

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial

**ABORDAGEM PARA SOLUÇÃO DE UM
PROBLEMA METROLÓGICO NA INDÚSTRIA
- MEDIÇÃO DE ENGRENAGENS -**

**Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina
para obtenção do grau de Mestre em Metrologia**

Autor: Marcos Jorge Alves Gemaque, Eng.

Orientador: Prof. Gustavo Daniel Donatelli, Dr. Eng.

**Florianópolis
Santa Catarina – BRASIL
Março 2004**

ABORDAGEM PARA SOLUÇÃO DE UM PROBLEMA METROLÓGICO NA INDÚSTRIA - MEDIÇÃO DE ENGRENAGENS -

Marcos Jorge Alves Gemaque

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

“MESTRE EM METROLOGIA”

e aprovada na sua forma final pelo

Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial

Prof. Gustavo Daniel Donatelli, Dr. Eng.

ORIENTADOR

Prof. Marco Antônio Martins Cavaco, Ph. D.

COORDENADOR DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

BANCA EXAMINADORA

Prof. Carlos Alberto Schneider, Dr. Eng.

Prof. Celso Luiz Nickel Veiga, Dr. Eng.

Prof. Luis Humberto Sánchez Troncoso, Dr. Eng.

**Leandro de Souza Santos, Eng.
Irmãos Zen S/A**

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho apenas foi possível graças à contribuição de algumas instituições e pessoas, as quais expresso meus sinceros agradecimentos.

As instituições em ordem de contato: CTA, UFSC, FUNDAÇÃO CERTI, LABMETRO, IRMÃOS ZEN E EMBRAER.

Aos professores do Pós-MCI que me orientaram e me ajudaram na busca do conhecimento:

Carlos Alberto Schneider, Gustavo Daniel Donatelli, Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Carlos Alberto Flesch e Marco Antônio Martins Cavaco.

A Irmãos ZEN, em todo seu corpo de funcionários, em particular ao facilitador Eng. Leandro de Souza Santos e aos técnicos do laboratório de Metrologia, Srs. Jairo e Jair, que me deram todo apoio na coleta de informações sem as quais não seria possível a concretização desta dissertação.

Especial agradecimento faço ao meu orientador: Dr. Donatelli. A nossa convivência me trouxe muitos ensinamentos, de tal forma que com ele aprendi resolver problemas metrológicos a partir de sua dedicação e paciência. Fica expresso o meu mais profundo respeito e admiração.

A todos os meus amigos que deixei em Florianópolis e que também tomaram os seus caminhos sentirei muitas saudades por todos os momentos.

Ao grupo de amigos que esteve sempre presente em reuniões, debates, momentos alegres e tristes: Janaina Helena, César, Luciana, Marcão, Paulo Gustavo, Maria Izabel, Cristiano, etc. Sinto e sentirei sempre muita falta de vocês.

E pra finalizar o meu mais profundo e infinito agradecimento ao criador do universo, por me guiar e me dar força em todas as fases da minha vida!.

RESUMO

Muitos problemas de qualidade têm sua origem em uma situação não ideal da metrologia na empresa. Infelizmente, alinhar a capacidade metrológica da empresa, em termos de meios de medição e recursos humanos, com o requerido para atender as necessidades da produção e da qualidade não é tarefa fácil. Nesta dissertação, propõe-se a aplicação de uma sistemática para solução de problemas metrológicos industriais, baseada na seguinte seqüência de ações: a) realização de uma análise crítica das necessidades de medição, (b) análise dos meios de medição e inspeção disponíveis na empresa, (c) racionalização das necessidades com os meios, (d) tomada de decisão sobre revitalização dos meios existentes ou aquisição de novos meios, (e) definição do modo de exploração da solução e as responsabilidades de execução e (f) implementação da solução.

Esta sistemática foi aplicada no âmbito de uma empresa média do ramo metal-mecânico, para melhorar a capacidade existente dedicada à medição de engrenagens de dentes retos e estrias com foco no controle geométrico, durante as diferentes etapas do ciclo de vida das peças e das ferramentas associadas. Após a caracterização da necessidade, avaliaram-se comparativamente diversas alternativas de solução, tais como: a revitalização de uma máquina de medir por coordenadas já existente, a aquisição de uma nova máquina de medir por coordenadas ou de uma máquina específica de medição de engrenagens e a contratação de um serviço de medição terceirizado.

Este projeto foi realizado no escopo do programa DECAM - Desenvolvimento de Soluções Baseadas em Conhecimentos Avançados de Metrologia, auspiciado pelo Ministério da Ciência e Tecnologia, através do Fundo Verde Amarelo, com o intuito de fortalecer também a interação Universidade-Indústria.

Palavras chaves: gestão da metrologia, medição por coordenadas, engrenagens.

ABSTRACT

Many problems of quality have its origin in a not ideal situation of the metrology in the company. Unfortunately to align metrological capacity of the company, in terms of ways of measurement and human resources, with the required to assist production necessities and the quality is not easy task. In this dissertation, suggest application of systematic for solution of problems metrological industrials, based in following sequence of action: (a) accomplishment of a critical analysis of the measurement necessities (b) analysis of ways of measurement and inspection available in the company, (c) integration of ways necessities, (d) take of decision about the up grade of the existing ways or acquisition of new ways, (e) definition in the way of exploration of the solution and the responsibilities of execution and (f) implementation of the solution.

This systematic was applied in the scope of an average company of the branch mechanical metal, to improve the existing capacity to the measurement of straight tooth gears and with focus in the geometric control, during the different stages of the cycle of the life of the parts and the tools associates. After the characterization of the necessity, had comparatively evaluated if diverse alternatives of solution, such as: the up grade of a machine to measure for coordinate already existing, the acquisition of a new specific machine of measurement of gears and the act of contract of others service of measurement

This project was carried through in the target of program DECAM - Development of Solutions Based on Advanced Knowledge of Metrology, augured for the Ministry of Science and Technology with intention to fortify the interaction University Industry

Keys words: management of the metrology, measurement for coordinates, gears.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	12
INTRODUÇÃO	12
1.1. Identificação, caracterização e solução de problemas metrológicos na indústria	13
1.2. A empresa parceira	16
1.3. Os produtos e processos	17
1.4. Objetivos desta dissertação	22
1.5. Explicação do conceito solução e descrição dos conteúdos da dissertação	24
CAPÍTULO 2	26
TECNOLOGIA DE ENGRENAGENS: UMA VISÃO METROLÓGICA	26
2.1. As engrenagens na tecnologia mecânica moderna: tipos, aplicações e requisitos	26
2.2. Cinemática de engrenagens	29
2.2.1. Lei geral do engrenamento	29
2.2.2. O perfil evolvente: propriedades e condições para um engrenamento eficaz	30
2.2.3. Correções de perfil e tipos de engrenamento	37
2.3. Fabricação de engrenagens cilíndricas de dentes retos	42
2.3.1. Usinagem com fresa módulo	42
2.3.2. Usinagem por geração	43
2.3.3. Conformação	46
2.3.4. Laminação	47
2.3.5. Brochamento	47
2.3.6. Eletroerosão à fio	47
2.4. Engrenagens da Irmãos Zen	48
CAPÍTULO 3	49
CONTROLE GEOMÉTRICO DE ENGRENAGENS	49
3.1. Normas para especificação de engrenagens	49
3.2. Especificação de engrenagens cilíndricas usando a norma ISO 1328 - 1/2	51
3.2.1. Parâmetros característicos	51
3.2.2. Grau de Qualidade	60
3.3. Medição de engrenagens	61
3.4. Considerações finais	85

CAPÍTULO 4	87
CARACTERIZAÇÃO DA NECESSIDADE DA EMPRESA	87
4.1. Caracterização das necessidades de medição	88
4.2. Análise dos meios de medição existentes na empresa	93
4.2.1. Descrição dos meios disponíveis e do ambiente de medição	93
4.2.2. Limitações operacionais	95
4.2.3. Avaliação metrológica preliminar dos meios disponíveis	97
4.3. Identificação das oportunidades de melhoria: o aumento da vida das ferramentas	101
4.3.1. Explicação do fenômeno de desgaste de ferramentas de conformação	101
4.4 Sumário e definição dos objetivos de melhoria	103
CAPÍTULO 5	106
SOLUÇÃO DO PROBLEMA	106
5.1. Descrição das estratégias de solução	106
5.2. Caderno de encargos	109
5.3. Identificação de fornecedores potenciais	112
5.4. Comparação de propostas	113
5.4.1. Comparação entre máquinas de medir por coordenadas	115
5.4.2. Equipamento específico /retrofitting da CMM-X versus CMM	120
5.4.3. Comparação com a alternativa terceirizada	121
5.6. Atividades de encerramento	121
CAPÍTULO 6	123
CONSIDERAÇÕES FINAIS E OPORTUNIDADES FUTURAS	123
6.1. Sobre os resultados alcançados para a empresa	123
6.2. Sobre a sistemática usada	126
6.3. Recomendações para trabalhos futuros	127
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	128

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Interação dos elementos envolvidos nos projetos DECAM.....	12
Figura 1.2 - Exemplos dos impulsores fabricados na Irmãos Zen.....	16
Figura 1.3 - Pinhão (a) e arraste (b) fabricados pelo processo de forjamento à frio..	18
Figura 1.4 - Matriz (a) e punção (b) para conformação do pinhão e do arraste.	19
Figura 1.5 - Estria helicoidal interna do arraste (a) e brocha associada (b).	20
Figura 1.6 - Gabarito para verificação do diâmetro mínimo da estria helicoidal interna.	20
Figura 1.7 - Catraca (a) e eixo (b) do max torque.	21
Figura 1.8 - Rolo de laminação.	21
Figura 1.9 - Estria interna reta (a) e punção de estria externa.	22
Figura 2.1 - Forma de engrenamento de dois corpos, rígidos e genéricos.	30
Figura 2.2 - Geração do perfil evolvente.	31
Figura 2.3 - Função evolvente.....	32
Figura 2.4 - Passo de base.	32
Figura 2.5 - Reta de ação.....	33
Figura 2.6 - Relação de transmissão.....	35
Figura 2.7 - Fenômeno de interferência.	37
Figura 2.8 - Geração do perfil evolvente.	38
Figura 2.9 - Correção positiva de perfil.	40
Figura 2.10 - Correção negativa de perfil.	40
Figura 2.11 - Correções positiva e negativa atuando conjuntamente.....	41
Figura 2.12 - Fresa módulo para a usinagem de engrenagens.....	43
Figura 2.13 - Geração com cremalheira de corte.....	44
Figura 2.14 - Geração com fresa caracol.	45
Figura 2.15 - Engrenagem de corte.....	46
Figura 3.1 - Passo das engrenagens.	53
Figura 3.2 - Desvio de perfil.	54
Figura 3.3 - Desvios de perfil segundo ISO 1328-1.....	55
Figura 3.4 - Desvio da linha de flanco.	55

Figura 3.5 - Desvios da linha de flanco segundo ISO 1328-1.	56
Figura 3.6 - Erro de concentricidade.	57
Figura 3.7 - Batimento radial.	58
Figura 3.8 - Resultado do desvio composto tangencial.	59
Figura 3.9 - Resultado do desvio composto radial.	60
Figura 3.10 - Verificação do passo de base.	63
Figura 3.11 - Micrômetro de disco.	64
Figura 3.12 - Calibre de cursor duplo.	65
Figura 3.13 - Projetor de perfil.	65
Figura 3.14 - Instrumento de reprodução de perfil evolvente.	66
Figura 3.15 - Esfera calibrada.	67
Figura 3.16 - CMM equipada com uma mesa rotativa (Zeiss ZMC 550).	68
Figura 3.17 - Vista superior (a) e frontal (b) da medição do batimento.	69
Figura 3. 18 - Vista frontal (a) e superior (b) da medição do perfil.	70
Figura 3.19 - Apalpadores para a medição de engrenagens de dentes externos.	70
Figura 3.20 - Alinhamento pelos flancos dos dentes da engrenagem.	72
Figura 3.21 - Diagrama de desvio de passo individual.	74
Figura 3.22 - Diagrama de desvio de passo acumulado e total.	75
Figura 3.23 - Desvio de perfil.	77
Figura 3.24 - Desvio da linha de flanco.	78
Figura 3.25 - Máquina específica para medição de engrenagens.	81
Figura 3.26 - Engrenômetro para medição dos desvios de conjunto.	82
Figura 3.27 - Desvio composto tangencial.	83
Figura 3.28 - Desvio composto radial.	84
Figura 4.1 - Fluxograma das tarefas de medição para o mercado original.	90
Figura 4.2 - Fluxograma das tarefas de medição para o mercado de reposição.	91
Figura 4.3 - Instrumentação do laboratório de medição por coordenadas.	94
Figura 4.4 - Cartas de média e amplitude para 10 engrenagens (R&R).	98
Figura 4.5 - Cartas de média e amplitude em um estudo EMP.	99
Figura 4.6 - Gráficos de tendência e inconsistência do operador.	99
Figura 4.7 - Cartas de média e amplitude sem as engrenagens 7 e 8 (R&R%).	100

Figura 4.8 - Tolerância da ferramenta versus tolerância da peça.	102
Figura 5.1 - Soluções alternativas.	108
Figura 5.2 - Características de uma matriz de conformação de pinhão de arraste, contidas no caderno de encargos.	110
Figura 5.3 - Características do corpo do arraste, contidas no caderno de encargos.	110
Figura 5.4 - Critérios de desempenho da matriz de decisão.	119

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Valores limites da relação de dentes do pinhão e da coroa para evitar a interferência no engrenamento zero.....	39
Tabela 3.1 - Lista de normas associadas à tolerância geométrica de engrenagens cilíndricas de dentes retos.....	50
Tabela 3.2 - Grau de qualidade para o desvio de perfil.....	61
Tabela 4.1 - Tempos totais de medição para o mercado original (MO) e de reposição (MR) em horas.	92
Tabela 5.1 - Comparação entre a aquisição e/ou atualização de equipamento para fazer as medições na empresa e a contratação de serviços de terceiros.	107

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A melhoria do grau de inovação e da qualidade de produtos e processos industriais brasileiros é uma das metas do Ministério da Ciência e Tecnologia, que tem fomentado o desenvolvimento de soluções baseadas em conhecimentos avançados de metrologia para este fim, a partir dos projetos DECAM - Desenvolvimento de Soluções Baseadas em Conhecimentos Avançados de Metrologia para Processos e Produtos Industriais Inovadores.

Neste contexto, o Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial da Universidade Federal de Santa Catarina tem se inserido no âmbito das indústrias, com a finalidade de fornecimento de conhecimento tecnológico para solução de problemas metrológicos, permitindo que a empresa parceira se coloque em posição de destaque no contexto nacional e internacional. A implementação das atividades se dá pela interação de alguns representantes, figura 1.1. De um lado há a presença do facilitador da empresa e do outro o orientador da universidade, os quais a partir de uma definição consensual definem os campos de atuação para solução dos problemas metrológicos que são consolidados na forma de um projeto.



Figura 1.1 - Interação dos elementos envolvidos nos projetos DECAM.

1.1. Identificação, caracterização e solução de problemas metrológicos na indústria

A identificação dos problemas metrológicos na indústria não é uma tarefa simples, pois envolve toda uma conjuntura que deverá estar comprometida para este fim. Deste ponto de vista, o reconhecimento da fragilidade de determinado processo é ponto crucial para início das atividades de melhoria, a qual pode se expressar através de:

- Definições diferentes sobre o que é necessário medir para garantir a qualidade do produto;
- Não atendimento dos requisitos metrológicos dos sistemas da qualidade (ISO 9000, ISO/TS 16949, dentre outras), gerando não-conformidades em auditorias dos clientes ou de terceira parte;
- Excessivos custos de falha interna (retrabalho ou refugo);
- Conflitos na avaliação de conformidade, quando a empresa e seus clientes não têm o mesmo parecer sobre a conformidade de itens medidos; e
- Dificuldades no controle dos processos críticos, gerando diminuição da capacidade dos mesmos.

Algumas das possíveis causas destes problemas podem ser:

- Falta de capacidade de medição, devido a uma incerteza maior que a requerida, para eficaz realização da tarefa.
- Falta de produtividade devido a meios de medição saturados, causando omissões de operações de medição necessárias ou liberação de lotes de produção antes do controle da qualidade.
- Falta de capacidade técnica e deficiente formação de Recursos Humanos para soluções dos problemas metrologicos.

Assim, o quadro caracterizado é péssimo do ponto de vista da redução da receita da empresa e de perda do desenvolvimento tecnológico que a empresa poderia alavancar na sua região, e no Brasil. A metrologia, portanto, quando aplicada de forma adequada agrega valor nos mais diferentes níveis e contribui para o crescimento do país.

A forma de agir para a solução dos problemas metrológicos requer bom senso aliada ao conhecimento tecnológico. A metodologia utilizada neste trabalho se baseia nas idéias de Raul Wuo [1], onde conceitos de concepção, gestão, investimento, relação qualidade/metrologia e capacitação de recursos humanos são aplicados para melhor proveito da metrologia como elemento agregador de valor. A seguir serão apresentadas as etapas desta metodologia para melhor elucidação da proposta.

1. Realizar uma análise crítica das necessidades de medição

Uma análise crítica das necessidades surge da realidade da empresa frente à demanda do mercado consumidor. O que, para que, onde, como, quando e quanto medir são perguntas a serem avaliadas para atendimento das necessidades dos clientes. Em muitas empresas alguns clientes, por serem os mais diferenciados, apresentam características metrológicas específicas para o produto.

2. Analisar os meios de medição e inspeção disponíveis na empresa

O levantamento dos meios metrológicos existentes é uma tarefa de grande importância, pois se pode detectar nesta fase a presença de equipamentos obsoletos ou sub-utilizados. Se o sistema de medição atual é adequado para atender a demanda de mercado, ou se é necessária a aquisição de novos meios, é uma atividade que depende não apenas de uma decisão técnica, mas também de uma decisão à nível gerencial (política da empresa), para apontar o rumo a tomar.

3. Integrar necessidades com os meios

A tarefa seguinte será adequar os meios existentes às necessidades da garantia da qualidade. Esta tarefa pode tomar grandes proporções, pois dependendo dos parâmetros a serem medidos e dos meios disponíveis, uma combinação extensa pode ser obtida. O maior objetivo nesta fase é poder se tirar o máximo de rendimento de cada meio de medição.

4. Tomar decisões sobre revitalização de meios existentes ou aquisição de novos meios

A partir do item anterior, pode não ocorrer a solução do problema metrológico com os meios disponíveis na empresa. Dependendo da política da empresa, poder-se-á fazer a compra de um novo equipamento, revitalizar um equipamento existente ou até mesmo terceirizar as medições.

5. Definir o modo de utilização dos meios de medição e as responsabilidades correspondentes

A definição da forma de utilização dos meios de medição pode tomar duas vertentes: localizada ou compartilhada. Quando utilizados de forma localizada, é desejável que se faça uso dos mesmos de forma integral para se extrair ao máximo a sua capacidade. Por outro lado, ao utilizá-los de forma compartilhada, faz-se mister que haja um controle e regras de utilização, para que o meio não fique ocioso e se obtenha também, a máxima capacidade.

6. Consolidar o plano de negócios e implementar a solução

Ao se optar por determinado meio de medição, todas as exigências com relação aos critérios metrológicos negociados durante os contatos preliminares, por exemplo, se a garantia de manutenção do meio de

medição foi estabelecida, é natural que isso seja pactuado em contrato, caso contrário a implementação da solução ficará deficitária.

A seguir, serão descritos as principais características da empresa parceira e os seus produtos e processos, para que se entenda o tipo de mercado em que a mesma está inserida, e se verifique sua potencialidade.

1.2. A empresa parceira

A Irmãos Zen está localizada na cidade de Brusque no estado de Santa Catarina, possui aproximadamente 32.000 m² de área construída e um efetivo de 900 funcionários. A principal linha de produtos da Irmãos Zen é a de Impulsores de Partida, figura 1.2. São mais de 1000 modelos diferentes, utilizados no mundo inteiro e em diversas aplicações como automóveis, caminhões, motocicletas e embarcações. Também, para o mercado de autopeças, a Irmãos Zen fabrica produtos como mancais e polias para motores de partida/alternadores. Atualmente, as exportações representam 78% das vendas da empresa destinadas a mais de 50 países nos cinco continentes. A maior concentração de vendas, 50% do faturamento total, é para o mercado norte americano [2].



Figura 1.2 - Exemplos dos impulsores fabricados na Irmãos Zen.

A empresa é certificada pela ISO/TS 16949 e ISO 9001 [3], que comprova o padrão de qualidade de seus produtos em conformidade com a indústria automobilística mundial, padrão que também é transferido para os produtos destinados ao mercado de reposição.

Na busca do aperfeiçoamento contínuo de produtos e processos, a Irmãos Zen investe na pesquisa, através de acordos com a Universidade Federal de Santa Catarina e instituições da Alemanha, em novas tecnologias de materiais, processos de fabricação e análise de mercado, o que resulta em redução de custos, aumento de capacidade de produção e desenvolvimento de pessoal e da região.

De fato, algumas oportunidades de melhoria de cunho metrológico permeiam o processo de produção da Irmãos Zen, daí a busca pela melhoria através da parceria com o Pós-MCI, para o desenvolvimento de soluções baseadas em conhecimentos avançados de metrologia para processos e produtos industriais. A aplicação da metodologia proposta visa este desenvolvimento e motiva este trabalho de dissertação.

1.3. Os produtos e processos

No planejamento de realização do produto são desenvolvidos os processos de conformação, usinagem, tratamento térmico e superficial, injeção de termoplástico e alumínio, conforme as especificações definidas pelo cliente ou pela engenharia de produtos Irmãos Zen. Aliado ao processo de desenvolvimento do produto, a Irmãos Zen dispõe de laboratórios de testes para avaliação e acompanhamento de performance. O departamento de compras desenvolve e qualifica fornecedores, visando promover um relacionamento que assegure o desenvolvimento mútuo [2].

A seguir far-se-á uma breve descrição das principais peças que compõem o impulsor de partida e as ferramentas utilizadas para sua fabricação. Inicialmente, na figura 1.3 (a) e (b), têm-se um pinhão e um arraste, respectivamente, fabricados pelo processo de forjamento à frio.

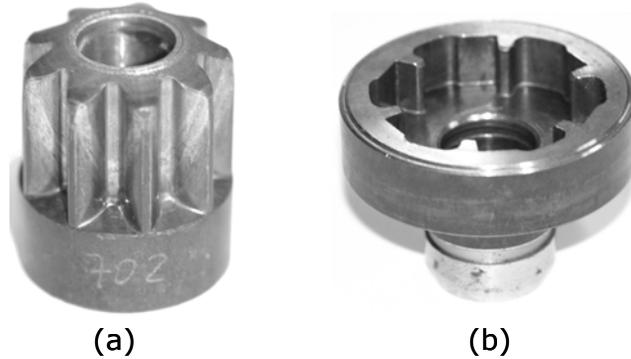


Figura 1.3 - Pinhão (a) e arraste (b) fabricados pelo processo de forjamento à frio.

Para obtenção dos pinhões e arrastes, há uma integração entre os processos de forjamento, recozimento¹ e fosfatização² [4] [5], que permitem que as peças sejam forjadas em prensas hidráulicas e mecânicas com capacidade de até 6 MN de força, em um número menor de etapas que garantam alta produtividade, qualidade do produto e a integridade do aço.

Após a conformação, o pinhão e o arraste, como peças semi-acabadas são encaminhados para a usinagem, onde ganham a forma final. Após a usinagem, as peças passam por um tratamento termo-químico em fornos de atmosfera controlada, para adquirirem a resistência necessária para suportar os esforços a que serão submetidos.

Os pinhões que integram os impulsores de partida possuem de 8 a 61 dentes com perfis evolventes, quantidade que varia diretamente com o tipo de aplicação.

O arraste possui um perfil complexo obtido empiricamente. Para seu projeto foram utilizados como referência, informações que avaliaram a necessidade do cliente e modelos matemáticos como elementos finitos. Atualmente o perfil é totalmente mapeado, e se divide em regiões com perfil em forma de hélice, seções retas e curvaturas com raios pequenos.

¹Recozimento: Processo aplicado para se diminuir a dureza das peças metálicas, com a finalidade de facilitar sua conformação

² Fosfatização: Processo utilizado com a finalidade de adequar a superfície metálica à conformação.

As ferramentas associadas à fabricação dos pinhões e do arraste são: matriz de conformação e punção do arraste, figura 1.4 (a) e (b).

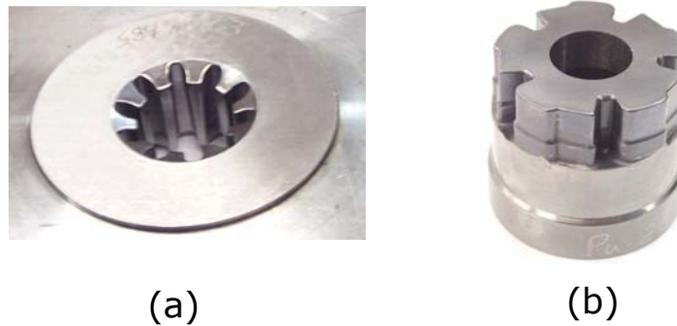


Figura 1.4 - Matriz (a) e punção (b) para conformação do pinhão e do arraste.

A matriz de conformação do pinhão, atualmente, é fabricada pela própria Irmãos Zen através do processo de eletroerosão à fio [6] que possui como grande vantagem a versatilidade. A matriz com perfil evolvente, no ato da conformação, repassa estas características metrológicas para o pinhão. Portanto, para se controlar as dimensões do pinhão, faz-se mister o controle da matriz, tanto antes da liberação inicial quanto durante o uso, para se avaliar os efeitos do desgaste.

O punção de arraste também é fabricado pelo processo de eletroerosão, tanto à fio como por penetração. Na eletroerosão à fio é fabricado um eletrodo que apresenta o mesmo perfil complexo do punção. Este por sua vez é utilizado para fabricar o punção propriamente dito pelo processo de eletroerosão por penetração. Da mesma forma que se obtém um controle dimensional mais exato na matriz de conformação, no caso do punção do arraste, se tem as mesmas características para o controle dimensional.

Ainda com relação ao arraste, o mesmo possui estrias helicoidais internas obtidas pelo processo de brochamento. Assim, para se ter uma estria helicoidal interna dentro de uma tolerância diametral máxima especificada, faz-se necessário se ter o controle dimensional da brocha. Na figura 1.5 (a) e (b), têm-se uma visão das estrias helicoidais internas e a brocha utilizada na sua fabricação, respectivamente.

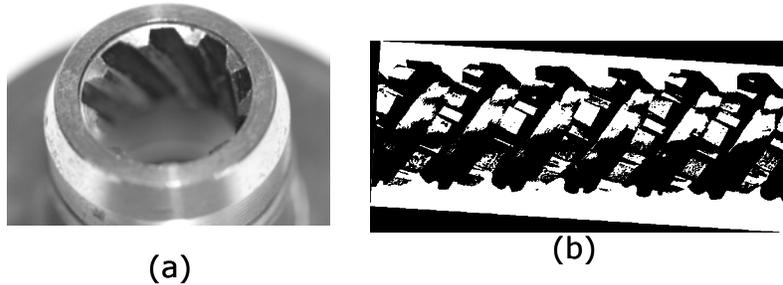


Figura 1.5 - Estria helicoidal interna do arraste (a) e brocha associada (b).

Os setores de desenvolvimento e metrologia demandam grandes esforços com relação à qualidade dimensional da brocha, tendo duas maneiras para a sua obtenção. A primeira é através da compra direta da brocha, de fornecedores credenciados, que passa por processo de medição no recebimento. A segunda é através de desenvolvimento do projeto da brocha pelos engenheiros da área de Desenvolvimento da empresa, e sua fabricação na própria ferramentaria. O processo de fabricação de brochas é o de usinagem, utilizando uma retificadora CNC.

Com o tempo, a brocha passa a ter um desgaste por atrito, e para se ter o controle do diâmetro mínimo das estrias helicoidais do arraste, faz-se necessário a utilização de um calibrador passa-não-passa, comumente chamado de 'gabarito', figura 1.6. Sua função basicamente é verificar a tolerância diametral mínima que a estria pode ter. Em resumo, o diâmetro interno máximo da estria helicoidal interna é garantido pela brocha, enquanto que o diâmetro mínimo é garantido pelo gabarito.

O gabarito é fabricado pelo processo de usinagem, utilizando uma retificadora CNC. O processo é dominado pelos engenheiros da Irmãos Zen, possuindo, portanto, auto-suficiência neste tipo de processo de fabricação.



Figura 1.6 - Gabarito para verificação do diâmetro mínimo da estria helicoidal interna.

Existem também outras peças com geometrias complexas fabricadas na empresa. Na figura 1.7 (a) e (b), têm-se uma catraca e um eixo do max torque.



Figura 1.7 - Catraca (a) e eixo (b) do max torque.

A catraca do max torque possui grandes limitações com relação as suas medições, por apresentarem dentes serrados e raios pequenos entre os mesmos. O processo de obtenção é o de conformação associado ao de usinagem.

O eixo do max torque possui estrias helicoidais externas obtidas pelo processo de laminação, que por sua própria característica de processo gera um perfil evolvente. Daí, duas características importantes a serem avaliadas no eixo são o perfil evolvente e ângulo de hélice. Atualmente, para se garantir tais características, faz-se o controle dimensional do rolo de laminação. O rolo de laminação, figura 1.8, é obtido somente através de fornecedores credenciados e suas características metrológicas são verificadas no processo de recebimento, seguindo fluxograma específico para esta ação.



Figura 1.8 - Rolo de laminação.

Por último, são fabricadas pela empresa peças com estrias internas retas, sem perfil evolvente, figura 1.9 (a). Tal como a matriz de conformação a sua grande limitação é com relação ao acesso, que por possuir um comprimento longo torna difícil sua medição. Alternativamente, se realiza o seu controle dimensional a partir do controle dimensional do punção de conformação com estrias externas utilizado para sua conformação, figura 1.9 (b).

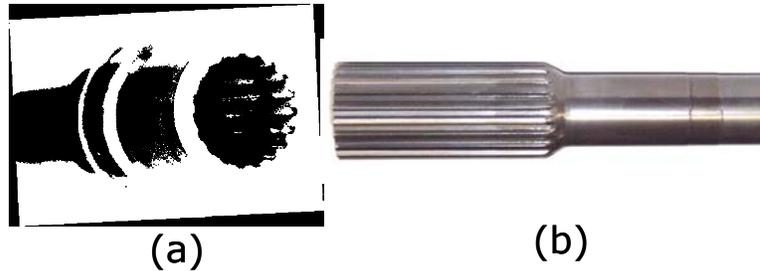


Figura 1.9 - Estria interna reta (a) e punção de estria externa.

Como se pode observar, os produtos da empresa se caracterizam pela presença marcante de geometrias que exigem o domínio de aspectos específicos da metrologia geométrica. Essa situação é ainda mais evidente quando se analisa a necessidade de caracterização das ferramentas de conformação e usinagem usadas para se obter essas geometrias.

1.4. Objetivos desta dissertação

De um ponto de vista geral, o propósito desta dissertação, inicialmente, culminava na melhoria da garantia da qualidade na fabricação de engrenagens cilíndricas e estrias de dentes retos e helicoidais no âmbito da Irmãos Zen, com foco no controle geométrico durante as diferentes etapas do ciclo de vida das peças e das ferramentas associadas. No entanto, na fase de identificação das necessidades observou-se que, com relação a aspectos de funcionalidade, as estrias de dentes retos e helicoidais possuíam importância secundária quando comparadas às engrenagens, e tratadas de forma mais superficial.

Ficou patente no início das atividades, a necessidade de diagnosticar a capacidade atual dos meios de medição dimensional da empresa. Alguns meios de medição não possuíam nenhuma evidência de falta de capacidade, mas havia outros que pareciam estar com esse quadro bem definido.

No decorrer do diagnóstico, entendeu-se que para a avaliação dos problemas seria necessário gerar, a um determinado grupo da empresa, um entendimento claro que auxiliasse na detecção dos problemas. As medições dos parâmetros geométricos de engrenagens são muito específicas e o entendimento do processo físico é fundamental para a percepção do que estaria ocorrendo. Ficou claro, também, que não apenas o setor de metrologia precisava deste conhecimento, mas também os setores de desenvolvimento e fabricação.

Deste conjunto de idéias visou-se fornecer uma solução técnica e economicamente ótima para a solução do problema, através de ferramentas de gestão. Uma sistemática adequada deveria ser avaliada para este fim.

Os objetivos específicos são, conseqüentemente:

- Diagnosticar a capacidade da Irmãos Zen para medir as geometrias de interesse e controlar a qualidade dos seus produtos e processos.
- Formação de recursos humanos da empresa para possibilitar a execução deste projeto e viabilizar futuros desenvolvimentos, sem precisar de contratação de assessoria externa no tema.
- Fornecer uma solução que permita melhorar o estado atual, alavancando o crescimento futuro dos negócios da Irmãos Zen.
- Avaliar as vantagens e desvantagens da sistemática empregada, evidenciando barreiras organizacionais que pudessem vir a dificultar sua utilização.

1.5. Explicação do conceito solução e descrição dos conteúdos da dissertação

Para concretização do roteiro de solução proposto, foram efetuadas ações junto aos diversos setores da Irmãos Zen, correspondentes ao conteúdo descrito nesta dissertação, para solução de problemas metrológicos na indústria.

Nos capítulos 2 e 3 são descritas informações sobre tecnologia e metrologia de engrenagens, respectivamente. O referido assunto foi incluído no corpo desta dissertação devido à sistemática proposta por Raul entender "... *Metrologia encarada como disciplina a ser dominada por todos os setores da empresa*". Assim, o conhecimento fornecido ao corpo técnico da Irmãos Zen, através de treinamentos, teve como intuito gerar uma base comum de entendimento entre os participantes da universidade e da empresa.

Os capítulos 4 e 5 tratam de gestão. Eles correspondem a um estudo de caso feito na empresa Irmãos Zen, e serão descritos a seguir.

O capítulo 4 trata dos dois primeiros tópicos da proposta de sistemática: caracterização das necessidades da empresa e seus meios de medição disponíveis. Durante o conhecimento de produtos e processos, da empresa, descritos anteriormente, fez-se um levantamento de toda a instrumentação de medição dimensional do chão-de-fábrica e da instrumentação existente no laboratório de metrologia dimensional e de seu ambiente de medição.

Como a maior parte das medições críticas, objeto deste trabalho, eram realizadas numa CMM³, que será chamada no corpo deste trabalho de CMM-X, fez-se um levantamento dos tempos de medição neste equipamento, tanto para o mercado original quanto para o mercado de reposição, no período compreendido de março de 2002 a março de 2003, do qual se pode ter uma estimativa do custo das medições da CMM-X em um ano.

³ CMM: Máquina de Medir por Coordenada.

Continuando, existia evidência preliminar que a CMM-X possuía capacidade marginal de medição, a qual foi constatada com um estudo de repetitividade e reprodutibilidade e EMP⁴. Concomitantemente, realizou-se um levantamento de todas as suas limitações operacionais, onde as principais detectadas foram: impossibilidade de medição de determinados parâmetros ferramentas de conformação, problemas de estabelecimento do eixo de referência das engrenagens (o processo utilizado não é confiável), impossibilidade de medição de perfis helicoidais e baixa velocidade de medição no modo escaneamento.

No capítulo 5, após definição da necessidade de se adequar a metrologia com as necessidades impostas pelo mercado atual, delineou-se as possibilidades para a solução do problema das quais culminaram em: compra de uma nova CMM ou máquina específica para medir engrenagens, retrofitting da atual CMM-X da Irmãos Zen e terceirização das medições. Assim, foram efetuados contatos com diversas empresas fornecedoras destes produtos, sendo seus resultados comparados com as necessidades da empresa e repassados para a gerência da Irmãos Zen, para a tomada de decisão segundo sua visão gerencial.

A opção tomada foi pela compra de uma nova CMM, e tão logo ela esteja instalada dar-se-á continuidade as ações propostas.

⁴ EMP: Evaluating the Measurement Process

CAPÍTULO 2

TECNOLOGIA DE ENGRENAGENS: UMA VISÃO METROLÓGICA

O presente capítulo é uma compilação de aspectos fundamentais da tecnologia de engrenagens. Serão apresentados elementos básicos da cinemática de engrenagens cilíndricas de dentes retos e dos processos de fabricação comumente utilizados, que são considerados essenciais para o entendimento dos requisitos sobre a geometria dos perfis evolventes e, conseqüentemente, dos sistemas de medição e do controle da qualidade geométrica.

O estudo desta matéria responde à premissa de que “toda solução a um problema metrológico deve se basear num entendimento forte da função do componente a ser medido”. Sua inclusão como capítulo desta dissertação responde ao interesse de documentar o tema em forma completa e ordenada, para uso da empresa parceira, e também como referência para futuras dissertações e teses. Assim, os conceitos apresentados não se restringem somente aos tipos de engrenagens e processos usados na Irmãos Zen.

2.1. As engrenagens na tecnologia mecânica moderna: tipos, aplicações e requisitos

Existem inúmeras aplicações de engrenagens na transmissão de movimentos, por exemplo, em brinquedos, automóveis e veículos de carga, navios, aviões e helicópteros, máquinas ferramentas, dispositivos de controle e instrumentos de medição, todas usando engrenagens na transmissão de movimentos entre eixos

rotacionais e na conversão de movimentos de rotação em movimentos de translação (e vice versa) [7] [8].

A combinação de diversas variáveis define o tipo de engrenagem a utilizar e a qualidade geométrica necessária para uma determinada aplicação. Essas variáveis são: a velocidade de rotação do eixo condutor, a posição geométrica relativa dos eixos no espaço (distância e ângulo), a potência a ser transmitida, a relação de transmissão, dentre outras [9].

Do ponto de vista da geometria global, as engrenagens podem ser classificadas em: cilíndricas, cônicas e hiperbolóidicas. Estas geometrias são obtidas pela rotação de uma reta ou curva geratriz, em torno do eixo central da engrenagem. Nesta ordem observa-se um aumento da complexidade tanto de projeto quanto de fabricação e, conseqüentemente, de medição [10] [11] [12] [13].

As engrenagens cilíndricas podem ser de dentes retos ou de dentes helicoidais [14] [15]. No primeiro caso, as engrenagens cilíndricas possuem seus dentes orientados segundo as geratrizes do cilindro, ou seja, na direção paralela ao eixo de transmissão. É consenso que as engrenagens cilíndricas de dentes retos são de mais fácil estudo, fabricação e medição em relação aos outros tipos de engrenagens. Possuem rendimento elevado pela ausência, quase que total, de deslizamento entre os flancos de dentes conjugados, não gerando cargas axiais nos mancais. No entanto, tendem a ser ruidosas em alta velocidade devido à existência de cargas de impacto, as quais limitam a velocidade de operação destas engrenagens e, conseqüentemente, seu campo de aplicação. Assim, estas são usadas na transmissão de potências pequenas e médias entre eixos paralelos que operam a baixa rotação (e.g. aplicações em brinquedos, engrenagens de marcha reversa em caixas de mudança de veículos, mecanismos de acionamento manual, etc.).

Nas engrenagens cilíndricas helicoidais os dentes se orientam segundo hélices cilíndricas de ângulos entre 5° e 45° . Normalmente são empregadas com eixos

paralelos, mas também são encontradas com eixos reversos. Os flancos dos dentes conjugados entram em contato de forma progressiva, pelo qual tem-se uma diminuição das cargas de impacto e, conseqüentemente, do ruído. Isso possibilita a sua aplicação em transmissões de alta velocidade, tais como caixas de mudança de marchas de veículos, máquinas ferramentas e turbinas. Pela sua geometria de contato, geram forças axiais nos mancais, os quais limitam sua aplicação para altas potências. Nestes casos, utiliza-se a engrenagem bi-helicoidal (i.e. tipo espinha de peixe ou Chevron), que por estar constituída de duas helicóides de ângulos iguais e opostos, neutraliza o empuxo axial.

As engrenagens cilíndricas de dentes retos e helicoidais podem operar na transmissão de movimentos de rotação ou na conversão de rotações em translações. No segundo caso, a transmissão fica constituída por uma engrenagem cilíndrica e uma cremalheira, que pode ser entendida também como uma engrenagem cilíndrica com raio infinito. Embora suas aplicações práticas sejam restritas (e.g. caixas de direção de automóveis, movimentos de máquinas ferramentas, relógios comparadores, etc.), a cremalheira apresenta grande importância no estudo cinemático e na fabricação de perfis evolventes, o que poderá ser melhor visualizado nas próximas seções.

As engrenagens com geometrias cônicas são usadas para transmissão entre eixos ortogonais ou concorrentes com ângulos distintos de 90° e exigem alta exatidão na fabricação e montagem para um adequado funcionamento. Seus dentes podem ser retos, helicoidais ou curvos (i.e. tipo Zerol). Engrenagens cônicas retas não devem ser utilizadas em altas velocidades.

As engrenagens com geometrias hiperbolóidicas possibilitam a transmissão entre eixos reversos. Permitem altas relações de transmissão, assim como possuem grande capacidade de carga. São extensivamente aplicadas em eixos de carros, caminhões e tratores.

Outro tipo de engrenagem que pode operar com eixos reversos é o denominado parafuso sem-fim, que embora não se enquadre na classificação mencionada anteriormente (caso especial) tem um grande valor prático. Transmissões compostas por um parafuso sem-fim e uma coroa helicoidal permitem atingir elevadas relações de transmissão e são, na maioria dos casos, irreversíveis. Aplicam-se, principalmente, para baixas velocidades de rotação no eixo de entrada (i.e. o eixo do sem-fim) e baixas potências, devido aos problemas de dissipação de calor decorrentes do seu baixo rendimento.

2.2. Cinemática de engrenagens

Nesta seção serão introduzidos os conceitos cinemáticos básicos que permitem entender o fenômeno de engrenamento e os princípios da transmissão do movimento de rotação entre eixos paralelos. Para maior simplicidade, todas as análises serão feitas considerando-se figuras planas.

2.2.1. Lei geral do engrenamento

A lei geral do engrenamento considera a relação entre as velocidades angulares ω_1 e ω_2 de dois corpos sólidos, rígidos e genéricos 1 e 2. Da figura 2.1, os pontos O_1 e O_2 são os centros de rotação e P é o ponto de contato entre os corpos que possui, em qualquer instante, uma reta perpendicular às suas superfícies de contato (n), denominada reta de ação, sobre a qual atuam as forças de contato. Sejam V_1 e V_2 os vetores velocidade, perpendiculares aos segmentos de retas que unem o ponto P e os centros O_1 e O_2 , respectivamente, a projeção dos vetores velocidade sobre a reta de ação define dois vetores iguais V_n . A partir de tal observação é fácil demonstrar que, se o corpo 1 gira com velocidade constante ω_1 e o ponto C, definido pela intercessão da reta de ação e do segmento de reta que une os centros de rotação, permanece fixo no espaço e no tempo, então o corpo 2 também sofrerá rotação com velocidade angular ω_2 constante. Esta constância da velocidade angular é importante na prática a fim de se evitar acelerações que provocam tanto variações na direção das forças de contato, quanto impactos e ruídos.

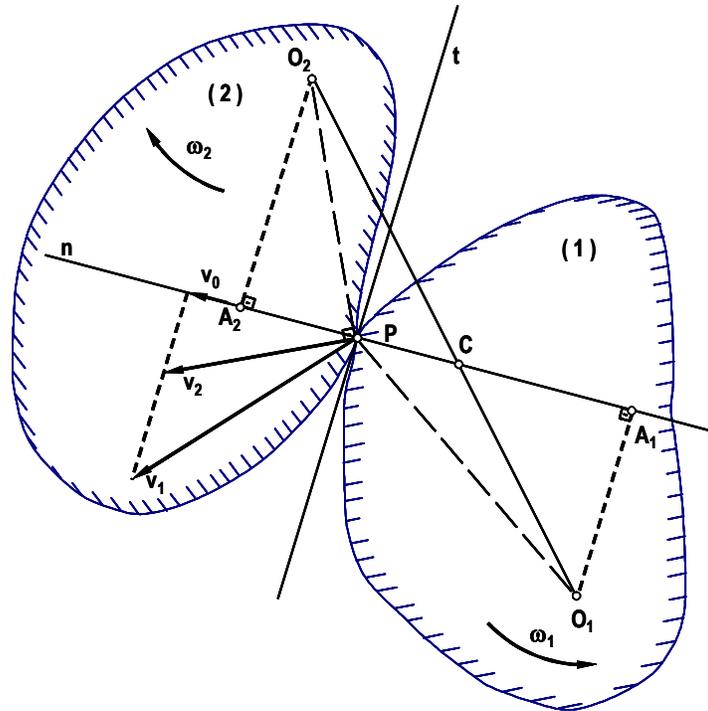


Figura 2.1 - Forma de engrenamento de dois corpos, rígidos e genéricos.

A imobilidade do ponto C com referência a O_1 e O_2 é um requisito fundamental da geometria dos perfis de engrenagens. Existem vários perfis que satisfazem tal requisito, entre eles o perfil evolvente [16].

2.2.2. O perfil evolvente: propriedades e condições para um engrenamento eficaz

Considerando-se o setor de circunferência da figura 2.2, o perfil evolvente é gerado a partir de uma reta tangente a uma circunferência denominada circunferência de base, caracterizada pelo seu raio de base (r_b). A referida reta, inicialmente tangencia a circunferência de base no ponto A e a partir de um determinado momento passa a rolar sem deslizamento sobre esta circunferência descrevendo no espaço, e nesta seqüência, os pontos A, 1', 2', 3' e A'. O perfil evolvente, corresponde, portanto, ao arco de perfil complexo AA' e equivale a uma das formas geométricas dos dentes das engrenagens [11][12][13][17]. Nota-se que ao ocorrer o rolamento sem deslizamento, as distâncias dos arcos, 1A, 2A, 3A e BA, são iguais aos segmentos

de retas 11', 22', 33' e BA', respectivamente. Essa igualdade corresponde a propriedade fundamental das evolventes.

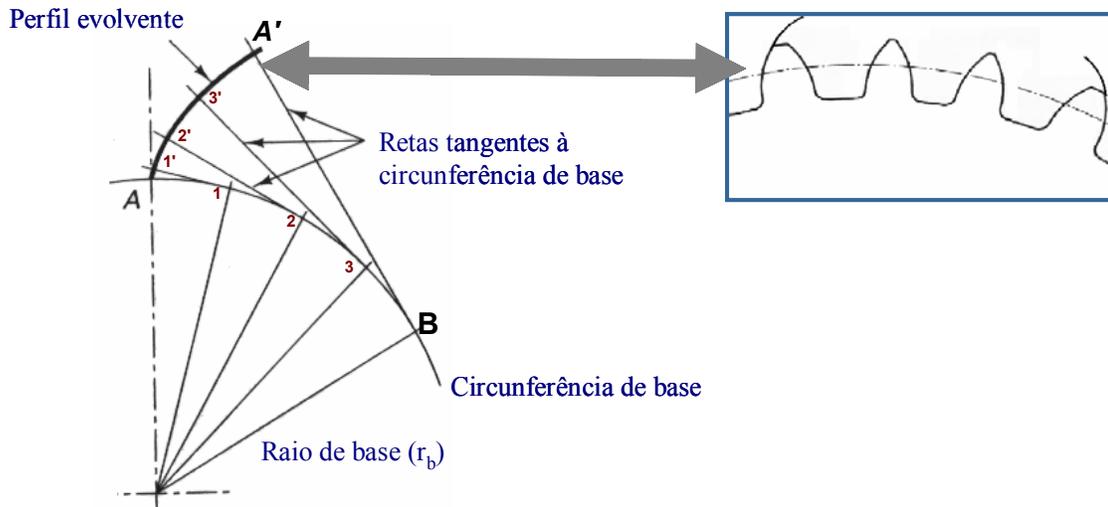


Figura 2.2 - Geração do perfil evolvente.

Ao se produzir o engrenamento entre a coroa (engrenagem maior) e o pinhão (engrenagem menor), figura 2.3, observa-se que a evolvente 1 gerada a partir da circunferência de base 1, no sentido da seta 1, se encontra com a evolvente 2 gerada a partir da circunferência de base 2, no sentido da seta 2. O referido encontro de funções se dá no ponto de contato P, dando origem a uma única função contínua.

Tal função possui um comportamento complexo e matematicamente é representada por: $\beta = ev_{\alpha} = tg(\alpha) - \alpha$ Sua importância é dada pelo fato que se consegue reproduzir o perfil evolvente ideal de forma a se comparar com os perfis reais gerados pelos diversos processos de fabricação.

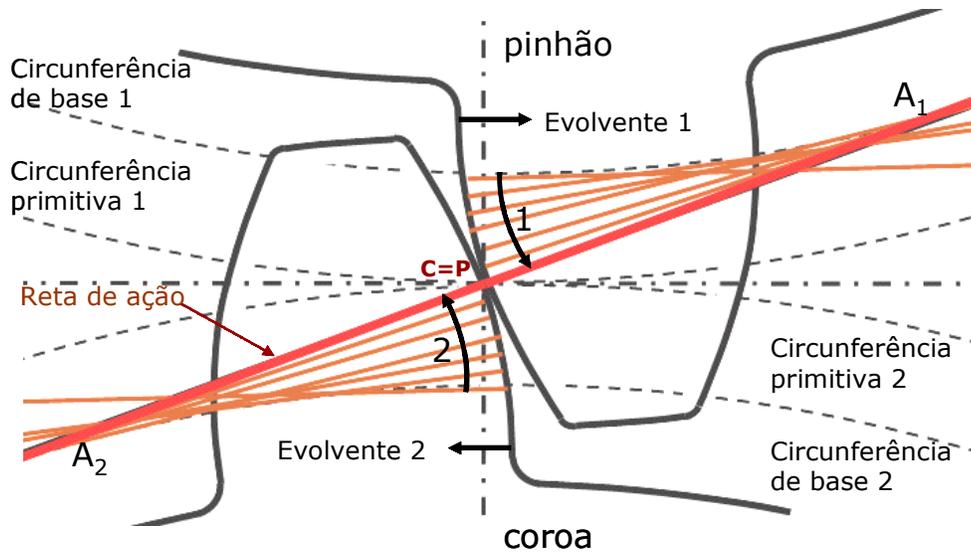


Figura 2.3 - Função evolvente.

Prova-se [12] que a continuidade das funções evolventes ocorre, se e somente se, os passos de base, figura 2.4, da coroa e do pinhão forem os mesmos, ou seja, a distância entre duas evolventes sobre a circunferência de base for a mesma para ambas as engrenagens.

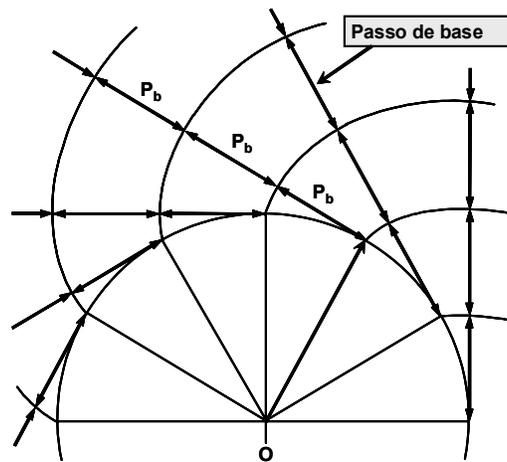


Figura 2.4 - Passo de base.

Obedecidas tais condições, observa-se que o ponto P de contato, figura 2.5, durante todo o engrenamento se desloca, de 1 para 3, sobre a reta de ação, que possui as seguintes características:

- é perpendicular aos perfis evolvente, no ponto de contato, da mesma forma que ocorre na lei geral de engrenamento;
- é tangente às circunferências de base de ambas as engrenagens;
- é invariante no plano; e
- corresponde ao lugar geométrico do ponto de contato durante todo o engrenamento.

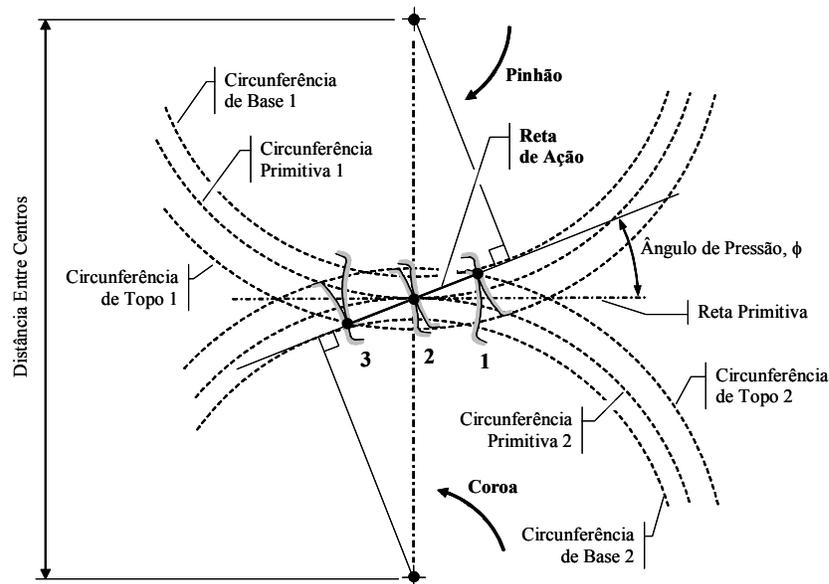


Figura 2.5 - Reta de ação.

Assumindo-se as engrenagens fixas nos seus respectivos centros de rotação e considerando-se a figura 2.3, pode-se definir o ponto C [18], agora denominado ponto primitivo, que corresponde à intersecção da reta de ação e a reta que une os centros das engrenagens. O ponto de contato P em determinado momento passará pelo ponto primitivo C e tal situação é a mostrada na referida figura. O ponto primitivo permanecerá invariante no espaço enquanto as seguintes características das engrenagens forem atendidas:

- os passos de base de ambas as engrenagens forem os mesmos; e
- os perfis das engrenagens sejam evolventes.

Como consequência de tais invariâncias defini-se uma característica fundamental e de grande emprego prático: o ângulo de pressão (α), que corresponde ao ângulo formado pela reta de ação e a reta perpendicular à reta que une os dois centros das engrenagens. O ângulo de pressão para o projetista é fator de determinação das cargas aplicadas nos flancos dos dentes⁵. A variação da posição do ponto C implica, portanto, na variação do ângulo de pressão e das forças atuantes nas superfícies das engrenagens.

Na figura 2.6, tem-se um engrenamento entre um pinhão (1) e uma coroa (2) que possuem suas respectivas funções evolventes 1 e 2. Da propriedade fundamental das engrenagens, em um primeiro momento, o arco B_1G sobre a circunferência de base do pinhão é igual ao segmento de reta B_1A_1 . Num momento posterior, o arco B_1F , também do pinhão, é igual ao segmento de reta B_1A_2 . Ao se fazer a diferença entre os segmentos de reta B_1A_2 e B_1A_1 , observa-se que o segmento de reta A_1A_2 é igual ao arco FG (passo de base 1). Utilizando-se o mesmo raciocínio para a coroa e admitindo que haja continuidade da função, verifica-se que o segmento de reta A_1A_2 também é igual ao arco DE da coroa (passo de base 2), ou seja, o par de engrenagens possuem passos iguais. Sendo o número de evolventes do pinhão e da coroa, numa dada direção, iguais a Z_1 e Z_2 , e do fato que o comprimento de uma circunferência genérica é igual a $2.\pi.r$, onde r , neste caso, é o raio de base r_b , tem-se que o produto do número de evolventes (Z_1) pelo passo de base 1 (FG) é igual ao comprimento da circunferência de base.

⁵ Flanco do dente: Área lateral do dente da engrenagem.

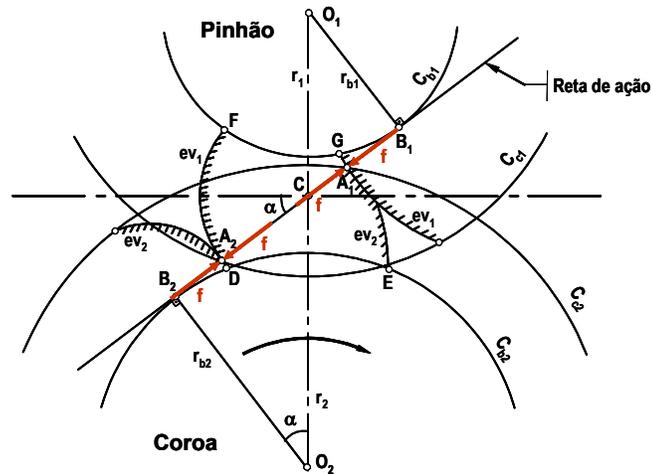


Figura 2.6 - Relação de transmissão.

Matematicamente:

$$Z_1 \cdot \overline{FG} = 2 \cdot \pi \cdot r_{b1} \quad (2.1)$$

$$Z_2 \cdot \overline{FG} = 2 \cdot \pi \cdot r_{b2} \quad (2.2)$$

Considerando-se a razão entre (2.1) e (2.2) e que FG é igual a DE, pode se concluir que:

$$Z_1/Z_2 = r_{b1}/r_{b2} \quad (2.3)$$

Para um determinado ângulo de pressão (α) e um determinado raio de base, defini-se um elemento característico de grande importância das engrenagens: a circunferência primitiva. Assim, da figura 2.6, verifica-se que $r_{b1} = r_1 \cdot \cos \alpha$ e $r_{b2} = r_2 \cdot \cos \alpha$, onde r_1 e r_2 são os raios das circunferências primitivas do pinhão e da coroa, respectivamente. Dividindo-se as equações entre si, tem-se:

$$r_1/r_2 = r_{b1}/r_{b2} \quad (2.4)$$

Da lei geral do engrenamento, as velocidades escalares de ambas as engrenagens sobre a reta de ação são iguais, naquela ocasião, denominada V_n . Como a reta de ação é tangente as circunferências de base, a razão entre essas velocidades e seus respectivos raios de base é igual as suas velocidades angulares ω_1 e ω_2 , ou seja:

$$r_1 / r_2 = (V_n / r_{b2}) / (V_n / r_{b1}) = \omega_2 / \omega_1 \quad (2.5)$$

tal qual a lei geral do engrenamento. Das equações (2.3), (2.4) e (2.5), tem-se por fim que:

$$\omega_2 / \omega_1 = Z_1 / Z_2 = r_{b1} / r_{b2} \quad (2.6)$$

que é a equação da relação de transmissão para engrenagens.

Nota-se então, que a relação de transmissão depende exclusivamente dos raios de base aos quais correspondem as duas curvas evolventes, independentemente, portanto, da distância entre centros O_1O_2 . Ao se deslocar os centros das duas engrenagens de modo que a distância passe a ser $O'_1O'_2$, ter-se-á um novo ponto primitivo C' e novas circunferências primitivas de raios r'_1 e r'_2 , tais que:

$$\omega_1 / \omega_2 = r'_2 / r'_1 \quad (2.7)$$

$$r'_1 + r'_2 = \overline{O'_1O'_2} \quad (2.8)$$

O ângulo de pressão que era α , tal que $\cos \alpha = r_{b1} / r_1$, passa a ser α' tal que:

$$\cos \alpha' = r_{b1} / r'_1 \quad (2.9)$$

Portanto:

$$\cos \alpha' = (r_1 / r'_1) \cos \alpha \quad (2.10)$$

Na equação (2.10), se evidencia que a circunferência primitiva e o ângulo de pressão não são característicos de um corpo com perfil evolvente, mas sim dependem dos dois corpos em contato e da distância entre os centros das engrenagens. Essa propriedade permite alterar o tipo de engrenamento, pela mudança do raio primitivo e do ângulo de pressão, sem alterar o raio de base [10][11][12].

2.2.3. Correções de perfil e tipos de engrenamento

Pode ocorrer que se tenha todas as condições possíveis para a constância do ponto C e se ter um engrenamento suave e contínuo. No entanto, pode acontecer que dependendo da relação entre os números de dentes do pinhão e da coroa, ocorra um fenômeno indesejável denominado interferência (figura 2.7) [19]. É sabido que o perfil evolvente se inicia na circunferência de base, e qualquer tentativa de engrenamento na região interna a esta circunferência acarretará na retirada de material do flanco do dente do pinhão pelo dente conjugado, acarretando em desgaste anormal e/ou ruptura dos dentes.

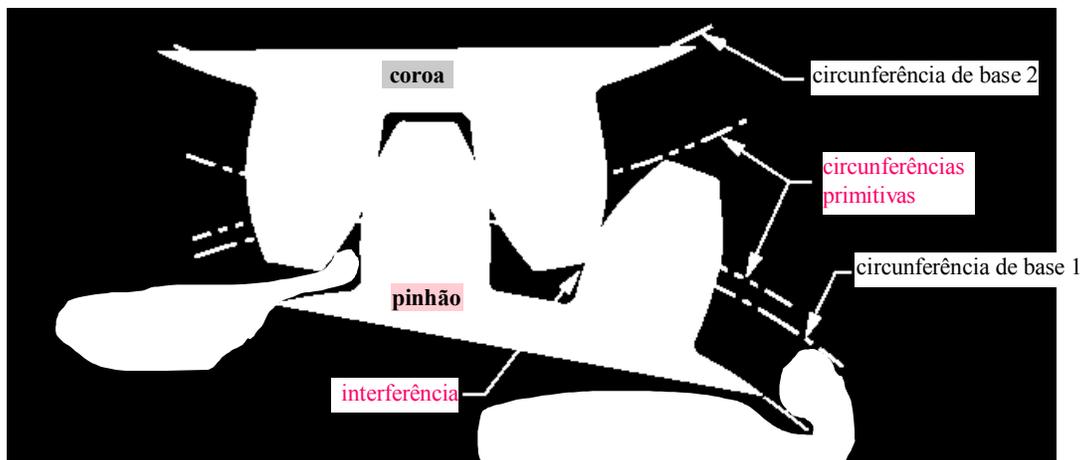


Figura 2.7 - Fenômeno de interferência.

A pior condição, no que diz respeito à interferência, se produz quando uma das engrenagens é uma cremalheira. Por isso, e por sua simplicidade geométrica, a cremalheira é usada como elemento de referência para estudo do processo de geração do perfil, imaginando-a como uma ferramenta que opera pelo princípio de

geração (i.e. ferramenta que corta o blanque⁶ enquanto reproduz o movimento de engrenamento). A cremalheira possui uma reta média que divide a altura dos seus dentes em duas partes iguais (figura 2.8). Ao se efetuar o engrenamento, que ocorre no ponto de contato, de tal forma que a reta média da ferramenta tangencie a circunferência primitiva do blanque que tem bem definido, por projeto, o seu diâmetro primitivo, defini-se uma reta da cremalheira denominada ‘reta primitiva’⁷. Na situação apresentada na figura 2.8, em que a reta primitiva coincide com a reta média, tem-se o denominado “engrenamento zero”.

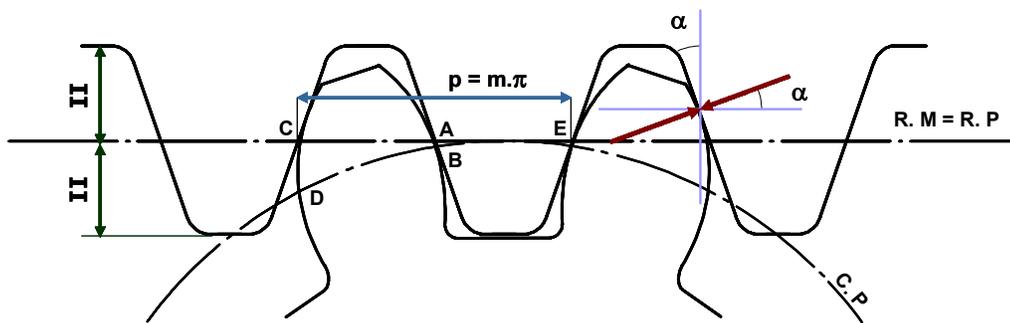


Figura 2.8 - Geração do perfil evolvente.

Como já foi antecipado, o engrenamento zero limita a relação entre os números de dentes do pinhão e da coroa, ou seja, a relação de transmissão. Prova-se que para se evitar interferência, deve-se obedecer a seguinte relação entre os números de dentes [10]:

$$z_2 \leq \frac{z_1^2 \operatorname{sen}^2 \alpha - 4}{4 - 2 \cdot z_1 \cdot \operatorname{sen}^2 \alpha} \quad (2.11)$$

onde Z_2 é número de dentes da coroa, Z_1 o número de dentes do pinhão e α o ângulo de pressão. A tabela 2.1 mostra algumas relações entre os números de dentes do pinhão e da coroa decorrentes da aplicação da equação (2.11).

⁶ Blanque: Corpo bruto e cilíndrico que tomará a forma de engrenagem após o processo de fabricação.

⁷ Reta primitiva: Similar a uma circunferência primitiva de raio infinito.

Tabela 2.1 - Valores limites da relação de dentes do pinhão e da coroa para evitar a interferência no engrenamento zero

α	Z_1/Z_2									
15°	21/22	22/27	23/34	24/44	25/58	26/80	27/117	28/195	29/456	30/ ∞
20°	13/16	14/26	15/45	16/101	17/1310	18/ ∞				

Assim, por exemplo, ao se efetuar um engrenamento de um pinhão com 13 dentes e ângulo de pressão de 20° , o número de dentes da coroa não deverá ser maior que 16 dentes, para se evitar interferência. No caso particular do engrenamento entre um pinhão e uma cremalheira, $Z_2 \rightarrow \infty$, a desigualdade (2.11) se reduz a:

$$z_1 \geq \frac{2}{\text{sen} \alpha^2} \quad (2.12)$$

Conforme se verifica na tabela 2.1, para um ângulo de pressão de 20° o número mínimo de dentes do pinhão que pode engrenar com uma cremalheira sem interferência, é 18 dentes.

Uma técnica de fabricação de engrenagens utilizada para se evitar interferência quando são violadas as condições estabelecidas pela equação 2.11, é a correção de perfil. Esta técnica permite alterar as proporções dos dentes das engrenagens, sem perder a constância da velocidade de transmissão característica dos perfis evolventes. Assim, por exemplo, fazendo uso da correção de perfil é possível que uma engrenagem com menos de 18 dentes engrene com uma cremalheira sem que ocorra o recorte dos dentes.

A correção pode ser positiva ou negativa. No primeiro caso, figura 2.9, a reta média da cremalheira se afasta do centro do blanque e, conseqüentemente, da reta primitiva de um valor igual ao deslocamento de perfil, que corresponde ao produto

do módulo⁸ (m) pelo seu coeficiente de correção de perfil⁹ (x) [20] [21]. Observar que a reta primitiva da cremalheira tangencia a circunferência primitiva de geração¹⁰ da engrenagem.

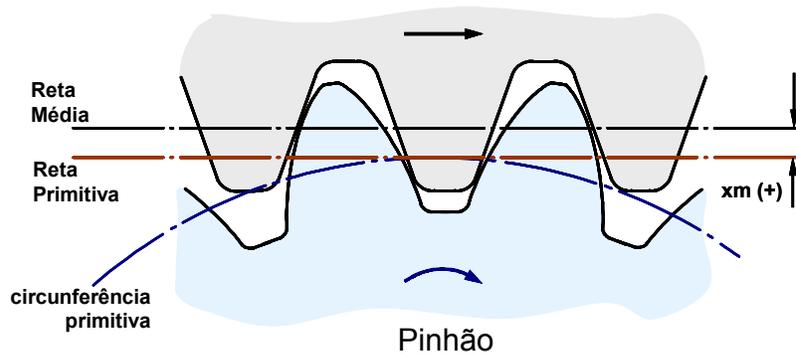


Figura 2.9 - Correção positiva de perfil.

No segundo caso, na correção negativa, figura 2.10, a reta média da cremalheira se aproxima do centro do blaque além da reta primitiva um valor igual ao deslocamento de perfil ($m.x$), já definido anteriormente. Neste caso, também a reta primitiva da cremalheira tangencia a circunferência primitiva de geração da engrenagem

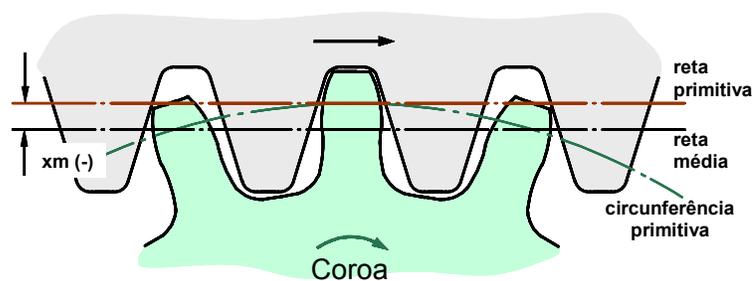


Figura 2.10 - Correção negativa de perfil.

⁸ Módulo: Característica da engrenagem definida pela razão do diâmetro primitivo e o respectivo número de dentes.

⁹ Coeficiente de correção de perfil (x); Parâmetro adimensional que indica a fração do módulo que a reta média se afasta da reta primitiva.

¹⁰ Circunferência primitiva de geração: Circunferência definida por projeto e se encontra afastada da reta média da cremalheira de um valor igual a $x.m$ (deslocamento de perfil). É tangente à reta primitiva da cremalheira.

Na figura 2.11, observa-se as duas circunferências primitivas de geração, do pinhão e da coroa, se tangenciando. Neste caso, diz-se que as referidas circunferências coincidem com as circunferências primitivas de funcionamento¹¹. Nota-se que a reta média é a mesma para o pinhão e coroa, pois a cremalheira no ato da fabricação se afastou de uma quantidade $x.m$ em relação ao centro do pinhão, e se aproximou da mesma quantidade para a coroa.

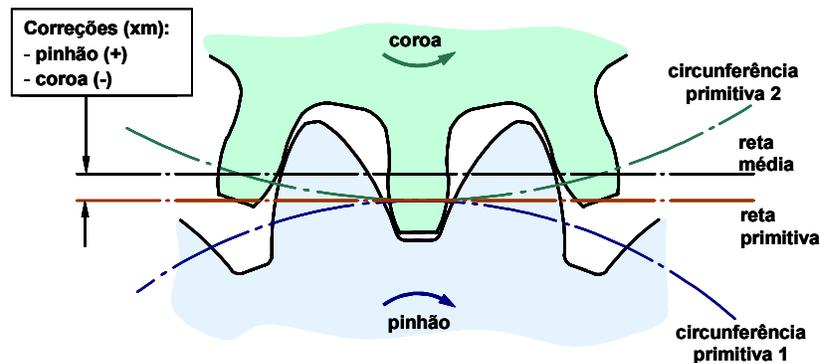


Figura 2.11 - Correções positiva e negativa atuando conjuntamente.

Da figura 2.11, tem-se que correções positivas de perfil, no pinhão, produzem um aumento de espessura do dente na raiz, melhorando-se com isso a sua resistência à flexão. O topo do dente se adelgaça, podendo, em casos extremos ficar pontiagudo. O efeito inverso ocorre ao se fazer uma correção negativa. Neste caso, ao se aproximar a ferramenta de corte de forma acentuada, ocorre a retirada de material da base do dente da engrenagem, diminuindo a resistência à flexão. Portanto, existe, um compromisso entre o quanto a ferramenta pode se aproximar ou se afastar sem comprometer a resistência dos dentes.

A forma de aplicação das correções de perfil determina dois tipos de engrenamento: o Vê-zero (V0) e o Vê (V). No engrenamento V0, os valores dos coeficientes de correção do perfil no pinhão e na coroa são do mesmo valor, mas de sinal oposto. Usualmente, o perfil dos dentes do pinhão recebe uma correção positiva e o da

¹¹ Circunferência primitiva de funcionamento: Circunferência funcional que passa pelo ponto primitivo C.

coroa uma correção negativa. Desta forma, pelo uso de pinhões menores, pode-se aumentar a relação de transmissão para uma determinada distância entre eixos, sem que exista interferência e preservando a resistência à flexão de seus dentes.

No engrenamento V as correções de perfis podem assumir quaisquer valores, de tal forma que a somatória de seus coeficientes de correção de perfil seja um valor diferente de zero. É possível provar [10][11][12] que se pode fazer um engrenamento com duas engrenagens que tenham sido fabricadas pela mesma ferramenta, ou seja, que possuam mesmo módulo e ângulo de pressão, resultando, no entanto, em um engrenamento com um outro módulo e ângulo de pressão para ambas as engrenagens. A grande vantagem deste tipo de engrenamento é justamente a possibilidade de variação entre os centros das engrenagens sem variação da relação de transmissão pois se mantêm a razão dos raios de base. Assim, ajusta-se a distância entre centros a valores pré-determinados, por exemplo, quando vários pares de engrenagens com diferentes relações de transmissão trabalham sobre o mesmo par de eixos.

2.3. Fabricação de engrenagens cilíndricas de dentes retos

Os mais diversos processos de fabricação de engrenagens existem no mercado, cada um com suas vantagens e desvantagens. No decorrer dos tempos, houve uma grande evolução dos processos de fabricação de engrenagens cilíndricas de dentes retos, sendo que métodos cada vez mais exatos tem sido apresentados. O que diferencia basicamente cada tipo de processo é: tipo de perfil a ser obtido, velocidade de fabricação, exatidão e custo. De uma forma bem sucinta, far-se-á uma exposição dos principais métodos de fabricação com suas vantagens e desvantagens.

2.3.1. Usinagem com fresa módulo

A fresa módulo é uma ferramenta de forma que se caracteriza por apresentar a mesma geometria do vão entre dois dentes adjacentes de uma engrenagem, figura

2.12 [11]. O fato de poder ser utilizada em uma fresadora comum, que possua um cabeçote divisor, torna este processo bastante utilizado em oficinas de manutenção.



Figura 2.12 - Fresa módulo para a usinagem de engrenagens.

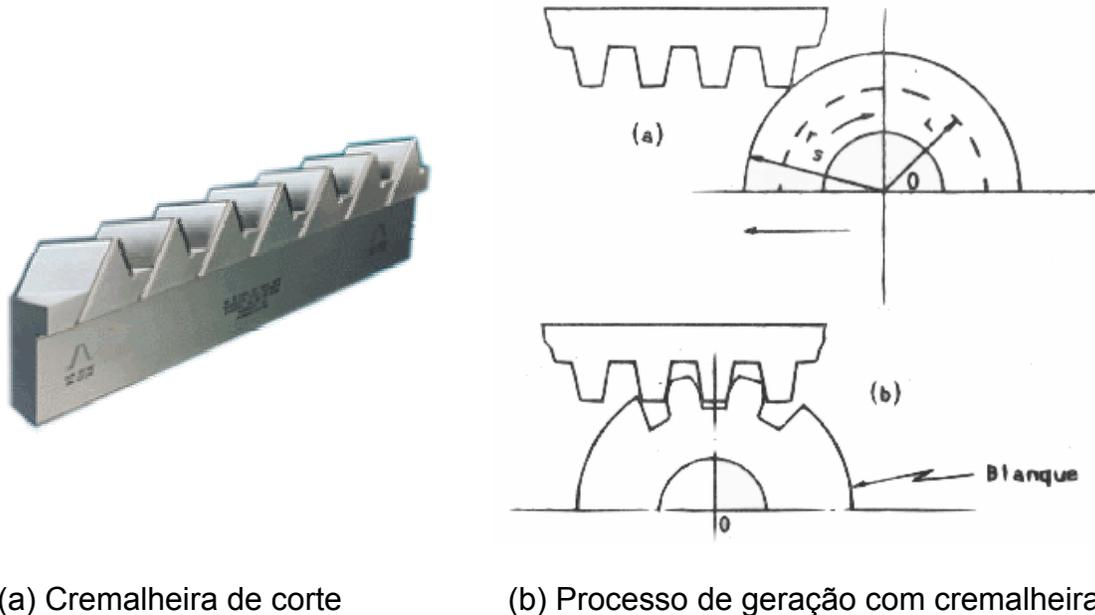
Por outro lado, o processo apresenta algumas limitações, sendo que as principais são: baixa velocidade de fabricação e o fato de que cada fresa padronizada reproduz o perfil do vão correspondente a um certo intervalo de número de dentes. Assim, por exemplo, a fresa identificada como N° 5 reproduz o perfil de uma engrenagem com 21 dentes com maior exatidão, mas é usada (recomendada) para engrenagens de até 25 dentes, que possuirá uma menor exatidão. Os erros de perfil decorrentes resultam em impactos e ruídos, pelos quais engrenagens usinadas com fresa módulo podem ser usadas somente com velocidades de rotação muito baixas.

2.3.2. Usinagem por geração

O processo de geração é capaz de reproduzir mais apuradamente o perfil de evolvente e de alcançar níveis de produtividade consistentes com as exigências do mercado atual. Durante a usinagem, a ferramenta, que possui a forma de uma engrenagem (pinhão, cremalheira ou sem-fim), e a engrenagem a usinar estão animados de movimentos relativos de engrenamento, comandados pela máquina geradora. Assim, uma engrenagem produzida por geração sofre o seu primeiro engrenamento durante o próprio processo de fabricação. Se a ferramenta tiver forma de cremalheira (ou sem-fim), esse engrenamento é o que determina a condição crítica de interferência. Por isso, as engrenagens obtidas por geração podem precisar de correções de perfil para serem fabricadas sem recorte. A seguir, uma breve descrição dos principais métodos de geração utilizados atualmente.

a) Cremalheira de corte ou sistema Maag

Do ponto de vista cinemático se trata de um engrenamento entre uma cremalheira de corte, figura 2.13 (a), e a engrenagem a fabricar [10]. Ocorrem dois movimentos simultâneos da cremalheira: um tangente ao blanque a ser usinado que gira com velocidade ω constante e sincronizado com a velocidade tangencial da cremalheira, figura 2.13 (b), outro no sentido de entrada do plano, onde ocorre a retirada de material.



(a) Cremalheira de corte

(b) Processo de geração com cremalheira

Figura 2.13 - Geração com cremalheira de corte.

Neste processo é possível se fazer todos os tipos de correções de perfil. Como já foi antecipado, é o tipo de ferramenta que provoca o máximo de adelgaçamento na raiz do dente, e conseqüentemente, as engrenagens usinadas por este processo não sofrerão interferência com nenhuma outra engrenagem. A usinagem com cremalheira de corte é usada principalmente para grandes peças, que precisam ser produzidas em lotes pequenos.

b) Fresa caracol (Hob) ou sistema Pfauter

Este processo usa uma ferramenta de corte com forma de parafuso-sem-fim, figura 2.14 (a) [22] [23]. A ferramenta entra em contato com o blanke, que possui velocidade de giro constante ω , e passa a se aproximar do centro do blanke até uma profundidade pré-definida. A partir daí, ocorre o deslocamento da ferramenta numa direção paralela ao eixo de rotação do blanke, até percorrer todo o flanco do dente, figura 2.14 (b) [10]. O processo se repete, com avances radiais sucessivos, até alcançar a profundidade do dente definida pelo projeto. Na fabricação de engrenagens cilíndricas de dentes retos, a ferramenta de corte deverá ser rotacionada de um ângulo igual ao seu ângulo de hélice. É um processo com boa exatidão, rápido e de grande aplicação industrial. Da mesma forma que a cremalheira de corte, consegue-se reproduzir qualquer deslocamento de perfil.



(a) Tipos de fresas caracol



(b) Processo de geração com fresa caracol

Figura 2.14 - Geração com fresa caracol.

c) Engrenagem de corte ou sistema Fellows

O sistema Fellows faz uso de uma engrenagem de corte que se assemelha às engrenagens comuns, exceto pelo fato de possuir gumes cortantes em uma de suas faces, figura 2.15 (a) [10]. A ferramenta entra em engrenamento realizando três movimentos sincronizados. O primeiro é de engrenamento propriamente dito entre o

blanque e a ferramenta, o outro é de um movimento alternado de sobe e desce em uma direção paralela ao eixo longitudinal do blanque que provoca a retirada de material, e o terceiro na direção do centro do blanque que permite se obter a profundidade do dente definida por projeto, figura 2.15 (b). Este processo também é muito exato, sendo sua principal vantagem a fabricação de dentes escalonados em uma mesma peça e também de dentes internos. Permite produção em larga escala e, como os processos anteriores, pode-se obter todos os tipos de correção de perfil.



(a) Tipos de engrenagens de corte



(b) Processo de geração com engrenagem de corte

Figura 2.15 - Engrenagem de corte.

2.3.3. Conformação

A conformação é um processo mecânico, onde a forma geométrica de uma matriz é repassada para a material a ser moldado através de grandes pressões externas ou internas. Ocorre escoamento de material e, conseqüentemente, encruamento do mesmo com aumento de dureza. A seguir será descrito brevemente um dos principais processos de conformação: o forjamento em matriz.

O forjamento em matriz é o processo de transformação dos materiais usando forças compressivas, em matriz aberta ou fechada, à quente ou à frio. Devido a grandes taxas de deformações envolvidas no forjamento, as operações são na grande

maioria dos casos realizados à quente. No entanto, seu controle dimensional se torna limitado sendo mais adequado o forjamento à frio para se ter um controle dimensional mais rigoroso. As forjas são equipamentos de grandes dimensões e seu custo é justificado pela produção elevada, além de permitir o mínimo de perda de material.

Este processo de fabricação repassa a forma geométrica da matriz para a peça que está sendo fabricada. Logo o controle geométrico e dimensional da matriz se torna de importância vital para a qualidade das engrenagens.

2.3.4. Laminação

A laminação é o processo de conformação mecânica por compressão contínua entre duas ou mais ferramentas rotativas. Aspectos como controle dimensional e aumento elevado da sua dureza devido ao encruamento do material são similares ao processo de forjamento. É importante se observar que o primeiro engrenamento se dá no ato da laminação e, portanto, qualquer falha geométrica no rolo de laminação será repassada para a engrenagem. Também repassada para a peça é a correção de perfil, que já deverá estar presente nos próprios rolos.

2.3.5. Brochamento

o brochamento é o processo de usinagem que provoca a retirada de material, de perfis internos retos ou helicoidais, de forma gradual através de três etapas: desbaste, pré-acabamento e acabamento final. Este último passo permite um rigoroso controle dimensional repassando a forma geométrica da brocha para o perfil gerado. Para evitar quebra da ferramenta é importante promover uma boa afiação e fornecer uma adequada saída de material.

2.3.6. Eletroerosão à fio

A eletroerosão é o processo baseado na retirada de partículas metálicas por meio de descargas elétricas para obtenção de peças e moldes de geometria complexa.

Divide-se em dois tipos: A eletroerosão à fio e a eletroerosão por penetração. A eletroerosão à fio faz uso de um sistema computacional que permite a obtenção com grande exatidão dos moldes de uma matriz de forjamento. O molde será utilizado no processo de eletroerosão por penetração, para a fabricação da matriz que possui, também, um elevado grau de exatidão. A matriz, assim obtida, é utilizada no forjamento de engrenagens que apresentará um alto grau de qualidade.

2.4. Engrenagens da Irmãos Zen

As engrenagens utilizadas nos impulsores de partida, foco deste trabalho, são cilíndricas de dentes retos. Caracterizam-se por operar durante intervalos curtos de tempo, sem lubrificação e muitas vezes em presença de sujeira. O tempo total de operação, ao longo da vida toda do veículo, é pequeno se comparado, por exemplo, com as engrenagens da caixa de mudança. Embora as potências a transmitir sejam relativamente baixas, a necessidade de conseguir uma alta relação de transmissão num espaço reduzido resulta em pinhões de pequeno diâmetro, com elevadas cargas de contato entre flancos conjugados. Nestas engrenagens, o ruído não é um requisito crítico, permitindo um certo relaxamento das exigências sobre a exatidão das geometrias de contato.

CAPÍTULO 3

CONTROLE GEOMÉTRICO DE ENGRENAGENS

No capítulo anterior foram descritos, brevemente, a cinemática das engrenagens e os processos de fabricação mais utilizados. Tem-se, conseqüentemente, o embasamento para julgar os requisitos que a função impõe à geometria e também os erros que os processos de fabricação introduzem na mesma.

Neste capítulo será abordada a forma em que os requisitos sobre a geometria das engrenagens devem ser especificados e, o atendimento dos métodos utilizados para controlar a geometria das engrenagens reais. Dar-se-á especial ênfase à norma ISO 1328 -1/2 [24] [25], por ser uma norma de nível internacional e ser a mais solicitada pelos principais clientes da Irmãos Zen.

3.1. Normas para especificação de engrenagens

As normas específicas para o controle de tolerâncias geométricas de engrenagens são publicadas pelos mais diversos sistemas de normas, segundo a competitividade no mercado para este tipo de aplicação. É o cliente que opta pela norma que melhor atende as suas necessidades, encontrando a sua disposição uma série de documentos que tratam do assunto, dentre estes podem-se citar: ISO, AGMA, DIN, JIS, BSI, ABNT e outras. Na tabela 3.1, há uma seleção das mais importantes normas utilizadas [26], sendo que suas principais diferenças se referem:

- a simbologia utilizada para representação dos parâmetros geométricos. Este aspecto é de grande interesse para a Irmãos Zen, pois há clientes que solicitam o controle de suas engrenagens segundo normas ISO, AGMA e DIN;
- a definição dos limites de tolerâncias que cada norma abrange; e
- a quantidade de classes disponíveis.

Tabela 3.1 - Lista de normas associadas à tolerância geométrica de engrenagens cilíndricas de dentes retos.

NORMA	ASSUNTO
ISO - 1328-1/2 (1997)	Cylindrical Gears - ISO System of Accuracy
AGMA – 2000-A88 (1988)	Gear Classification and Inspection Handbook
DIN - 3962 (1978)	Tolerances for Cylindrical Gear Teeth
JIS - B 1702 (1976)	Accuracy for Spur and Helical Gears
BSI - BS 436 (1986)	Spur and helical gears - Basic Rack Form, Pitches and Accuracy
ABNT - NBR10095 (1989)	Engrenagem Cilíndrica de Evolvente – <i>Precisão Dimensional</i> .

No Brasil, as normas da ABNT em alguns aspectos, como definições de partes funcionais e parâmetros geométricos, se assemelham à ISO 1328 -1/2, o que já não ocorre com as normas AGMA, por esta apresentar uma estrutura simbólica própria que em muito se diferencia da ISO e ABNT.

3.2. Especificação de engrenagens cilíndricas usando a norma ISO 1328 - 1/2

A ISO 1328-1/2 [24] [25] trata das tolerâncias geométricas de engrenagens cilíndricas de dentes retos, fornecendo limites para os principais parâmetros característicos da geometria das engrenagens a serem controladas, e delimita para cada tipo de aplicação os erros máximos permissíveis. Esta norma também trata dos desvios das engrenagens associados aos parâmetros característicos tomados isoladamente, e dos desvios das engrenagens do ponto de vista funcional, ou seja, avalia conjuntamente todos os desvios isolados, eventualmente existentes nas superfícies das engrenagens.

Duas são as vantagens da referida norma: uma é a sua associação com materiais didáticos de grande reconhecimento neste campo de atuação [7][11], o que a torna de fácil compreensão e menos propensa a erros de interpretação; e a outra é que seu conteúdo está de acordo com o Sistema Internacional de Unidades [27] que é o sistema oficialmente reconhecido no Brasil.

3.2.1. Parâmetros característicos

Parâmetros característicos são elementos de controle da geometria das engrenagens. Por problemas que posteriormente serão detalhados, as superfícies das engrenagens sofrem variações, em relação a sua geometria esperada como ideal no ato de sua fabricação. Estes desvios, dependendo de suas dimensões, tornam-se de difícil identificação e comprometem a funcionalidade do conjunto coroa/pinhão [28] [29].

Os parâmetros característicos são classificados em dois grupos, que estão intimamente relacionados pela forma de avaliação dos desvios, são eles: desvios isolados e desvios de conjunto.

➤ Desvios isolados

Os desvios isolados são as variações dos parâmetros característicos geométricos ,que ocorrem na superfície das engrenagens. Suas principais causas são:

- forma defeituosa do perfil da ferramenta de conformação e usinagem;
- excentricidade entre o eixo da engrenagem e o eixo do mandril;
- deformações oriundas do processo de tratamento térmico;
- deficiente lubrificação durante o processo de usinagem;
- uso de ferramentas com o gume de corte gasto ou danificado; e
- excesso de vibração da máquina de usinagem.

À seguir serão descritos todos os parâmetros característicos da geometria das engrenagens, segundo a ISO 1328-1 [24].

a. Desvio de passo individual (f_{pt}), acumulado (f_{pk}) e total (F_p)

O desvio de passo individual, representado por f_{pt} na figura 3.1, corresponde a diferença algébrica entre o passo medido e o correspondente passo teórico. Devido à facilidade, utiliza-se o flanco dos dentes como referência para a medição. O passo primitivo é o comumente avaliado e é medido sobre a circunferência primitiva [30]. Pela ISO 1328-1 [24], o passo também pode ser medido sobre uma circunferência de referência que passa pela altura média dos dentes, ou seja, o ponto médio entre o topo e a raiz do dente.

O desvio de passo acumulado, representado por f_{pk} na figura 3.1, corresponde a diferença algébrica entre o comprimento medido e o comprimento teórico de um setor que abranja uma determinada quantidade inteira de passos (K). O setor avaliado não deve ser maior que 1/8 da circunferência de referência, ou seja, $2 \leq K \leq Z/8$, onde Z é o número de

dentes. De outra forma, o desvio de passo acumulado pode ser entendido como a soma algébrica dos passos individuais no setor avaliado.

Por último, tem-se o desvio de passo total (F_p), que corresponde ao máximo valor do desvio de passo acumulado de qualquer setor de circunferência em relação a um determinado flanco de dente.

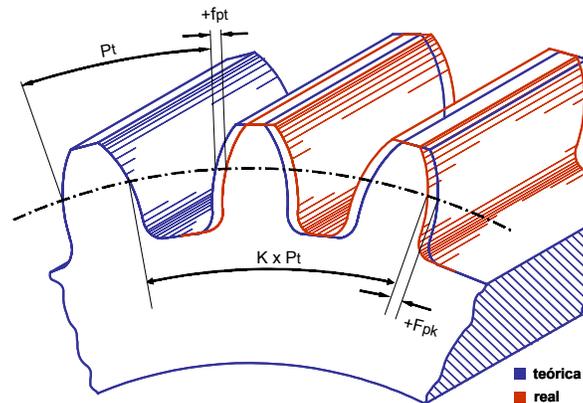


Figura 3.1 - Passo das engrenagens.

b. Desvio de perfil (F_α , $f_{f\alpha}$ e $f_{H\alpha}$)

Na figura 3.2, o desvio de perfil corresponde ao afastamento do perfil evolvente real obtido do processo de fabricação do perfil ideal gerado a partir da respectiva circunferência de bases [24] [31]. As medições, segundo a ISO 1328-1, deverão ocorrer no ponto médio da largura do dente.

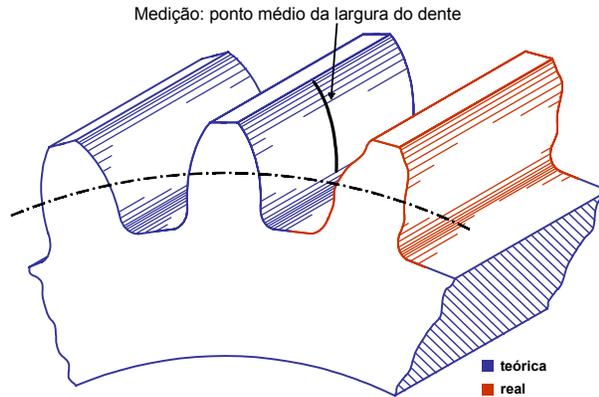


Figura 3.2 - Desvio de perfil.

O desvio de perfil é caracterizado por três parâmetros: desvio total de perfil (F_α), desvio de forma de perfil ($f_{f\alpha}$) e desvio angular de perfil ($f_{H\alpha}$). Na figura 3.3 (a) (b) e (c), tem-se uma representação gráfica destes desvios. A linha sinuosa corresponde ao perfil real detectado pelo sistema de medição.

No gráfico de desvio de forma de perfil (b), verifica-se o quanto o perfil real atinge seus limites máximos e mínimos. Da mesma forma, pode-se avaliar a partir do gráfico de desvio angular de perfil (c) o quanto o perfil real se aproximou ou se afastou angularmente do perfil teórico. Por último, quando se busca apenas uma avaliação quantitativa, pode-se fazer uso do diagrama de desvio total de perfil (a), que possui intrinsecamente os dois resultados anteriores, sendo mais conservativo.

A avaliação do desvio de perfil segundo a norma ISO 1328-1 [24] pode ser referida a perfis corrigidos ou não. A figura 3.3, se refere a avaliação do desvio de perfil para uma engrenagem com perfil corrigido.

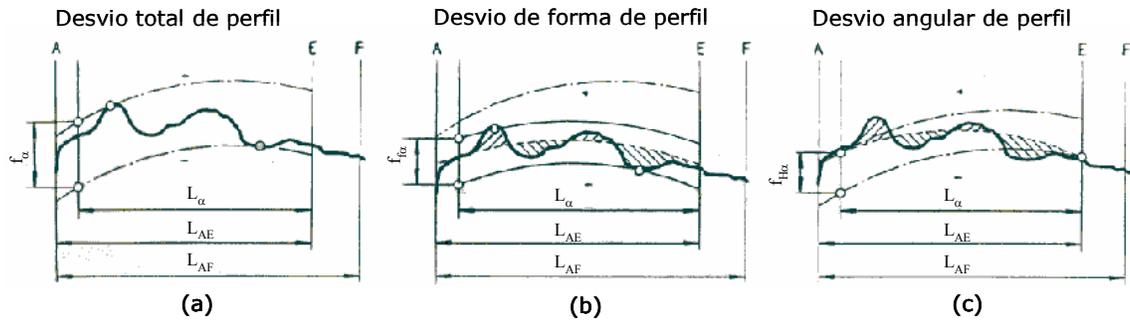


Figura 3.3 - Desvios de perfil segundo ISO 1328-1.

c. Desvio da linha de flanco (F_{β} , $f_{f\beta}$ e $f_{H\beta}$)

A figura 3.4, mostra o desvio de flanco corresponde ao afastamento do flanco do dente, obtido no processo de fabricação do flanco resultante da extrusão do perfil evolvente ideal no sentido axial da engrenagem. As medições, segundo a ISO 1328-1, deverão ocorrer na altura da circunferência de referência e no sentido axial.

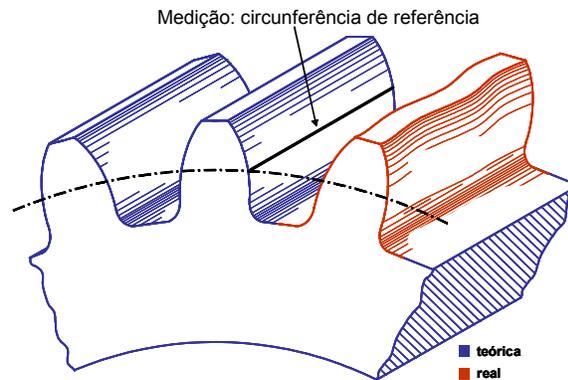


Figura 3.4 - Desvio da linha de flanco.

Da mesma forma que o desvio de perfil, o desvio da linha de flanco é caracterizado por três parâmetros: desvio total da linha de flanco (F_{β}), desvio de forma da linha de flanco ($f_{f\beta}$) e desvio angular da linha de flanco ($f_{H\beta}$), figura 3.5 (a) (b) (c), respectivamente. A linha sinuosa corresponde ao flanco real detectado pelo sistema de medição, na altura da circunferência referência.

A interpretação do desvio da linha de flanco é *similar* ao desvio de perfil. Assim, do gráfico de desvio de forma da linha de flanco (b) verifica-se o quanto o flanco real atinge seus limites máximos e mínimos. Da mesma forma, pode-se avaliar a partir do gráfico de desvio angular da linha de flanco (c), o quanto o perfil real se aproximou ou se afastou angularmente do perfil teórico. Por último, ao se querer apenas uma avaliação quantitativa, pode-se fazer uso do diagrama de desvio total da linha de flanco (a), que possui intrinsecamente os dois resultados anteriores e também é mais conservativo.

A avaliação do desvio da linha de flanco, segundo a norma ISO 1328-1 [24], pode ser referida a flancos corrigidos ou não. A referida figura, trata de uma avaliação do desvio para uma engrenagem com perfil não corrigido. Com relação a flancos corrigidos, a referência é feita às engrenagens do tipo ‘Crown’¹².

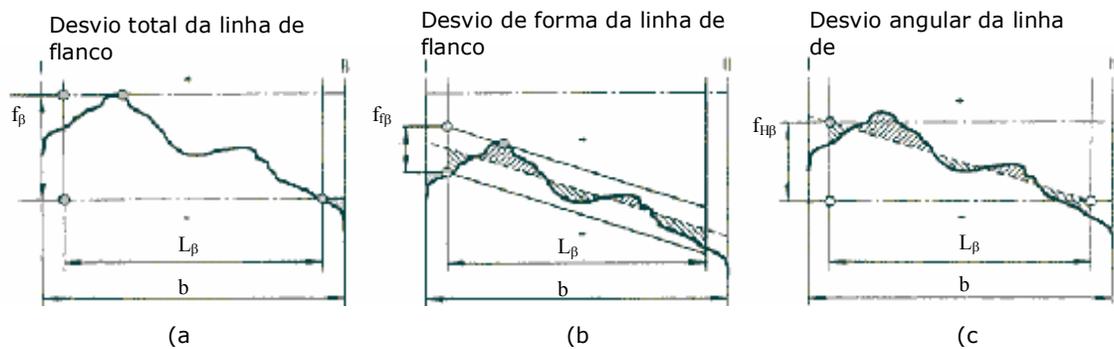


Figura 3.5 - Desvios da linha de flanco segundo ISO 1328-1.

d. Erro de concentricidade

Embora não seja um parâmetro característico tratado na ISO 1328-1, far-se-á uma breve descrição desta característica dada a sua importância.

O erro de concentricidade, figura 3.6, "... é a distância entre as intersecções dos dois eixos (eixo geométrico ‘A’ e o eixo de rotação ‘B’) com o plano

¹² Crown: Engrenagens submetidas a um processo de acabamento, que torna a região central do flanco do dente côncava em relação ao centro do dente, com a finalidade de aumentar a sua resistência nesta região.

perpendicular ao eixo de rotação. Na referida figura, a distância AB corresponde ao erro de concentricidade” [32].

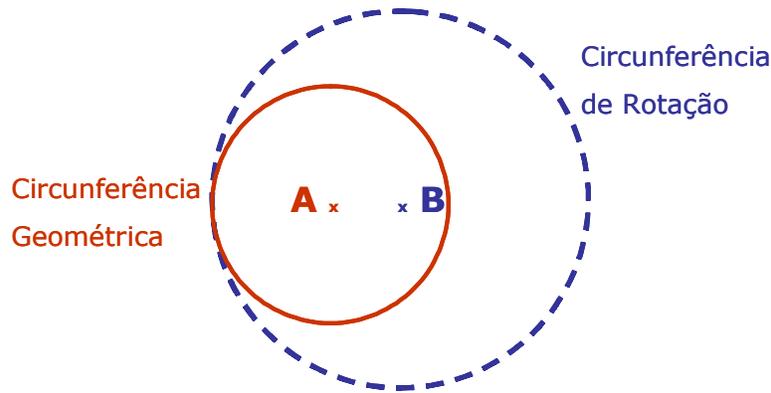


Figura 3.6 - Erro de concentricidade.

e. Batimento radial (F_r)

O batimento radial é a maior variação da distância em relação ao eixo de giro da engrenagem, de uma esfera ou cone, colocado seqüencialmente entre os vãos da engrenagem, estabelecendo um contato com os flancos dos dentes adjacentes. Corresponde a amplitude total da variação lida no sistema de medição, quando da verificação do erro de concentricidade. Se não houvesse irregularidades no dente da engrenagem, o batimento radial seria igual ao dobro do erro de concentricidade (caso existisse), ou seja, o erro total de giro [32].

Segundo a norma 1328-2 [25], o batimento radial corresponde a amplitude máxima dos desvios individuais (erro detectado em cada vão de dente), figura 3.8. Verifica-se que os erros estão distribuídos em torno de uma senóide, cuja amplitude corresponde a duas vezes o erro de concentricidade.

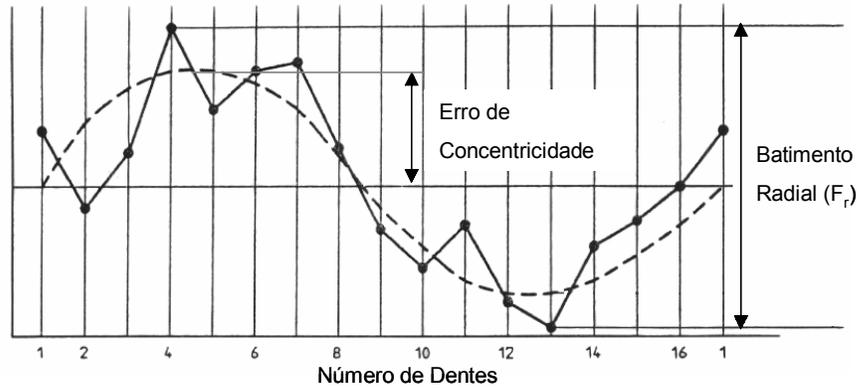


Figura 3.7 - Batimento radial.

➤ Desvios de Conjunto

Os desvios de conjunto correspondem a variações de funcionalidade das engrenagens dentro de uma determinada faixa de tolerância requerida. Tais variações são decorrentes de vários desvios isolados intrínsecos que à priori, não são conhecidos. A garantia da qualidade baseada neste parâmetro terá dificuldade para agir de forma corretiva quando se produz uma não conformidade, já que estes parâmetros não informam sobre as causas dos desvios e para isso dever-se-á recorrer à verificação dos desvios isolados.

A forma de medição dos desvios de conjunto são feitas através do engrenamento entre a engrenagem avaliada e uma engrenagem padrão. Existem dois tipos de desvios de conjunto: desvio composto tangencial e desvio composto radial.

a. Desvio composto tangencial (F_i' e f_i')

Devido a variações no processo de fabricação, ocorrem defasagens angulares nos flancos dos dentes. Para avaliação deste parâmetro, a engrenagem avaliada é colocada em engrenamento com uma engrenagem padrão num dispositivo específico denominado engrenômetro. O engrenômetro faz uma comparação angular entre as duas engrenagens. Na figura 3.8, tem-se que φ_1 é a variação da engrenagem padrão, na engrenagem em inspeção é esperada uma variação φ_3 , para se ter uma

relação de transmissão constante. Por imperfeições nos dentes da engrenagem em inspeção o valor registrado é φ_2 . A diferença $\Delta\varphi$ ($\varphi_2 - \varphi_3$) é registrada graficamente em função de φ_3 . O engrenômetro possui um sistema interno que avalia para cada dente a variação $\Delta\varphi$. A máxima variação de $\Delta\varphi$ tomada individualmente, corresponde ao desvio composto tangencial dente-a-dente (f_i') e a diferença entre os valores máximo e mínimo correspondem ao desvio composto tangencial total (F_i').

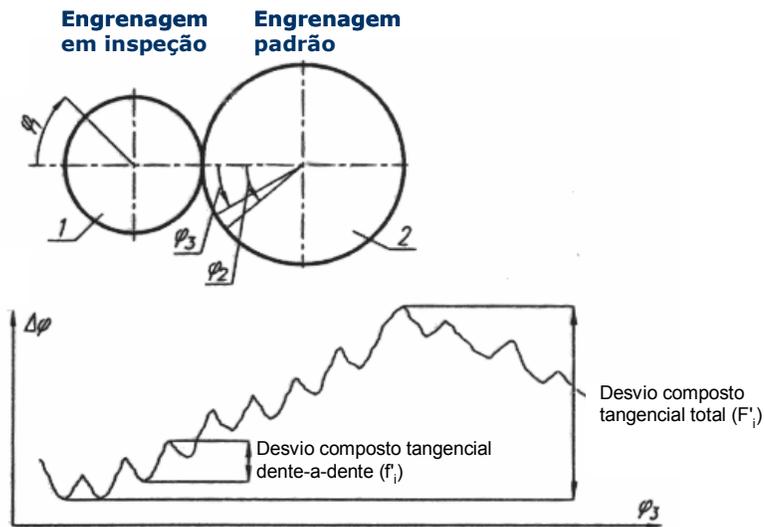


Figura 3.8 - Resultado do desvio composto tangencial.

b. Desvio composto radial (F_i'' e f_i'')

O desvio composto radial avalia as imperfeições dos dentes da engrenagem em inspeção, através da medição da variação da distância entre os centros da engrenagem avaliada e da engrenagem padrão para cada vão de dente.

A avaliação do desvio composto radial, excetuando pelo processo físico, é muito similar ao desvio composto tangencial. Na figura 3.9, tem-se o resultado gráfico deste tipo de avaliação realizado a partir de um engrenômetro. A máxima variação da distância entre os centros tomada individualmente, corresponde ao desvio composto radial dente-a-dente (f_i'') e

a diferença entre os valores máximo e mínimo corresponde ao desvio composto radial total (F_i'') [33].

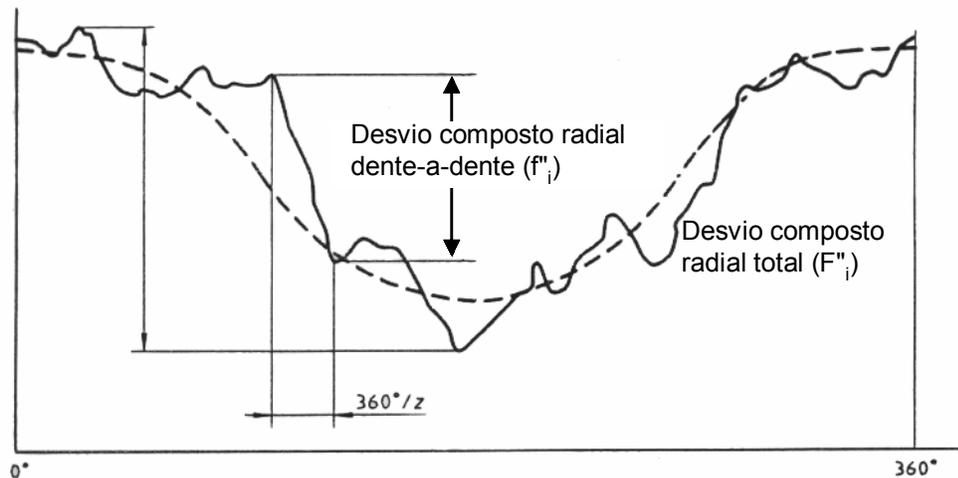


Figura 3.9 - Resultado do desvio composto radial.

Tanto os desvios isolados quanto os desvios de conjunto são avaliados para se garantir um funcionamento adequado do par pinhão/coróa. A ISO 1328-1/2 traz inserida em seu contexto um conjunto de tabelas que caracterizam cada um destes desvios, e dependendo da tolerância admitida por projeto, poder-se-á ter um determinado grau de qualidade.

3.2.2. Graus de Qualidade

Os graus de qualidade variam para cada sistema de norma. Na ISO 1328-1/2, exceto pelo desvio composto radial, que possui 9 graus de qualidade (4 é o grau mais exigente e 12 é o menos exigente), os demais parâmetros característicos possuem 13 graus de qualidade (0 é o grau mais exigente e 12 é o menos exigente) [34].

Para classificação de uma engrenagem com relação ao seu grau de qualidade, alguns parâmetros de projeto são considerados pela norma 1328-1/2, entre eles: o diâmetro de referência e o módulo. Definidos esses parâmetros de projeto, para cada um dos parâmetros característicos já mencionados pode-se estabelecer uma

tolerância, cujo valor dependerá do grau de qualidade selecionado e vice-versa, estabelecendo-se a tolerância necessária e obtendo-se o grau de qualidade. Na tabela 3.2, tem-se um exemplo do grau de qualidade para o desvio total de perfil (F_α). Para efeito de construção da tabela, considerando-se um grau de qualidade igual a 5 os valores das tolerâncias são determinados empiricamente e equacionados por: $F_\alpha = 3,2\sqrt{m} + 0,22\sqrt{d} + 0,7$.

Os valores de tolerâncias superiores, por exemplo, para o grau 6 são obtidos a partir da tolerância de grau 5 multiplicado por $\sqrt{2}$, as tolerâncias do grau 7 são obtidos a partir das tolerâncias do grau 6 multiplicado $\sqrt{2}$, e assim sucessivamente até o grau 12. Para os valores inferiores ao grau de qualidade 5 utiliza-se o mesmo raciocínio, exceto pelo fato de se dividir cada resultado de tolerância por $\sqrt{2}$. Assim, conclui-se que ao se querer melhorar um grau de qualidade de uma engrenagem basta dividir por $\sqrt{2}$ a tolerância de um determinado grau de qualidade em questão por quantas vezes se quer melhorar a qualidade do item.

Tabela 3.2 - Grau de qualidade para o desvio de perfil.

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_α (μm)												
$5 \leq d \leq 20$	$0,5 \leq d \leq 2$	0,8	1,1	1,6	2,3	3,2	4,6	6,5	9,0	13,0	18,0	26,0	37,0	52,0
	$2 \leq d \leq 3,5$	1,2	1,7	2,3	3,3	4,7	6,5	9,5	13,0	19,0	26,0	37,0	53,0	75,0
$20 \leq d \leq 50$	$0,5 \leq d \leq 2$	0,9	1,3	1,8	2,6	3,6	5,0	7,5	10,0	15,0	21,0	29,0	41,0	58,0
	$2 \leq d \leq 3,5$	1,3	1,8	2,5	3,6	5,0	7,0	10,0	14,0	20,0	29,0	40,0	57,0	81,0
	$3,5 \leq d \leq 6$	1,6	2,2	3,1	4,4	6,0	9,0	12,0	18,0	25,0	35,0	50,0	70,0	99,0
	$6 \leq d \leq 10$	1,9	2,7	3,8	5,5	7,5	11,0	15,0	22,0	31,0	43,0	61,0	87,0	123,0

3.3. Medição de engrenagens

Após a descrição dos parâmetros geométricos das engrenagens e dos seus graus de qualidade associados às tolerâncias definidas por projeto, far-se-á neste item, uma descrição dos principais instrumentos utilizados nas medições dos parâmetros geométricos relativos aos desvios isolados e de conjunto, que tem como principais propósitos [35]:

- Fornecer dados para controle do processo, em particular no setup das máquinas de fabricação de engrenagens e inspeção das ferramentas de corte.
- Verificar o funcionamento adequado de uma engrenagem com a sua conjugada, a qual se dá pela comparação da engrenagem avaliada com uma engrenagem padrão.

O assunto é de interesse da Irmãos Zen que, devido ao seu crescimento no mercado mundial, vem sendo solicitada junto aos seus principais clientes que realize medições que outrora não eram efetuadas, como é o caso do desvio composto radial.

3.3.1. Medição dos desvios isolados

A instrumentação utilizada para medição dos erros isolados, varia desde equipamentos de medições manuais, de fácil construção e manuseio por parte do operador, a equipamentos que possuem um sistema automatizado complexo com uma melhor exatidão [36]. Os principais instrumentos utilizados para estas medições são:

- a) instrumentação de medição manual;
- b) máquina de medir por coordenadas (CMM) [37];
- c) máquina de medição de forma; e
- d) máquina de medição dedicada.

a) Medições realizadas com instrumentos de medição manual

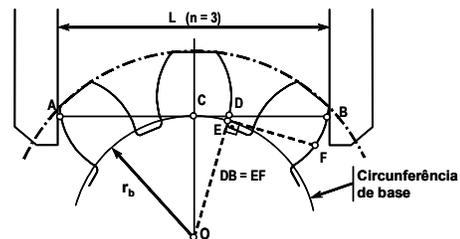
Os equipamentos de medições manuais descritos a seguir, baseiam-se em princípios físicos decorrentes da tecnologia de engrenagem e reproduzem, no ato de sua medição, os modelos matemáticos já tratados no capítulo anterior. Entre os principais tem-se:

1. Instrumento dedicado a medição do passo de base

A medição do passo de base é de fundamental importância para as engrenagens, pois qualquer desvio neste parâmetro implicará em desvios dos demais. Como consequência, ter-se-á a não constância do ponto primitivo C e variação na relação de transmissão. A figura 3.10 (a) (b), mostra um equipamento dedicado a este tipo de medição e um esquema que descreve o princípio físico envolvido, respectivamente. A semi-reta AB é tangente à circunferência de base no ponto C. Pela propriedade fundamental das evolventes, a semi-reta CD será igual ao arco CE. Seguindo este raciocínio, para os demais perfis evolventes observa-se que o segmento de reta EF, que corresponde ao passo de base, é igual ao segmento de reta DB. A medição é efetuada de forma indireta, onde o equipamento registra a medida L, que é função de DB, e, através de conversão matemática pelo equipamento, fornece o valor do passo de base [10].



(a) Medição de passo de base



(b) Princípio físico

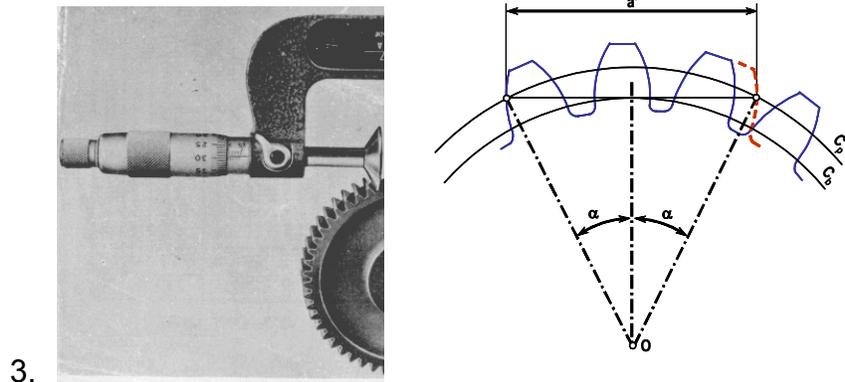
Figura 3.10 - Verificação do passo de base.

3. Medição da corda do dente¹³ com o micrômetro de disco

O controle da espessura do dente é também efetuado pela avaliação da corda do dente. Pela figura 3.11, tem-se o micrômetro de disco, que é um

¹³ Corda do dente: Medição efetuada no arco do dente por onde passa a circunferência primitiva.

equipamento de medição manual muito difundido dada sua simplicidade e rapidez de medição. Possui dois discos paralelos que são colocados entre os flancos de uma determinada quantidade de dentes para se efetuar a medição. Em função do ângulo de pressão (α), número de dentes (z) e uma tabela específica obtém-se a medição da corda. O princípio físico envolvido mais uma vez envolve a propriedade fundamental das evolventes. No esquema mostrado, a semi-reta a' está tangente à circunferência de base e suas extremidades tocam a circunferência primitiva. Através de um processamento decorrente da forma de construção do equipamento, registra-se o valor da corda entre os dentes considerados através de um micrômetro.



(a) Micrômetro de disco

(b) Princípio físico

Figura 3.11 - Micrômetro de disco.

3. Medição da corda do dente com o calibre de cursor duplo

Este instrumento é similar a dois paquímetros dispostos ortogonalmente. Na figura 3.12, posiciona-se o cursor C_1 sobre o topo do dente de tal forma, que sua parte inferior tangencie o topo do dente para a circunferência onde se quer medir a corda do dente. Se o valor da corda pretendida corresponde ao da circunferência primitiva, o cursor C_1 deverá ser ajustado na sua escala para um valor correspondente ao módulo (m) da engrenagem. Uma vez

ajustado C_1 , posiciona-se o cursor C_2 de tal forma a tocar os flancos direito e esquerdo simultaneamente obtendo-se o valor da corda na sua escala.

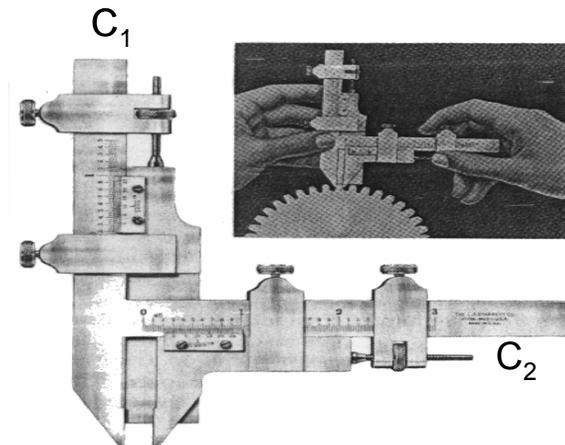


Figura 3.12 - Calibre de cursor duplo

4. Medição do perfil evolvente com projetor de perfil

O projetor de perfil, mostrado na figura 3.13, fornece, através de um sistema de luzes, o perfil real do dente da engrenagem. Avaliação é realizada através da comparação deste perfil com o perfil ideal que pode ser obtido por um sistema computacional que reproduza o perfil da sua função evolvente: $\beta = ev_{\alpha} = \text{tg}(\alpha) - \alpha$.

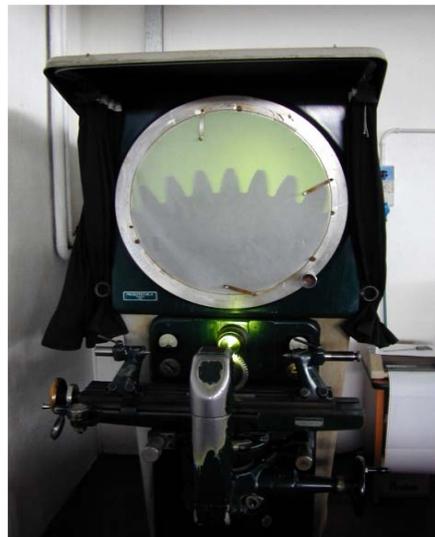


Figura 3.13 - Projetor de perfil.

5. Medição do perfil com instrumento de reprodução

Na figura 3.14 (a), o disco (1) que possui um determinado diâmetro de base (2) entra em contato com o instrumento de medição (3), sendo tangentes neste ponto. O instrumento se desloca para cima com velocidade V_r constante. O ponteiro (5) solidário ao instrumento toca a superfície do dente e pela propriedade fundamental do perfil evolvente, apalpa o perfil do dente sobre toda a sua extensão. Como o ponteiro (5) se encontra interligado com o ponteiro (7) através da alavanca (6), qualquer variação do perfil do dente será registrada pelo dispositivo mostrador (8). O princípio físico pode ser visualizado pela figura 3.14 (b), onde se observa uma reta tangente que rola sem deslizamento sobre a sua circunferência de base gerando o perfil evolvente.

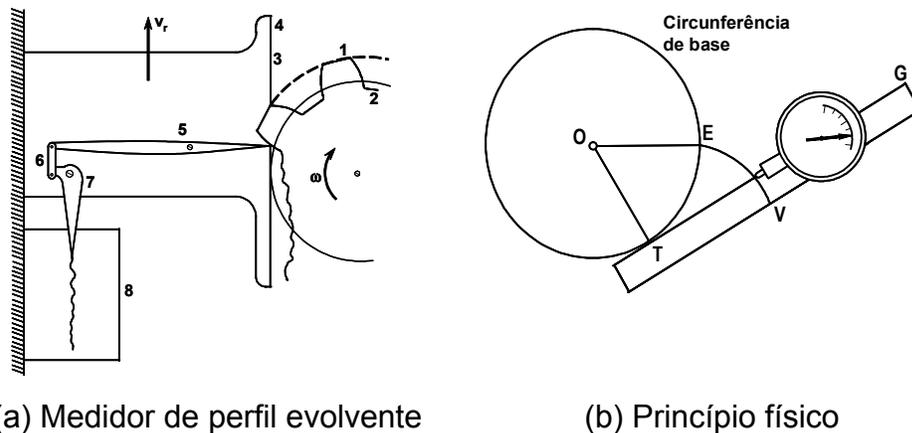


Figura 3.14 - Instrumento de reprodução de perfil evolvente.

6. Medição do batimento radial com esfera ou cone calibrado

Para se fazer a medição, a esfera ou o cone calibrado é colocado sucessivamente entre os vãos dos dentes, conforme figura 3.15. Devido à imperfeição dos dentes, sua posição varia em relação ao centro da engrenagem. Essa variação é registrada por um dispositivo de medição que pode ser um micrômetro. A variação máxima e mínima corresponde ao valor

do batimento radial (F_r) que possui intrinsecamente, e eventualmente, o erro de concentricidade.

Este tipo de erro acarreta em variações do ponto primitivo C, e é um parâmetro característico crítico na funcionalidade do impulsor de partida. Por esse motivo possui especial atenção pela equipe de engenheiros da qualidade da Irmãos Zen com relação ao seu controle.

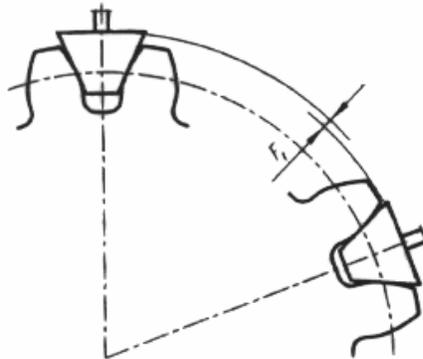


Figura 3.15 - Cone calibrada.

b) Medições realizadas com máquinas de medir por coordenadas (CMM)

As máquinas de medir por coordenadas que possuem acessórios como mesa rotativa e software de medição, são um dos sistemas de medição mais flexíveis e dinâmicos para a medição de peças com geometrias complexas, figura 3.16. Softwares dos mais variados têm sido desenvolvidos e fazem das CMM^S um forte concorrente para medições de superfícies complexas e engrenagens [37] [38].



Figura 3.16 - CMM equipada com uma mesa rotativa (Zeiss ZMC 550).

As vantagens de se utilizar uma CMM no controle dimensional e geométrico de engrenagens são as seguintes:

- Flexibilidade e agilidade da CMM;
- Fornecem incertezas de medição compatíveis com algumas classes engrenagens; e
- Máquina não dedicada somente à medição de engrenagens, servindo para medição de outras peças com geometria complexas e sistemas de medição como esquadros, goniômetros, traçadores de altura, paquímetros.

A seguir serão abordadas as principais etapas nas medições de engrenagens, utilizando uma máquina de medir por coordenadas com software específico para este tipo de tarefa.

a) Escolha do diâmetro e disposição dos apalpadores

A medição de engrenagens geralmente requer vários apalpadores com diâmetros diferentes e possuindo uma determinada disposição espacial. Os diâmetros dos apalpadores, bem como a disposição espacial dos mesmos, é

função do tipo de engrenagem a ser medida, da sua dimensão e da estratégia de medição adotada.

As medições do passo, da linha de flanco e batimento radial são geralmente realizadas com a esfera do apalpador tocando dois flancos simultaneamente, figura 3.18 (a) (b). Este tipo de medição requer que o diâmetro do apalpador seja tal, que realize a medição numa região mais próxima possível ao diâmetro primitivo. A norma DIN 3977 [39] estabelece qual diâmetro de apalpador deverá ser usado para obedecer a esta condição. O software de medição de engrenagens, com o preenchimento dos parâmetros da engrenagem a ser medida, fornece informação deste diâmetro baseado na própria norma DIN 3977. Quando o diâmetro requerido pela norma não estiver disponível, então um diâmetro bem próximo do normalizado poderá ser utilizado, pois o software fará a compensação matemática deste diâmetro. No entanto, isto trará o inconveniente da medição não estar sendo realizada efetivamente numa região bem próxima ao diâmetro primitivo. A medição destes parâmetros, com o apalpador tocando os dentes da engrenagem em apenas um flanco, também poderá ser realizada.



Figura 3.17 - Vista superior (a) e frontal (b) da medição do batimento.

Para a medição do perfil do dente, figura 3.18, a escolha do diâmetro do apalpador será função de quanto se deseja aproximar a raiz do dente.



Figura 3. 18 - Vista frontal (a) e superior (b) da medição do perfil.

b) Configuração espacial dos apalpadores

Na inspeção de engrenagens externas, os dois apalpadores deverão estar dispostos em um plano perpendicular ao eixo da engrenagem, figura 3.19. A distância entre os apalpadores deverá ser tal, que o apalpador que não se encontra em uso durante a operação não entre em colisão com a engrenagem que estiver sendo medida. No caso de inspeção de engrenagens internas, os dois apalpadores deverão estar dispostos num eixo paralelo ao eixo da engrenagem, sendo as demais considerações similares.



Figura 3.19 - Apalpadores para a medição de engrenagens de dentes externos.

c) Qualificação do Apalpador

Após se ter estabelecido a configuração espacial dos apalpadores, bem como os seus diâmetros, pode-se realizar a qualificação dos mesmos

utilizando uma esfera padrão de diâmetro conhecido e informado ao software de medição da CMM.

Uma qualificação insatisfatória do apalpador certamente influenciará nos resultados de medição. Sugere-se, portanto, verificar o erro de forma obtido em cada posição qualificada do apalpador. Este erro não deverá ser maior do que a parcela constante do erro especificado para a CMM.

Ao se utilizar um programa CNC para realizar a qualificação dos apalpadores, deverá ser tomado o cuidado de que, devido à disposição espacial dos mesmos, não ocorra colisões dos apalpadores que não se encontram em processo de qualificação com a esfera de calibração (isto para o caso do uso de mais de um apalpador).

d) Alinhamento do eixo de giro da mesa rotativa

Existem várias maneiras de se determinar o eixo de giro da mesa rotativa. Um dos métodos utilizados é fixar uma esfera padrão na mesa rotativa o mais próximo das extremidades da mesa, para amplificar os erros, e medir a esfera em várias posições angulares, encontrando para cada posição angular da esfera as coordenadas espaciais do seu centro. O software da CMM grava as coordenadas destes pontos espaciais, e em seguida calcula um plano que passa por eles. Desta forma, o software assume, como sendo o eixo de giro da mesa, o vetor perpendicular a este plano. Uma das vantagens deste método é que existe uma certa compensação dos erros de batimento axial e radial da mesa rotativa gerados durante o seu movimento.

Outra maneira de se alinhar este eixo de giro é medindo o eixo da engrenagem ou cilindro formado por seu furo, em várias posições angulares da mesa rotativa e assumir como sendo o eixo de giro da mesa rotativa o eixo simétrico aos eixos calculados nestas várias posições angulares. Este método tem como vantagem o fato de que o próprio eixo de giro da mesa rotativa encontrado, será o eixo de alinhamento do eixo Z da peça.

e) Fixação e alinhamento da engrenagem

Engrenagens que possuem seu eixo embutido podem servir-se dele como elemento de fixação e também para fazer o alinhamento do eixo Z de medição da peça.

Existe a possibilidade do uso de um pino padrão nas engrenagens que não possuem eixo como referência de alinhamento, além de facilitar a fixação da engrenagem.

Os seguintes elementos poderiam teoricamente ser escolhidos como referência para o alinhamento da engrenagem [40]:

- a) superfície externa cilíndrica da raiz dos dentes;
- b) superfície externa cilíndrica do topo dos dentes;
- c) furo interno ou uso do pino padrão;
- d) face plana de topo ou inferior (para alinhamento do eixo “Z”) e medição de um círculo em um dos elementos cilíndricos para a definição da origem do sistema de coordenadas “XY” da peça; e
- e) alinhamento pelos flancos dos dentes da engrenagem, figura 3.20.

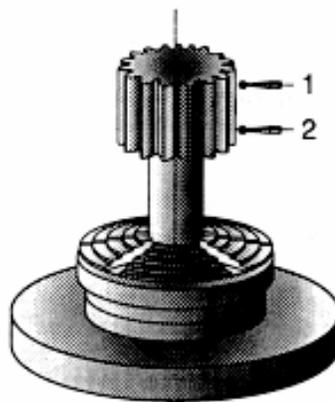


Figura 3.20 - Alinhamento pelos flancos dos dentes da engrenagem.

A melhor forma de alinhamento é aquela que garanta uma menor inclinação do eixo de alinhamento do sistema de coordenadas da peça, em relação ao eixo funcional da engrenagem e um menor erro de excentricidade. No caso das engrenagens não acabadas, uma análise dos erros de forma e posição desses possíveis elementos de referência é imprescindível para determinar o melhor alinhamento, e se este é adequado para o controle dos parâmetros da engrenagem frente a sua tolerância.

Uma inclinação do eixo de alinhamento em relação ao ideal tem um efeito maior sobre a linha de flanco. Uma excentricidade do eixo de alinhamento tem efeitos maiores sobre o perfil e o batimento radial. O passo da engrenagem é influenciado tanto pela inclinação do eixo quanto pela sua excentricidade.

Entre as opções acima, o alinhamento pelos dentes da engrenagem (e) não é possível em CMM^S que não possuem o recurso de apalpação autocentrada. Para as opções (a) e (b), o alinhamento torna-se difícil devido à pequena região de apalpação. As demais formas de alinhamento são possíveis, mas devem estar compatíveis com o alinhamento CNC definido pelo software da engrenagem.

f) Entrada de parâmetros da engrenagem no software

Para a execução do programa CNC, são necessárias a entrada de parâmetros de projeto da engrenagem. O software de medição GON-UX fornece, à medida que se vai entrando com os parâmetros da engrenagem, os demais parâmetros da engrenagem que estão correlacionados entre si matematicamente.

Após preencher os parâmetros de entrada do software, o apalpador é posicionado em frente ao dente em que será iniciada a medição. Após inicializar o software de medição, a tarefa de medição é realizada automaticamente.

Descritos todos os passos para a medição das engrenagens na CMM, far-se-á em seguida uma discussão de aspectos a serem observados na medição de cada parâmetro característico da geometria das engrenagens, e uma análise dos seus resultados com foco na funcionalidade do par coroa/pinhão.

a. Desvios de passo: individual (f_{pt}), acumulado (f_{pk}) e total (F_p)

Na figura 3.21, tem-se um resultado das medições do desvio de passo individual [41]. Cada retângulo corresponde ao desvio de passo individual fornecido pela CMM. Um flanco adiantado em relação ao seu valor teórico é considerado como um valor positivo ou acima da linha média, e vice-versa, um flanco atrasado em relação ao seu valor teórico como um valor negativo ou abaixo da linha média. Pode ser verificado no gráfico em questão, que 60% dos dentes da engrenagem estão atrasados, e 40% adiantados, conseqüentemente, é esperado que ocorra acelerações provocadas pelos dentes de 1 a 4 e de 15 a 17 e desacelerações dos dentes de 5 a 14. No engrenamento, dependendo da engrenagem conjugada, é esperado ocorrer tanto a ausência de backlash¹⁴ quanto o jogo de flanco. Como conseqüência, haverá variações da velocidade angular que interferem diretamente na relação de transmissão, resultando em um engrenamento descontínuo.

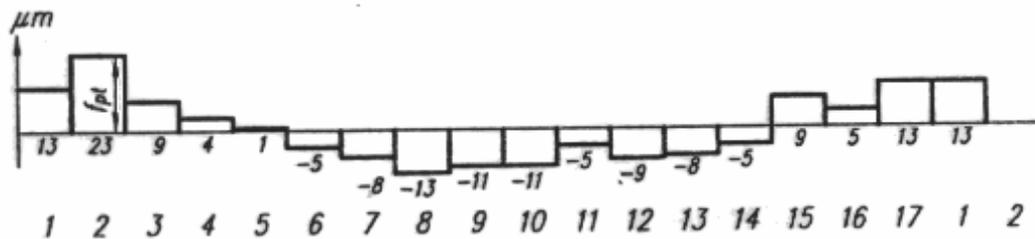


Figura 3.21 - Diagrama de desvio de passo individual.

¹⁴ Backlash: Espaçamento existente entre dois dentes em engrenamento para se evitar engripamento devido a desvios nos perfis dos dentes. Por outro lado não pode ter um valor excessivo para se evitar o jogo de flanco.

A partir dos resultados do desvio de passo individual, a CMM fornece o resultado dos desvios de passo acumulado e total, figura 3.22. O passo acumulado corresponde à somatória dos passos individuais e a sua amplitude máxima, no gráfico em questão, corresponde ao passo total. Na prática o passo total é mais importante, pois ele fornece o resultado entre dois flancos de dentes quaisquer que estão mais afastados entre si, ou seja, o maior desvio possível entre dois dentes. Entre esses dois dentes haverá maior variação de velocidade, conseqüentemente, maior variação na relação de transmissão.

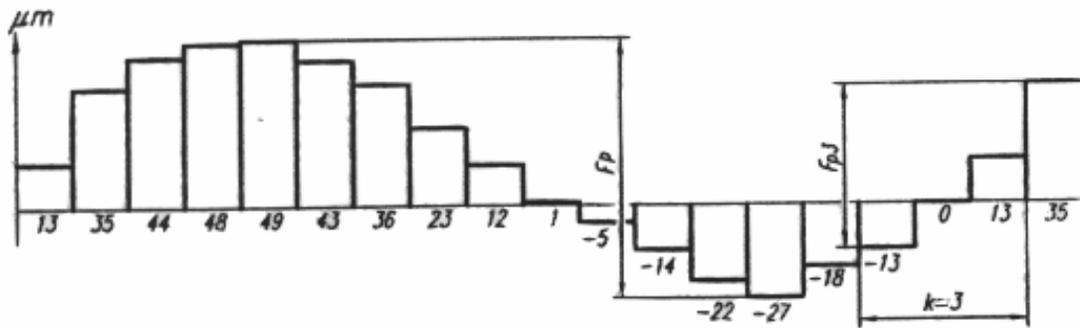


Figura 3.22 - Diagrama de desvio de passo acumulado e total.

b. Desvio de perfil

Ao fazer as medições de perfil a CMM considera somente uma região do perfil do dente muito bem definida pela ISO 1328-1. Evidentemente, cada sistema de norma define esta região segundo seus critérios.

Na figura 3.23, devido a variações do processo de fabricação, desconsidera-se na medição as regiões 1 e 2 denotada por Fillet¹⁵ / Undercut¹⁶ e Tip Round¹⁷ [7], respectivamente, pelo fato das mesmas se afastarem do perfil evolvente.

¹⁵ Fillet: Região compreendida entre a raiz e o flanco do dente.

¹⁶ Undercut: Situada na mesma região que o fillet. Corresponde ao recorte provocado pela ferramenta de corte.

¹⁷ Tip Round: Região compreendida entre o topo e o flanco do dente.

A CMM, após o toque do apalpador na região de avaliação do perfil evolvente, fornece uma série de pontos, conforme mostra a referida figura.

A linha sinuosa (a), formada pelos pontos registrados pelo sistema de apalpação, corresponde ao perfil real da evolvente. Em (b), tem-se o perfil de dente ideal definido por projeto.

Dos pontos medidos pelo sistema de apalpação, pode-se determinar a sua média quadrática [24] definindo uma curva média representada por (c). Fazendo-se um deslocamento desta curva, de tal forma que ela tangencie os pontos registrados o mais afastado possível tanto à direita quanto à esquerda, tem-se o desvio de forma de perfil, que indica de quanto o perfil real ficou mais espesso.

Fazendo-se um deslocamento do perfil ideal de tal forma que tangencie os limites (superior e inferior) da curva média, tem-se o desvio angular de perfil, que indica o quanto o perfil real se afastou angularmente do perfil ideal.

Por último, fazendo-se um deslocamento do perfil ideal de tal forma que tangencie os pontos medidos o mais próximo e afastados possível do dente, tem-se o desvio total de perfil, que engloba os dois resultados anteriores.

O desvio de perfil acarreta em variação da reta de ação, pois no engrenamento do pinhão/coroa suas respectivas funções evolventes não se tangenciarão de forma a gerar apenas uma função contínua. Ocorrerá, conseqüentemente, variação do ângulo de pressão, implicando em variação das cargas nas superfícies das engrenagens com seu posterior e eventual colapso.

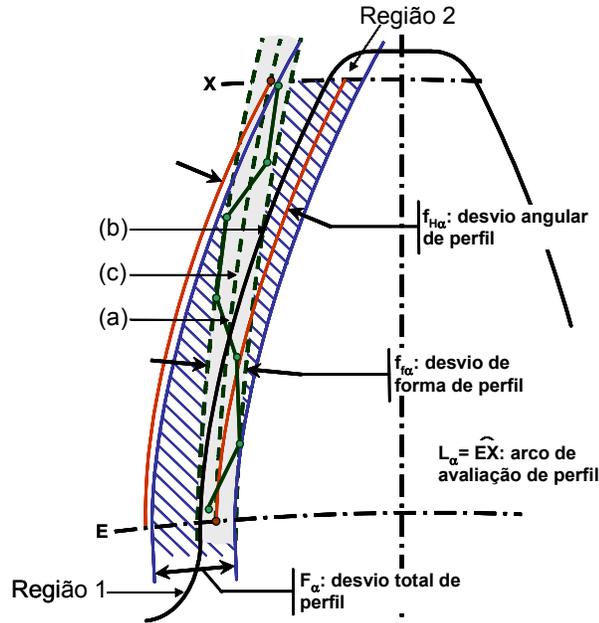


Figura 3.23 - Desvio de perfil.

c. Desvio da linha de flanco

Para efeito da ISO 1328-1, somente uma determinada região do flanco é considerada para avaliação. Na figura 3.24, desconsidera-se em cada extremidade da largura da engrenagem um valor igual a 5% desta largura ou um valor igual ao módulo, o menor deles. Essa região denominada Edge Round¹⁸, indicada na figura, deve ser eliminada do processo de medição por possuir grandes irregularidades causadas pelo processo de fabricação [24].

A avaliação do desvio da linha de flanco é *similar* ao desvio de perfil. Assim, na medição do desvio da linha de flanco, é fornecida pela CMM uma série de pontos, conforme mostra a referida figura.

A linha sinuosa (a), formada pelos pontos registrados pelo sistema de apalpação corresponde à linha de flanco real da evolvente. Em (b), tem-se a linha de flanco ideal, que corresponde a uma linha reta.

¹⁸ Edge Round: Região compreendida entre o flanco e a lateral dos dentes.

Dos pontos medidos pelo sistema de apalpação, pode-se determinar a sua média quadrática [24] definindo uma curva média representada por (c). Fazendo-se um deslocamento desta curva, de tal forma que ela tangencie os pontos registrados o mais afastado possível tanto à direita quanto à esquerda, tem-se o desvio de forma da linha de flanco, que dá a idéia de quanto o flanco do dente ficou mais espesso.

Fazendo-se um deslocamento da linha de flanco ideal de tal forma que tangencie os limites (superior e inferior) da curva média, tem-se o desvio angular da linha de flanco, que dá a idéia de quanto a linha de flanco real se afastou angularmente da linha de flanco ideal.

Por último, fazendo-se um deslocamento da linha de flanco ideal de tal forma que tangencie os pontos medidos o mais próximo e afastados possível do dente, tem-se o desvio total da linha de flanco, que engloba os dois resultados anteriores.

Engrenagens que possuem excessivo desvio da linha de flanco terão uma deficiente distribuição das cargas aplicadas no sentido axial, quando do engrenamento pinhão/corona. Como esses desvios ocorrem em direções diversas para cada flanco do dente, ocorre no engrenamento variações de velocidade e com conseqüente variação da relação de transmissão.

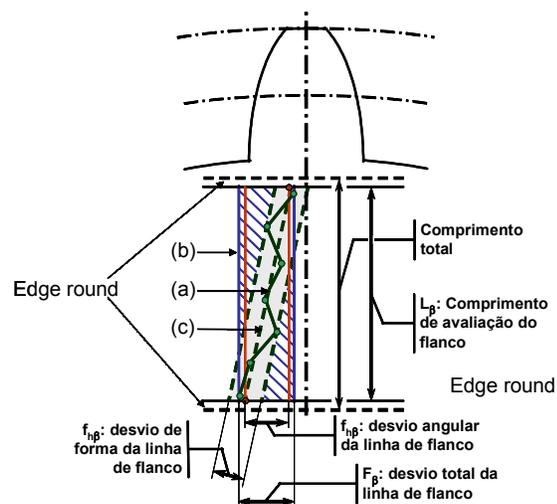


Figura 3.24 - Desvio da linha de flanco.

d. Batimento radial

Conforme já mencionado anteriormente, pode-se utilizar um apalpador que toque os dois ou apenas um dos flancos. A medição é feita o mais próximo possível do diâmetro primitivo. Após a entrada dos dados das características da engrenagem como: número de dentes, ângulo de pressão, módulo, ângulo de hélice, coeficiente de correção de perfil, a CMM, via software, simula o posicionamento de esferas colocadas sucessivamente nos vãos dos dentes de forma a se determinar o batimento radial [42], caso se utilize um apalpador que toque apenas um flanco do dente.

A medição do batimento radial tem importância fundamental no controle da qualidade do processo de fabricação. Engrenagens com excessivo desvio do batimento radial oscilarão na direção dos seus eixos produzindo fortes ruídos e vibração. O backlash, definido por projeto, sofrerá variações com um possível engripamento do conjunto.

d) Medições realizadas com máquinas de medição de forma

As máquinas de medição de formas são equipamentos que se diferenciam das máquinas de medição por coordenadas principalmente pelas seguintes características [43]:

- melhor exatidão; e
- maior velocidade de medição.

É um sistema híbrido capaz de efetuar medições de forma, tal como são realizadas pelas “formtester”, medições de perfis, linha de flanco, passos, ângulo de hélice, batimento de engrenagens, e também, medições de características em 3D.

No caso da medição de cilindridade, as influências de suas medições em um aparelho de medição por coordenadas são relativamente grandes quando comparadas com um aparelho de medição de forma, no qual apenas a peça a ser

testada move-se de maneira uniforme sobre um eixo de rotação. Tal característica faz com que as máquinas de medição de forma possuam uma melhor exatidão em relação as CMM^S e isso ocorre pelo seguinte fato: nas CMM^S, para que o apalpador possa descrever uma trajetória circular, são necessários, pelo menos, dois eixos lineares. Em superfícies não-alinhadas, há a necessidade de até três eixos, que são acelerados e freados repetidas vezes, alternadamente, até a parada total. Este tipo de operação é uma das responsáveis pela introdução dos erros.

Outro fator de diferenciação em relação às CMM^S, é que nestas os erros gravados devem ser corrigidos matematicamente à posteriori, contrariamente as máquinas de medição de forma que possuem um sistema de alinhamento que efetua tal compensação.

Um aparelho de aplicação, dada a sua tradição de mercado, é a máquina de medição de forma PRIMAR. As medições e avaliações deste equipamento detectam os erros individuais, o que outros equipamentos também fazem, mas com melhores possibilidades de operação e alinhamento.

A opção por uma máquina de medição de forma ou por uma CMM vem do tipo de produto desenvolvido. Embora as máquinas de medição de forma apresentem diversas vantagens, com uma menor incerteza, as CMM^S, de fato são mais versáteis, pois, devido à competitividade de mercado, os fabricantes de CMM têm desenvolvido e incorporado software para os mais diversos tipos de aplicação.

d) Medições realizadas com máquinas de medição dedicada

As máquinas dedicadas à medição de engrenagem, figura 3.25, são utilizadas na grande maioria das vezes para esta tarefa específica, podendo de forma limitada realizar medições gerais. Este tipo de equipamento foi assim fabricado, com o intuito de fornecer uma melhor exatidão quando comparada com as CMM^S e a máquina de medição de forma. É possível se efetuar medições, dependendo do software disponível, em todos os tipos de engrenagens: cilíndricas de dentes retos e helicoidais, cônicas de dentes curvos, ferramentas (Hob), dentre outras.

Os baixos níveis de incertezas fornecidos por este tipo de equipamento se deve, principalmente, pelo fato de que sua concepção se baseia em modelos matemáticos associados à tecnologia de engrenagem, pois se pode reproduzir a melhor distribuição geométrica das engrenagens focada na sua funcionalidade. Se a geometria da peça não é bem definida, pode-se fazer uso de escaneamento 3D e obter as suas características geométricas e parâmetros característicos.

De fato, este tipo de equipamento não atende à realidade da Irmãos Zen, por esta além de realizar medições de engrenagens de dentes retos, helicoidais e ferramentas associadas, deve efetuar grande parte de suas medições em produtos dos mais diversos, por exemplo, superfícies complexas do arraste do impulsor de partida.



Figura 3.25 - Máquina dedicada para medição de engrenagens.

3.3.2. Medição dos desvios de conjunto

Uma das grandes vantagens das medições dos desvios de conjunto são:

- a. Rapidez, sendo adequado para o recebimento de engrenagens fabricadas em série.

b. Avaliação funcional das engrenagens.

A instrumentação utilizada para medição dos erros de conjunto se reduz a um equipamento dedicado denominado engrenômetro [44]. Os engrenômetros possuem características muito particulares e fazem avaliação funcional do grau de qualidade das engrenagens através da comparação da engrenagem avaliada com uma engrenagem padrão [45]. Dependendo da forma de engrenamento, pode-se considerar dois tipos de engrenômetros: o engrenômetro que faz a avaliação do desvio composto tangencial, onde ocorre o contato de apenas um flanco de dente, e o engrenômetro que avalia o desvio composto radial em que ocorre o contato de dois ou mais flancos de dentes. Os dois equipamentos são similares quanto a sua forma, diferenciando-se apenas pelos seus processos físicos, figura 3.26. A seguir, far-se-á uma descrição destes processos físicos e forma de medição.



Figura 3.26 - Engrenômetro para medição dos desvios de conjunto.

a. Desvio composto tangencial

Na figura 3.27 mostra-se a forma de detecção do desvio composto tangencial. A engrenagem da direita é a engrenagem em inspeção e da esquerda uma engrenagem padrão. A engrenagem em inspeção é solidária ao seu disco de atrito por meio de sua haste e a engrenagem padrão

encontra-se apenas engrenada, possuindo movimento livre no seu eixo. Os referidos discos giram com velocidades constantes ω_2 e ω_1 , respectivamente, e possuem os mesmos diâmetros primitivos das engrenagens a que estão ligadas. Conforme já exposto no capítulo 2, este engrenamento deve obedecer à relação de transmissão tal que $\omega_1 \cdot Z_1 = \omega_2 \cdot Z_2$. As engrenagens são colocadas em contato em apenas um flanco de dente, que pode ser pela direita ou pela esquerda dependendo da aplicação, e isso é obtido mantendo-se a engrenagem padrão girando com uma certa resistência provocada por um sistema de molas. A velocidade angular ω_2 do disco de atrito é repassada por transmissão para a engrenagem em inspeção, sendo ω_1 a velocidade esperada na engrenagem padrão. Como existe incorreção no flanco dos dentes da engrenagem em inspeção ocorre variação angular na engrenagem padrão que gera uma velocidade angular ω' , diferente de ω_1 , que é registrada por um sistema indicador. Esse desvio é composto por: desvio composto tangencial dente-a-dente (f_i') que indica o desvio de cada dente individualmente e o desvio composto tangencial total (F_i') que indica a amplitude máxima do desvio de todos os dentes.

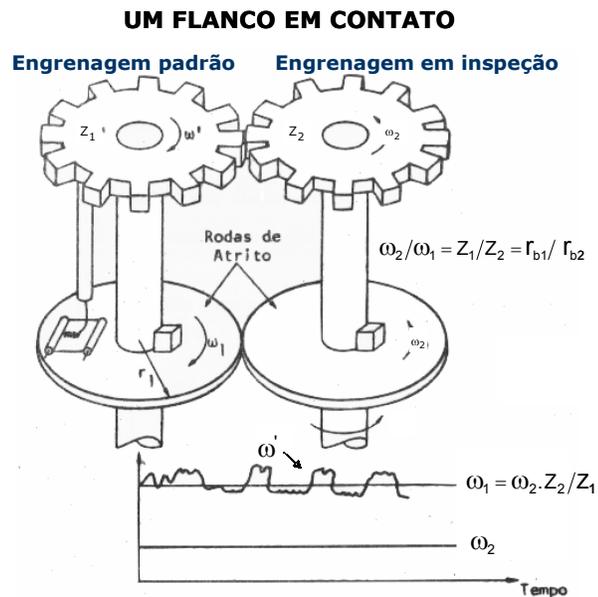


Figura 3.27 - Desvio composto tangencial.

O desvio composto tangencial é de grande interesse para a indústria, pois verifica a funcionalidade da engrenagem com respeito à relação de transmissão. Simula de forma mais próxima do real um engrenamento do par pinhão/corona, além de ser um método de grande exatidão. A variação deste parâmetro implica em movimentos angulares vibratórios, acompanhados de excessivo aumento das cargas nos dentes e presença de ruído. É um bom indicador da variação do processo de fabricação.

b. Desvio composto radial

Da figura 3.28, a engrenagem em inspeção possui seu eixo de rotação fixo e a engrenagem padrão possui seu eixo móvel. A engrenagem padrão, através de um sistema de molas, encontra-se em constante contato, em pelo menos dois flancos de dentes, com a engrenagem em inspeção (ausência de backlash). Devido às imperfeições da engrenagem em inspeção, ocorre a variação da distância entre os centros das engrenagens, que é registrada por um sistema indicador. O desvio composto radial dente-a-dente (f_i'') indica o desvio de cada dente tomado individualmente e o desvio composto radial que corresponde ao desvio máximo de todos os dentes (F_i'')

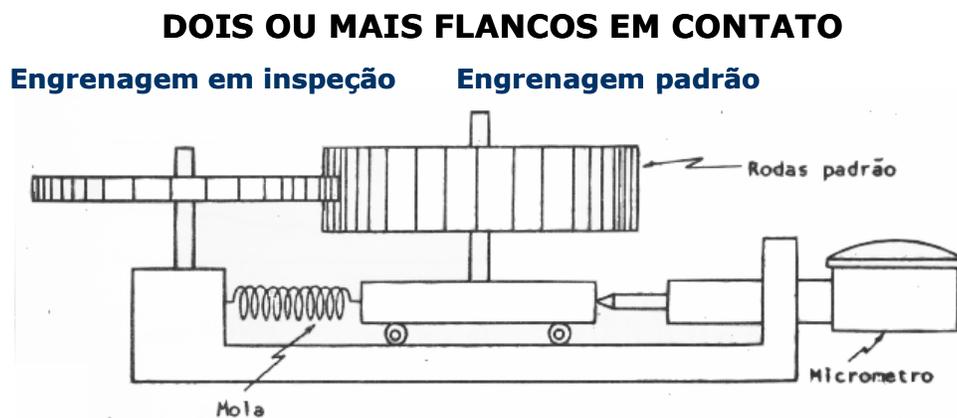


Figura 3.28 - Desvio composto radial.

O desvio composto radial também avalia a funcionalidade das engrenagens. Possui intrinsecamente desvios de batimento radial, pois cada par de dentes

em contato equivale à esferas ou cones colocados entre seus vãos. É um caso extremo do batimento radial.

Os seus testes são menos reais que o desvio composto tangencial, pois ocorrem oscilações do eixo da engrenagem padrão. Por outro lado, fornece resultados mais rápidos, é de fácil construção e grande robustez.

3.4. Considerações finais

Os capítulos 2 e 3 deste trabalho abordaram o assunto da tecnologia de engrenagens cilíndricas de dentes retos, que embora seja o mais simples dentro do conjunto de teoria de engrenagens, ainda é dotado de grande complexidade. O conhecimento de matemática e percepção de geometria plana e espacial são pré-requisitos básicos para o entendimento do assunto.

Ao se tratar da metrologia de engrenagem, torna-se as vezes, muito difícil entender o que se está medindo, caso não se conheça o seu processo físico. Tratar os resultados de um relatório de um determinado parâmetro geométrico apenas como valor numérico com certeza não agrega valor para melhoria do processo. Por exemplo, ao se determinar o batimento radial e este apresentar um valor elevado, pode conduzir o metrologista a concluir que os desvios sejam provenientes de incorreções nos dentes, mas na verdade pode se tratar de um erro de concentricidade que possui um comportamento senoidal. Neste caso, interferir no processo para corrigir imperfeições dos dentes de uma matriz de conformação seria uma decisão errada, pois na verdade o problema é relativo a um erro de concentricidade entre o eixo de rotação da engrenagem e a circunferência de base. Assim, tem-se o conhecimento tecnológico e a metrologia intimamente ligados para a solução de problemas da engenharia.

Por isso, foram repassados todos os conhecimentos adquiridos durante o projeto, na forma de treinamento, para determinado grupo chave da empresa. Os treinamentos consistiram de uma forma bem generalizada de: cinemática de

engrenagens, fabricação e os erros associados, e metrologia para a garantia da qualidade de engrenagens cilíndricas de dentes retos. Por último, foi realizada uma reunião de treinamento para revisão dos conceitos, onde se enfatizaram os pontos mais relevantes para a empresa. Os referidos treinamentos auxiliaram sobremaneira, na execução dos trabalhos a serem descritos nos capítulos 4 e 5 e tiveram como principais objetivos:

- Homogeneizar a linguagem para identificação dos problemas;
- Motivar os participantes a se envolverem em discussões que fornecessem subsídios na identificação de necessidades latentes e problemas que pudessem vir a acontecer no futuro.
- Auxiliar na interpretação dos resultados fornecidos pela CMM-X disponível na empresa.

Dando continuidade a este trabalho, serão mostradas, nos próximos capítulos, as atividades decorrentes do estudo de caso realizado na Irmãos Zen.

CAPÍTULO 4

CARACTERIZAÇÃO DA NECESSIDADE DA EMPRESA

Como já foi introduzido no Capítulo 1, a seqüência recomendada de ações para solução de um problema metrológico industrial é [Raul Wuolff] [1]:

1. realizar uma análise crítica das necessidades de medição;
2. analisar os meios de medição e inspeção disponíveis na empresa;
3. integrar necessidades com meios;
4. tomar decisões sobre revitalização de meios existentes ou aquisição de novos meios;
5. definir o modo de utilização dos meios de medição e as responsabilidades correspondentes; e
6. consolidar o plano de negócios e implementar a solução.

Neste capítulo, são apresentados os resultados da aplicação das duas primeiras ações para a solução do problema de medição de engrenagens e outras geometrias complexas na Irmãos Zen. A apresentação será feita na ordem em que os sucessos foram acontecendo durante o trabalho, mostrando que a própria definição do problema foi mudando, desde o primeiro contato com a empresa até a caracterização final de sua necessidade de medição. Deve-se lembrar que a primeira definição da tarefa foi “fornecer uma solução para melhorar as medições das engrenagens, estrias de evolvente e perfis de arrastes dos impulsores de partida fabricados pela empresa”.

4.1. Caracterização das necessidades de medição

Para caracterizar as necessidades da empresa, começou-se por coletar informações sobre como o controle da qualidade das geometrias de interesse era realizado. Constatou-se, em primeiro lugar, que existia uma grande diferença entre as medições realizadas no chão de fábrica, para separar produto não-conforme e/ou monitorar o andamento dos processos de usinagem, e as medições realizadas para validar ferramentas e liberar os processos de conformação, brochamento e laminação.

As medições no chão de fábrica são realizadas com instrumentos relativamente simples, muitas vezes manuais, que mediam somente alguns parâmetros significativos (e.g. batimento radial). Essas medições, por estarem bem resolvidas na empresa, foram excluídas do contexto deste trabalho. Já as medições relativas à validação de ferramentas metrologicamente mais demandantes eram realizadas na máquina de medir por coordenadas CMM-X, localizada no laboratório de metrologia e na área para inspeção de ferramentas, próxima ao armazém de ferramentas.

Perfis de engrenagens, arrastes e estrias são acabadas diretamente pelas ferramentas correspondentes: matrizes de conformação, punções e brochas/rolos de laminação. Assim, da qualidade geométrica destas ferramentas depende a qualidade geométrica do produto da empresa e, conseqüentemente, sua performance funcional. Essas medições foram consideradas críticas por serem ainda, segundo a empresa, as que acarretam maiores incertezas ao processo de conformação, decidindo-se realizar o levantamento de informações junto aos setores de:

- armazém de ferramentas;
- inspeção de ferramentas; e
- laboratório de metrologia.

Em particular, para a estimação dos tempos de medição, focou-se nas tarefas realizadas pela máquina de medir por coordenadas CMM-X. O levantamento das

informações considerou o período de março de 2002 a fevereiro de 2003, estimando-se os tempos de medição a partir da escolha de alguns produtos típicos. As informações levantadas foram apresentadas na forma de um fluxograma, descrevendo todos os processos de medição de uma ferramenta (por vezes a peça associada) desde o projeto, passando pela produção até o final da sua vida útil. Foram construídos fluxogramas diferentes para o controle de peças destinadas ao mercado original e ao mercado de reposição, pois o nível de controle é diferente. Assim, foram avaliadas as seguintes ferramentas de fabricação (e peças associadas):

- matriz de conformação de engrenagem (engrenagem);
- punção de arraste (arraste);
- brocha (arraste);
- Rolo de laminação (eixo do max torque);
- punção trapezoidal (arraste);
- punção trapezoidal helicoidal (arraste); e
- gabarito.

A metodologia de levantamento dos dados utilizada é a mesma para todas estas ferramentas e peças. O tempo total para cada processo consistiu de uma somatória dos tempos utilizados para projeto e desenvolvimento, validação e revalidação periódica da ferramenta. O tempo foi estimado como sendo a soma do tempo efetivo de medição mais o tempo necessário para o set-up do processo de medição.

A título de exemplo, a fig. 4.1 mostra o fluxograma que descreve as atividades de garantia da qualidade geométrica de engrenagens cilíndricas de dentes retos com perfil evolvente fornecidas para o mercado original. Os quadros vermelhos são as atividades realizadas no laboratório de medir por coordenadas sendo que algumas destas tarefas são desempenhadas medindo diretamente a ferramenta. Em outros casos, devido à impossibilidade de medir perfis evolventes internos das matrizes de

conformação com o equipamento atual, essas medições diretas são substituídas pela medição de peças conformadas com a ferramenta analisada. Na figura 4.1 encontram-se também informações sobre o número de ferramentas medidas no intervalo da análise e os tempos de set-up e realização das medições.

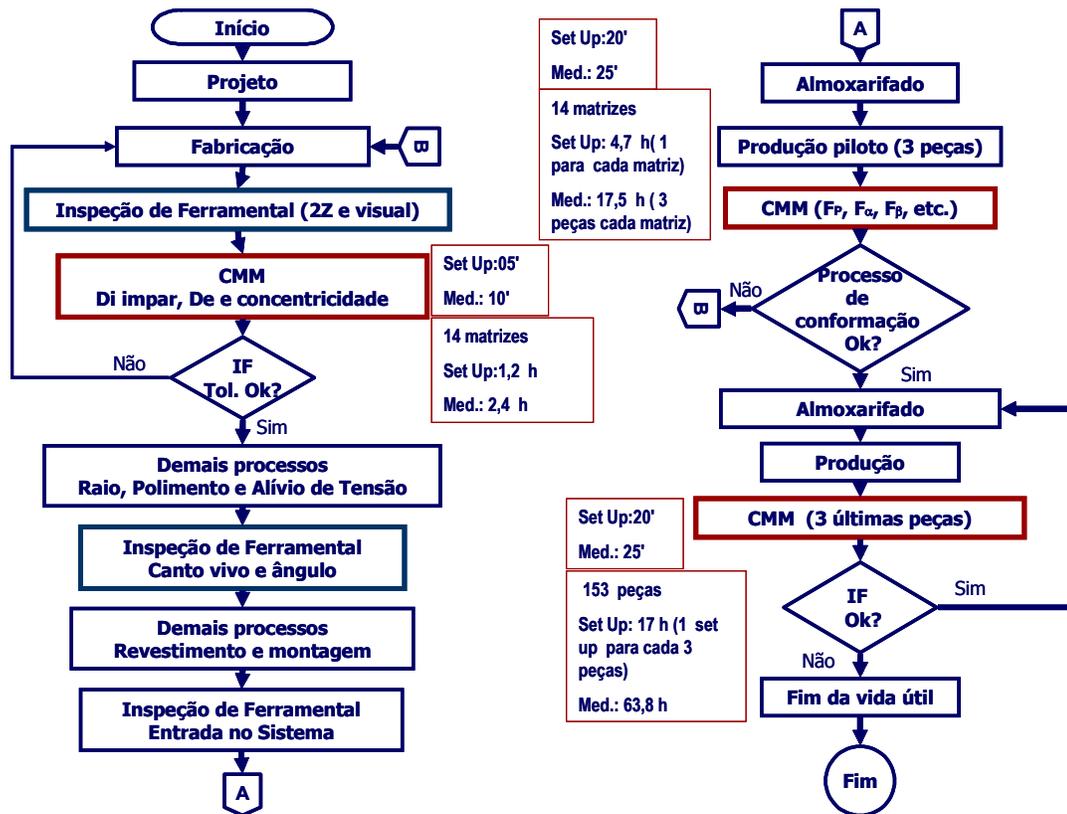


Figura 4.1 - Fluxograma das tarefas de medição para o mercado original.

Para o mercado de reposição usa-se uma estratégia de garantia da qualidade simplificada, com relaxamento do controle do perfil da engrenagem. Na figura 4.2 pode-se observar a seqüência de atividades, com informação sobre o número de ferramentas construídas no intervalo da análise e os tempos de medição correspondentes.

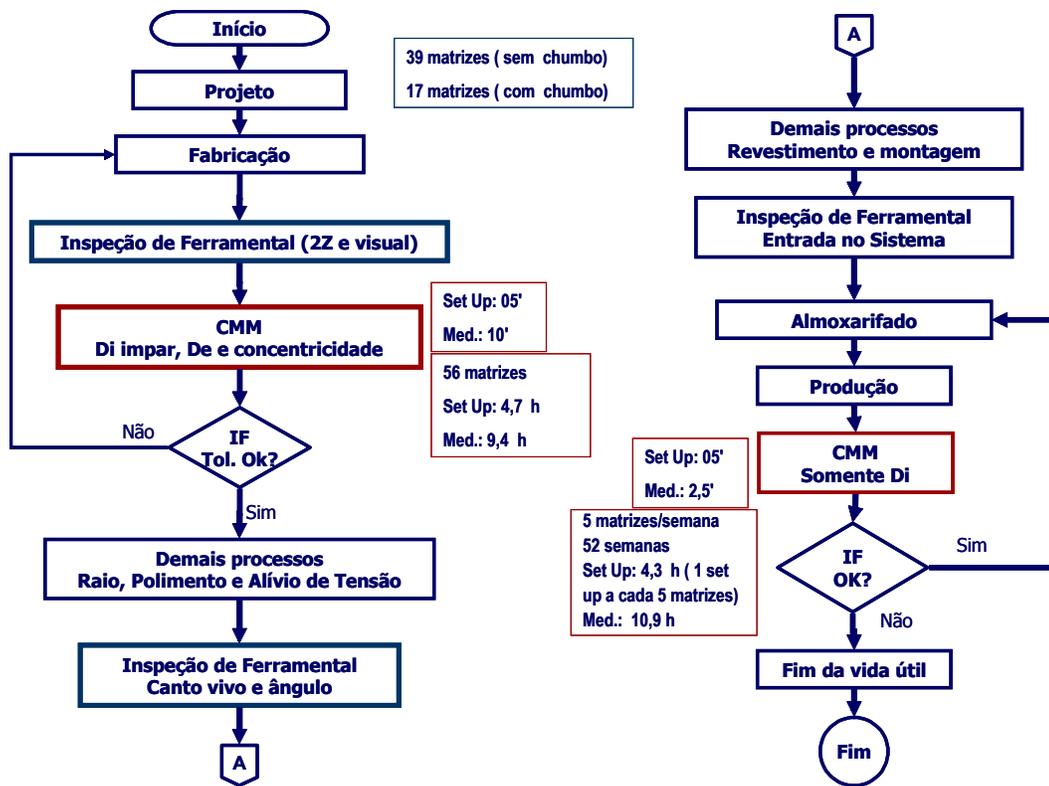


Figura 4.2 - Fluxograma das tarefas de medição para o mercado de reposição.

Após a construção dos fluxogramas para todos os processos indicados anteriormente (não mostrados) e da estimativa dos tempos de medição, chegou-se aos seguintes resultados:

Tabela 4.1 - Tempos totais de medição para o mercado original (MO) e de reposição (MR) em horas.

PROCESSO	Set Up (h)	Desenvolvimento (h)	Revalidação da ferramenta (h)	Tempo total (h)
CONFORMAÇÃO À FRIO (MO)	22,9	19,9	63,8	106,6
CONFORMAÇÃO À FRIO (MR)	9,0	9,4	10,9	29,3
BROCHA (MO)	12,5	50	-	62,5
BROCHA (MR)	-	-	-	-
ROLO DE LAMINAÇÃO (MO/MR)	5,4	29,3	-	34,7
PUNÇÃO DE ARRASTE (MO)	15,3	4,6	50,5	70,4
PUNÇÃO DE ARRASTE (MR)	0,6	2,9	-	3,5
PUNÇÃO TRAPEZOIDAL (MO/MR)	4	23,4	-	27,4
PUNÇÃO TRAPEZOIDAL HEL. (MO/MR)	-	-	-	-
GABARITO (MO/MR)	2,8	123,8	-	126,6
SOMATÓRIA DOS TEMPOS DE TODOS OS PROCESSOS				461,0

Os tempos totais são: 239,5 horas anuais de medição para o mercado original, 32,8 horas anuais de medição para o mercado de reposição e 188,7 horas para os casos em que o grau de exigência é o mesmo, tanto para o mercado original quanto para o de reposição chegando a um total aproximado de 460 horas de medição por ano. Considerando que um mês de trabalho corresponde a aproximadamente 160h, fica

clara a grande despesa de tempo de medição realizada pela Irmãos Zen para garantir a qualidade geométrica dos seus produtos.

4.2. Análise dos meios de medição existentes na empresa

Nesta seção, tratar-se-á das disponibilidades atuais de infra-estrutura no referente a equipamento e local para efetuar medições. Esses meios serão discutidos com referência às necessidades de medição detalhadas na seção anterior, evidenciando necessidades não satisfeitas e estabelecendo objetivos para melhoria da capacidade de medição da empresa.

4.2.1. Descrição dos meios disponíveis e do ambiente de medição

Como já se antecipou, a instrumentação existente na empresa pode ser dividida em dois grupos: a que se encontra nas linhas de produção e a que permanece no Laboratório de Metrologia. Os instrumentos pertencentes ao primeiro grupo são usados para verificação de características dimensionais 'in loco' e numa determinada frequência fazendo parte deste grupo: os relógios comparadores, micrômetros, paquímetros, dispositivos passa-não-passa, dentre outros. Entre os instrumentos que permanecem no Laboratório, cabe destacar a máquina para medição de desvios de forma MITUTOYO RA400, figura 4.3 (a), e a já mencionada máquina de medir por coordenadas CMM-X, figura 4.3 (b) [46], que tem como especificações técnicas as características identificadas à seguir:

- Fabricante/ Modelo: CMM-X;
- Volume de medição: X = 710 mm; Y = 660 mm; Z = 460 mm;
- Dimensões externas: Altura : 2310 mm; Largura : 1125 mm;
Comprimento : 1495 mm;
- Software de medição: Wtutor; Profile (utilizado para escaneamento); Wgear (medição de engrenagem);

- Resolução: 0.0005 mm; e
- Incerteza de medição (3D): $(1,7 + L/230) \mu\text{m}$.

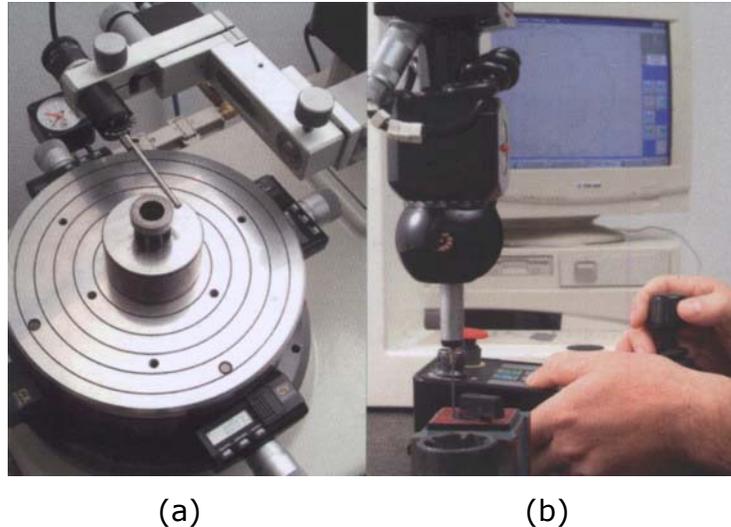


Figura 4.3 - Instrumentação do laboratório de medição por coordenadas.
 (a) Formtester (b) CMM-X

No laboratório é realizada, principalmente, a medição dos parâmetros característicos das engrenagens e estrias, assim como a medição dos perfis de arrastes. Outras atividades de importância são a medição do ferramental utilizado na produção, a validação de dispositivos de medição, as medições para suporte à engenharia reversa e à manutenção. Também, efetua-se no laboratório a calibração da maioria dos instrumentos de controle dimensional que operam na linha de produção. Os padrões usados nestas calibrações são, em geral, calibrados por terceiros.

O laboratório de metrologia dimensional possui condições ambientais controladas e, atualmente, seu sistema automatizado mantém uma variação de $(20 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$ de temperatura e $(60 \pm 5) \%$ de umidade relativa. O sistema de distribuição de ar é constituído por dois dutos no teto, munidos de grades de saída direcionáveis, que percorrem o laboratório em sentido longitudinal. A máquina de medir por coordenadas CMM-X está localizada em posição simétrica entre os dutos, sobre uma base de concreto independente da laje do resto do laboratório. Não existe

evidência de que essas vibrações afetem as medições feitas na máquina de medir por coordenadas, equipada com amortecedores passivos, e nem na máquina de medir desvios de forma.

4.2.2. Limitações operacionais

Através de discussões com o pessoal responsável pelas tarefas de medição, constatou-se que os principais problemas que dificultavam o controle da qualidade em engrenagens, estrias e perfis de arraste eram:

- impossibilidade de medição direta dos parâmetros característicos na matriz de conformação de engrenagens;
- dificuldade para estabelecer o eixo de referência na medição de engrenagens;
- impossibilidade de medição direta dos parâmetros característicos em brochas helicoidais;
- impossibilidade de medir perfis de estrias helicoidais internas; e
- baixa velocidade de medição em modo de *escaneamento*.

O primeiro problema é devido a uma limitação do software da máquina de medir por coordenadas, mas também à dificuldade de acessar o topo do dente (vão do perfil da ferramenta), por ser o raio de topo demasiadamente pequeno [47]. Por essa razão, o controle da geometria da ferramenta se faz através da medição das engrenagens conformadas com ela, tipicamente três peças piloto na liberação da ferramenta e três no final de cada ciclo de produção, para se garantir a qualidade da matriz com relação ao seu desgaste.

O segundo problema é causado pela necessidade de usinar o furo de cada engrenagem a medir, para poder encaixá-lo sobre uma haste retificada. Essa haste é usada para fixar a engrenagem e para estabelecer o eixo de referência para medição do perfil do dente. Agrega-se assim, mais uma operação que aumenta o

tempo e o custo das medições, sem necessariamente garantir a concentricidade entre a haste e o diâmetro primitivo da engrenagem a medir.

A medição de brochas helicoidais depara-se com a limitação do software da máquina de medir por coordenadas para medição dos parâmetros característicos. Os engenheiros de desenvolvimento, no entanto, criaram um método alternativo que compreende, inicialmente, pela fabricação de uma brocha piloto com pequeno comprimento longitudinal. Esta brocha piloto é retificada e o perfil dos dentes é medido na máquina de medir por coordenadas. As informações são repassadas para o setor de desenvolvimento que faz a comparação gráfica destes resultados com o perfil teórico do dente. Estando os desvios dentro das tolerâncias correspondentes, a brocha é então fabricada [48].

O problema na medição de estrias internas é associado à acessibilidade do perfil do dente pelo apalpador. Isso dificulta a obtenção de informação sobre o ângulo da hélice, característica chave para a funcionalidade do impulsor.

Por último, o problema da baixa velocidade de escaneamento traz conseqüências tanto na medição das engrenagens como na medição do perfil interno do arraste e o seu punção de conformação. Outra limitação é que o software não permite interligação direta com o CAD, tendo-se que fazer um tratamento computacional das informações.

Como resultado desta situação, têm-se processos de medição demorados e pouco confiáveis, que resultam em um aumento dos custos de desenvolvimento e produção, e em limitações na quantidade e qualidade da informação disponível sobre produto e processo. Isso tudo limita a capacidade da empresa para satisfazer às fortes exigências do mercado, e coloca um limite ao crescimento dos negócios, especialmente como fornecedor de impulsores de partida para o mercado original.

4.2.3. Avaliação metrológica preliminar dos meios disponíveis

Por ser certificada ISO/TS 16949, a empresa aplica as recomendações do manual de Análise dos Sistemas de Medição (Measurement System Analysis – MSA) [49] para assegurar a confiabilidade das suas medições. No contexto do estudo relatado nesta dissertação, realizou-se um estudo de repetitividade e reprodutibilidade (R&R) para medição do desvio de passo individual na máquina de medir por coordenadas DEA.

O estudo de R&R em questão trata da avaliação de sistemas de medição por variáveis utilizando conceitos de controle estatístico de processos, em particular os relativos aos gráficos de média e amplitude (\bar{X} -R) [49]. O método determina uma estimativa tanto do erro de repetitividade, devido à variação de carácter aleatório (denominada variação de equipamento VE), quanto do erro de reprodutibilidade, devido à variação entre as médias das medições de cada operador (denominada variação do operador VO).

Para a análise, tomaram-se 10 engrenagens semi-acabadas e fizeram-se 3 medições do desvio de passo individual em cada uma delas. As medições foram realizadas por dois operadores independentes A e B. O resultado obtido pela Irmãos Zen mostrou um R&R% de 51,1% em relação a tolerância (R&R%/Tol) e de 45,3% em relação a variação total presente nos dados (R&R%/TV), indicando assim que o sistema de medição não é capaz. Vale ressaltar que o valor de R&R% não pode ser maior que 30% para se ter um sistema de medição capaz. Na figura 4.4, podem-se observar os gráficos de controle de média e amplitude correspondentes ao estudo realizado.

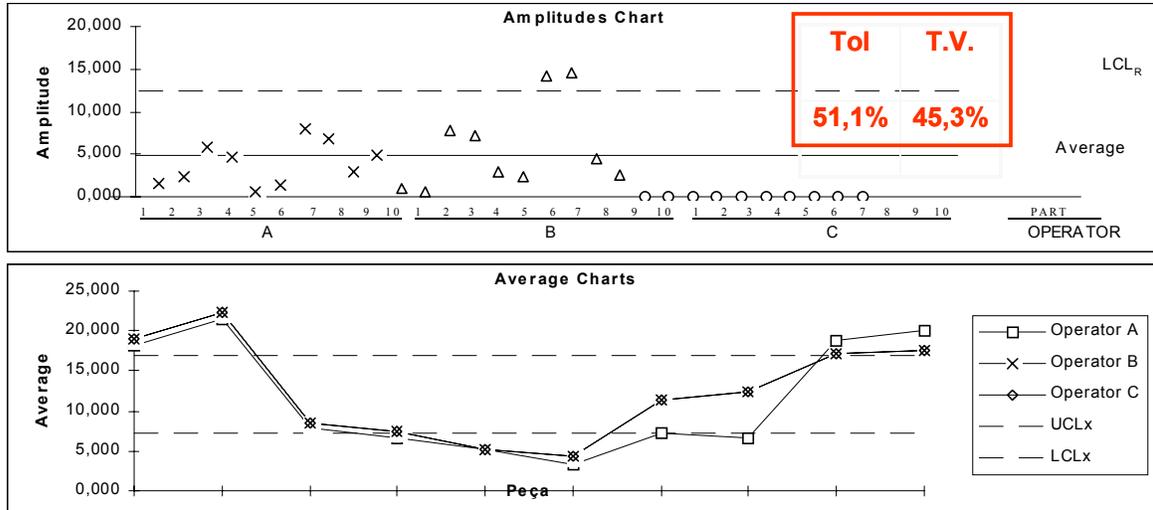


Figura 4.4 - Cartas de média e amplitude para 10 engrenagens (R&R).

Devido à falta de capacidade do processo de medição evidenciada pelo estudo de R&R, os dados foram processados também usando a sistemática proposta por Wheeler [50] [51] – Evaluating Measurement Process (EMP). Neste estudo foram avaliadas a tendência e a inconsistência dos operadores. Existe tendência, quando existem diferenças estatisticamente significativas entre as médias das medições dos diferentes operadores. Existe inconsistência, quando os desvios padrão do erro de repetitividade dos operadores mostram diferenças estatisticamente significativas.

A partir dos dados de medição gerados para o estudo de R&R, para os operadores A e B, foram plotados tanto as gráficas de média e amplitude quanto os gráficos de tendência e inconsistência dos operadores. Pela carta de amplitude, figura 4.5, observou-se que as engrenagens 7 e 8 do operador B estão fora de controle. Além disso, observou-se que o índice de discriminação D_r (indicador de capacidade de medição) ficou abaixo de 4, o que confirma a baixa capacidade do sistema de medição, já evidenciada pelo estudo de R&R.

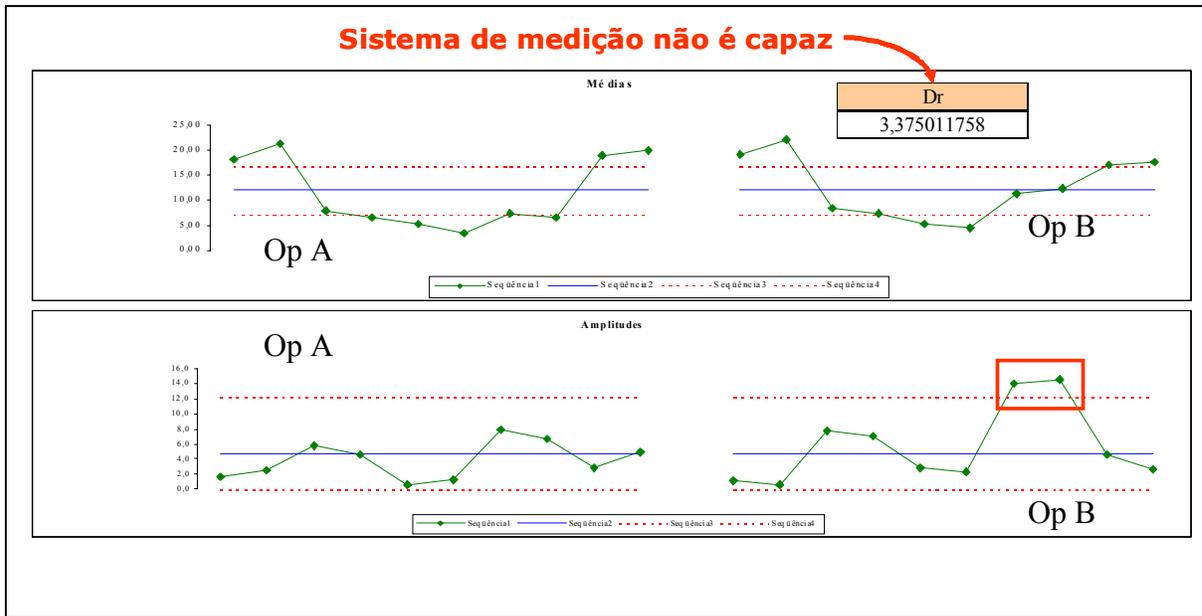


Figura 4.5 - Cartas de média e amplitude em um estudo EMP.

Continuando o estudo, nas cartas de tendência e inconsistência do operador, figura 4.6, observa-se a ausência de tendência e inconsistência do operador, pelo fato de ambos operadores estarem dentro dos limites de controle.

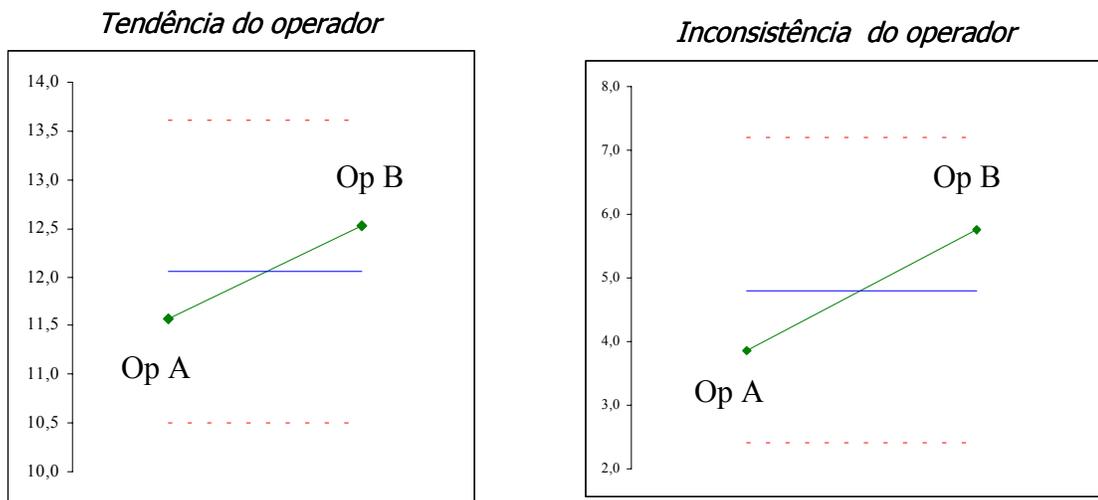


Figura 4.6 - Gráficos de tendência e inconsistência do operador.

O fato de não existirem tendência ou inconsistência significativas entre os operadores A e B pode ser interpretado como se os dois operadores medissem, em média, com o mesmo erro de repetitividade. Então, as amplitudes excessivas das engrenagens 7 e 8 pelo operador B ocorrem, provavelmente, pela ação de causas especiais associadas às próprias engrenagens. Observa-se também, que o operador A apresentou amplitudes elevadas nas engrenagens 7 e 8 e isto habilitou a eliminar os dados relativos às engrenagens 7 e 8 por serem considerados atípicos.

Com a retirada das engrenagens 7 e 8, recalcularam-se os valores de R&R%, obtendo-se 34,6% e 30,6%, em relação à tolerância e à variação total, respectivamente. Tem-se, conseqüentemente, um sistema de medição marginalmente capaz. Na figura 4.7, podem-se observar os gráficos de média e amplitude onde se eliminaram as peças 7 e 8.

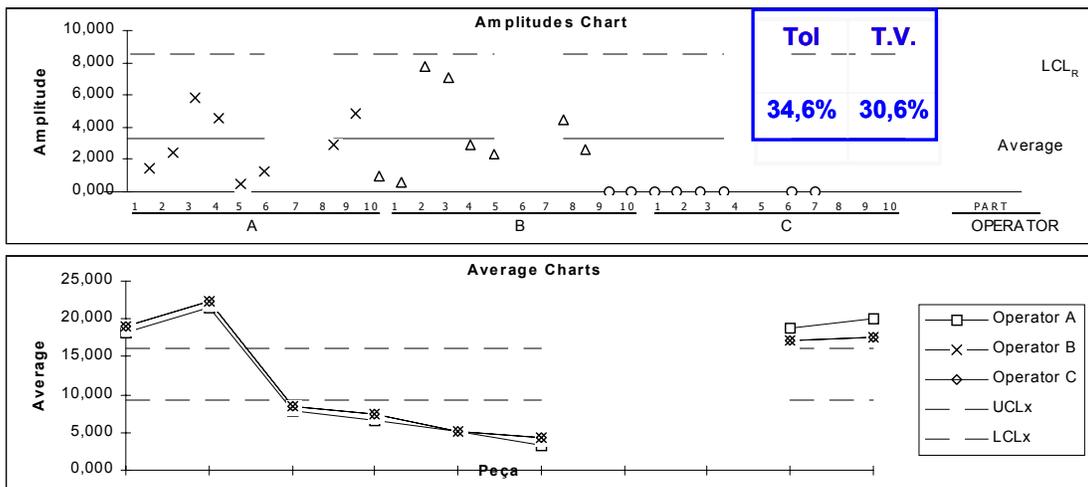


Figura 4.7 - Cartas de média e amplitude sem as engrenagens 7 e 8 (R&R%).

Por fim, para o estudo EMP, observa-se um valor de D_r de 5,35, indicando, também, um sistema de medição apenas capaz.

Do exposto, fica evidenciado que há a necessidade de melhoria do sistema de medição da Irmãos Zen, não somente pela limitação de escaneamento de certas geometrias complexas e o difícil acesso de apalpação de algumas peças, mas

também pela capacidade marginal do processo de medição. Deve-se considerar que, embora a capacidade do processo de medição disponível possa ser marginalmente aceitável para inspeção de peças, ela será insuficiente para a qualificação das ferramentas com que as citadas peças são conformadas, por serem as suas tolerâncias menores. O efeito da capacidade de medição na melhoria da vida das ferramentas é tema da próxima seção.

4.3. Identificação das oportunidades de melhoria: o aumento da vida das ferramentas

4.3.1. Explicação do fenômeno de desgaste de ferramentas de conformação

As engrenagens aplicadas nos impulsores de partida possuem grau de qualidade que varia entre 10 e 11, segundo norma ISO 1328-1/2. Para cada um dos parâmetros característicos da engrenagem, o grau de qualidade define uma tolerância determinada. Dado que as peças são produzidas por processos de conformação, essas tolerâncias devem acomodar a variação total de longo prazo do processo, basicamente constituída pela variação de curto prazo, ou variação por causas comuns, e a variação estrutural devida ao desgaste da ferramenta. Considerando que a taxa de desgaste da ferramenta seja uniforme, é evidente que a maximização da vida da ferramenta será possível somente se for viável a minimização da sua tolerância de fabricação. Na medida que se consiga construir ferramentas de conformação com tolerâncias estritas e convenientemente localizadas num extremo da faixa de tolerância das peças, o excedente de tolerância disponível para acomodar variações devida ao desgaste aumenta e, com isso, aumenta a vida útil da ferramenta , figura 4.8.

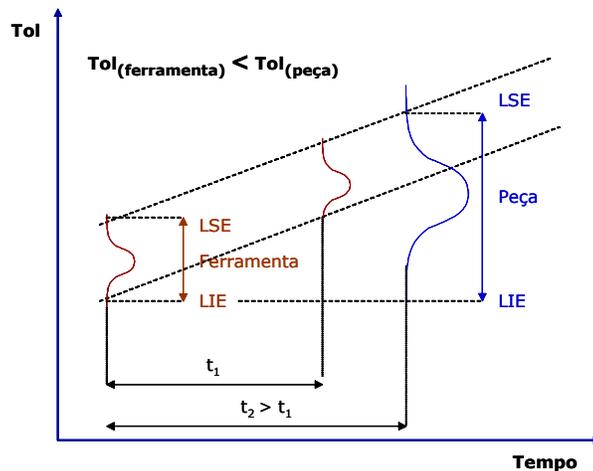


Figura 4.8 - Tolerância da ferramenta versus tolerância da peça.

Para alcançar esse ideal, é necessário dispor de meios de medição que possam medir as ferramentas eficientemente. Aqui são críticos os aspectos de acessibilidade e compatibilidade com as geometrias internas, não excluindo a relação entre a incerteza de medição e a tolerância especificada para os parâmetros da ferramenta. Como já se mostrou nas seções anteriores, nenhum destes requisitos está plenamente atendido na situação atual da empresa.

Assim uma questão é: o quanto de melhoria é possível se introduzir no processo de medição, para se estender a vida das ferramentas e, com isso, diminuir o custo de produção? Este dilema somente pode ser resolvido por meio de um compromisso, já que melhorar a capacidade de medição também implica em custos, que devem ser justificados como investimento [1]. Observa-se aqui uma visão estratégica da metrologia como suporte ao desenvolvimento de tecnologias chaves para a competitividade da empresa.

Por insuficiência de dados, esse compromisso foi resolvido considerando que as ferramentas não deveriam ter uma tolerância menor do que a utilizada por uma máquina de medir por coordenadas moderna para aplicação industrial com adequada capacidade. Isso levou a especificar como tolerância alvo para as ferramentas, o correspondente grau de tolerância da peça menos dois. Assim, tem-se que a solução de medição buscada deveria ser capaz de avaliar a conformidade

de ferramentas construídas para atender graus de qualidade entre 8 e 9, segundo ISO 1328-1/2. Como cada grau de qualidade divide a tolerância do grau superior por $\sqrt{2}$, a tolerância da ferramenta de conformação resultará na metade da tolerância da engrenagem. Vale observar que com a capacidade de medição atual da CMM-X, que possui um R&R%/Tol de 34,6%, ao se dividir a tolerância por dois aumenta-se o R&R%/Tol para aproximadamente 70%, valor claramente inaceitável.

4.4 Sumário e definição dos objetivos de melhoria

As duas primeiras etapas da sistemática proposta por R. Wu para solução de problemas metroológicos industriais resultaram nas seguintes constatações:

1. Os planos de inspeção da empresa estão claramente focados na inspeção do ferramental, como meio de garantir a conformidade geométrica das peças produzidas.
2. A medição das ferramentas usadas para produção dos produtos de maior incidência no faturamento da empresa (matrizes e punções de conformação a frio, brochas e rolos de laminação) não podem ser medidas com os meios atuais, o que levou a empresa a estabelecer estratégias alternativas para garantir a qualidade dos produtos.
3. As principais limitações associadas à medição na máquina de medir por coordenadas existente são:
 - de acessibilidade dos apalpadores em geometrias internas de ferramentas e peças;
 - de software no estabelecimento do sistema coordenado da peça e na medição de perfis de evolvente internos; e
 - de exatidão, na medição de características significativas de peças e ferramentas.

O resultado da situação existente é tanto uma despesa de, aproximadamente, 500 horas anuais de medição para satisfazer as exigências de qualidade geométrica em impulsores para o mercado de peças originais e como uma limitação do número de operações de inspeção, realizadas durante a fabricação dos impulsores para o mercado de reposição. Melhorando a velocidade e a capacidade de medição, poder-se-á reduzir o lead time para fabricação de ferramentas e aumentar a vida das mesmas sem aumentar os custos diretos de medição. Evidentemente, este último resultado não poderá ser conseguido imediatamente, já que será necessário monitorar o desgaste das ferramentas, até que a empresa acumule o conhecimento necessário para o estabelecimento dos valores alvos de fabricação para cada característica geométrica afetada pelo desgaste. Esse acúmulo de conhecimento foi impossível até o momento, pela impossibilidade de medir ferramentas com suficiente exatidão. Mas será possível, se for decisão da empresa aumentar o número de medições realizadas, para garantir a qualidade geométrica dos impulsores para o mercado de reposição, sem um aumento expressivo de custo, realizando no laboratório de metrologia da empresa parte das medições feitas na inspeção de ferramentas.

Assim, pode se estabelecer como meta para as etapas seguintes a identificação de uma solução de medição que:

1. Seja capaz de medir as características geométricas significativas para a empresa e seus clientes.
2. Forneça garantias de confiabilidade metrológica para medir ferramentas (capacidade adequada).
3. Seja capaz de medir consideravelmente mais rápido que os meios existentes;
4. Na eventualidade de substituir os meios atuais, satisfaça também às necessidades de medição para manutenção, engenharia reversa e outras tarefas eventuais realizadas atualmente na CMM-X e por meios de medição manuais.

5. Possa ser instalada no laboratório existente, sem exigir maiores modificações de infra-estrutura.

O capítulo a seguir, trata da escolha do meio de medição que satisfaça a esse conjunto de restrições.

CAPÍTULO 5

SOLUÇÃO DO PROBLEMA

Após o diagnóstico e a definição dos objetivos para o desafio de alinhar a metrologia da empresa com as necessidades de medição impostas pelo mercado atual, deve-se avançar na materialização de uma solução técnica e economicamente adequada. Neste capítulo, descrevem-se as estratégias de solução exploradas, os critérios utilizados para identificar a estratégia ótima para a empresa e o processo aplicado para seleção e aquisição do equipamento que satisfaça essas necessidades.

5.1. Descrição das estratégias de solução

A necessidade de adequar a capacidade metrológica da empresa levou a considerar duas variantes de solução:

- aquisição de novo equipamento ou atualização do equipamento disponível; e
- terceirização das medições.

A opção por uma destas variantes depende de questões que estão além do puramente técnico-econômico, dependendo principalmente da política de gestão da empresa e da imagem que os altos gerentes têm da metrologia como processo gerador de valor.

Na tabela 5.1, é realizada uma comparação entre as duas variantes, sob diferentes pontos de vista.

Tabela 5.1 - Comparação entre a aquisição e/ou atualização de equipamento para fazer as medições na empresa e a contratação de serviços de terceiros.

Medição na empresa		Medição terceirizada
Precisa de grandes investimentos iniciais.	↔	Não existe investimento inicial: se paga pela realização do serviço.
O desafio está não somente na seleção do equipamento e projeto da estrutura laboratorial, mas também na formação de recursos humanos.	↔	O desafio está na seleção de um prestador confiável e tecnicamente competente.
Se a escolha do equipamento resulta errada, a readequação nem sempre é possível e, quando for, geralmente implica em altos custos.	↔	Se a escolha do fornecedor resultar errada, pode-se mudar com pouco custo.
A informação estratégica sobre produtos e processos fica sob controle da empresa.	↔	O prestador de serviços é detentor de informação estratégica da empresa.
As competências metrológicas da empresa são mantidas pela renovação contínua dos desafios técnicos.	↔	Competências metrológicas da empresa restritas à interpretação de resultados e gestão do serviço terceirizado.
Tarefas de medição não rotineiras, associadas ao desenvolvimento e melhoria de produto e processo, ficam simplificadas pelo acesso direto ao recurso.	↔	Problemas logísticos e de comunicação e dificuldades para o deslocamento de pessoal podem complicar a terceirização de tarefas não rotineiras.
A sub-exploração do recurso implica em demora no retorno do investimento, portanto, maiores custos para a empresa.	↔	O custo para a empresa é função das medições realizadas.
Dúvidas sobre os resultados de medição podem ser tiradas quase imediatamente, refazendo as medições.	↔	Refazer medições pode implicar em demoras de horas ou dias.

As duas variantes conceptuais foram analisadas durante a execução deste trabalho. Dado o tipo de tarefas de medição reveladas no diagnóstico, achou-se conveniente dividir a primeira variante em duas soluções alternativas:

1. aquisição de uma máquina de medir por coordenadas com capacidade para realizar todas as tarefas requeridas pela empresa; e
2. aquisição de um equipamento específico para medir engrenagens e melhoria da capacidade da máquina de medir por coordenadas CMM-X existente.

Na figura 5.1, apresenta-se um diagrama de blocos que relaciona as três possíveis soluções a serem tomadas.

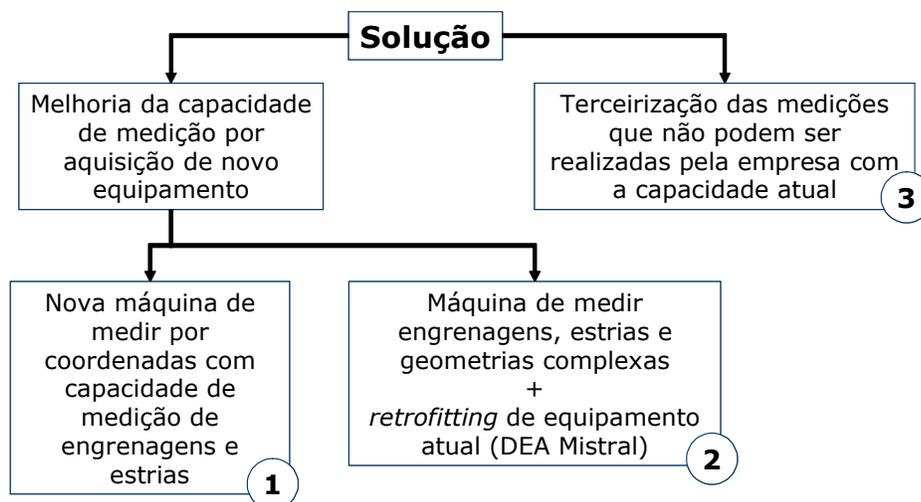


Figura 5.1 - Soluções alternativas.

Decidiu-se postergar a decisão por uma das alternativas, solução da figura 5.1, até contar com informação técnica e de custos que permitisse realizar uma comparação objetiva. Para obter essa informação, o primeiro passo foi construir um documento que descrevesse todas as tarefas de medição críticas, que o novo equipamento ou prestador de serviços deveria ser capaz de realizar: o caderno de encargos.

5.2. Caderno de encargos

Identificadas as vantagens de melhoria do sistema de medição, para garantir a qualidade do produto final, foi elaborado um caderno de encargos que operasse como documento de referência entre a equipe do projeto e os possíveis fornecedores da solução metrológica, seja esta na forma de um novo equipamento ou um serviço de terceiros.

O corpo central do caderno de encargos constitui-se da descrição das tarefas de medição a serem realizadas. As onze tarefas críticas documentadas no caderno foram:

- 1) Medição de engrenagens forjadas à frio.
- 2) Medição de matriz de forjamento de engrenagem.
- 3) Medição de estria interna.
- 4) Medição de brocha bi-helicoidal.
- 5) Medição do eixo do max torque.
- 6) Medição do rolo de laminação.
- 7) Medição do arraste.
- 8) Medição do punção de arraste.
- 9) Medição do estriado interno com perfil reto;
- 10) Medição do punção de perfil reto.
- 11) Medição do gabarito.

Para cada uma delas, as seguintes informações foram fornecidas:

- ✓ breve descrição da tarefa de medição;
- ✓ forma da peça;
- ✓ dimensões internas/externas; e

- ✓ características geométricas a medir, com valor nominal e tolerância (no caso dos perfis evolvente, foi especificado o grau de qualidade ISO).

Nas figuras 5.2 e 5.3 apresentam-se, como exemplo, as especificações e gravuras do caderno de encargos correspondentes à matriz de conformação do pinhão do arraste e do corpo do arraste.

Nº	Descrição	Foto	Detalhes das tarefas	Sim/Não
2	Medição de matriz de forjamento de engrenagem		<p>3. Medição de dentado interno:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Número de dentes: 11 ▪ Comprimento dos dentes: 35 mm ▪ Ângulo de pressão: 20° ▪ Parâmetros a medir segundo ISO 1328 -1/2: <ul style="list-style-type: none"> ○ Single Pitch Deviation (f_{pt}) ○ Total Pitch Deviation (F_{pt}) ○ Total Profile Deviation (F_{α}) ○ Profile Form Deviation ($f_{f\alpha}$) ○ Profile Slope Deviation ($f_{H\alpha}$) ○ Total Helix Deviation (F_{β}) ○ Helix Form Deviation ($f_{f\beta}$) ○ Helix Slope Deviation ($f_{H\beta}$) ○ Runout (F_r) ▪ Grau de qualidade 8 e 9 segundo ISO 1328 -1/2 (ver tabela com as tolerâncias) <p>4. Dimensões externas do objeto:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Diâmetro externo da matriz: 200 mm ▪ Altura da matriz: 46 mm 	

Figura 5.2 - Características de uma matriz de conformação de pinhão de arraste, contidas no caderno de encargos.

Nº	Descrição	Foto	Detalhes das tarefas	Sim/Não
7	Medição do arraste		<p>13. Medição do arraste:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Geometria interna complexa <p>14. Dimensões externas do arraste:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Diâmetro externo: 45 mm ▪ Altura do arraste: (7 a 10) mm 	

Figura 5.3 - Características do corpo do arraste, contidas no caderno de encargos.

Também foram incluídas no caderno de encargos informações sobre as características do ambiente em que se pretende instalar o novo equipamento. Como o laboratório de metrologia da empresa apresenta características atuais aceitáveis, o sistema de medição deveria, à princípio, enquadrar-se em tal ambiente para se evitar o máximo de modificações, que interfiram nas atividades atuais e gerem custos adicionais. As especificações foram:

- ✓ temperatura entre 18 °C e 23 °C (embora o termômetro instalado na sala indique apenas variações entre 19 °C e 21 °C);
- ✓ umidade relativa: $(60 \pm 5) \%$; e
- ✓ possível presença de vibrações, não caracterizadas quantitativamente, devido aos impactos provenientes das prensas.

Por último, foram estabelecidos os requisitos relativos à confiabilidade metrológica:

- ✓ A solução de medição oferecida deve satisfazer a uma relação incerteza/tolerância, para todas as tarefas de medição descritas no caderno de encargos. O valor de incerteza a usar é a incerteza expandida 95%, avaliada segundo o Guia ISO para Expressão da Incerteza de Medição [52] [53]:

$$\frac{U_{95\%}}{Tol} \leq \frac{1}{5}$$

- ✓ A solução de medição oferecida deve satisfazer ao requisito de repetitividade e reprodutibilidade [49] para todas as tarefas de medição associadas ao controle de processos e/ou separação de produto não-conforme:

$$R \& R(\%Tol) \leq 30\%$$

Desta forma, os possíveis fornecedores foram instruídos a preparar uma proposta técnica e econômica que fosse completa nas suas informações sobre hardware

(mecânico, eletro-eletrônico, etc.), software e padrões de calibração e verificação, incluindo uma clara e concisa descrição do equipamento base e de todos os acessórios necessários para realizar as tarefas de medição solicitadas pela empresa.

5.3. Identificação de fornecedores potenciais

Após levantamento de aproximadamente 10 fornecedores de adequada referência no mercado, foram contatados apenas quatro por possuírem características gerais que atendiam as expectativas iniciais da Irmãos Zen, entre eles:

- Fornecedores com maior presença e antecedentes no Brasil;
- Existência de escritório da empresa no Brasil; e
- Forte compromisso na garantia de assistência técnica.

Efetuada contato, inicialmente por e-mail e posteriormente por telefone, verificou-se o interesse das empresas que chamaremos A, B, C e D em atender as solicitações. As empresas A, B e C ofereceram soluções no escopo da solução 1, medição por coordenadas. Um aspecto de relevante importância técnica é que todas elas (A, B e C) ofereciam equipamentos de média a alta exatidão, com capacidade de medição por escaneamento. A empresa D foi contatada por oferecer uma solução mista (equipamento específico), com capacidades para medição de desvios de forma, de formas complexas por escaneamento e medição de perfis de engrenagens. Não foram contatadas empresas que ofereciam equipamentos dedicados à medição de engrenagens, porque estes não estariam fornecendo uma solução adequada para medição do perfil de arraste e das ferramentas associadas

De posse das propostas de caráter técnico/comercial enviadas, verificou-se que o atendimento às solicitações contidas no caderno de encargos se diferenciavam bastante. Algumas das empresas foram mais incisivas na questão de transparência de seus produtos, fornecendo os mais diversos tipos de manuais técnicos, inclusive apresentações em extensão PPT (PowerPoint), que facilitaram bastante a tomada de dados dos aspectos operacionais da CMM. Outras propostas não foram tão

detalhadas, a ponto de serem interrogadas quanto à possibilidade de envio de informações mais completa. Deu-se especial importância à agilidade com que os proponentes reagiam às demandas de informação, por ser esse um indicador do compromisso e competência técnica do representante local, potencialmente vinculado com o desempenho posterior em caso de acionamento da assistência técnica.

Por último como solução 3 (terceirização), optou-se pela denominada empresa E, principalmente por sua proximidade com a cidade de Brusque. Essa empresa foi submetida a uma avaliação de sua capacidade de executar as tarefas contidas no caderno de encargos com pronta resposta e a um custo compatível com o mercado. Como a referida empresa pronunciou-se capaz de atender às necessidades de medição da Irmãos Zen, passou a ser considerado como principal fornecedor para esta alternativa.

5.4. Comparação de propostas

Das informações obtidas, complementadas por outras adicionais que foram solicitadas posteriormente, preencheu-se um conjunto de critérios que, à princípio, seriam os mais importantes. Decidiu-se utilizar uma matriz de decisão somente para comparação das máquinas de medir por coordenadas. A comparação da melhor das CMM^{MS} com os equipamentos da solução 2 e com a solução 3 (terceirizada) foi realizada de forma menos sistemática.

A seguir serão mostradas as principais características das CMM propostas pelas empresas A, B e C. Todas as máquinas oferecidas foram do tipo portal.

Empresa A:

- Baixa incerteza.
- Volume de medição baixo.
- Mesa móvel.
- Cabeçote de escaneamento + cabeçote de comutação indexável.
- Exigência de elevada de estabilidade térmica.

- Custo total adimensionalizado: 1.
- Não mede: Brocha bi-helicoidal, eixo de max torque e gabarito.

Empresa B:

- Média incerteza.
- Elevada velocidade de medição e escaneamento.
- Volume de medição médio.
- Mesa fixa.
- Cabeçote de escaneamento.
- Menor exigência de estabilidade térmica.
- Custo total com relação ao produto da Empresa A: 1,3.
- Não mede: Brocha Bi-helicoidal e Eixo de max torque. A referida empresa ofereceu um sistema alternativo e dedicado para tais medições: máquina de medição ótica. Custo com relação ao produto da Empresa A: 0,4.

Empresa C (proposta 1):

- Média incerteza.
- Elevada velocidade de medição e escaneamento.
- Volume de medição grande.
- Mesa fixa.
- Cabeçote de escaneamento.
- Menor exigência de estabilidade térmica.
- Custo total com relação ao produto da Empresa A: 1,2.
- Efetua todas as tarefas referidas no caderno de encargos.

Empresa C (proposta 2):

- Muito baixa incerteza.
- Elevada velocidade de medição e escaneamento.
- Volume de medição grande.
- Mesa móvel.
- Cabeçote de escaneamento.
- Exigência de elevada estabilidade térmica.

- Custo total com relação ao produto da Empresa A: 1,7.
- Mede todas as geometrias.
- Pode realizar tarefas de calibração de padrões e gabaritos.

A empresa D apresentou uma proposta para o equipamento dedicado e a empresa C se propôs efetuar o retrofitting da CMM-X. A seguir são apresentadas as principais características do equipamento dedicado proposto:

- Alta exatidão.
- Quatro eixos de medição.
- Sensor escaneamento de alta precisão.
- Realiza tarefas de medição de forma com ótimo desempenho.
- Volume de medição baixo.
- Custo total com relação ao produto da Empresa A: 1,1.

O custo de retrofitting da CMM-X era da ordem de 0,13 do preço da máquina de medir por coordenadas oferecida pela empresa A.

O passo seguinte seria comparar qual a melhor proposta apresentada para cada solução, o que será descrito a seguir.

5.4.1. Comparação entre máquinas de medir por coordenadas

É sabido que o custo de uma CMM é muito elevado, trata-se de um equipamento com uma complexidade acentuada e que, conseqüentemente, afetará de forma expressiva o cotidiano da metrologia e da garantia da qualidade de empresa. Portanto, a escolha entre várias máquinas de medir por coordenadas de fabricantes reconhecidos pela sua qualidade é uma tarefa de alta responsabilidade, na qual os critérios pessoais não devem ter influência alguma. Devido a enorme quantidade de informações a serem analisadas, foi utilizada uma matriz de decisão que considera, basicamente, o grau de importância para a Irmãos Zen dos critérios avaliados e o quanto estes critérios são atendidos numa escala de 0 a 10. Dimensões em que os

critérios individuais foram classificados são: desempenho metrológico, hardware, software, custos e outros critérios. A seguir o detalhe destes critérios:

Desempenho Metrológico

- volume de medição.
- incerteza de medição (ISO 10360-2).
- dimensões externas.
- massa total.
- massa sobre a mesa.
- resolução.
- temperatura (limites).
- temperatura (gradiente temporal).
- temperatura (gradiente espacial).
- compensação de temperatura.
- faixa de umidade.
- vibração.
- velocidade de escaneamento.
- velocidade máxima vetorial (CNC).
- aceleração máxima vetorial.
- tempo de medição (peça 1) (engrenagem).
- tempo de medição (peça 2) (punção).
- mesa giratória.
- placa de fixação.
- kit de fixação.
- cabeçote apalpador.
- sensor de toque.
- sensor scannig alta precisão.
- jogo de pontas.
- ponteira (alcance máximo).
- proteção contra impactos.
- esfera de calibração.
- troca rápida de apalpadores.

Hardware eletrônico

- processador.
- capacidade do HD.
- RAM.
- monitor.
- CD-RW.
- CD-ROM.
- impressora.
- sistema operacional.
- serviço/manutenção (tercerizado).
- interface LAN p/ integração rede do cliente.

Software

- módulo (calibração).
- ligação com CAD.
- tutorial On Line.
- manual em língua portuguesa.
- atendimento as normas: ISO 1328-1/2, DIN 3960, JIS e AGMA.
- arquivo de relatório.
- processamento estatístico.
- emissão de certificados.
- medição geral.
- medição de perfis evolventes.
- medição de curvas (perfis complexos).
- medição das ferramentas e peças associadas.
- medição de engrenagens cônicas.
- interação com outros software.

Custos

- equipamento.
- padrões de verificação.
- embalagens.

- acessórios.
- treinamento.
- Instalação.
- custo geral: cabeçote, sensor, software e sist. proc. dados.

Outros Critérios

- serviço técnico (Brasil)_tempo de resposta.
- serviço de calibração (Brasil)_Disponibilidade.
- garantia (CMM e computador).
- prazo de entrega.
- validade do orçamento.
- condições de pagamento.
- atendimento às informações técnicas solicitadas.

Na figura 5.4, pode-se observar um extrato da matriz de decisão (critério de desempenho metrológico), mostrando os campos que devem ser preenchidos para realizar a avaliação da melhor proposta.

1						
2			xPeso			
3	5	Desempenho	20			
4		Hardware eletrônico	10			
5		Software	10			
6		Custos	20			
7		Outros	40			
8			1	2	3	4
9	1. Desempenho			20,0		
10			Peso	Peso ajustado	Nota	Pontos
11		Volume de Medição	3	6		
12		Incerteza de Medição (ISO 10360-2)	15	30		
13		Dimensões Externas	3	6		
14		Massa Total	3	6		
15		Massa sobre a mesa	2	4		
16		Resolução	3	6		
17		Temperatura (Limites)		0		
18		Temperatura (Gradiente Temporal)	10	20		
19		Temperatura (Gradiente Espacial)		0		
20		Compensação De Temperatura	1	2		
21		Faixa de Umidade	1	2		
22		Vibração	10	20		
23		Velocidade de Scanning	3	6		
24		Velocidade Máxima Vetorial (CNC)	3	6		
25		Aceleração Máxima Vetorial	3	6		
26		Tempo de Medição (Peça 1) (engrenagem)	0	0		
27		Tempo de Medição (Peça 2) (punção)	0	0		
28		Mesa Giratória	5	10		
29		Placa de fixação	5	10		
30		Kit de fixação		0		
31		Cabeçote Apalpador		0		
32		Sensor de toque		0		
33		Sensor Scanniq Alta Precisão	15	30		
34		João de pontas		0		
35		Ponteira (alcance máximo)		0		
36		Proteção contra impactos	3	6		
37		Esfera de Calibração	2	4		
38		Troca Rápida de Apalpadores	10	20		
39		Soma dos Pesos	100	200		

Figura 5.4 - Critérios de desempenho da matriz de decisão.

A matriz em linhas gerais possui a sistemática de operação abaixo apresentada, sendo que cada número de item apresenta uma correspondência para cada campo na referida figura :

1. Na PLANILHA DETALHADA, para cada um dos atributos dos critérios, definiu-se pesos que correspondem à importância do atributo para Irmãos Zen. Cada critério possui uma somatória de 100 pontos percentuais;
2. Os respectivos valores foram, por sua vez, normalizados para tornar a planilha automatizada;

3. Para cada CMM proposta, avalia-se com uma nota de 0 a 10, o grau de atendimento de cada critério;
4. Executa-se o produto das notas pelos pesos, repassado o resultado para a PLANILHA RESUMO onde se obtém o resultado classificatório para uma determinada priorização de critérios; e
5. Uma vez definidos todos os pesos e pontos dos critérios avaliados, pode-se manipular a matriz e avaliar as mais diversas possibilidades bastando entrar com os pesos no campo 5, numa somatória de 100 pontos percentuais. Esses pesos representam o quanto cada critério é importante para a empresa.

Foi dada uma grande priorização para o aspecto custo, por ser um requisito de grande importância para a Irmãos Zen. Isto tendenciou a CMM de menor custo a ser a melhor classificada, muito embora alguns aspectos de medição necessária à garantia da qualidade dos produtos da empresa não fossem atendidos. Observou-se também, que uma determinada CMM classificada em segunda posição, apresentou um diferencial extremamente pequeno em relação à primeira. Isto deu a liberdade para os dirigentes da empresa optarem pela segunda, devido a mesma garantir a execução das tarefas de medições proposta no caderno de encargos. Assim, a opção finalmente selecionada foi a proposta 1 da empresa C.

5.4.2. Equipamento específico /retrofitting da CMM-X versus CMM

Da avaliação do equipamento proposta pela empresa D, observou-se que ele não conseguia fazer todas as medições requeridas para resolver o problema da Irmãos Zen. Além disso, a necessidade de fazer em paralelo o retrofitting da máquina de medir por coordenadas levava o custo total para a empresa a um valor aproximadamente igual ao custo da CMM selecionada no item anterior. Evidentemente, esta CMM possui maior volume de medição, velocidade e versatilidade que a CMM-X, com uma incerteza de medição menor. Esse conjunto

de razões, além de outras que não podem ser mencionadas neste documento, desqualificou a solução 2.

5.4.3. Comparação com a alternativa terceirizada

Para comparação de custos entre a primeira e terceira solução foi efetuado um levantamento dos custos das medições efetuados pela Irmãos Zen. Para o mercado original e de reposição são necessárias um total de 500 horas/ano. O serviço de medição fornecido pela empresa E foi orçado em R\$ 100,00/hora, negociando sobre uma base de 500 horas anuais (aproximadamente R\$ 50.000,00/ano). Outros custos que deveriam ser considerados são os referentes à logística. Supondo que a soma dos custos de transporte, embalagem e deslocamento de pessoal fosse da mesma ordem que o custo das medições terceirizadas, Obtém-se um custo total da solução 3, próximo de R\$ 100.000,00/ano. Esse valor é aproximadamente igual ao custo associado à depreciação da máquina de medir por coordenadas selecionada, estabelecido pela empresa como sendo 10% do valor de compra. Isso faz com que a solução terceirizada se torne atraente desde o ponto de vista econômico.

No entanto, as desvantagens da terceirização apresentados na tabela 5.1, tais como a perda da competência metrológica da empresa e a impossibilidade de reavaliação das medições em pequeno intervalo de tempo, foram fatores decisivos para a desistência pela terceirização e opção pela compra de uma nova máquina de medir por coordenadas.

5.6. Atividades de encerramento

Continuando a proposta de trabalho, após definido o interesse da Irmãos Zen em adquirir a máquina de medir por coordenadas, realizou-se uma visita a uma determinada empresa no Paraná, que possuía essa máquina em serviço e a utilizava na medição de engrenagem. Os objetivos da visita foram avaliar se o equipamento era efetivamente uma solução viável às demandas da Irmãos Zen.

Para isso, levou-se um pinhão e um arraste, que foram medidos no modo de escaneamento.

Assim, os resultados obtidos permitiram constatar, que os tempos previstos para estas medições eram realistas.

Observadas outras capacidades da CMM, decidiu-se realizar a sua compra.

Durante o processo de análise/decisão foi sugerida a possibilidade de se fazer o retrofitting da CMM-X, paralelamente a compra da nova CMM, mudando-se o cabeçote de medição, o software e o hardware eletrônico, e isso não ocorreu pelos seguintes motivos:

- Necessidade de adaptação na operação e avaliação pormenorizada do software;
- Dado ao elevado custo da CMM, um retrofitting no momento onerava extensivamente o processo; e
- Verificação real desta necessidade. Optou-se por se avaliar a real capacidade da nova CMM e então tomar uma nova decisão futura.

Por fim, passou-se então para a consolidação do plano de negócios, sendo que já está sendo implementada toda uma infra-estrutura para recebimento da CMM. Assim todos os passos da proposta de trabalho foram realizados, exceto pela implementação propriamente dita, pois depende da entrega do equipamento, que ocorrerá a partir de abril do corrente ano.

CAPÍTULO 6

CONSIDERAÇÕES FINAIS E OPORTUNIDADES FUTURAS

6.1. Sobre os resultados alcançados para a empresa

Nesta dissertação foi aplicada, numa indústria metal-mecânica do ramo automotivo, uma sistemática para solução de problemas metrológicos. A demanda inicial da empresa, relativa à falta de capacidade na medição de perfis evolventes em engrenagens conformadas, foi mudando dinamicamente durante a execução do projeto, até se converter num problema de medição de ferramentas de geometria definida, usadas na conformação e usinagem das peças e ferramentas da empresa. Estas medições, muito mais demandantes desde o ponto de vista metrológico, mostraram também possuir um impacto muito mais profundo na qualidade do produto e nos custos de produção. Assim, a resolução do problema implicou num posicionamento da metrologia como fornecedora de dados confiáveis que viabilizem a investigação orientada à melhoria dos produtos e processos da empresa, colaborando no alcance de uma posição competitiva no mercado global. Por esta razão, pode-se considerar que o trabalho colaborou na formação da imagem da metrologia como investimento, orientada à eliminação das fragilidades dos produtos e processos.

Deve-se salientar que o escopo do projeto foi limitado, abrangendo somente aspectos da metrologia dimensional e geométrica de perfis evolventes e outros perfis complexos, em peças e suas ferramentas associadas. Como consequência deste escopo restrito, a solução foi dimensionada para satisfazer a essas necessidades e não a outras que pudessem estar latentes na empresa parceira. De

fato, é possível que nas áreas de ensaios mecânicos, medição de temperatura, testes funcionais, dentre outras, surjam outras demandas de melhoria, cujas soluções precisem, talvez, ser integradas com a que resultou desta dissertação. O autor reconhece que a metrologia de uma empresa é uma unidade funcional total, e que soluções otimizadas de uma problemática restrita não conduzem necessariamente a soluções globais ótimas. No entanto, o fato de ter selecionado uma máquina de medir por coordenadas permite afirmar que se tenha dado um passo decisivo na solução dos problemas latentes da metrologia geométrica, ainda que eles não tenham sido explicitamente considerados neste estudo. Não poderia se afirmar o mesmo se, por exemplo, houvesse recomendado a aquisição de uma máquina dedicada à medição de perfis evolvente: muitos problemas de medição ainda ficariam latentes, evidenciando-se num futuro próximo.

A máquina de medir por coordenadas selecionada já foi adquirida pela empresa e estará em funcionamento ainda no mês de abril de 2004. Para instalá-la no laboratório serão necessários outros investimentos não computados nesta dissertação. O autor está seguro de que o impacto que essa máquina trará sobre o modo de operar da garantia da qualidade da Irmãos Zen será grande. A baixa incerteza de medição do novo equipamento permitirá o acúmulo de conhecimento em algumas áreas até hoje não exploradas com efetividade, como por exemplo, o fenômeno de desgaste de punções, matrizes e brochas. Assim, será possível realimentar o processo de desenvolvimento com informações que permitam maximizar a vida em serviço das ferramentas. A maior velocidade da nova máquina, especialmente em modo de escaneamento, permitirá realizar com ela tarefas de medição que antes não podiam ser imaginadas. Isso terá conseqüência direta no fluxo de atividades que a empresa realiza para garantir a qualidade dos produtos para o mercado original e, conseqüentemente, o seu espelho no mercado de reposição. Questões tais como o aumento da intensidade do controle em peças para mercado de reposição, não representarão necessariamente um aumento de custo. De forma similar, poder-se-á realizar na nova CMM as tarefas de checagem de geometrias que se realizam hoje na Inspeção de Ferramental, certamente com

menor incerteza de medição e provavelmente com menor custo. Isso pode até gerar realocação de recursos humanos e espaços físicos.

A própria realização de medições para terceiros não é uma possibilidade remota, dado que o equipamento adquirido, por estar munido de mesa rotativa e cabeçote de tipo medidor, apresenta uma ótima combinação de elevada versatilidade e baixa incerteza.

O início da operação com o novo equipamento pode produzir também um impacto nos recursos humanos disponíveis. Embora seja ministrado, por parte do fabricante da máquina, um curso de operação e manutenção, pode-se afirmar que existe uma grande probabilidade de que nos primeiros tempos, muitas tarefas que eram resolvidas na máquina CMM-X tragam desafios e precisem de tempos que afetarão negativamente a produtividade do laboratório. Por isso, a equipe da Universidade recomendou que a máquina CMM-X fosse mantida no laboratório e não fosse revitalizada antes que o pessoal da metrologia esteja familiarizado completamente com o novo equipamento. De todas as formas, existe sempre o risco latente de subutilização da nova máquina, dado o tempo que será requerido para explorar completamente as capacidades do software e do hardware. Esse risco poderá ser contornado implementando uma política de formação contínua de pessoal e apropriadas instâncias para discussão de novas técnicas e potencialidades, sejam dentro da própria metrologia ou entre o pessoal da metrologia e o de outros setores da empresa.

Outra fonte de prováveis perturbações de uso da nova máquina de medir por coordenadas poderá se expressar na validação de medições feitas no chão de fábrica com dispositivos especiais e instrumentos simples. Dada a menor incerteza da nova máquina e sua superior capacidade para trabalhar no modo de escaneamento, ela constituirá a referência da empresa nestas comparações. No entanto, dever-se-á prestar especial atenção ao fenômeno de inconsistência de estratégias e a suas conseqüências na validação.

Outro ponto a ser considerado é a necessidade de inserir a máquina de medir no contexto de um sistema de garantia da qualidade. Aspectos tais como a rastreabilidade das medições e a avaliação da incerteza de medição poderão trazer novos desafios. Em particular, a equipe da universidade recomendou implementar checagens periódicas com utilização de objetos padrão, para poder aumentar o prazo entre calibrações.

6.2. Sobre a sistemática usada

A sistemática adotada permitiu uma eficaz caracterização das oportunidades de melhoria. Sua implementação, no caso particular da Irmãos Irmãos Zen, não foi problemática, dada a ausência de barreiras à coleta de informação. O autor atribui isso ao profundo comprometimento da alta administração da empresa com a qualidade e a convicção dos mesmos sobre a importância do projeto. É necessário ressaltar que o mesmo apoio foi brindado pelos funcionários da empresa, não tendo sido necessária, em nenhum momento, a intervenção da alta direção. Assim, a aplicação da sistemática permitiu obter as conclusões a seguir:

- A caracterização da necessidade é uma fase intensiva de busca e análise de informação. Por ser a empresa certificada ISO 9000 e ISO/TS 16949, a informação necessária para execução do projeto estava disponível nos registros da empresa, existindo ótima rastreabilidade. Isso facilitou a estimativa dos tempos e a caracterização das tarefas de medição críticas.
- A formação de recursos humanos durante a execução do projeto mostrou-se indispensável para estabelecer uma base comum de entendimento entre o autor desta dissertação e os funcionários detentores da informação procurada. Foi especialmente feliz a realização de treinamentos nos quais se reuniram funcionários atuantes no projeto de produto, de ferramental, da metrologia e de processos. As discussões que se geraram permitiram ao autor perceber muitos problemas latentes que não estavam considerados na formulação original do projeto. É justamente por esta experiência positiva que

se decidiu incluir tanto o capítulo sobre cinemática de engrenagens e métodos de fabricação como o capítulo sobre medição de engrenagens.

- A modificação introduzida pelo autor na matriz de decisão, permitindo ponderar a importância relativa do desempenho metrológico, do hardware, do software e dos aspectos em geral mostrou-se eficiente na hora de apresentar e discutir os resultados da comparação dos meios de medição com a gerência. Sem ela, teria sido necessário modificar os pesos de inúmeras características, resultando num processo tedioso e pouco transparente.

Assim, pode se concluir que, embora a evidência aqui gerada não seja conclusiva, a sistemática aplicada é idônea na solução de problemas metrológicos da indústria.

6.3. Recomendações para trabalhos futuros

- A proposta de trabalho utilizada para solução de problemas metrológicos na indústria pode ser aplicada a outras grandezas exploradas na empresa, por exemplo, temperatura, bastando apenas fazer as adaptações pertinentes.
- Para um maior rendimento da matriz de decisão, sugere-se que seja solicitado das empresas contactadas, os manuais técnicos completos do meio de medição e, se possível, uma apresentação dos critérios a serem atendidos, em local a ser definido. A matriz de decisão pode ser preenchida pelo próprio fornecedor, mas isso não inibe a necessidade de consulta aos manuais para eventuais dúvidas.
- Caso ocorra de algum projeto tratar do assunto engrenagens, por exemplo helicoidais, seria interessante o executor cursar alguma disciplina do assunto em local de boa referência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] WUO, R., *Retorno dos Investimentos no Controle da Qualidade*. Seminário: A Medida da Qualidade e Produtividade, Fundação CERTI, Florianópolis, março de 2003.
- [2] IRMÃOS ZEN, *Manual Informativo*. Produtos Automotivos de Alta Performance, Brusque, 2003.
- [3] IRMÃOS ZEN, *Certificação*. Disponível em:
<http://www.irmaoszen.com.br/index.html>. Acessado em: nov. 2003.
- [4] BARG, S. *Relatório de Estágio em Processos de Tratamento Térmico*. UFSC, Florianópolis, SC, 2002.
- [5] VAN VLACK, L. A., *Princípio de Ciência dos Materiais*. Edgard Blüncher, São paulo, 1970.
- [6] USP, *Usinagem por Eletroerosão*. Disponível em:
<http://www.bibvirt.futuro.usp.br/index.html>. Acessado em: mar. 2003.
- [7] DUDLEY, D. W., *Handbook of Practical Gear Design*. McGRAW-HILL, New York:, First Edition, 1954.
- [8] DIAS, A., *Curso de Elementos de Máquinas II*, Apostilha de Curso, UFSC, Florianópolis, SC, 2002.
Disponível em: <http://www.emc.ufsc.br/~emc5332/download/capitulo1.pdf>.
Acessado em: ago. 2003.
- [9] MIHELICK, J. R., *Measurement Basics for Parallel. Axis Involute Gears*.
Disponível em : http://www.ndx.com/printpage.asp?article_id=58. Acessado em:
mar. 2003.

-
- [10] GIL DE OLIVEIRA, N. C., *Engrenagens*. São Paulo: Grêmio politécnico, 2^a Ed, 1980.
- [11] DUDLEY, D. W., *Gear Handbook*. The Design, Manufactured and Application of Applications. New York: McGRAW-HILL, First Edition, 1962.
- [12] BRAZZALLE, R. R., *Engrenagens Cilíndricas*. Apostila do Curso de Engenharia Mecânica da UFSC. Florianópolis.
- [13] HOUGHTON, P.S., *Gears*. Spur, Helical, Bevel, Internal Epicyclic and Worm. London: Technical Press, Third Edition, 1970.
- [14] USP, Engrenagens I, II, III, IV e V. Disponível em:
<http://www.bibvirt.futuro.usp.br/Apostila>. Acessado em: mar. 2003.
- [15] BRITO, A., *Engrenagens*. Apostila de Curso. UFSC, Florianópolis, SC, 2002.
- [16] EMD, Inc, Sceptre. *Application Notes: Gears and Gearing Industry*. Vol nº 13, Aug.1,2000. Disponível em:<http://www.emdsceptre.com/appnotes/vol3no13.pdf>. Acessado em: abr. 2002.
- [17] FINZI, D., *Engrenagens*. Livro Técnico, Rio de Janeiro, RJ,1963.
- [18] LENT, D., *Análisis Y Proyecto de Mecanismos*. Reverté, España, 1974.
- [19] BAILEY, R., *Engineering Component Design*. Course of Gears. AME, 324B. Disponível em: <http://www.me.udel.edu/meeg304/03/14>. Acessado em: abr. 2003.
- [20] NBR 8088, *Módulo de Engrenagem Cilíndrica*. Padronização. Rio de Janeiro: ABNT, 21p. Jul. 1983.
- [21] BORDINI, A. B., *Engrenagens e Rodas Dentadas*. Publicações Técnicas, SENAI, Brasil, 1972.
- [22] DEGARMO, E. P.; BLACK, J.T.; KOHSER, R. A., *Materials and processes in manufacturing*. 8 ed., New York: John Wiley e Sons, Inc, 1259p. 1997.

-
- [23] ROSSI, M., *Maquinas – Herramientas Modernas*. Mandos Hidraulicos – Metodos de fabricacion Herramientas – Tiempos de Produccion, Volumen II. 8ª Edición, Dossat, 1987.
- [24] ISO 1328-1, *Cylindrical Gears - ISO system of accuracy, Part 1*. Definitions and allowable values of deviations relevant to radial composite deviations and runout information, First Edition, 1997.
- [25] ISO 1328-2, *Cylindrical Gears - ISO system of accuracy, Part 2*. Definitions and allowable values of deviations relevant to corresponding flanks of gear teeth, First Edition, 1997.
- [26] QUALITY TRANSMISSION COMPONENT, *Elements of Metric Gear Technology*. Disponível em: <http://www.qtcgears.com/> . Acessado em: fev. 2004.
- [27] NBR 12230, *Sistema Internacional*. Prescrição para sua aplicação. Rio de Janeiro: ABNT, 24p. abr. 1992.
- [28] Dr. GEARS, *One Stop Resource for the Gear manufacturer*. Disponível em: <http://www.drgears.com/index.htm> . Acessado em: mar. 2003.
- [29] HOOVER, S., *Simplifying Gear Metrology*. Quality on Line. Disponível em: <http://www.qualitymag.com>. Acessado em: mar. 2003.
- [30] VDI/VDE 2613. *Pitch Testing on Gearings – SpurGear (Cylindrical Gear), Wormwheels, Bevelgears*. dez. 1983.
- [31] VDI/VDE 2612. *Testing of Involute Cylindrical Gears -Tooth trace testing*. Part 2.set. 1980.
- [32] SANTOS JUNIOR, M. J; IRIGOYEN, E. R. C., *Metrologia Dimensional: teoria e prática*, Porto Alegre, Ed. Universidade/UFRGS, 1995, 222p, ISBN 85-7025-308-7.

-
- [33] DIN. *Taschenbuch* 123, Zahnradfertigung, Beuth, 1994.
- [34] Pinto, A., *Velocidade Periférica de Engrenagens*. Recife. 2001. Disponível em: <http://www.upemecanica.hpg.ig.com.br/velperif.pdf>. Acesso em: mar. 2003.
- [35] FARAGO, F. T., *Handbook of Dimensional Measurements*, Industrial Press, INC., NY, 1982.
- [36] INMETRO, *Vocabulário Internacional de Termos - VIM – Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia*. DIMCI, 52P. Duque de Caxias, 1995.
- [37] Souza, A. R., *Garantia da Confiabilidade metrológica na Medição por Coordenadas*. Apostilha de Curso, Fundação CERTI, Florianópolis, 2002.
- [38] COOPER, C., *Coordinate Measuring Machines and the Gear Industry*. Disponível em: <http://geartechnology.com/mag/MMC.htm> . Acesso em: mar. 2003.
- [39] DIN 3977. *Cylindrical Worms-Dimensions*. correlation of shaft center distances and gear ratios of worm gear drives. fev. 1981.
- [40] BOSCH, J. A., *Coordinate Measuring Machines and Systems*. ISBN 0-8247-9581-4. Marcel Dekker, INC, 443p. New York, 1995.
- [41] HUMIENNY, Z.; BIATAS, S.; OSANNA, P.; TAMRE, M.; WECKENMANN, A.; BLUNT, L.; JAKUBIEC, W., *Geometrical Product Specification*. Course for Technical Universities. First Edition, poland: Oficina Wydawnicza politechniki. ISBN.: 83-912190-8-9. 2001.
- [42] VDI/VDE 2614. *Radial Runout Testing on Gearings – SpurGear (Cylindrical Gear), Wormwheels, Bevelgears*. abr. 1980.
- [43] REISSNER, H., *Engrenagens Medidas em Aparelhos de Medição de Forma*, Máquinas e Metais, p 46–55, maio 2003.

-
- [44] INFAS CONTROL, *Engrenômetros. Aplicações*. Disponível em;
<http://www.infas.com.ar/por.htm>. Acessado em: mar. 2003.
- [45] SAMMARTINI, M. P.; De CHIFFRE, L., *A Task Specific Gauge for Pitch Measurement of Cylindrical Gears*. VI IMEKO Symposium, Metrology for Quality Control in Production. Wien, p 573 – 579. 1998.
- [46] DEA, *The Wgear Program*. User Manual. Third part TrademarksMoncalieri, Maio de 1995.
- [47] BERNT, P. G.; KIENGLE, O., *Taschenbuch der Längenmesstechnik*. Berlin, 1954.
- [48] BROWN & SHARPE, *Coordinate Metrology Helps Gear manufacturer Assure Quality With Process Control*. Brown & Sharpe: mfg.magazine#9, Article 2.

Disponível em: <http://www.brownandsharpe.com/mfg/mfg9/mfg9art2.html>.
Acessado em: mai. 2003.
- [49] QS 9000/MSA, *Análise dos Sistemas de Medição*: Manual de Referência. 3ª edição americana. mar. 2002.
- [50] D. J. Wheeler, R. W. Lyday, *Evaluating the Measurement Process*, Second Edition, SPC Press, Knoxville, Tennessee, 1989.
- [51] DONATELLI, G. D., *Análisis del Sistema de Medición*. GMAC: Aulas de Pós graduação, Florianópolis, novembro de 2002.
- [52] *Guia para a Expressão da Incerteza de Medição*, Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. Segunda Edição Brasileira do, Edição Revisada (agosto de 1998).
- [53] GONÇALVES Jr A. A., *Metrologia Parte I – 2002.1*, Apostila do Programa de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial.