença de  $\pm 143,0 \mu m$  de tolerância. A Figura 4.4 mostra a tela do MCOSMOS com as tolerâncias respectivamente  $\pm 204,9 \mu m$ , no qual todos os perfis se encontra dentro dos limites de tolerância do perfil e  $\pm 150,0 \mu m$  no qual todos os perfis dos dentes estão fora do padrão de qualidade da empresa.

Figura 4.4 – (a) Tela do software MCOSMOS com o limite de tolerância  $\pm 204,9 \mu m$  e  $\pm 150,0 \mu m$ .



Fonte: Autoria Própria.

Resultado final do Erro Máximo do perfil da envolvente do dente das engrenagens analisadas está presente na Tabela 4.2.

Tabela 4.1– Resultados encontrados utilizando a MMC do Erro máximo do perfil da envolvente.

	$F_{\alpha}$ ( $\mu m$ )
Engrenagem 1	788,2
Engrenagem 2	552,2
Engrenagem 3	204,9

Na pratica, após as medições com a MMC, nenhuma das engrenagens inspecionadas foram classificadas na norma, todos os erros de perfis foram superiores aos limites de grau de qualidade 12. Porém pode-se acreditar que a engrenagem 3 foi fabricada fora do padrão de qualidade pelo fato de nunca ter sido utilizada e não apresentar desgastes. As outras duas engrenagem 1 e 2, medidas elas foram fabricadas pelo processo de fresagem, para estudo e não possuem utilidade real.

## 4.2 PASSO E ESPESSURA DO DENTE

A metodologia desenvolvida a partir dos experimentos realizados no LEP citado no capítulo III, com o uso da MMC automática e a mesa rotativa, foi possível medir o passo e espessura do dente da engrenagem reais e classificar segundo a ISO 1328.

Foi desenvolvida como forma de medição de parâmetros de engrenagem, para MMC automática, que não possui *software* dedicado para medição desses parâmetros. Promovendo uma medição rápida, pois o algoritmo fica gravado na memória da máquina e pode se repetir de forma automática para todos os dentes da engrenagem. Como também pode ser acessado e utilizado quantas vezes forem necessário. Os resultados são mostrados nas Tabelas 4.3, 4.4 e 4.5, juntamente com alguns parâmetros necessários para a obtenção dos dados.

Tabela 4.2– Parâmetros da engrenagem 1.

<b>Parâmetros</b>	<b>Engrenagem 1</b>
Passo Teórico ( $p_t$ )	20,4197 mm
Passo Experimental ( $p_e$ )	19,5219 mm
Erro do passo ( $F_{pt}$ )	0,8977 mm
<b>Erro do passo (<math>F_{pt}</math>)</b>	<b>897,7 <math>\mu m</math></b>
Espessura do Dente Teórico ( $t_t$ )	10,2098mm
Espessura do dente Experimental ( $t_e$ )	9,8480 mm
Erro da Espessura do dente $ t_t - t_e $	0,3610 mm
<b>Erro da Espessura do dente <math> t_t - t_e </math></b>	<b>361,4295 <math>\mu m</math></b>
Ângulo Passo ( $\alpha_2$ )	26,4748°
Ângulo Espessura do Dente ( $\alpha_1$ )	13,356°
Modulo ( $m$ )	6,5 mm
Diâmetro Externo ( $D_e$ )	97,5 mm
Diâmetro Primitivo ( $D_p$ )	84,5 mm
Número de Dentes ( $N$ )	13
<b>Classe</b>	<b>Não obedece a nenhuma classe</b>

Tabela 4.3– Parâmetros da engrenagem 2.

<b>Parâmetros</b>	<b>Engrenagem 2</b>
Passo Teórico ( $p_t$ )	12,5660 mm
Passo Experimental ( $p_e$ )	12,1557 mm
Erro do passo ( $F_{pt}$ )	0,41026 mm
<b>Erro do passo (<math>F_{pt}</math>)</b>	<b>410,2 <math>\mu m</math></b>
Espessura do Dente Teórico ( $t_t$ )	6,2830 mm
Espessura do dente Experimental ( $t_e$ )	5,8570 mm
Erro da Espessura do dente $ t_t - t_e $	0,426 mm
<b>Erro da Espessura do dente <math> t_t - t_e </math></b>	<b>426,1 <math>\mu m</math></b>
Ângulo Passo ( $\alpha_2$ )	21,7654 °
Ângulo Espessura do Dente ( $\alpha_1$ )	10,4869 °
Modulo ( $m$ )	4 mm
Diâmetro Externo ( $D_e$ )	72 mm
Diâmetro Primitivo ( $D_p$ )	64 mm
Número de Dentes ( $N$ )	16
<b>Classe</b>	<b>Não obedece a nenhuma classe</b>

Tabela 4. 4– Parâmetros da engrenagem 3.

<b>Parâmetros</b>	<b>Engrenagem 3</b>
Passo Teórico ( $p_t$ )	6,2830 mm
Passo Experimental ( $p_e$ )	6,2718 mm
Erro do passo ( $F_{pt}$ )	0,0111 mm
<b>Erro do passo (<math>F_{pt}</math>)</b>	<b>11,1 <math>\mu\text{m}</math></b>
Espessura do Dente Teórico ( $t_t$ )	3,1415 mm
Espessura do dente Experimental ( $t_e$ )	3,2120 mm
Erro da Espessura do dente $ t_t - t_e $	0,0701 mm
<b>Erro da Espessura do dente <math> t_t - t_e </math></b>	<b>70,1 <math>\mu\text{m}</math></b>
Ângulo Passo ( $\alpha_2$ )	6,0909 °
Ângulo Espessura do Dente ( $\alpha_1$ )	3,1190 °
Modulo ( $m$ )	2 mm
Diâmetro Externo ( $D_e$ )	122 mm
Diâmetro Primitivo ( $D_p$ )	118 mm
Número de Dentes ( $N$ )	59
<b>Classe</b>	<b>7</b>

Dessa forma foi possível classificar a qualidade do passo e espessura do dente da engrenagem ao comparar os resultados do erro do desvio de passo apresentados nas Tabelas 4.2 a 4.5 com a Norma ISO 1328 usando a Tab. 2.2, a qual indica o grau de qualidade para o passo único. As Engrenagens 1 e 2 não se classificam dentro da variação de tolerância para o Passo em nenhuma das 12 classes, pois o seu resultado é superior a tolerância de classe 12, que é a maior. Já a Engrenagem 3 que foi fabricada pelo processo de geração é classificada na classe 7, que é considerado um grau de qualidade de fabricação satisfatório.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSÃO

#### 5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para realizar esse trabalho foi necessário estudar os principais parâmetros das engrenagens, as diversas formas de medição desses parâmetros, entender como funciona uma MMC, e suas variadas aplicações. Assim como, compreender os níveis de qualidade da norma ISO 1328.

Foram avaliadas as medidas de engrenagem utilizando a MMC e o sensor de contato *Touch Trigger Probe (TTP)*, desta forma foram realizados ensaios experimentais para a elaboração de uma metodologia, que foi criada para análise de alguns parâmetros específicos como, perfil da evolvente, passo e espessura do dente. E daí foi avaliada a qualidade dimensional das engrenagens utilizando a ISO 1328 como referência.

Apesar das três engrenagens analisadas com relação ao parâmetro de perfil da evolvente não terem atendido ao referencial, ou seja a Norma ISO 1328, a metodologia de análise do perfil da evolvente pode ser testada. O mesmo ocorreu com o algoritmo desenvolvido para a análise de espessura de dente e passo da engrenagem, pode ser testado e somente engrenagem 3 teve um resultado dentro da faixa de qualidade da ISO, pertencendo a classe de qualidade 7. O que já era esperado por ter sido fabricada pelo processo de geração.

A metodologia mostrada no trabalho pode ser usada em organizações onde possua um tipo de MMC automática similar citada nesse trabalho e não possua o *software* dedicado para medição de parâmetros e avaliação de qualidade da engrenagem.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Fazer metodologia dos mesmos parâmetros utilizando a MMC para outros tipos de engrenagens;
- Utilização de sensores de medição da MMC sem contato, como o laser e a câmera;
- Avaliar outros parâmetros das engrenagens como por exemplo: *runout*.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

ACOPLASTBRASIL, Engrenagem. Disponível em:  
<https://www.acoplastbrasil.com.br/engrenagem/> Acesso em: 10 de fevereiro de 2019.

AUERSWALD, Matthias Marcus; VON FREYBERG, Axel; FISCHER, Andreas. Laser line triangulation for fast 3D measurements on large gears. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 100, n. 9-12, p. 2423-2433, 2019.

BOSCH, J. A, Coordinate Measuring Machines and Systems. Marcel Dekker, New York, 1995.

BRITO NETO, et al. A tecnologia da medição por coordenadas na calibração de peças padrão e medição de peças com geometrias complexas, 2003.

BUDYNAS, Richard G.; NISBETH, J. Keith. **Elementos de Máquinas de Shigley-8ª Edição**. McGraw Hill Brasil, 2011.

BUENO, M. A. M. Sensores Eletrônicos para uso em Máquinas de Medir por Coordenadas. **Revista Metrologia e Instrumentação**, v. 52, 2009.

FARAGO, Francis T.; CURTIS, Mark A. **Handbook of dimensional measurement**. Industrial Press Inc., 1994.

FRESADORAHIPOYDE, Engrenagem cilíndrica helicoidal. Disponível em:  
<https://www.fresadorahipoyde.com.br/engrenagem-cilindrica-helicoidal> Acesso em : 10 de fevereiro de 2019.

FRESADORAHIPOYDE, Rosca-fim-coroa. Disponível em:  
<https://www.fresadorahipoyde.com.br/rosca-fim-coroa> Acesso em : 10 de fevereiro de 2019.

ISELI, Claudio; SPRENGER, Bernhard. **Non-cartesian hexapod or hexapod-like coordinate measuring machine**. U.S. Patent Application n. 16/118,842, 7 mar. 2019.

LIMA JÚNIOR, J. C. **Aplicação de Redes Neurais Artificiais para determinar parâmetros de geometrias, substitutas em MMCs**. 2007. Tese de Doutorado. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PPGEM. Universidade Federal da Paraíba, UFPB, João Pessoa.

MUNRO, R. G.; LING, P. H. K. A new method of measuring involute profile deviations of gear teeth. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science**, v. 210, n. 1, p. 63-67, 1996.

NÓBREGA, Luiz Henrique Melo Silva et al. Desenvolvimento de uma estratégia de medição, baseada em nurbs, para determinação do desvio total de perfil ( $f\alpha$ ) de engrenagens cilíndricas de dentes retos usando MMCs. 2016.

NORELEM, Engrenagem. Disponível em: <https://www.norelem.com/pt/> Acesso em: 10 de fevereiro de 2019.

PORATH, M. de C.; SOUSA, AR de. A Tecnologia de medição por coordenadas no ciclo de desenvolvimento de produtos plásticos. **artigo da Fundação CERTI, (in portuguese)**, v. 20001, 2002.

POLLI, Milton Luiz et al. Análise da estabilidade dinâmica do processo de fresamento a altas velocidades de corte. 2005.

RADZEVICH, Stephen P. **Dudley's handbook of practical gear design and manufacture**. CRC Press, 2012

RENISHAW, *knowledge base touch trigger probe* Disponível em: <https://www.renishaw.com/cmmsupport/knowledgebase/en/tp20-touch-trigger-probe-kit--13528> Acesso em: 10 de fevereiro de 2019.

SRINIVASAN, N.; SHUNMUGAM, M. S. Limiting conditions in a gear-shaping process. **THE INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH**, v. 21, n. 4, p. 543-552, 1983.

STANDARD, I. S. O. Cylindrical gears—ISO system of accuracy—part 1: definitions and allowable values of deviations relevant to corresponding flanks of gear teeth. **ISO**, n. 1328-1, 1997.

WILLY, Hofler. **Apparatus for the measurement of gears and the like**. U.S. Patent n. 2,913,831, 24 nov. 1959

CMMXYZ, history of the CMM Disponível em: <https://blog.cmmxyz.com/blog/history-of-the-cmm> Acesso em: 02 de maio de 2019.