



**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA**

Sandro Pereira da Silva

**Otimização do processo honing em pinhões
de direção utilizando a metodologia de
superfície de resposta**

São João del Rei, 2010

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

SANDRO PEREIRA DA SILVA

Otimização do processo honing em pinhões de direção utilizando a metodologia de superfície de resposta

Dissertação apresentada à Universidade Federal de São João del-Rei, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, para obtenção do título de “Mestre em Engenharia Mecânica”.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Lincoln Cardoso Brandão

Co-orientador: Prof. Dr. Tulio Hallak Panzera

São João del Rei, 2010

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA - UFSJ

F884p Silva, Sandro Pereira da.
Otimização do processo de honing em pinhões de direção utilizando a metodologia de superfície de resposta / Sandro Pereira da Silva. -- São João del Rei, 2010.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São João del Rei, 2010.

Orientador: Prof. Dr. Lincoln Cardoso Brandão
1. Honing. 2. Superfície de Resposta. 3. Ângulo de Hélice. 4. Perfil evolvente. I. Título.

Título em Inglês: Optimization of honing process in pinions of steering system using response surface methodology

Palavras-chave em Inglês: Honing, Surface Response Methodology, Machining, Quality Control.

Área de concentração: Processos de Fabricação

Titulação: Mestrado

Banca examinadora: Juan Carlos Campos Rubio, Andréa Cristiane dos Santos Delfino, Lincoln Cardoso Brandão

Data da defesa: 25 de outubro de 2010

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Otimização do processo honing em pinhões de direção utilizando a metodologia de superfície de resposta

Autor: Sandro Pereira da Silva

Orientador: Prof. Dr. Lincoln Cardoso Brandão

Co-orientador: Prof. Dr. Tulio Hallak Panzera

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

Prof. Dr. Juan Carlos Campos Rubio
Universidade Federal de Minas Gerais

Prof. Dra. Andréa Cristiane dos Santos Delfino
Universidade Federal de São João del Rei

Prof. Dr. Lincoln Cardoso Brandão
Universidade Federal de São João del Rei

São João del Rei, 25 de outubro de 2010

Dedicatória

A **DEUS**, pela constante presença em nossas vidas.

A **Erika Fabiane Vernier Pereira da Silva**, minha querida esposa, com amor, admiração e gratidão por sua compreensão, carinho, presença e incansável apoio ao longo do árduo período de elaboração deste trabalho.

A **Bianca Vernier Pereira da Silva**, filha querida, que com sorriso sempre me recebe.

Aos meus queridos pais, **Sr. Oscar Pereira da Silva e Da. Marilene Pereira da Silva**, pelo amor, dedicação e carinho sempre dispensados a mim.

Aos meus queridos padrinhos **Sr. Vicente Antonio de Medeiros e Da. Iracema Moreto Medeiro**, que são para mim exemplos de vida.

Agradecimentos

Ao amigo **Prof. Dr. Lincoln Cardoso Brandão**, que nas horas mais difíceis sempre esteve presente colocando sábias palavras de orientação, encorajamento, força e determinação para transcorrer essa tão importante etapa em minha vida.

Ao amigo graduando **Jonatas Resende**, pelo apoio na realização dos experimentos na TRW Automotive.

Ao amigo **Eng. Paulo Cesar Lima**, pelo desenvolvimento em conjunto deste importante e competitivo processo inovador de fabricação de pinhões, através do “Honing”.

Aos amigos de mestrado que todas as semanas me presenteavam com sua presença, **Rodrigo Borba, Everton Matias e Diogo Maciel**.

Ao amigo **Eng. Rafael Flávio Pimenta**, pelo companheirismo e dedicação em todos os trabalhos técnicos e experimentais que realizamos.

Ao amigo **Eng. Luis Henrique Gallicchio**, pelo apoio na sistematização dos gráficos de controle e encorajamento para realização deste trabalho.

À **TRW Automotive**, pela oportunidade de realização do curso de mestrado acadêmico em engenharia mecânica.

À **UFSJ**, pela oportunidade de aprender e desenvolver temas acadêmicos e profissionais de grande valia para minha vida.

E a **Todos** aqueles que direta ou indiretamente me auxiliaram na execução deste importante trabalho.

*"É melhor tentar e falhar,
que preocupar-se e ver a vida passar;
é melhor tentar, ainda que em vão,
que sentar-se fazendo nada até o final.*

*Eu prefiro na chuva caminhar,
que em dias tristes em casa me esconder.*

*Prefiro ser feliz, embora louco,
que em conformidade viver ..."*

Martin Luther King

Resumo

SILVA, S.P. (2010) *Otimização do processo de honing em pinhões de direção utilizando a metodologia de superfície de resposta*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São João del Rei, São João del Rei, 2010.

Os processos de fabricação com cunha indefinida têm o objetivo de melhorar o acabamento de produtos industriais agregando novas tecnologias. Os processos de retificação e “honing” são responsáveis pela precisão e qualidade dos produtos exigindo equipamentos modernos de fabricação e um controle de produção eficiente. Engrenagens são produtos industriais que exigem extrema qualidade devido à impotância que possuem na transmissão de movimentos. O conjunto pinhão/cremalheira usado em sistemas de direção deve proporcionar um engrenamento preciso e livre de vibrações, por este motivo o perfeito acabamento entre o perfil evolvente e o ângulo de hélice são desejados. Sistemas de direção são constantemente pesquisados para o melhoramento destes perfis com o objetivo de diminuir os esforços de esterçamento. Além disso, a simetria no retorno do sistema de direção proporciona ao motorista uma melhor sensação durante a direção. Esta dissertação apresenta uma análise do processo de “honing” no acabamento de pinhões de sistemas de direção. Foram monitorados os seguintes fatores; avanço por passe no eixo “X”, avanço no eixo “Z”, rotação da máquina, tempo de oscilação e tempo de centelhamento que influenciam diretamente na qualidade do sistema de direção. As variáveis respostas foram: os desvios de perfil de ângulo (evolvente esquerda e direita), desvios de perfil de forma, desvios de perfil total e desvios de ângulo de hélice. Os resultados foram analisados através da metodologia de superfície de resposta, constatando-se os fatores e parâmetros de processo de maior relevância para o aprimoramento da operação de honing para pinhões aplicados em sistemas de direção veiculares.

Palavras-chave: Perfil Evolvente; Honing; Superfície de Resposta; Ângulo Hélice.

Abstract

SILVA, S.P. *Optimization of honing process in pinions of steering system using response surface methodology*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São João del Rei, São João del Rei, 2010.

The manufacturing process with undefined wedge aim to improve the finish of industrial products has added new technologies. The processes of grinding and "honing" are responsible for the accuracy and quality of products requiring modern manufacturing equipment and an efficient production control. Gears are industrial products that require extremely high quality due to importance who own the transmission of movement. The set pinion / rack systems used in steering gear should provide an accurate and free of vibration, therefore the perfect finish between the involutes profile and helix angle are desired. Steering systems are constantly being researched to improve their profiles in order to reduce steering effort. Moreover, the symmetry in the return steering system gives the driver a better feel for the direction. This thesis presents an analysis of the process of honing "in finishing sprockets steering systems. The following factors were monitored; feed per pass in the axis "X" in advance "Z" axis, rotation of the machine, swing and sparkout time, that directly influence the quality of the steering system. The variables were: the deflection of angle profile (involutes left and right), deviations of profile shape, profile deviation and total deviation angle of the propeller. The results were analyzed by response surface methodology, verifying the factors and process parameters are most relevant to the improvement of the operation of honing sprocket used in vehicle steering systems

Keywords: Evolvent Profile; Honing, Response Surface Methodology, Angle Propeller.

Lista de Figuras

Figura 1.	Sistema de direção completo (TRW, 2010).....	6
Figura 2.	Vista explodida de um mecanismo manual (TRW, 2010).....	6
Figura 3.	Mecanismo manual cortado na região de engrenamento (TRW, 2010)	8
Figura 4.	Engrenamento Pinhão & Cremalheira (TRW, 2010).....	8
Figura 5.	Sistema de direção hidráulicamente assistido (TRW, 2010)	9
Figura 6.	Mecanismo de direção hidráulica (TRW, 2010).....	10
Figura 7.	Mecanismos de direção hidráulica em vista explodida (TRW, 2010)	10
Figura 8.	Válvula do mecanismo de direção em neutro (TRW, 2010)	12
Figura 9.	Válvula do mecanismo de direção esterçando à esquerda (TRW, 2010)	12
Figura 10.	Válvula do mecanismo de direção esterçando à direita (TRW, 2010)	13
Figura 11.	Esquema do sistema de direção EPHS (TRW, 2010).....	14
Figura 12.	Esquema do sistema de coluna elétrica EPAS (TRW, 2010)	16
Figura 13.	Vista em corte do EPAS (TRW, 2010).....	16
Figura 14.	Ângulo de Pressão (Shigley, 1984)	17
Figura 15.	Desenvolvimento dos dentes da engrenagem (Shigley, 1984)	20
Figura 16.	Perfil “Stub” (Brito, 1999).....	21
Figura 17.	Comparação do perfil do dente Stub 20° (a) e normal de 20° (b) (Brito, 1999).....	21
Figura 18.	Perfil do dente (Shigley, 1984).....	23
Figura 19.	Curva Evolvente e Principais Grandezas Geométricas (Brito,1999).....	24
Figura 20.	Curva da Trocóide e Principais Grandezas Geométricas (Brito, 1999).....	25
Figura 21.	Curva da Evolvente e Trocóide, principais grandezas geométricas. (Brito, 1999).....	27
Figura 22.	Perfil Normal. (Brito, 1999)	28
Figura 23.	Perfil Deslocado (Brito, 1999).....	29
Figura 24.	Princípio da geração de dentes	31

Figura 25.	Fresamento engrenagem helicoidal.....	32
Figura 26.	Fresa para corte de dentes da engrenagem.....	32
Figura 27.	Divisor para geração de dentes da engrenagem.	33
Figura 28.	Geração de dentes através do processo de brochamento.....	34
Figura 29.	Movimentos entre ferramenta e engrenagem na geração dos dentes	34
Figura 30.	Movimentos entre ferramenta e engrenagem na geração dos dentes	35
Figura 31.	Esquema de geração dos dentes da engrenagem helicoidal	36
Figura 32.	Cinemática na geração dos dentes da engrenagem helicoidal.....	36
Figura 33.	Equipamento CNC para fresar dentes helicoidais.....	37
Figura 34.	Ferramenta de cortar dentes helicoidais tipo caracol.	37
Figura 35.	Movimentos no processo de cortar dentes helicoidais tipo “shaper”.....	38
Figura 36.	Ferramenta de cortar dentes helicoidais tipo “shaper”.....	39
Figura 37.	Ferramenta de cortar dentes tipo “shaper rack”	40
Figura 38.	Engrenagens extrudadas.....	41
Figura 39.	Movimentos cinemáticos do processo de retificação de dentes, (Kruszynski e Lutervelt 1994).	44
Figura 40.	Ferramenta de shaving engrenada na engrenagem.....	46
Figura 41.	Lapidação de engrenagens	47
Figura 42.	Planejamento fatorial 2 ²	52
Figura 43.	Pinhão empregado no sistema de direção (TRW, 2010).....	56
Figura 44.	Ponto de aplicação da carga no pinhão (TRW, 2010).....	56
Figura 45.	Equipamento de honar modelo HMX-400 (Fässler, 2008)	57
Figura 46.	Desenho esquemático dos 9 graus de liberdade (Fässler, 2008).....	57
Figura 47.	Detalhe do reboło dentado (Fässler, 2008).	58
Figura 48.	Dressador para reboło dentado (Fässler, 2008).....	59
Figura 49.	Telas parametrizadas, equipamento HMX-400 (Fässler, 2008).....	60

Figura 50.	Detalhe do cabeçote de usinagem, HMX-400 (Fässler, 2008).	61
Figura 51.	Detalhe do cabeçote de usinagem, HMX-400 (Fässler, 2008).	61
Figura 52.	Perfil transversal. (Silva et al., 2009)	62
Figura 53.	Diagrama da representação do erro de hélice. (Silva et al., 2009).	63
Figura 54.	Equipamento de medir dentes de engrenagens (Strjirny Celákovice, 2007)	64
Figura 55.	Divergência de perfil total, evolvente (Minitab®, 2008)	68
Figura 56.	Modelo plano de engajamento para arestas de corte sucessivas (Marinescu et al., 2007)...	69
Figura 57.	Divergência de perfil de ângulo, evolvente (Minitab®, 2008)	70
Figura 58.	Divergência de perfil de forma, evolvente (Minitab®, 2008)	71
Figura 59.	Divergência de perfil total, evolvente (Minitab®, 2008)	72
Figura 60.	Divergência de ângulo de hélice (Minitab®, 2008)	73
Figura 61.	Divergência angular de forma da hélice (Minitab®, 2008).....	74
Figura 62.	Regressão linear entre o tempo de ciclo e a velocidade de corte (Minitab®, 2008)	75
Figura 63.	Gráfico de normalidade para divergência de perfil total, evolvente (Minitab®, 2008).....	77
Figura 64.	Gráfico de normalidade para divergência do perfil da hélice, evolvente (Minitab®, 2008)	78
Figura 65.	Gráfico de normalidade para divergência do perfil de forma evolvente (Minitab®, 2008)	79
Figura 66.	Gráfico de normalidade para divergência de ângulo de hélice total (Minitab®, 2008).....	80
Figura 67.	Gráfico de normalidade para divergência de ângulo de hélice (Minitab®, 2008).....	81
Figura 68.	Gráfico de normalidade para divergência de angular de forma da hélice (Minitab®, 2008)	82
Figura 69.	Gráfico de rack-pull mecanismo direção (TRW, 2010)	84

Lista de Tabelas

Tabela 1.	Componentes do mecanismo de direção manual (TRW, 2010).....	7
Tabela 2.	Componentes do mecanismo de direção hidráulica (TRW, 2010).....	11
Tabela 3.	Componentes do sistema de direção EPHS. (TRW, 2010).....	15
Tabela 4.	Análise de variância para o modelo de efeitos fixos com três fatores.	50
Tabela 5.	Sinais para os Efeitos no Planejamento 2^2	53
Tabela 6.	Fatores adotados no planejamento experimental	64
Tabela 7.	Planejamento experimental com dados de entrada (Minitab®, 2008).	66

Lista de Abreviaturas e Siglas

- EPAS – Electric Power Assisted System (Sistema assistido eletricamente)
- EPHS – Electric Power Hydraulic System (Sistema hidráulico eletricamente assistido)
- FIG – Fully Integral Gear (Mecanismo integral de direção hidráulica)
- OBJ – Outer Ball Joint (Terminal articulado externo ou tirante externo)
- IBJ – Inner Ball Joint (Terminal articulado interno ou tirante interno)
- HPS – Hydraulic Power System (Mecanismo de direção hidráulica)
- ECU – Unidade eletrônica de controle
- 3D – Tridimensional
- SAE – Society of Automotive Engineers
- IST – Instron
- g – gravidade

Símbolos, Letras Latinas, Unidades no Sistema Inglês (SI)

A	Addendum	mm [in]
a'	Distância entre centros de operação	mm [in]
a _l	Distância entre centros hipotética	mm [in]
ac	Distância da linha de referência da cremalheira ao centro da engrenagem	mm [in]
b	Dedendum	mm [in]
c	Folga no fundo do dente (backlash)	mm [in]
Ce a	Distância entre centros	mm [in]
Cf	Fator de superfície	ADM
CH	Fator de dureza	ADM
CP	Coefficiente de elasticidade	ADM
d	Diâmetro de primitivo	mm [in]
da	Diâmetro da cabeça	mm [in]
dbp e dbg	Diâmetro da base do p[in]hão e da coroa	mm [in]
df	Diâmetro do pé	mm [in]
dHPSTC _p e		
dHPSTC _g	Diâmetro para o HPSTC	mm [in]
dop e dog	Diâmetro externo do pinhão e coroa	mm [in]
e	Vão frontal	mm [in]
Ep e Eg	Módulo de elasticidade do pinhão e da coroa	MPa [psi]
F	Largura da face	mm [in]
F(α)	Função Ponderada	ADM
H	Altura total do dente	mm [in]
ha	Altura da cabeça do dente	mm [in]
hap	Altura da cabeça da cremalheira	mm [in]
hf	Altura do pé do dente	mm [in]
I	Fator geométrico superficial	ADM

i, mG	Relação de transmissão	ADM
inv α	Função evolvente	ADM J
	Fator de flexão geométrico AGMA	ADM
j	Fator geométrico	ADM Ka,
	Ca Fator de aplicação	ADM KB
	Fator de flexão periférica	ADM
KI	Fator da engrenagem intermediária (ociosa)	ADM
KL	Fator de vida (flexão-fadiga)	ADM
Km, Cm	Fator de distribuição de carga	ADM
KR, CR	Fator de confiabilidade	ADM
KS, CS	Fator de tamanho	ADM
KT, CT	Fator de temperatura	ADM
KV,	CV Fator dinâmico	ADM
m	Módulo métrico	mm
M	Momento	N.m./[lb.in]
m'	Módulo de operação	mm
mp	Razão de contato	ADM
Ng e zg	Número de dentes da coroa	ADM
Np e zp	Número de dentes do pinhão	ADM
np, ng	Rotação do pinhão e da coroa	RPM
P	Potência	hp [HP]
Pb	Passo da base	mm [in]
Pc	Passo circular	mm [in]
Pd	Diametral pitch	- 1/in
Qv	Índice de qualidade da engrenagem	ADM
r	Raio da circunferência primitiva	mm [in]
r'	Raio de aplicação	mm [in]
r'1 e r'2	Raios primitivos de operação	mm [in]
rb	Raio da circunferência de base	mm [in]
rf	Raio do filete	mm [in]

ri	Raio de um ponto no perfil evolvente do dente	mm [in]
rL	Raio limite teórico	mm [in]
ro	Raio externo	mm [in]
Ro2	Raios externos de duas planetárias	mm [in]
rP	Raio em qualquer ponto P sobre a evolvente	mm [in]
rps	Raio padrão do passo	mm [in]
rT	Raio da trocóiide	mm [in]
rti	Raio inicial da evolvente do perfil do dente	mm [in]
s	Espessura do dente	mm [in]
s1 e s2	Espessura do dente sobre a circunferência primitiva de geração	mm [in]
sa	Espessura da cabeça do dente	mm [in]
sf	Espessura da seção crítica do dente	ADM
Sfb	Limite de resistência à flexão	MPa [psi]
Sfb'	Limite de resistência à fadiga	MPa [psi]
Sfc	Limite de resistência à flexão superficial	MPa [psi]
Sfc'	Limite de resistência à fadiga superficial	MPa [psi]
t	Raio padrão do passo da espessura circular do dente	mm [in]
T	Torque	N.m/[lb.m]
Vt	Velocidade na linha do passo	m/s [in/s]
W	Força resultante	N [lb]
w	Velocidade angular	rad/s [rad/s]
wA	Velocidade angular do braço em relação à conexão fixa	rad/s [rad/s]
Wf	Velocidade angular da primeira engrenagem em relação à conexão fixa	rad/s[rad/s]
wL	Velocidade angular da última engrenagemem relação à conexão fixa	rad/s rad/s
Wr	Força radial	N [lb]
Wt	Força tangencial	N [lb]
x	Coefficiente de deslocamento do perfil do dente	ADM
xf, yf	Coordenadas do perfil do filete da trocóiide	ADM
xi, yi	Coordenadas da evolvente do perfil do dente	ADM
xp	Coefficiente addendun do pinhão	ADM

x_p e x_g	Coeficiente addendum do pinhão e coroa	ADM
x_t , y_t	Coordenadas do ponto de tangência	ADM
Y	Fator de forma do dente (Lewis)	ADM
y	Fator de forma	ADM
Z	Comprimento da linha de ação	mm [in]
Z_c	Distância entre o ponto do passo e o HPSTC da engrenagem medida ao longo da linha de ação	mm [in]
Z_e	Distância entre o ponto do passo e o HPSTC do pinhão medida ao longo da linha de ação	mm [in]

Símbolos, Letras Gregas e Unidades no Sistema Inglês (SI)

α'	Ângulo de pressão de operação	deg [deg]
α	Ângulo de pressão	deg [deg]
α_P	Ângulo de rolamento do ponto P	deg [deg]
α_L	Ângulo entre a linha de ação e a linha horizontal, (ângulo de carga)	deg [deg]
δ	Ângulo entre as origens da evolvente e da trocóiide	deg [deg]
δ	Ângulo entre as origens da evolvente e trocóiide	deg [deg]
θ'	Ângulo entre o eixo de simetria do dente e o eixo que passa pelo ponto de origem da evolvente	deg [deg]
θ_p	Ângulo vetorial entre os raios vetores que definem a origem da evolvente em qualquer ponto	deg [deg]
θ_T	Ângulo diretor da trocóiide	deg [deg]
$\gamma, \xi, \tau, \kappa$	Ângulos estruturais	deg [deg]
ν_p, ν_g	Coefficiente de Poisson do pinhão e da coroa	ADM
Δ	Metade da largura da base do dente	ADM p
	Raio de curvatura do filete mínimo da curva	mm [in]
r_p e r_g	Raio de curvatura do pinhão e coroa	mm [in]
ζ	Raio não dimensional	ADM
σ_b	Tensão de flexão	MPa [psi]
σ_c	Tensão de superfície	MPa [psi]

Sumário

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1.	Sistemas de direção	4
2.1.1.	Tipos de sistemas de direção.....	5
2.1.2.	Sistema de direção pinhão/cremalheira mecânico	5
2.1.3.	Sistema de direção pinhão cremalheira com assistência	9
2.1.4.	Sistema de direção hidraulicamente assistido convencional.....	9
2.1.5.	Sistema de Direção Eletro-Hidráulico e EPHS	13
2.1.6.	Sistema de Direção Elétrico – EPS	15
2.2.	Sistemas de Engrenagens.....	17
2.2.1.	Introdução – pontos relevantes para sistema direção	17
2.2.2.	Sistema Normal (Adotado pela ABNT)	18
2.2.3.	Sistema Stub 20°	18
2.2.4.	Sistema Fellow	18
2.2.5.	Traçado do perfil de dentes	19
2.2.6.	Evolvente como perfil de dentes de engrenagem	19
2.2.7.	Diferentes Formas dos dentes.....	20
2.2.8.	Vantagens e inconvenientes dos perfis evolventes e cicloidais.....	22
2.2.9.	Solução analítica para determinação do perfil de engrenagens de evolvente sem correção.....	23
2.2.10.	Equação da evolvente em coordenadas polares.....	23
2.2.11.	Equação da trocóiide em coordenadas polares.	25
2.2.12.	Equação da evolvente e trocóiide em coordenadas cartesianas	26
2.2.13.	Deslocamento dos perfis.....	28

2.2.14.	Solução analítica para determinação do perfil de engrenagens evolvente com correção	29
2.3.	Processos de fabricação de engrenagens.....	30
2.3.1.	Introdução aos processos de fabricações de engrenagens.....	30
2.3.2.	Brochamento.....	33
2.3.3.	Geração de Engrenagem	34
2.3.4.	Engrenagens geradas pelo processo “hobbing”	35
2.3.5.	Engrenagens geradas pelo processo de “Shaper”.....	38
2.3.6.	Engrenagens geradas pelo processo de “Shaper rack”.....	39
2.3.7.	Engrenagens geradas por conformação.....	40
2.3.8.	Engrenagens geradas por fundição baixa pressão.....	40
2.3.9.	Engrenagens geradas por fundição de alta pressão.....	40
2.3.10.	Engrenagens Sinterizadas	41
2.3.11.	Engrenagens por Extrusão	41
2.3.12.	Engrenagens geradas através do processo de estampagem:.....	42
2.4.	Acabamentos em dentes de engrenagens	42
2.4.1.	Acabamento de Engrenagens	42
2.4.2.	Retificação de engrenagens.....	43
2.4.3.	“Shaving” para acabamento em engrenagens	45
2.4.4.	Lapidação para acabamento em engrenagens	47
2.5.	Planejamento de experimentos e método de superfície de resposta.....	48
2.5.1	Introdução	48
2.5.2	Experimento Fatorial	49
2.5.3	Fatorial Fracionário.....	51
2.5.4	Planejamento 2 ²	52
2.5.5	Metodologia de superfície de resposta.....	54

3.	METODOLOGIA.....	56
4.	ANALISE DOS RESULTADOS	68
5.	CONCLUSÃO.....	85
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86

1. INTRODUÇÃO

As linhas de produção de componentes automotivos estão sempre em processo de melhoria contínua buscando a utopia da perfeição que pode ser expressa no nosso idioma como “defeito zero”. Neste movimento frenético onde esforços e investimentos são empregados de forma crescente, a engenharia com todo o seu poder de analisar e modelar o problema para propor soluções inovadoras e inteligentes tem papel fundamental.

O sistema de direção é um dos principais itens de segurança veicular, sendo o componente que transforma a necessidade direcional que o condutor do veículo identifica em realidade, que pode ser atingida de diferentes formas no que tange ao nível de esforço, ângulo do volante, sensibilidade da pista pelo condutor e comportamentos distintos em função da velocidade do veículo, um fator importante e também predominante para proporcionar conforto ao condutor é a obtenção de um engrenamento pinhão/cremalheira perfeito, sendo o pinhão o componente na caixa de direção considerado a árvore motriz para transmitir o movimento circular em retilíneo para as rodas do veículo.

Os sistemas de transmissão para direções veiculares são projetados para condições de operação extremas, acarretando estreitos limites de tolerância dimensional para os pinhões, reduzindo assim as possibilidades de ocorrência de falhas durante seu funcionamento. As técnicas de projeto, execução do processo e monitoramento do estado de funcionamento necessitam ser constantemente ajustadas para assegurar o desempenho adequado do sistema de engrenamento.

As primeiras engrenagens de que se têm conhecimento são as da Carruagem Chinesa, datada do século 27 a.C. Os dentes destas engrenagens eram pinos de madeiras, organizados em um complexo trem de engrenagens, que moviam uma estatueta com um braço estendido, sempre apontando para a mesma direção, independente da direção que a carruagem se movia. As primeiras descrições escritas sobre engrenagens foram feitas por Aristóteles, no século 4 a.C. Ctesibius, inventor grego, usou no século 3 a.C., as engrenagens cilíndricas de dentes retos e cônicas, e Archimedes mencionou parafuso sem-fim e coroa em seus escritos.

Vitruvius, que inventou a roda d'água vertical, usou um par de engrenagens de ângulo reto para transmitir potência do eixo de uma roda horizontal para uma roda de eixo vertical de um moinho de pedra. (Amaral, 2000). Os cadernos de Leonardo da Vinci contêm esboços de engrenagens cilíndricas de dentes retos, cônicas e parafuso sem-fim e coroa. É provável que nenhum destes inventores prestasse muita atenção no problema de perfis de dentes

cinematicamente corretos, o que permitiria uma relação de velocidades constantes (perfis conjugados).

Dessa forma, embora a curva cicloidal já fosse conhecida há mais de 200 anos, até 1674 ela ainda não havia sido empregada para perfis de dentes de engrenagens. Nos séculos XVIII e XIX, debateram-se os méritos da aplicação dos perfis cicloidais e evolventais. Desde 1830 os perfis evolventais eram os preferidos para transmissões de potência das máquinas industriais. Já os perfis cicloidais eram usados para a fabricação dos relógios. A primeira engrenagem cilíndrica de dentes retos e cônicos foi cortada com a forma de “cutters”, e correspondia aos espaços entre os dentes, Amaral (2000).

O mais antigo cortador giratório deste tipo era feito à mão por um mecânico francês chamado Jacques de Vaucanson, em 1782, tendo sido usado em uma máquina de moenda. Até os meados do século XIX ainda não haviam aparecido máquinas especiais para cortar engrenagens Britânica.

A revolução industrial na Inglaterra no século XVIII assistiu a uma explosão no uso de engrenagens de metal. A ciência das engrenagens e projetos diferenciados e fabricação propiciaram uma rápida evolução ao longo do século XIX.

Atualmente, os estudos mais significativos voltados para o desenvolvimento das engrenagens estão relacionados ao acabamento do perfil dos dentes e material empregado objetivando alcançar engrenamentos mais precisos, não ruidosos e com vida útil elevada.

A partir da década de 1970, investigações teóricas e experimentais vêm sendo desenvolvidas para o estudo do comportamento dinâmico de sistemas engrenados. Pode-se observar uma primeira tendência ligada à pesquisa de tensões no dente da engrenagem, com a inclusão de efeitos térmicos durante o ciclo de engrenamento e considerando a sua flexibilidade, tendo como objetivo o aperfeiçoamento de projeto do dente de engrenagem. (Queiroz e Brazzalle, 1978).

A proposta deste trabalho é encontrar a melhor produtividade e a qualidade, razão intrínseca presente no produto final. Para tanto foi utilizada uma técnica estatística conhecida como Superfície de Resposta para encontrar o equilíbrio destas, e em seguida definido o componente mecânico do sistema de direção como corpo de prova. A

comprovação dos dados através de um novo experimento e os dados coletados foram analisados para verificar se possuíam uma distribuição normal.

O tema de acabamento de dentes de engrenagens utilizando o processo de fabricação por “honing” é pouco explorado, por se tratar de um processo relativamente novo, pois os primeiros estudos surgiram da aplicação do “honing” em 1970 pelo Dr. Albert Fässler em desenvolvimento da primeira máquina para “honing” de dentes de engrenagens com cunha indefinida. Desta forma, a pesquisa nas bases de referências bibliográficas para o processo de “honing” apresentou uma elevada dificuldade, devido ao fato da maioria dos estudos neste processo não subsidiarem aprofundamentos em acabamentos de pinhões para sistemas de direção veicular.

Este fato motivou mais ainda a realização deste trabalho com um planejamento de experimentos no chão de fábrica em pinhões de sistemas de direção, não apenas tendo como objetivo melhorar a produtividade dos componentes, mas buscando conhecer melhor o processo de “honing” em relação aos parâmetros de corte, qualidade superficial dos componentes, otimização da ferramenta de corte e características dinâmicas da máquina.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Sistemas de direção

Conforme Gillespie (1992), o sistema de direção dos veículos automotores possui grande importância no comportamento estático e dinâmico. A função do sistema de direção é gerar ângulos nas rodas dianteiras e/ou traseiras em resposta às necessidades impostas pelo condutor para que haja o controle do veículo. Contudo, os ângulos de esterçamento efetivos são modificados pela geometria do sistema de suspensão, direção e condições de tracionamento para os veículos de tração dianteira. Por sua vez, Bastow (1993), salienta a importância do sistema de direção no que tange a aceitar as irregularidades verticais impostas pelas pistas provocando perturbações no sistema de direção.

Do mesmo modo, para as irregularidades das pistas na direção horizontal, o sistema de direção deve absorvê-las sem que haja distúrbios direcionais. No projeto de um sistema de direção, um dos maiores desafios é a necessidade da isolação dos choques gerados pelas pistas, sem que haja o bloqueio da sensibilidade da pista o que prejudicaria a perfeita condução do veículo. O componente do sistema de direção que tem um importante papel na boa retornabilidade veicular é o pinhão, pois através da qualidade de engrenamento encontrada no perfil e ângulo de hélice pode-se alcançar uma retornabilidade suave e sem ruídos oriundos do sistema de engrenamento pinhão / cremalheira. Outro ponto importante a ser considerado é o baixo esforço ao “esterçar” em manobras de estacionamento ou baixa velocidade e manter os esforços suficientes para proporcionar a sensibilidade do condutor nas manobras em médias e altas velocidades.

Segundo Dixon (1996), o volante do veículo foi desenvolvido por Benz e quase universalmente utilizado em 1900. Testes realizados em sistemas de controle verificaram que o volante é a melhor maneira de se combinar grandes e rápidos movimentos com fina precisão. O autor também afirma a importância do sistema de direção que se conecta com as rodas gerando a relação apropriada de engrenamento, como também o atendimento das restrições geométricas e imperfeições relacionadas ao pinhão, peça considerada com grau elevado de importância para uma direção confortável, que serão abordados neste texto.

Além dos esforços com baixo nível sem prejudicar a condução em alta velocidade, tem-se a eficiência reversa como sendo o fator filtro para a transmissão dos distúrbios e aspereza das pistas para o condutor que não pode ser em demasia elevado, pois se perderia a sensibilidade do estado de atrito proporcionado pela pista.

2.1.1. Tipos de sistemas de direção

Comumente os sistemas de direção pinhão/cremalheira são divididos em três famílias: Sistema de Direção Mecânica, Sistema de Direção Hidráulica e Sistema de Direção Elétrico. O volante é conectado ao mecanismo de direção através do sistema de coluna de direção que é composto de eixos, mancais, juntas universais e isoladores de ruído e vibrações em algumas aplicações. Através desta conexão, o mecanismo de direção é acionado e transforma o movimento de rotação do volante em ângulos de esterçamento das rodas. A transformação do ângulo do volante para o ângulo nas rodas é realizada através do pinhão, considerado componente principal para transformar o movimento rotacional do volante em retilíneo para a cremalheira, a seguir iremos descrever com mais detalhes o funcionamento de cada sistema e a interação do pinhão em cada contexto.

2.1.2. Sistema de direção pinhão/cremalheira mecânico

O mecanismo de direção normalmente é fixado na carroceria ou na suspensão, podendo estar localizado à frente ou atrás das rodas. Através do engrenamento pinhão/cremalheira, os movimentos de rotação do volante que resulta no mesmo movimentam de rotação do pinhão é transformado em movimento de translação da cremalheira. Em cada extremidade da cremalheira, existem barras laterais biarticuladas que tem a função de promover a união da cremalheira com as mangas de eixo. Portanto o movimento de translação da cremalheira é suportado pela ação rotacional do pinhão, que necessita ter um perfeito acabamento no perfil dos dentes. Esse acabamento possibilita que a cremalheira possa acionar as mangas de eixo que geram os ângulos de esterçamento das rodas esquerda e direita de maneira homogênea, onde as mangas de eixo descrevem um arco em torno do eixo de esterçamento da roda ou pino mestre. Esta concepção é largamente empregada em veículos de passeio e comercial leves. Já existem protótipos para comerciais

médios, mas ainda estão em desenvolvimento. A característica deste sistema é a redução do torque no volante necessário para girar as rodas do veículo apenas pela redução de engrenamento e geometria do sistema. A Figura 1 ilustra um sistema de direção completo e a Figura 2 ilustra o mecanismo de direção em uma vista explodida, onde se podem verificar todos os componentes que o constitui na Tabela 1.

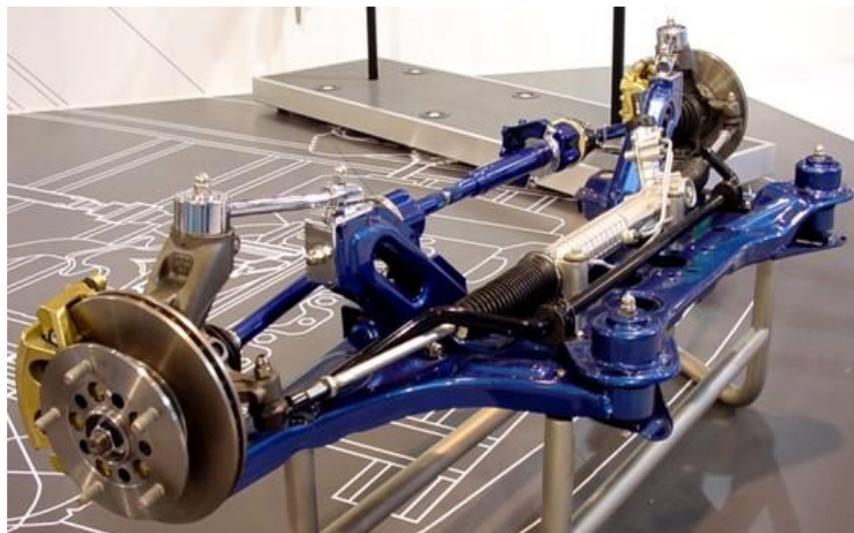


Figura 1. Sistema de direção completo (TRW, 2010)

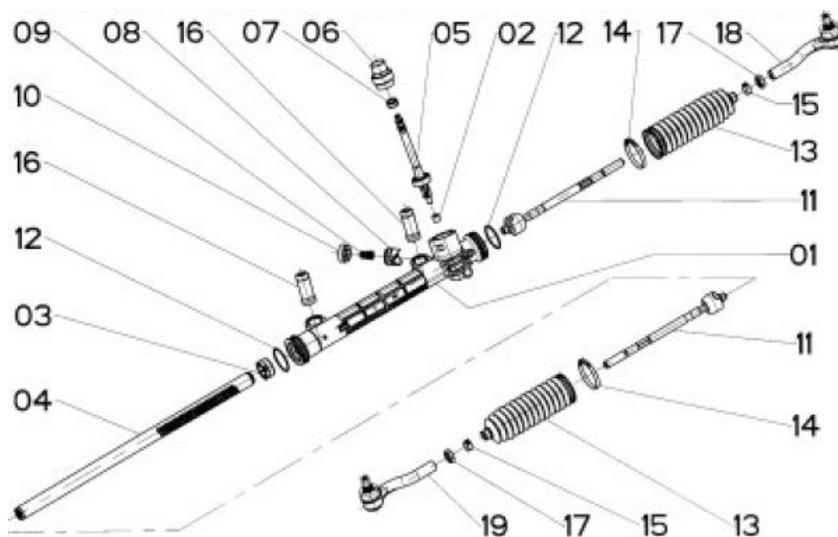


Figura 2. Vista explodida de um mecanismo manual (TRW, 2010)

Tabela 1. Componentes do mecanismo de direção manual (TRW, 2010)

Nº	Descrição dos Componentes
01	Carcaça
02	Rolamento ou Bucha
03	Bucha da Cremalheira
04	Cremalheira
05	Pinhão
06	Tampão do Pinhão
07	Vedador do Pinhão
08	"Yoke" - Garfo de Apoio
09	Mola
10	Tampa do "Yoke" - Tampa do Garfo de Apoio
11	Tirante Interno
12	Anel "O"
13	Sanfona de Vedação
14	Abraçadeira Maior
15	Abraçadeira Menor
16	"Silent Block" - Coxin
17	Porca do Tirante Exteno
18 /19	Tirante Externo

As Figuras 3 e 4 apresentam os detalhes do engrenamento pinhão e cremalheira. O veículo possui a característica de torque no volante da ordem de 12 a 16 Nm em manobra de esterçamento com o veículo estático, conforme determina a geometria da suspensão e do sistema de direção. Como exemplo, tem-se a relação de engrenamento de 32:1 e 34:1 aplicada em sistemas de direção para carros leves. O torque necessário apenas para deslocar os mecanismos de direção de batente a batente é da ordem de 1,5 a 2,2 N.m, com o número de revoluções de 3,7 a 3,8 conforme modelo.



Figura 3. Mecanismo manual cortado na região de engrenamento (TRW, 2010)

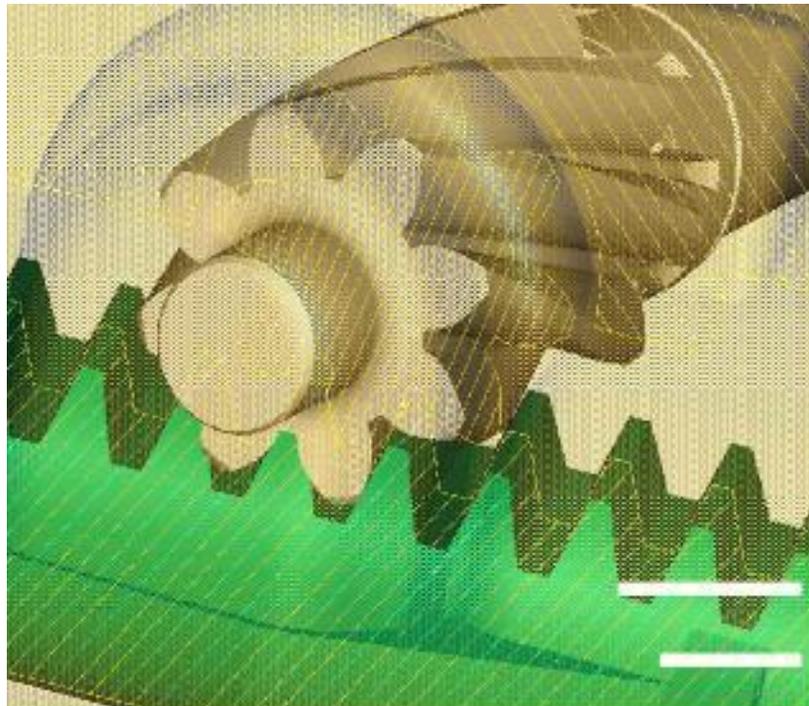


Figura 4. Engrenamento Pinhão & Cremalheira (TRW, 2010)

2.1.3. Sistema de direção pinhão cremalheira com assistência

Os sistemas assistidos podem ser divididos em três categorias:

- a) Hidráulico convencional
- b) Eletro-Hidráulico
- c) Elétrico

2.1.4. Sistema de direção hidraulicamente assistido convencional

O sistema é semelhante ao mecanismo de direção manual a menos da redução do torque imposto ao motorista através da ação da assistência hidráulica. O torque que o motorista tem percepção é da ordem de 5 a 7 N.m em manobra de esterçamento com o veículo estático. A Figura 5 exemplifica um sistema completo de direção hidráulica.

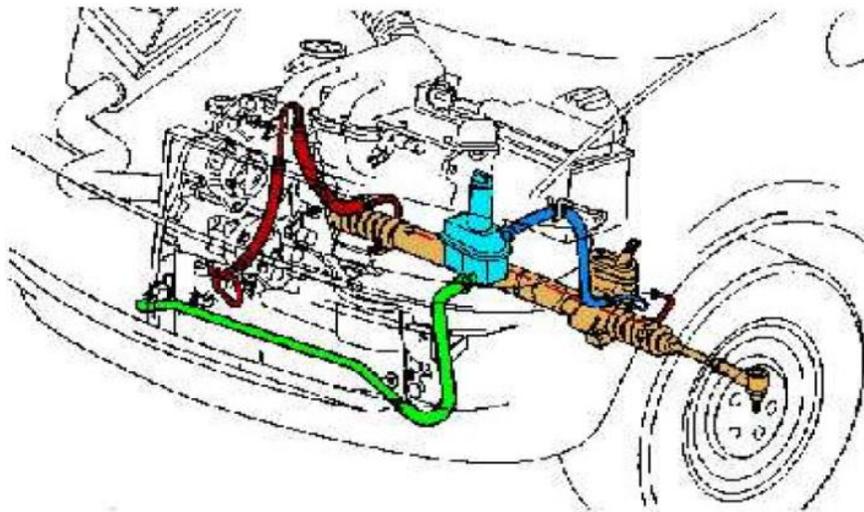


Figura 5. Sistema de direção hidraulicamente assistido (TRW, 2010)

As Figuras 6 e 7 e a Tabela 2 detalham o mecanismo de direção hidraulicamente assistido.

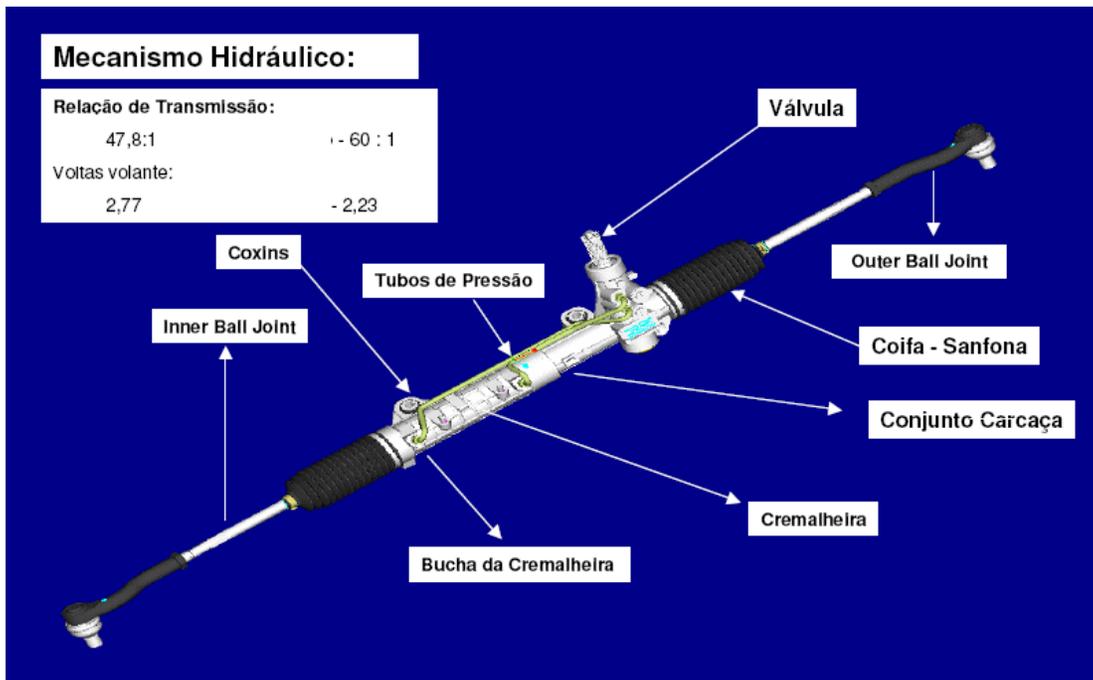


Figura 6. Mecanismo de direção hidráulica (TRW, 2010)

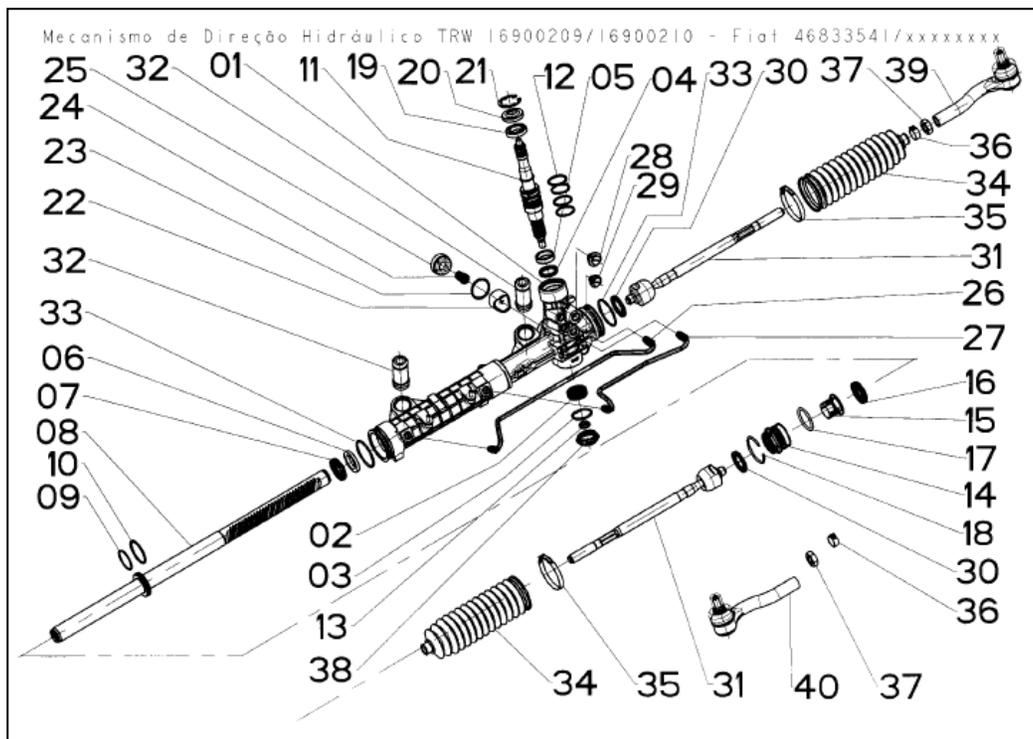


Figura 7. Mecanismos de direção hidráulica em vista explodida (TRW, 2010)

Tabela 2. Componentes do mecanismo de direção hidráulica (TRW, 2010)

Nº	Descrição do Componente	Nº	Descrição do Componente
01	Carcaça	20	Vedador da Árvore Entrada
02	Rolamento do Pinhão	21	Anel Elástico
03	Anel Elástico	22	Yoke
04	Vedador do Pinhão	23	Anel “O”
05	Bucha do Pinhão	24	Mola
06	Anel Suporte do Vedador	25	Tampa do Yoke
07	Vedador da Cremalheira	26	Tubo de Pressão Longo
08	Cremalheira	27	Tubo de Pressão Curto
09	Anel “O”	28 / 29	Tampões
10	Anel do Pistão	30	Espaçador
11	Válvula	31	Tirante Interno
12	Anéis da Válvula (x 4)	32	Silent Block
13	Anel Elástico	33	Anel “O”
14	Bucha da Cremalheira	34	Sanfona
15	Inserto da Bucha	35	Abraçadeira Maior
16	Vedador da Cremalheira	36	Abraçadeira Menor
17	Anel “O”	37	Porca
18	Anel Retentor da Bucha	38	Tampão da Válvula
19	Bucha da Árvore Entrada	39 / 40	Tirante Externo

A válvula do mecanismo direção com assistência hidráulica é responsável pela característica de assistência do sistema, isto é, possui a função de resposta das entradas geradas pelo condutor do veículo e saída nas rodas. Conforme sua construção ela pode gerar mais ou menos assistência e, portanto exigir maior ou menor esforço do condutor ao movimentar o volante no sentido horário e ou anti-horário. Neste caso o pinhão deve manter o engrenamento suave, sem que ocorram sinuosidades no movimento retilíneo da cremalheira.

Desta forma, o perfeito acabamento no perfil dos dentes pode determinar maior ou menor esforço para ser compensado pelo sistema hidráulico. A calibração deste sistema é determinada pelas montadoras, com padrões de retornabilidade específicos para cada

modelo de carro leve. As Figuras 8 a 10 ilustram o funcionamento da válvula de um mecanismo de direção hidráulica, em neutro (Figura 8), esterçando para esquerda (Figura 9) e direita (Figura 10).

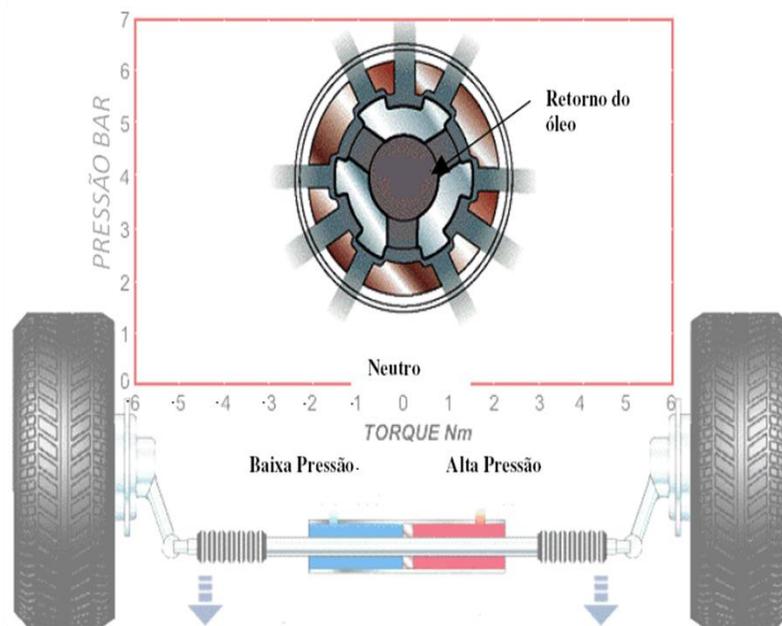


Figura 8. Válvula do mecanismo de direção em neutro (TRW, 2010)

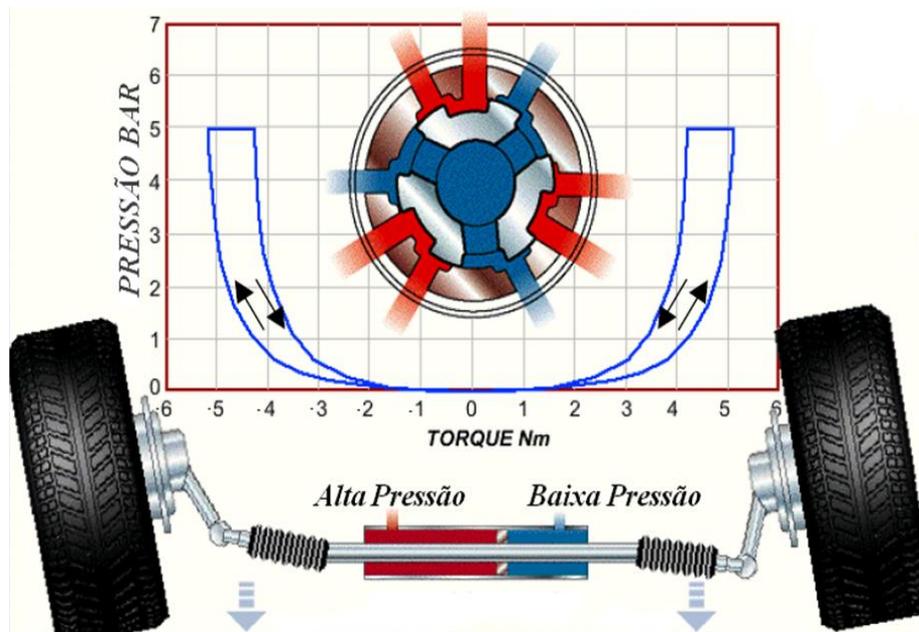


Figura 9. Válvula do mecanismo de direção esterçando à esquerda (TRW, 2010)

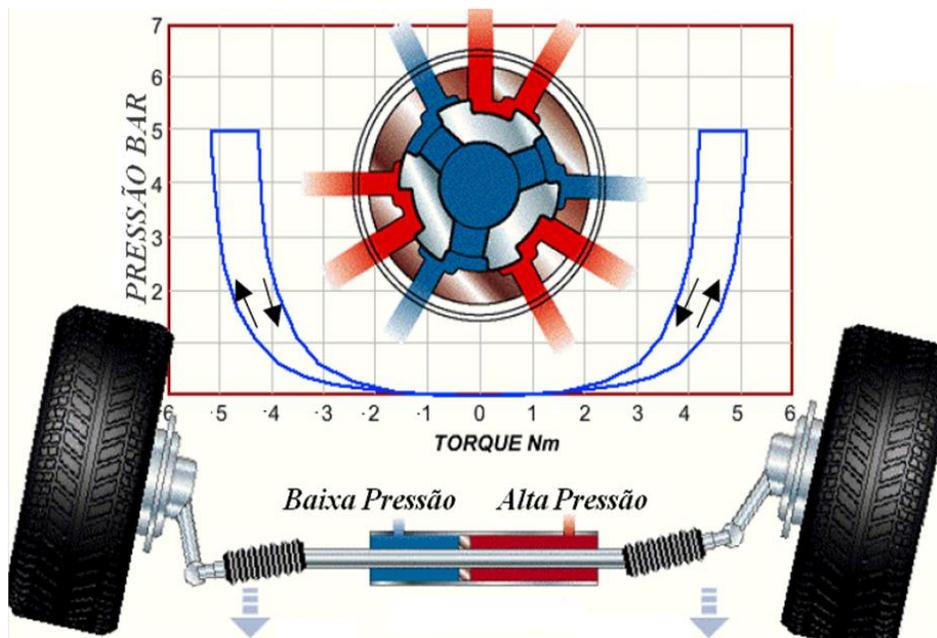


Figura 10. Válvula do mecanismo de direção esterçando à direita (TRW, 2010)

Os gráficos das Figuras 09 e 10 são chamados de curva de válvula. O gráfico é composto no eixo da abscissa por valores de torque de entrada do mecanismo de direção e o das ordenadas representa os valores de pressão. Assim, quanto mais aberta for a curva da válvula, maiores os valores atingidos no eixo da abscissa. Portanto, mais torque ou esforço o condutor irá necessitar para conduzir o veículo.

2.1.5. Sistema de Direção Eletro-Hidráulico e EPHS

O sistema de direção EPHS é assistido eletricamente através de conexão via cabos ao sistema elétrico do veículo. Este conjunto pode ser instalado no veículo no lugar de um mecanismo de direção manual ou do sistema de direção hidráulica tipo pinhão e cremalheira convencional, com idênticas interfaces à coluna de direção e suspensão do veículo.

O sistema consiste de uma Bomba Hidráulica convencional movimentada por um motor elétrico, que fornece assistência hidráulica ao mecanismo de direção pinhão cremalheira. Sua operação se inicia após receber na ECU (unidade eletrônica de controle) um sinal da ignição e um sinal do alternador do veículo. O sistema é controlado por velocidade e consumo de corrente elétrica em resposta a aplicação de torque no volante do

veículo pelo motorista. Assim, o torque provoca o fechamento do conjunto pinhão e válvula rotativa do mecanismo, causando assim um aumento na pressão hidráulica do sistema de direção e por consequência um aumento no torque do eixo da bomba hidráulica que é movimentada pelo motor elétrico. Portanto, o pinhão é um componente fundamental nesta relação direta com o funcionamento do sistema, tendo suas características dimensionais dentro do padrão DIN9 evitará consumo de energia além do previsto pelo sistema. Dessa forma, este aumento de torque gera um aumento do consumo de corrente elétrica do motor elétrico que é detectado pela ECU. A Figura 11 representa de forma esquemática o sistema EPHS e a Tabela 3 identifica os componentes do sistema.

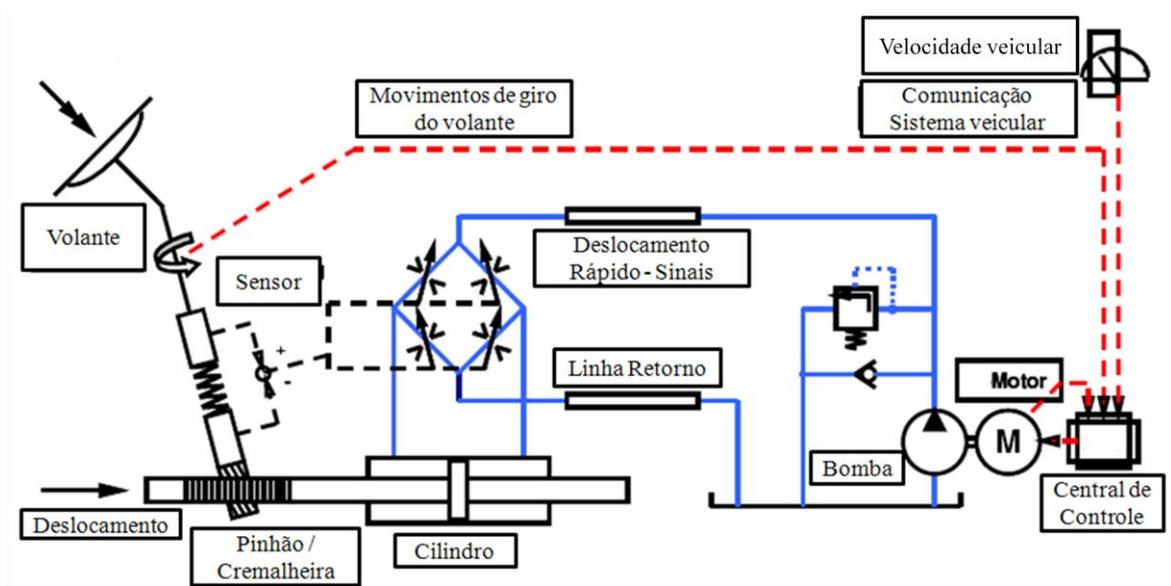


Figura 11. Esquema do sistema de direção EPHS (TRW, 2010)

Tabela 3. Componentes do sistema de direção EPHS. (TRW, 2010)

Nº	Descrição dos componentes
01	"Pump" - Bomba
02	"E-Motor" - Motor Elétrico
03	"Steering valve" - Válvula de direção
04	"ECU" - Unidade Eletrônica de Controle
05	"Cylinder" - Cilindro Hidráulico
06	"Steering Manoeuvre" – Giro do Volante
07	"Vehicle Speedy" - Informação de velocidade
08	"Feed line" - Linha de alimentação
09	"Return Line" - Linha de retorno
10	"Steering Rate" - Relação do mecanismo
11	"Rack & Pinion" - Cremalheira e pinhão
12	"Car/Driver-Settings" - Configurações de veículo
13	"Load" - Carga

2.1.6. Sistema de Direção Elétrico – EPS

O sistema de direção elétrico pode ser subdividido em 3 famílias. A família da coluna de direção elétrica ou “Column Drive”, a família da cremalheira elétrica ou “Rack Drive” e a família do pinhão elétrico ou “Pinion Drive”. O sistema é composto por um atuador Elétrico formado por um motor elétrico acoplado ao sem-fim engrenado a uma coroa solidária ao eixo da coluna de direção. São aplicados sensores visando medir o torque e posição da coluna, como também sensores para medir as condições internas do sistema. A unidade de controle eletrônico (ECU) tem a função de processar os sinais dos sensores e calcular a assistência de acordo com os sinais dos sensores e o status do veículo e controlar o motor. A Figura 12 ilustra esquematicamente um sistema de direção eletricamente assistido EPAS que significa “Eletronic Power Assistance Steering” ou simplesmente direção elétrica.

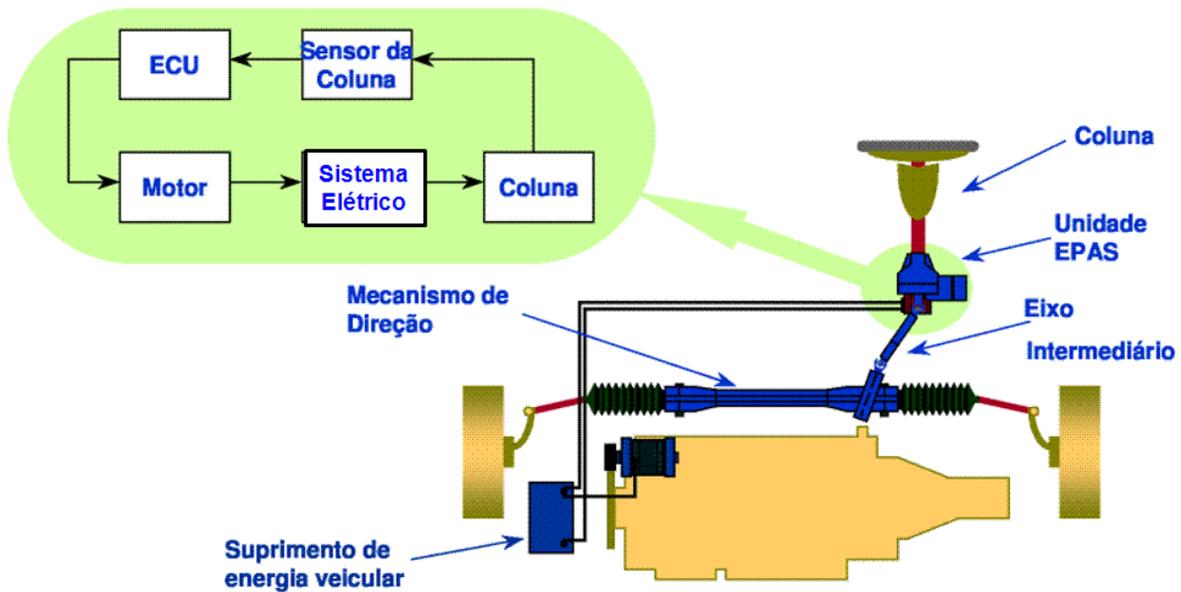


Figura 12. Esquema do sistema de coluna elétrica EPAS (TRW, 2010)

A Figura 13 ilustra o conceito mecânico da unidade EPAS, onde se observa o engrenamento da coroa que é solidária ao eixo da coluna de direção e o sem-fim que transmite o torque gerado pelo motor elétrico que é controlado pela ECU.

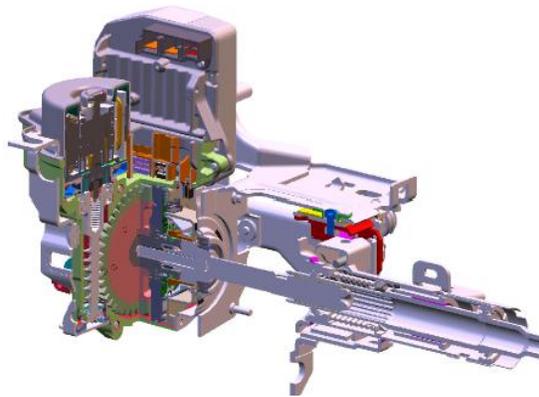


Figura 13. Vista em corte do EPAS (TRW, 2010)

As outras famílias citadas usam o mesmo conceito do motor, mas a transmissão é realizada no caso do “Rack Drive”, por um sistema de esferas recirculantes na cremalheira

do mecanismo de direção e na família “Pinion Drive” o torque é transmitido por um engrenamento no pinhão em série com o engrenamento da cremalheira.

Os veículos de tração dianteira possuem um momento gerado pela força de tração, com impacto direto no comportamento dinâmico do veículo. A somatória de todos os momentos das rodas direita e esquerda resulta nas forças transmitidas nas barras de direção que através do mecanismo de direção (onde temos o pinhão, como peça chave na determinação da eficiência do mesmo e relação de transmissão) geram o torque a que o condutor do veículo tem percepção. Para entendermos melhor a relação que existem entre engrenamento e conforto para o condutor do veículo vamos entrar no campo de engrenagens e buscar alguns conceitos, que poderão ser observados nos tópicos subseqüentes.

2.2. Sistemas de Engrenagens

2.2.1. Introdução – pontos relevantes para sistema direção

O ângulo de pressão é formado pela tangente comum aos diâmetros primitivos das duas engrenagens e a trajetória descrita por um ponto de contato entre um par de dentes das engrenagens. Os ângulos de pressão dos pares engrenados são padronizados em poucos valores pelos fabricantes de engrenagem. Eles são definidos na distância de centros nominal para um par engrenado “cortado”. Os valores padrões são $14,5^\circ$, 20° e 25° . A norma DIN 867 recomenda a utilização do ângulo de pressão $\alpha = 20^\circ$, conforme Figura 14, atualmente o mais usado, Shigley (1984).

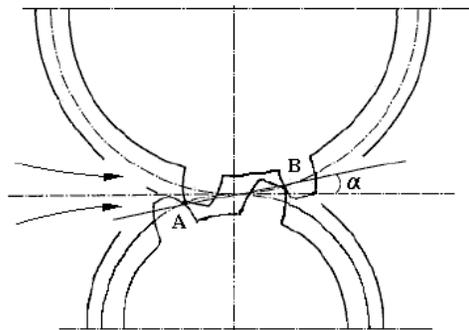


Figura 14. Ângulo de Pressão (Shigley, 1984)

É indiscutível a conveniência dos perfis serem padronizados. É o que se faz normalmente, adotando-se dimensões dos dentes em função do módulo ou do passo diametral. Assim, a cada módulo (ou passo diametral) corresponderão dimensões bem determinadas para os dentes. Existem vários perfis padronizados, dificultando a identificação de engrenagens gastas, Shigley (1984).

2.2.2. Sistema Normal (Adotado pela ABNT)

A curva do perfil é uma evolvente de círculo com ângulo de pressão de 20° ou $14^\circ 30'$. A característica principal deste sistema é a cabeça do dente igual ao módulo ou ao inverso do passo diametral (Shigley, 1984).

2.2.3. Sistema Stub 20°

Em função das condições exigidas na moderna construção de máquinas e elementos de tração, foi preciso estudar engrenagens de elevadas condições de resistência, modificando-se os ângulos de pressão. Em 1899, a companhia americana “Fellows Shaper Co”. utilizou o dente “Stub”, que foi traduzido como “dente sem ponta”, em diversos pontos de máquinas. O resultado do uso do sistema “Stub” foi excelente, mas seu uso generalizado foi lento, encontrando seu lugar preferencial na indústria automobilística e de máquinas ferramentas.

A finalidade de utilização deste perfil é obter número mínimo de dentes onde a cabeça do dente é menor que a do sistema normal. Assim, a altura da cabeça do dente (h_a) é menor que o módulo (m) e, conseqüentemente, a profundidade por ser menor, resulta em um dente mais reforçado e uma diminuição na relação de contato (Shigley, 1984).

2.2.4. Sistema Fellow

Este sistema foi desenvolvido pela “Fellow Gear Sharper Co” e têm sido utilizados largamente para transmissões de automóveis. O sistema utiliza ângulo de pressão de 20° , sendo a geometria da engrenagem determinada por uma função, em que o numerador é o passo diametral utilizado para o diâmetro e a espessura do dente é o denominador para a altura, a cabeça e a base (Shigley, 1984).

2.2.5. Traçado do perfil de dentes

O estudo do traçado do perfil do dente de engrenagens cilíndricas de evolvente tem despertado interesse dos projetistas pelo fato das engrenagens, na sua maioria, serem fabricadas sempre com correção (Brito, 1998). Neste item são discutidos os princípios básicos para o traçado do perfil do dente das engrenagens cilíndricas de evolvente, destacando suas vantagens, inconvenientes e soluções analíticas.

O traçado do perfil do dente de engrenagens torna-se necessário em diversas situações de projeto e de controle de qualidade. Dentre elas podem ser destacadas:

- No projeto e no controle de ferramentas, tais como moldes de injeção, coquilhas para fundição sob pressão, matrizes de extrusão e matrizes de compactação em processos de sinterização.
- No projeto de engrenagens com perfis especiais, tais como engrenagens que devem operar sob condições muito severas de carga, engrenagens fabricadas em termoplásticos, engrenagens aplicadas ao sistema de direção pinhão/cremalheira, etc.
- Na necessidade de calcular a tensão que atua no pé do dente, no caso de perfis especiais ou quando dados geométricos necessários a este cálculo não podem ser fáceis ou rapidamente obtidos.
- No controle do perfil de engrenagens obtidas através de diferentes processos de fabricação, na falta de equipamento específico para esta finalidade. Existem diversos métodos para o traçado de perfis de dentes de engrenagens. Os métodos gráficos são mais simples e fáceis de executar, simulam o processo de geração e são muito úteis no caso de perfis especiais. Porém, os métodos analíticos são os mais precisos e com o uso de artifícios computacionais, pode-se obter qualquer número de pontos do perfil, de forma rápida e precisa.

2.2.6. Evolvente como perfil de dentes de engrenagem

Quando a evolvente é usada como perfil de dentes de engrenagens, várias curvas evolventes são desenvolvidas a partir de uma mesma circunferência de base (Dias, 2002). A Figura 15 ilustra o desenvolvimento do lado que apresenta vários dentes sucessivos. Considere um cordão com vários nós igualmente espaçados, enrolado sobre uma

circunferência de base, quando o cordão é desenrolado, cada nó descreve uma curva evolvente. A distância entre essas evolventes, medida sobre qualquer linha tangente à circunferência de base é sempre a mesma, que por sua vez é igual ao comprimento do arco da circunferência de base entre as origens de quaisquer duas evolventes sucessivas. Assim, também é igual à distância entre os nós do cordão e ao comprimento da circunferência de base dividida pelo número de dentes da engrenagem sendo chamada de passo da base (P_b), conforme Equação 1.

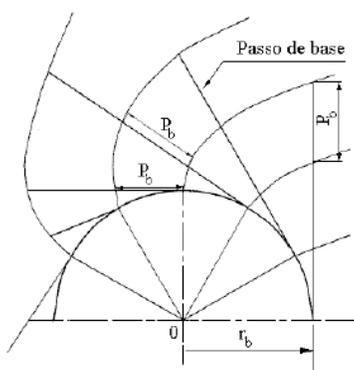


Figura 15. Desenvolvimento dos dentes da engrenagem (Shigley, 1984)

$$P_b = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_b}{N} \quad (1)$$

2.2.7. Diferentes Formas dos dentes

Em um procedimento análogo a Companhia Americana “Fellows Shaper Co.”, a empresa “R. D. Nuttall” desenvolveu desenhos de dentes, marcando suas formas de uma maneira distinta, diferenciando-se entre si nas dimensões das alturas da cabeça e do pé do dente, a partir do diâmetro primitivo, mas mantendo o mesmo ângulo de pressão.

Brito (1999), mostra em seu trabalho ilustrado na Figura 16 o perfil “Stub” de um dente de engrenagem com suas dimensões, onde (s) é a espessura, (h) a altura total, (h_a) a altura da cabeça e (h_f) a altura do pé. Para a mesma, será tomado como referência o

“Diametral Pitch nº 4”, passo equivalente ao módulo 6,35. A Figura 17, ilustra o perfil do dente “Stub” e normal de 20°.

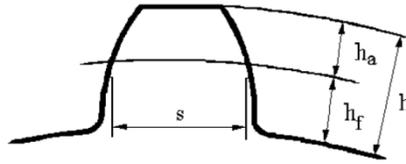


Figura 16. Perfil “Stub” (Brito, 1999)

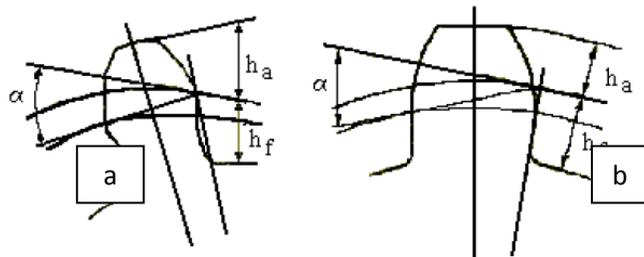


Figura 17. Comparação do perfil do dente Stub 20° (a) e normal de 20° (b) (Brito, 1999)

O Comitê Francês de Normalização – CFN adotou um perfil de dente que já é empregado na indústria francesa, também usando o ângulo de pressão de 20°. Neste perfil, a altura do dente e altura do pé do dente são dadas pelas Equações 2 e 3, respectivamente, em que (m) é o módulo.

$$h_a = 0,75 \cdot m \quad (2)$$

$$h_f = 0,95 \cdot m \quad (3)$$

Outro perfil de dente que obteve uma grande aceitação, sendo muito utilizado, é o perfil da “British Standard”. Este perfil tem um ângulo de 20° e sua aplicação principal é em engrenagens de tração, caixas reductoras para turbinas a vapor, em aviação e em outras aplicações especiais. O seu uso mais generalizado é em engrenagens helicoidais com eixos paralelos. Estas engrenagens classificam-se em três classes:

- Classe A – Precisão: engrenagens para uma velocidade periféricas maiores que 600 [m/min];
- Classe B – Alta precisão: engrenagens para uma velocidade periférica de 230 a 900 [m/min];
- Classe C – Tipo comercial: engrenagens para uma velocidade periféricas inferiores a 360 [m/min];

2.2.8. Vantagens e inconvenientes dos perfis evolventes e cicloidais

Segundo Pires (1980) e Shigley (1984), cada perfil tem vantagens e inconvenientes. Nas engrenagens cicloidais o contato dos dentes verifica-se entre uma superfície côncava e uma convexa. Desta maneira, a área deformada de contato é maior que nas engrenagens da evolvente, resultando uma pressão menor, e conseqüente diminuição de desgaste. O número mínimo de dentes admissíveis é menor. Estas engrenagens apresentam, porém, o inconveniente de exigir uma distância precisa entre as árvores, pois uma modificação na distância provoca alteração de funcionamento do sistema engrenado, já que a lei fundamental das engrenagens não se satisfaz, devido a alteração do ponto de tangencia na região engrenada. O traçado é mais difícil, a intensidade das pressões nos pontos de contato aumenta do centro do perfil para as extremidades. Engrenagens com o mesmo passo só podem engrenar se os perfis são gerados por circunferências de mesmos raios. As ferramentas para a execução são mais numerosas e de execução difícil. As bases dos dentes resultam perfis debilitados, para as engrenagens de pequeno número de dentes.

As engrenagens da evolvente do círculo permitem uma variação na distância dos centros, o que acarreta apenas a modificação do ângulo de pressão. O traçado é mais simples e as cortadeiras são de execução fácil. A pressão nos pontos de contato é constante, por ser a linha de ação, uma reta. Para um mesmo passo, os dentes das engrenagens da evolvente são mais reforçados que os das cicloidais. Mas, inconvenientes existem. Os contatos se processam entre duas superfícies convexas, o que aumenta a pressão atuante. O número mínimo de dentes é mais elevado que para engrenagens cicloidais, tornando o rendimento ligeiramente inferior. Ponderando estas vantagens e inconvenientes, as engrenagens cicloidais estão sendo, cada vez mais, substituídas pelas engrenagens evolventes.

2.2.9. Solução analítica para determinação do perfil de engrenagens de evolvente sem correção

Brito (1999), destaca em seu trabalho que a curva evolvente é universalmente utilizada como perfil dos dentes das engrenagens, por sua grande facilidade de fabricação e, sobretudo por certas características que ela tem na sua utilização. A evolvente permite que o contato entre os dentes das duas engrenagens aconteça apenas em um ponto A (ou uma pequena região reformada em torno do ponto), permitindo uma ação conjugada, suave e sem muito deslizamento, próximo a uma condição de rolamento. Conforme ilustrado na Figura 18, à medida que as engrenagens giram, o ponto de contato “A” muda nos dentes, mas permanece sempre ao longo da linha aa' chamada de linha de ação. A inclinação desta linha é definida pelo ângulo de pressão α , sendo uma característica já incorporada na ferramenta usada para gerar o dente. É na direção da linha de ação que a força é transmitida de um dente para outro.

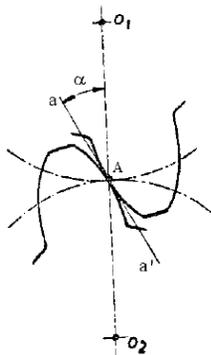


Figura 18. Perfil do dente (Shigley, 1984)

2.2.10. Equação da evolvente em coordenadas polares

A evolvente é uma linha gerada por um ponto “P” de uma reta “g”, que rola sem escorregar sobre uma circunferência de base b , como ilustra a Figura 19. Na mesma, a curva obtida se faz sobre uma circunferência de raio r_b e centro em O, onde ρ é o raio instantâneo de curvatura da evolvente, r^P é o raio em qualquer ponto “P” sobre a evolvente, θ^P é o ângulo vetorial entre os raios vetores que definem a origem da evolvente em qualquer ponto, tal como “P” sobre a evolvente, α_P é o ângulo de rolamento do ponto “P” e r_b é o raio da circunferência de base (Brito, 1999).

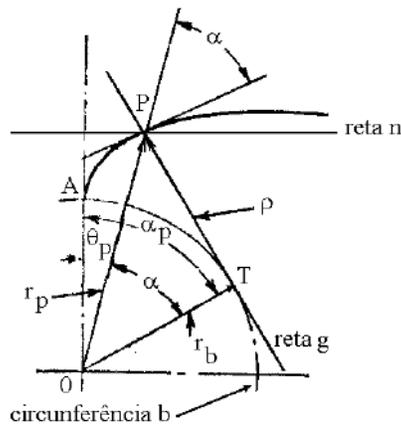


Figura 19. Curva Evolvente e Principais Grandezas Geométricas (Brito,1999)

O segmento \overline{PT} da reta g chama-se geratriz da evolvente. Este segmento é perpendicular a evolvente no ponto “P”, gerando o raio de curvatura desta no mesmo ponto. O ângulo que o raio vetor \overline{OP} forma com o raio do círculo de base, passando por “T”, é igual ao ângulo que a geratriz forma com a reta n, normal a \overline{OP} , e resulta também igual ao ângulo α que o raio vetor \overline{OP} forma com a tangente à evolvente do ponto P. A condição fundamental é que $\overline{PT} = \overline{AT}$ Como, $\overline{PT} = \rho$, têm-se as equações 4 e 5. Fazendo-se a equação 4 igual a equação 5, pela condição fundamental, tem-se a equação 6, que define a função evolvente $inv\alpha$, em que $(tg\alpha)$ é expressa em graus e (α) em radianos. O ângulo de rolamento do ponto P (α_p) é dado pela Equação. 7.

$$AT = r_b (\theta_p + \alpha) \quad (4)$$

$$\rho = \overline{PT} = r_b tg\alpha = \sqrt{r_p^2 - r_b^2} \quad (5)$$

$$\theta_p = tg\alpha - \alpha = inv\alpha = tg\alpha - \alpha \quad (6)$$

$$\alpha_p = arctg p \frac{d\theta_p}{dr_p} = arctg \frac{\sqrt{r_p^2 - r_b^2}}{r_b} \quad (7)$$

O vetor (r^P) e o ângulo (α_P) variam com a posição do ponto “P”, e estão ligados ao raio (r_b) do círculo de base pela Equação 8, sendo o ângulo (α_P) igual a zero na origem “A” e aumentando enquanto o ponto “P” percorre a evolvente. Portanto, em coordenadas polares, têm-se (θ_P) para cada (r^P), para um dado círculo de base “P” (r^P, α_P).

$$r_P = \frac{r_b}{\cos \alpha_P} \quad (8)$$

2.2.11. Equação da trocóiide em coordenadas polares.

A curva evolvente tem seu começo na circunferência de base, não permitindo que haja ação conjugada abaixo desta circunferência. Se uma cremalheira com cantos agudos atua contra a evolvente e seus bordos se estendem bem abaixo da circunferência de base, ocorrerá interferência, a menos que o dente seja recortado. A curva em laço representa a trajetória do canto agudo do dente da cremalheira quando ele entra e sai do engrenamento e, é chamada de trocóiide, como ilustra a Figura 20, onde (α) é o ângulo de pressão, (r) é o raio da circunferência primitiva, (r_T) é o raio qualquer da trocóiide (origem no centro da engrenagem), (θ_T) é o ângulo diretor da trocóiide, (h_p) é a altura da cabeça da cremalheira, (δ) é o ângulo entre as origens da evolvente e da trocóiide e LP é a linha primitiva (Brito, 1999).

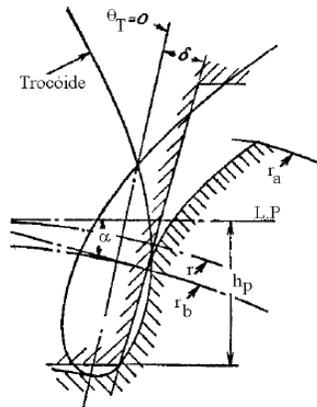


Figura 20. Curva da Trocóiide e Principais Grandezas Geométricas (Brito, 1999)

Para o caso mais freqüente de recorte, que é a trocóiide gerada no engrenamento de um pinhão com uma cremalheira, o que ocorre com a maioria dos processos de fabricação de engrenagens por geração é apresentado nas equações 9 e 10, sendo (α) em radianos e $\text{tg}(\alpha)$ em graus. Para a altura da cabeça da cremalheira, geralmente, adota-se o mesmo valor da altura do pé do dente (h_f).

$$\theta_T = \text{arctg} \left[\frac{\sqrt{r_T^2 - (r - h_{ap})^2}}{r - h} \right] - \frac{\sqrt{r_T^2 - (r - h_{ap})^2}}{r} \quad (9)$$

$$\delta = \alpha - \frac{(r - h_{ap}) \text{tg} \alpha}{r} \quad (10)$$

2.2.12. Equação da evolvente e trocóiide em coordenadas cartesianas

A Figura 21 ilustra a curva da evolvente e trocóiide, onde “XP”, “YP” são as coordenadas cartesianas de um ponto “P” pertencente à evolvente em relação a um sistema com origem no centro da engrenagem e cujo eixo “y” passa pelo centro do dente, (θ') é o ângulo entre o eixo de simetria do dente e o eixo que passa pelo ponto de origem da evolvente e “XT”, “YT” são as coordenadas cartesianas de um ponto “T” pertencentes à trocóiide em relação ao mesmo sistema de coordenadas “XP”, “YP”.

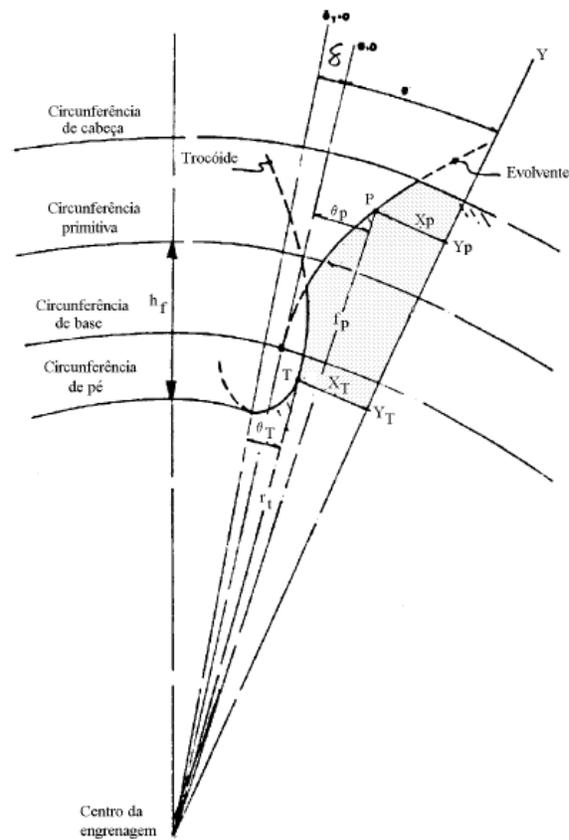


Figura 21. Curva da Evolvente e Trocóide, principais grandezas geométricas. (Brito, 1999)

O ângulo (θ') é dado pela equação 11 em que (N) é o número de dentes. A curva da evolvente em coordenadas cartesianas é dada pela Equação 12, e a curva da trocóide em coordenadas cartesianas é dada pela Equação 13.

$$\theta' = \frac{N}{\pi} + \text{inv}\alpha \quad (11)$$

$$X_P = r_P \text{sen}(\theta' - \theta_P) \quad Y_P = r_P \text{cos}(\theta' - \theta_P) \quad (12)$$

$$X_T = r_T \text{sen}(\theta' - \delta - \theta_T) \quad Y_T = r_T \text{cos}(\theta' - \delta - \theta_T) \quad (13)$$

2.2.13. Deslocamento dos perfis

Brito (1999), mostra em seu trabalho que uma das grandes vantagens do perfil evolvente é a possibilidade de deslocamento do perfil, sem modificação da conjugação. Outras vantagens do deslocamento de perfis são: obtenção de maior ou menor razão de contato, melhorar a resistência à flexão, eliminação do recorte, melhoramento do rendimento e diminuição do ruído.

Uma engrenagem de perfil evolvente não tem definido o diâmetro da circunferência primitiva até que os perfis entrem em contato. Na Figura 22, a linha de referência da cremalheira tangencia a circunferência primitiva da engrenagem, obtendo-se a equação 14, em que (d) é o diâmetro primitivo, (m) o módulo e (N) o número de dentes.

$$d = Mn \tag{14}$$

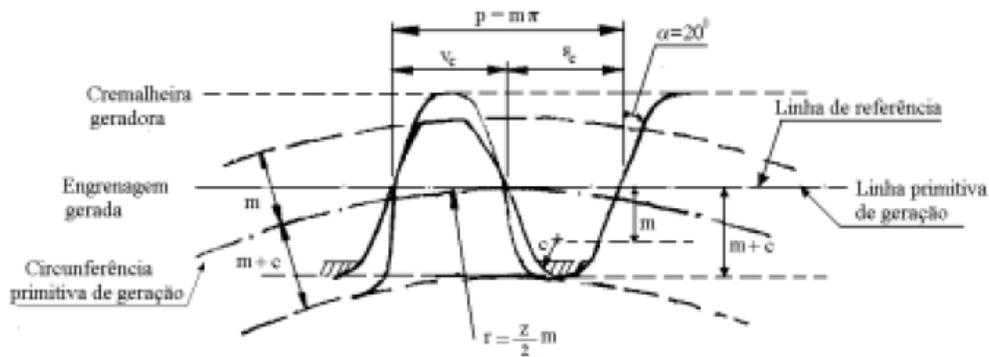


Figura 22. Perfil Normal (Brito, 1999)

Na Figura 23, a engrenagem ao ser gerada foi afastada da cremalheira geradora de uma distância v dada pela Equação 15, em que (x) é o coeficiente de deslocamento do perfil e (m) o módulo.

$$v = xm \tag{15}$$

Por questão de convenção, o coeficiente de deslocamento do perfil é positivo (+ x) se a linha de referência da cremalheira se afasta do centro do pinhão. A distância da linha de

referência da cremalheira ao centro do pinhão (a_c) é dado pela Equação 16, onde (r) é o raio primitivo.

$$a_c = r + xm = \frac{N}{2}m + xm \quad (16)$$

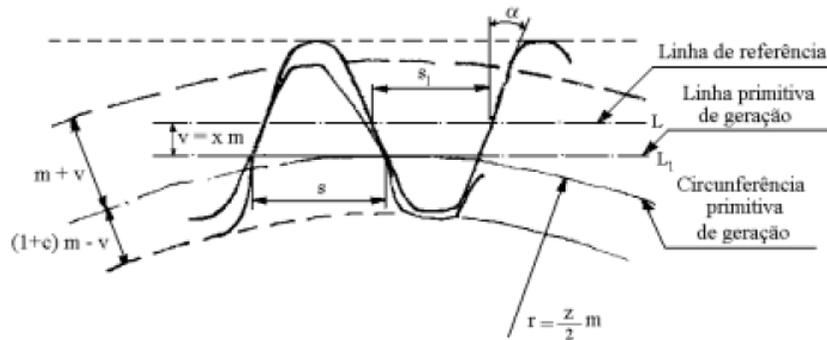


Figura 23. Perfil Deslocado (Brito, 1999)

A espessura do dente (s) gerado com deslocamento de perfil positivo, medida sobre a circunferência primitiva de geração, aumenta de $(2 \times m \times \text{tg}\alpha)$, Equação 17. As novas alturas da cabeça e do pé do dente são dadas pelas Equações 18 e 19, respectivamente.

$$s = \frac{\pi m}{2} + 2m \times \text{tg}\alpha \quad (17)$$

$$h_a = m + v = m(1 + x) \quad (18)$$

$$h_f = m(1 + c) - v = m(1 + c - x) \quad (19)$$

2.2.14. Solução analítica para determinação do perfil de engrenagens evolvente com correção

Brito (1999), destacou em seu trabalho a solução analítica para determinação do perfil de engrenagens de envolvente sem correção foi estudada a solução analítica para o traçado

do perfil de engrenagens cilíndricas de dentes retos de evolvente sem correção. Neste item será apresentado o estudo do traçado do perfil de engrenagens cilíndricas de dentes retos e helicoidais de evolvente com correção.

As engrenagens cilíndricas corrigidas correspondem a maior utilização e pode-se afirmar que, praticamente, não existem engrenagens sem correção. Para solução de engrenagens cilíndricas de dentes retos com correção e para a solução de engrenagens cilíndricas de dentes helicoidais com plano normal e frontal, com e sem correção, procede-se de forma análoga ao caso estudado por Brito (1999). As equações da evolvente e trocóiide em coordenadas cartesianas são as mesmas. As alterações são no raio primitivo (r), raio de base (r_b), ângulo de pressão (α), no ângulo (θ'), na altura do pé do dente (h_f) e na altura da cabeça do dente (h_a).

O tópico anterior foi descrito com a finalidade de introduzir alguns métodos de utilização do ângulo de pressão, apresentando um estudo criterioso sobre o traçado do perfil de dentes de engrenagens. O objetivo foi a influencia que o sistema de engrenamento possui no sistema de direção para determinar o maior e ou menor esforço do condutor do veículo ao esterçar o volante para direita e ou esquerda.

2.3. Processos de fabricação de engrenagens

2.3.1. Introdução aos processos de fabricações de engrenagens

Devido à sua capacidade para transmitir movimento e energia, as engrenagens estão entre os componentes mais importantes nos elementos da máquina. É dada especial atenção à fabricação de engrenagens porque existem requisitos específicos para cada tipo de engrenamento. Os flancos dos dentes da engrenagem têm uma forma complexa e precisa, com elevadas exigências para o acabamento de superfície.

As engrenagens podem ser fabricadas por diferentes processos de fabricação, tais como fundição, forjamento, extrusão de metalurgia do pó, entalhamento e fresamento. Mas, como regra geral, a usinagem é aplicada para atingir o final das dimensões pré-estabelecidas, tais como, forma e acabamento na engrenagem. As operações iniciais têm a função de pré-acabar os dentes e prepará-los para a etapa final de usinagem. Dessa forma, podemos dizer

que existem 2 métodos para formação de engrenagens, sendo um o processo de formação inicial dos dentes utilizando, por exemplo, forjamento e produzindo o “blank” e o acabamento dos dentes onde é empregado o fresamento, “shaving”, “honing”, etc. Na etapa de acabamento, cada um desses métodos inclui uma série de processos de usinagem.

A Figura 24 demonstra a forma de corte de engrenagens, a ponta da ferramenta de corte tem uma forma idêntica com a forma do espaço entre os dentes da engrenagem.

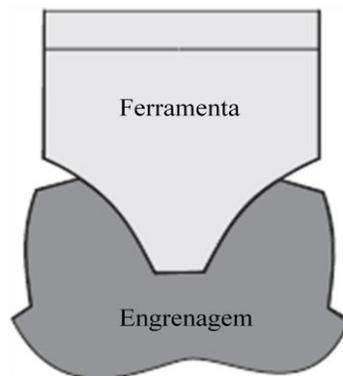


Figura 24. Princípio da geração de dentes

Duas operações de usinagem, fresamento e brochamento podem ser utilizadas para formar corte de dentes de engrenagens. No processo de fresamento, a ferramenta percorre axialmente ao longo do comprimento do dente na profundidade adequada para produzir o dente da engrenagem. Depois que cada dente é cortado, a ferramenta é retirada, e a engrenagem “blank” é rotacionada (permanece indexada), e os procedimentos de cortes são executados para cortar outro dente. O processo continua até que todos os dentes sejam cortados, conforme demonstrado na Figura 25.



Figura 27. Divisor para geração de dentes da engrenagem.

No processo de geração dos dentes de engrenagem utilizando o fresamento é necessário que o equipamento possua uma boa indexação, a engrenagem “blank” deve ter a execução dos dentes em uma única fixação para garantir precisão aos quesitos dimensionais requeridos.

2.3.2. Brochamento

O processo de brochamento também pode ser usado para produzir dentes da engrenagem e é particularmente aplicável aos entes internos. O processo é rápido e produz acabamento fino com alta precisão dimensional. No entanto, os pentes de brochas são relativamente caros, sendo este processo recomendado para altas produções, a Figura 28 exemplifica um esquema de brochamento para geração dos dentes de uma engrenagem.

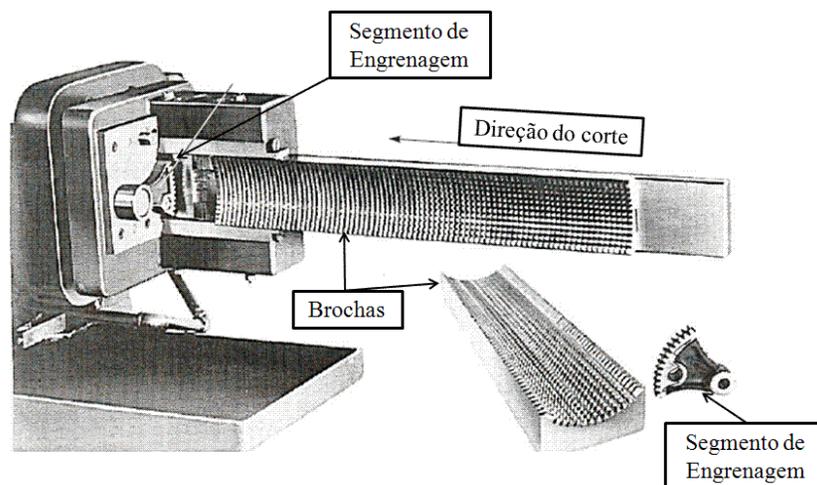


Figura 28. Geração de dentes através do processo de brochamento.

2.3.3. Geração de Engrenagem

Na geração de engrenagens, os flancos dos dentes são gerados como um esquema das posições subseqüentes do cortador, que se assemelha em forma a engrenagem de acoplamento no par de engrenagens, conforme demonstrado nas Figuras 29 e 30.

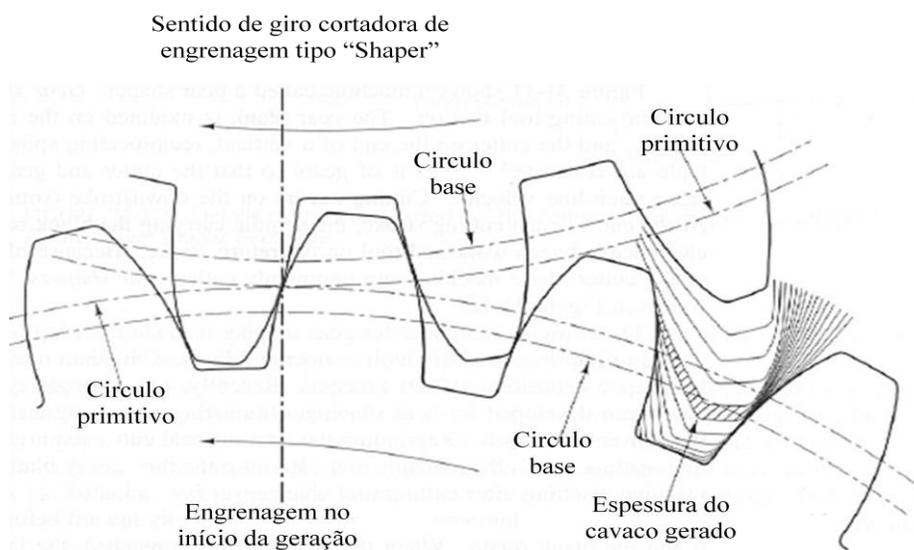


Figura 29. Movimentos entre ferramenta e engrenagem na geração dos dentes (Shigley, 1984)

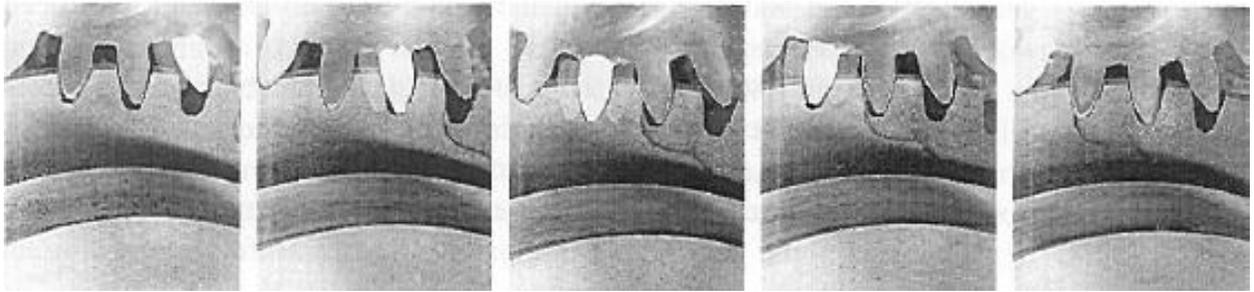


Figura 30. Movimentos entre ferramenta e engrenagem na geração dos dentes

A Figura 30 demonstra a ação de um cortador tipo “shaper” de engrenagens. A série de figuras define as várias fases da produção de um dente em uma engrenagem. A ação que ocorre da direita para a esquerda e para facilitar a visualização um dente do cortador foi pintado de branco. Na geração de engrenagens, dois processos de usinagem são empregados, “shaping” e fresamento. Existem várias anuências relacionadas a estes processos para a ferramenta de corte, com diferentes processos fabricação de engrenagens, sendo:

- Fresamento com um “hobbing”;
- Engrenagens com um pinhão cortador;
- Engrenagens com uma cremalheira cortadora;

2.3.4. Engrenagens geradas pelo processo “hobbing”

O processo de usinagem de engrenagens utilizado este conceito tem como base a utilização de uma ferramenta tipo caracol para geração dos dentes, representando o perfil e ângulo de hélice desejado. Todos os movimentos do fresamento são rotativos, e a engrenagem que está sendo usinada gira no sentido de concatenar ferramenta e peça de maneira contínua até que todos os dentes sejam cortados, conforme demonstrado no esquema da Figura 31.

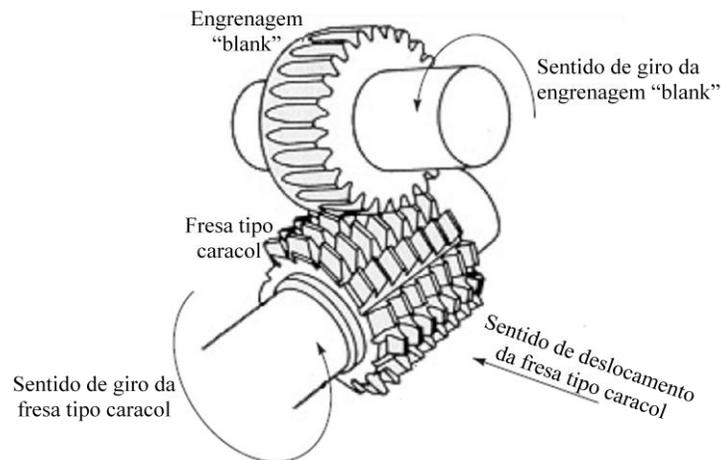


Figura 31. Esquema de geração dos dentes da engrenagem helicoidal

Quando se inicia o processo de geração de dentes da engrenagem utilizando o conceito de “hobbing” o ângulo a ser utilizado entre a placa e a engrenagem é 90° menos o ângulo da engrenagem a ser gerada. Para engrenagens helicoidais, a placa é de tal modo que o ângulo da hélice da fresa é paralelo a direção do dente da engrenagem a ser cortado, um movimento adicional ao longo do comprimento do dente é necessário com o objetivo de garantir homogeneidade no comprimento do dente, podemos observar a cinemática destes movimentos na Figura 32.

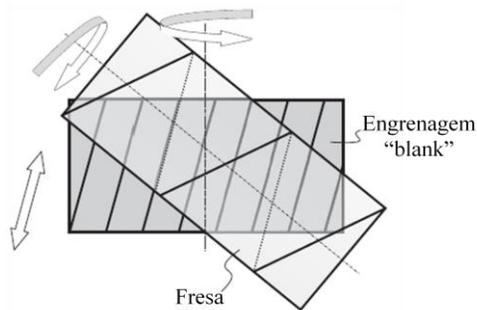


Figura 32. Cinemática na geração dos dentes da engrenagem helicoidal

A ação da máquina de fresar tipo “hobbing” tem como característica corte dos dentes com qualidade no engrenamento na ordem de DIN10, para isso são necessários elementos de fixação da engrenagem “blank” rígidos, pois o corte ocorre de maneira contínua e homogênea. A placa e a engrenagem “blank” são conectadas por um eixo principal que

assegura a rotação contínua em forma de malha. Para iniciar o corte de uma engrenagem, a placa de giro é alimentada com a engrenagem “blank” e o programa com os parâmetros de corte inseridos no equipamento, em seguida, inicia-se o corte contínuo até que a engrenagem toda seja concluída. Máquinas para cortar engrenagens precisas são geralmente do tipo CNC e muitas vezes são dispostas em locais especiais com controle de temperatura evitando assim variações dimensionais. A Figura 33 demonstra os elementos de fixação e a ferramenta para cortar dentes helicoidais de engrenagens.



Figura 33. Equipamento CNC para fresar dentes helicoidais

A ferramenta para geração de dentes helicoidais no processo “hobbing” apresenta dentes igualmente espaçados e possuem a geometria padrão em relação ao dente que se pretende gerar, essas ferramentas normalmente recebem coberturas de nitreto de titânio que aumenta a vida da ferramenta, pois reduz a troca do calor entre ferramenta e cavado gerado no corte dos dentes da engrenagem, a Figura 34 demonstra uma ferramenta de fresar dentes de engrenagens helicoidais tipo caracol.



Figura 34. Ferramenta de cortar dentes helicoidais tipo caracol.

2.3.5. Engrenagens geradas pelo processo de “Shaper”

O processo de geração de dentes de engrenagens utilizando “shaper” tem sua fundamentação no processo de entalhamento para remoção do material na engrenagem “blank”, O eixo de corte é paralela ao eixo da engrenagem, o cortador gira lentamente em relação à engrenagem “blank” com um movimento alternativo axial, o sistema na máquina é conhecido como biela manivela, para produzir os dentes da engrenagem. Um conjunto de engrenagens na parte superior do equipamento determina o passo e profundidade do entalhamento, assim é possível ter a relação necessária entre o movimento do eixo do cortador e do eixo de transmissão.

O corte pode ocorrer tanto no movimento ascendente ou descendente da máquina, visto que o movimento necessário para o cortador é relativamente pequeno, este processo é recomendado para cortar engrenagens com pouca área de saída da ferramenta, como por exemplo, os flanges ou alguns tipos de pinhões para sistemas de direção veicular.

A ferramenta é chamada de cortadora de engrenagem e se assemelha em forma a engrenagem de acoplamento do par de engrenagens conjugadas. A geração de engrenagens com esse processo é conhecido como um dos mais versáteis para se produzir engrenagens internas ou externas, a Figura 35 demonstra a cinemática do processo de cortar engrenagens utilizando “shaper”, a Figura 36 demonstra um ferramenta de cortar dentes de engrenagens tipo “shaper”.

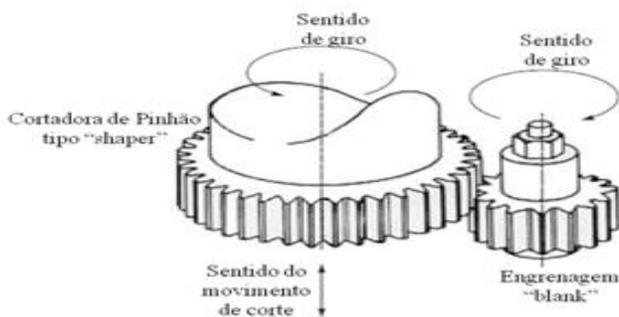


Figura 35. Movimentos no processo de cortar dentes helicoidais tipo “shaper”



Figura 36. Ferramenta de cortar dentes helicoidais tipo “shaper”

As vantagens das engrenagens fabricadas com o processo de entalhamento, também conhecido como “shaper”, é sua precisão na qualidade do engrenamento tendo a ferramenta de cortar com arestas de corte bem definidas. Quando comparados com outros métodos para gerar engrenagens não é considerado cara, este processo pode ser aplicado para operação de acabamento em todos os tipos de engrenagens e a altos volumes de produção.

2.3.6. Engrenagens geradas pelo processo de “Shaper rack”

Engrenagem fabricada com um cortador em formato de cremalheira tem seu sentido de corte obedecendo ao deslocamento longitudinal e a engrenagem “blank” rotacionando no seu próprio eixo, esse movimento longitudinal transcorre lentamente e de forma linear.

O “shaper rack” é realmente um segmento de uma cremalheira, não se torna prático ter mais de 12/06 dentes em um cortador de “shaper rack”, o mesmo deve sair e entrar algumas vezes na engrenagem até se obter a profundidade de corte desejada. Esse método de cortar dentes de engrenagens possui uma precisão dimensional elevada e a ferramenta de corte não tem custo alto, esse método de fabricação pode ser usado para baixas e altas produções, a Figura 37 demonstra a cinemática do processo de cortar dentes de engrenagens utilizando o método “shaper rack”.

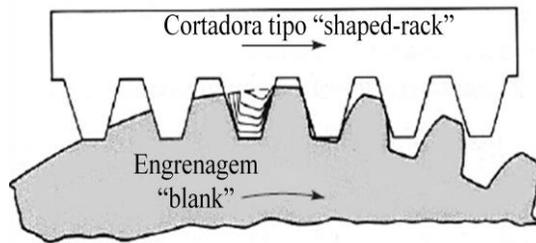


Figura 37. Ferramenta de cortar dentes tipo "shaper rack"

2.3.7. Engrenagens geradas por conformação

As operações de conformação dos dentes da engrenagem são formados de uma só vez a partir de um molde para que as formas dos dentes alcancem o perfil e ângulo desejado. A precisão dos dentes é totalmente dependente da qualidade do molde, de forma geral o acabamento é menor em relação aos processos de desbaste ou acabamento. O processo de conformação tem altos custos para o ferramental empregado em contrapartida possui baixos tempos de ciclo para processamento das engrenagens.

2.3.8. Engrenagens geradas por fundição baixa pressão

As engrenagens fabricadas por molde de areia são relativamente baratas diante de outros processos, pois apresenta baixa qualidade, os custos dos ferramentais são altos, baixa precisão dimensional e baixo acabamento superficial, diante do fato de não serem precisos os níveis de ruído e as folgas são considerados constantes neste processo de geração de engrenagens. Esses tipos de engrenagens são adequados para aplicações não-críticas, onde não se requer acabamentos finos nos dentes, as faltas de precisão dimensional nos dentes não interferem em sua aplicação final, por exemplo, podemos citar brinquedos, eletroportáteis, misturador de cimento e de barris, caixa de velocidades de elevação de portão entre outras. Os materiais aplicados a este tipo de engrenagens normalmente são ferro fundido, bronze e cerâmica.

2.3.9. Engrenagens geradas por fundição de alta pressão

As engrenagens fundidas sob alta pressão são de melhor acabamento superficial e precisão (espaçamento dos dentes e concentricidade), porém evidenciam-se altos custos de

ferramental, é adequado para aplicações de produção em grande escala, as engrenagens oriundas do processo de fundição são utilizados em instrumentos como máquinas fotográficas, máquinas de escritório, máquinas de lavar, bombas de engrenagens, redutores de velocidade e motores de máquinas para aparar gramado.

Os materiais empregados para fabricar estas engrenagens são zinco, alumínio e latão. As engrenagens feitas a partir deste processo não são utilizados para a alta velocidade e altas cargas concentradas no dente, portanto, tem sua aplicação em engrenagens de pequeno porte.

2.3.10. Engrenagens Sinterizadas

A técnica de metalurgia do pó utilizado para fabricação de engrenagens conhecida também como sinterização tem como pontos relevantes a semelhança com o processo de injeção, suas propriedades relativas ao material podem ser feitas sob medida, visto a possibilidade de utilizar a receita ideal para cada tipo de aplicação. As engrenagens fabricadas a partir do processo de sinterização normalmente são indicadas para pequenas engrenagens, pode ser econômica se fabricada em lotes de larga escala.

2.3.11. Engrenagens por Extrusão

Extrusão é usada para formar dentes em longas hastes, que são cortados em comprimentos utilizáveis e usinados para furos e ranhuras etc,. Normalmente são de materiais não ferrosos como alumínio e ligas de cobre, em vez de aço. Isto resulta em bons acabamentos superficiais com bordas limpas e livres de poros com uma estrutura mais densa, a Figura 38 demonstra alguns modelos de engrenagens fabricadas pelo processo de extrusão. Os materiais mais comuns que são utilizados para extrusão são alumínio, cobre, latão, bronze, tendo suas aplicações em estriado de eixos ocos e sólidos.

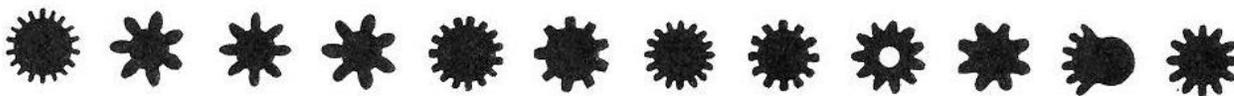


Figura 38. Engrenagens extrudadas

2.3.12. Engrenagens geradas através do processo de estampagem:

Consiste em uma ferramenta de corte / repuxo, composto de um punção e uma matriz, onde ao passar da chapa em cima da matriz o punção exerce força axial na chapa, cortando-a e a chapa passa a possuir a forma do punção. O processo de estampagem para fabricação de engrenagens pode ser aplicado a relógios, mecanismos aquáticos, brinquedos entre outros, não é considerado de precisão e possui acabamento ruim.

2.4. Acabamentos em dentes de engrenagens

2.4.1. Acabamento de Engrenagens

As operações de acabamento para dentes de engrenagens são requeridos em várias aplicações, tais como sistemas de direção pinhão/cremalheira, transmissão veicular, sistemas de engrenagens para máquinas operatrizes tipo CNC, entre outras. Como as engrenagens são produzidas por qualquer dos processos descritos nos tópicos anteriores, o acabamento superficial e precisão dimensional pode não ser na qualidade DIN de engrenamento requerida para determinadas aplicações, fato este que, justifica o estudo de processos para melhorar o acabamento e a qualidade dimensional das engrenagens, tais como “hard hobbing”, “honing”, retificação, lapidação, “shaving”, etc.

Acabamentos em dente de engrenagens têm sido considerado umas das operações de custo expressivo em comparação aos processos de usinagens convencionais vestem seu alto tempo de ciclo para processamento. Isso ocorre pelo fato de alteramos os parâmetros de corte para aumentar a produtividade onde temos como consequência danos sérios a evolvente do dente da engrenagem de acordo com Kruszynski e Luttermelt (1994). Em função disto, as engrenagens geralmente apresentam um complexo modelo tribológico, sujeito a fadiga precoce e uma superfície de contato desfavorável. Dessa forma, os parâmetros de processo são fundamentais para determinação do menor tempo de ciclo e maior qualidade.

2.4.2. Retificação de engrenagens

O processo de retificação normalmente é a última operação aplicada a engrenagem antes de sua finalização, este processo tem boa inferência nos efeitos potenciais das propriedades estruturais das engrenagens, com potencial de causar tensão residual. Isto acaba sendo um problema bem conhecido, entretanto, torna-se difícil a equalização dos parâmetros de processo com a alta produção e atendimento de um excelente padrão de qualidade dentro do processo de retificação. O fato de se atingir uma boa temperatura de austenização no material após o tratamento térmico pode se tornar um problema de tensão residual, introduzido no produto no processo de retificação. A consequência mais comum é um material tensionado e o deterioramento prematuro da engrenagem.

Por outro lado, a aplicação de super abrasivos no processo de retificação, para rebolos e dressadores, tem reduzido a geração de tensão residual em função da melhor distribuição de energia para remoção do material nas engrenagens ao longo do processo de retificação dos dentes. Suas características são as baixas temperaturas atingidas entre o rebole e a engrenagem associado ao baixo esforço aplicado para remoção de material conforme relatado por Kruszynski (1998). No entanto, a aplicação de super abrasivos para o processo de retificação ainda possui um alto custo, necessita de cuidados especiais durante o processo de dressagem, além de uma boa determinação do processo ideal, na busca das condições mais econômicas e de alta produtividade.

O processo de retificação de dentes da engrenagem é considerado complexo devido toda a cinemática envolvida para obter acabamentos elevados. (Kruszynski 1995, Kruszynski e Midera 1998).

A retificação de dentes de engrenagens tem como principais movimentos cinemáticos, o longitudinal (V_{st}) e o rotacional (n_{fa}) do rebole combinados com a peça, a velocidade da peça V_w com o rebole e o movimento rotacional do rebole (n_s). A Figura 39 apresenta o esquema dos movimentos cinemáticos que ocorrem durante o processo de retificação dos dentes, e neste caso a retificação ocorre em 1 dente por vez.

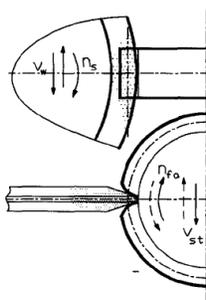


Figura 39. Movimentos cinemáticos do processo de retificação de dentes, (Kruszynski e Luttermelt 1994).

A qualidade da retificação dos dentes de engrenagens varia significativamente durante o processo em função dos parâmetros adotados, gerando a necessidade de correção na geometria do reboło em função de seu desgaste.

Dentro do contexto de retificação de dentes de engrenagens, para se obter um alto desempenho da qualidade da evolvente e ângulo de hélice alguns estudos tem demonstrado a utilização CBN para garantir o perfeito perfil do reboło transferido para os dentes da engrenagem conforme Klages e Fryda (1998) e Jackson e Mills (2000). Para essa aplicação devemos observar a composição do CBN e entender os mecanismos de desgaste do ferramental para retificação.

Segundo Chou e Evans (1999) e Poaulachon e Moisan (2001), uma nova camada estrutural passa a ser construída nos dentes da engrenagem, durante o processo de retificação devido ao fluído refrigerante aplicado.

Tsay e Liu (2000) desenvolveram um modelo para fixar o perfil da ferramenta de corte dos dentes, enquanto Litvin (2001) propôs modificações no ângulo de hélice e evolvente desenvolvendo um algoritmo articulando a área de contato acabada do dente do pinhão com uma fina superfície de contato da ferramenta de acabamento do perfil dos dentes.

Yoshino (1992) projetou um reboło capaz de acompanhar a forma da hélice em acabamento no perfil cônico do engrenamento. Dentro do processo de retificação de dentes da engrenagem, a precisão do ferramental de retificação é um fator determinante para obter

qualidade no perfil e ângulo de hélice nos dentes do engrenamento, todavia, o processo de retificação em engrenagens é considerado complexo.

Muitos estudos foram realizados para se determinar a influência da topografia do rebolo de corte durante o processo de retificação. O dressador tem sido o protagonista destes efeitos no rebolo e como consequência no produto, a combinação da profundidade de dressagem (a_d), a velocidade de dressagem (v_d) e a inclinação do dressador em contato com o rebolo tem sido responsável pelos efeitos macros da topografia da revolução obtida, controlando esses parâmetros torna-se possível encontrar a melhor condição de corte para o rebolo.

O problema encontrado com o método convencional de dressagem é a incerteza da homogeneidade da superfície do rebolo, torna-se difícil o monitoramento destes parâmetros devido a vários aspectos operacionais. Assim, freqüentemente faz-se necessário realizar a correção dos parâmetros de dressagem durante a vida útil do rebolo de corte.

Outro método para controlar o desempenho da retificação é gerar durante o processo de dressagem, pequenas ranhuras no rebolo de corte, onde os mesmos têm a função de deixar o corte mais agressivo e contínuo. De acordo com Kim (1997) e Lee (2000) este é o ponto mais crítico no processo de retificação, visto a dificuldade técnica de garantir esse perfil.

2.4.3. “Shaving” para acabamento em engrenagens

Dentre os vários tipos de operações para acabamento de engrenagens podemos destacar o “shaving” que vem sendo utilizado para o acabamento de engrenagens em produções de larga escala, devido ao baixo custo e curto tempo de usinagem.

A introdução do processo de “shaving” para melhorar o acabamento dos dentes da engrenagem tem o objetivo de reduzir o ruído e as vibrações além de melhorar as condições do engrenamento tornando suas funções mais favoráveis, evitando os erros de transmissão, modificando as superfícies dos dentes da engrenagem, evitando contatos de topos na crista dos dentes e aumentando a vida útil da mesma. A ferramenta de “shaving” tem a condição geométrica de uma engrenagem ideal e o propósito de transferir um fino acabamento a forma dos dentes da engrenagem endurecida.

O processo de “shaving” consiste na remoção de minúsculas partículas de material na superfície de trabalho dos dentes da engrenagem. Para que a ferramenta de “shaving” possa realizar essa tarefa é necessário possuir na região de geração dos dentes linhas semelhantes a um serrilhado em cada flanco para propiciar corte fino e bom acabamento nos dentes da engrenagem.

Dentre os muitos tipos de operação de “shaving” existentes podemos destacar o processo de mergulho largamente utilizado para acabamento em dentes das engrenagens, também possui como boa referência a alta produtividade e baixo custo peça de acordo com Townsend (1991). Durante o processo de “shaving”, a ferramenta executa um mergulho em direção a engrenagem, mantendo os movimentos radiais nos dentes da engrenagem, estabelece-se uma fina linha de contato entre o dente da ferramenta de “shaving” e o flanco do dente em um espaço de tempo pequeno, de acordo com Litvin (2001).

Nos últimos anos foi desenvolvido um estudo para determinar em função do perfil do dente da engrenagem a ferramenta ideal de “shaving” para cortar e depois acabar os dentes endurecidos da engrenagem, conforme estudado por Moriwaki (1994) e Nakada (2007). O propósito deste estudo foi à modificação da superfície de contato para reduzir os ruídos e vibrações decorrentes do contato imperfeito do flanco dos dentes em sua aplicação final, associado ao enrijecimento de uma pequena parte na região externa do flanco do dentes, aumentando assim consideravelmente a vida útil do engrenamento. A Figura 40 demonstra uma engrenagem sendo aplicada à ferramenta de “shaving”.

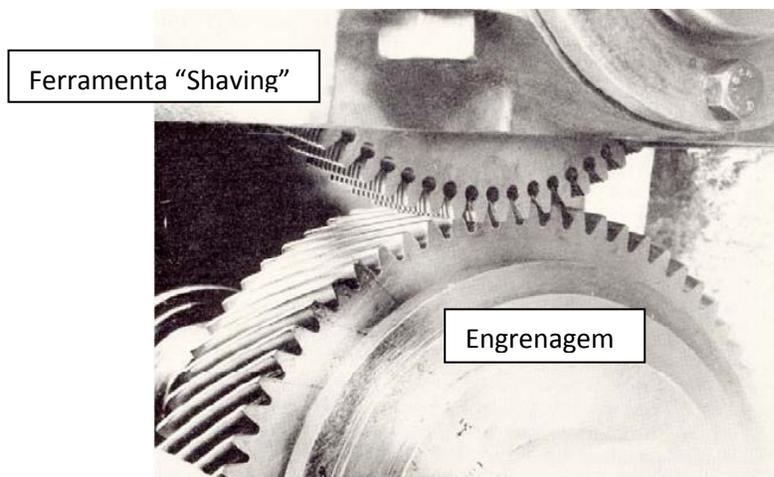


Figura 40. Ferramenta de “shaving” engrenada na engrenagem

2.4.4. Lapidação para acabamento em engrenagens

O processo de lapidação dos dentes de engrenagens consiste em literalmente esfregar material abrasivo no perfil do dente objetivando alcançar acabamentos mais finos, esse processo deve ocorrer depois do enrijecimento da engrenagem. A Figura 41 demonstra uma engrenagem durante o processo de lapidação.

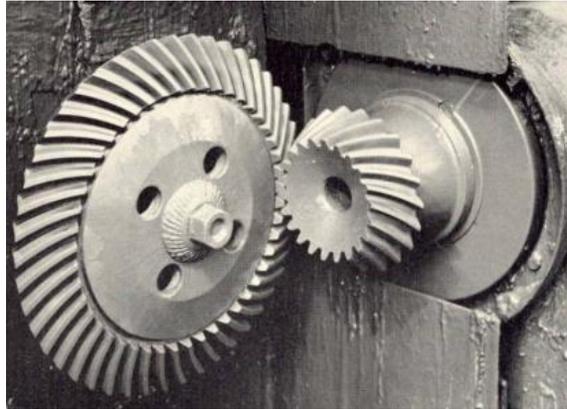


Figura 41. Lapidação de engrenagens

Nos últimos anos, a tendência pela busca contínua de engrenamentos mais suaves e menos ruidosas, fizeram com que a tecnologia para acabamentos de dentes de engrenagem buscasse alternativas de processo a fim de melhorar as condições qualitativas do processo de revolução dos dentes após o tratamento térmico. Entre as melhores práticas adotadas para o processo de retificação podemos citar o “honing”, que tem boa semelhança com o processo de retificação, possuindo altas velocidades de cortes e melhores propriedades de superfície dos flancos dos dentes de acordo com Denkena e Reichstein (2005). Este fino processo de acabamento foi aplicado ao pinhão, sendo o mesmo considerado um dos componentes mais importantes do sistema de direção, particularmente para o engrenamento entre o pinhão e a cremalheira torna-se fundamental o acabamento no perfil da hélice.

2.5. Planejamento de experimentos e método de superfície de resposta

2.5.1 Introdução

Planejamentos experimentais são utilizados nas mais diversas áreas do conhecimento, sendo um útil instrumento no processo de tomada de decisão.

Segundo Montgomery (2003), a definição de experimento é um conjunto de testes, nos quais, são feitas mudanças nas variáveis de entrada de um processo, observando e identificando os resultados destas mudanças nas variáveis de respostas. Geralmente os experimentos possuem grande quantidade de informações, sendo necessário um tratamento estatístico dos dados para se extrair conclusões valiosas.

O planejamento de experimentos é um conjunto de ensaios estabelecidos com critérios científicos e estatísticos, ou seja, é uma técnica usada para definir quais dados, em que quantidade e em quais condições devem ser coletados durante um determinado experimento.

O uso do planejamento de experimentos tem por meta satisfazer dois objetivos: a maior precisão estatística possível na resposta e o menor custo. É, portanto, uma técnica de extrema importância para a indústria, pois seu emprego permite resultados mais confiáveis, economizando tempo e dinheiro.

A validade das conclusões que são tiradas de um experimento depende de como o experimento foi conduzido. Portanto, o delineamento experimental desempenha um papel importante na solução final do problema que, inicialmente, motivou o experimento.

Segundo Banzato & Kronka (1992), a pesquisa científica está constantemente utilizando experimentos para provar suas hipóteses. Experimentos variam de pesquisa para outra, porém todos eles são regidos por alguns princípios básicos, necessários para que as conclusões sejam válidas. Os princípios são:

- 1) Princípio da repetição: consiste na reprodução do experimento básico e tem por finalidade propiciar a obtenção de uma estimativa do erro experimental;
- 2) Princípio da casualização: tem por finalidade propiciar a todos os tratamentos a mesma probabilidade de serem designados a qualquer das unidades experimentais;

3) Princípio do controle local: este princípio é freqüentemente utilizado, mas não é de uso obrigatório, pois podemos realizar experimentos sem utilizá-lo. O procedimento é reunir em blocos as unidades experimentais mais homogêneas, reduzindo assim o erro experimental;

O método estatístico de análise dos dados provenientes de um experimento é a análise de variância. Este método se baseia na decomposição da variação total da variável resposta em duas partes, uma atribuída aos tratamentos e outra ao erro experimental. De acordo com Banzato & Kronka (1992), para que a análise de variância seja válida algumas hipóteses básicas devem ser verificadas:

- a) aditividade: os efeitos dos fatores que ocorrem no modelo devem ser aditivos;
- b) independência: os erros ou desvios devidos ao efeito dos fatores não controlados devem ser independentes;
- c) homogeneidade de variância: os erros ou desvios, devido aos efeitos dos fatores não controlados, devem possuir uma variância comum;
- d) Normalidade: os erros ou desvios, devido ao efeito de fatores não controlados, devem possuir uma distribuição normal de probabilidade;

2.5.2 Experimento Fatorial

Os experimentos fatoriais são utilizados quando há interesse no estudo de dois ou mais fatores simultaneamente. Cada subdivisão de um fator é denominada nível do fator e os tratamentos nos experimentos fatoriais consistem de todas as combinações possíveis entre os diversos fatores nos seus diferentes níveis.

Os experimentos fatoriais não constituem um delineamento experimental, e sim um esquema orientado de desdobramento de graus de liberdade de tratamentos e podem ser instalados em qualquer dos delineamentos experimentais.

Muitos experimentos envolvem mais de dois fatores, por exemplo, existem a níveis do fator A, b níveis do fator B, c níveis do fator C e assim por diante, arrumados em um experimento fatorial, usualmente ocorrerão $abc \dots n$ observações totais, se houver réplicas

do experimento completo. Podemos considerar como exemplo um experimento com três fatores, tendo o seguinte modelo:

$$Y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl} \quad (20)$$

O modelo possui três efeitos principais, três interações de segunda ordem, uma interação de terceira ordem e um termo de erro, considerando de A, B e C sejam fatores fixos à análise.

Tabela 4. Análise de variância para o modelo de efeitos fixos com três fatores.

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrática	Valor esperado da média quadrática	FO
A	SQA	a-1	MQA	$\sigma^2 + \frac{bcn \sum_i \tau_i^2}{a-1}$	MQA/MQE
B	SQB	b-1	MQB	$\sigma^2 + \frac{acn \sum_j \beta_j^2}{b-1}$	MQB/MQE
C	SQC	c-1	MQC	$\sigma^2 + \frac{abn \sum_k \gamma_k^2}{c-1}$	MQC/MQE
AB	SQAB	(a-1)(b-1)	MQAB	$\sigma^2 + \frac{cn \sum \sum (\tau\beta)_{ij}^2}{(a-1)(b-1)}$	MQAB/MQE
AC	SQAC	(a-1)(c-1)	MQAC	$\sigma^2 + \frac{bn \sum \sum (\tau\gamma)_{ik}^2}{(a-1)(c-1)}$	MQAC/MQE
BC	SQBC	(b-1)(c-1)	MQBC	$\sigma^2 + \frac{an \sum \sum (\beta\gamma)_{jk}^2}{(b-1)(c-1)}$	MQBC/MQE
ABC	SQABC	(a-1)(b-1)(c-1)	MQABC	$\sigma^2 + \frac{n \sum \sum \sum (\tau\beta\gamma)_{ijk}^2}{(a-1)(b-1)(c-1)}$	MQABC/MQE
Erro	SQE	abc(n-1)	MQE	σ^2	
Total	SQT	abcn-1			

Quando existe a necessidade de se observar vários fatores em um único experimento, devemos aplicar o conceito de planejamento fatorial, que significa em cada tentativa ou

réplica do experimento alcançar todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores que são investigadas.

Segundo Montgomery (2003), o efeito de um fator é definido como a variação na resposta produzida pela mudança no nível do fator, sendo chamado de efeito principal, pois se refere a fatores primários no estudo, por exemplo, considere um experimento fatorial com dois fatores, sendo A e B, cada um com dois níveis (A_{baixo} , A_{alto} e B_{baixo} e B_{alto}). O efeito principal do fator A é a diferença entre a resposta média do nível alto de A e a resposta média do nível baixo de A.

2.5.3 Fatorial Fracionário

Segundo Montgomery (2003), planejamentos fatoriais são freqüentemente usados nos experimentos envolvendo vários fatores em que é necessário estudar o efeito conjunto dos fatores sobre uma resposta. Entretanto, vários casos especiais do planejamento fatorial em geral são importantes pelo fato deles serem largamente empregados em trabalhos de pesquisa e devido ao fato de formarem a base de outros planejamentos de considerável valor prático.

O mais importante desses casos especiais é aquele de k fatores, sendo cada um com somente dois níveis, esses níveis podem ser quantitativos, tais como dois valores de temperatura, de pressão, ou de tempo, ou eles podem ser qualitativos, tais como duas máquinas, dois operadores, os níveis “alto” e “baixo” de um fator, ou talvez a presença e ausência de um fator. Uma réplica completa de tal planejamento requer $2 \times 2 \dots \times 2 = 2^k$ observações, sendo chamado de um planejamento fatorial 2^k .

O planejamento 2^k é particularmente útil nos estágios iniciais de um trabalho experimental, quando muitos fatores são prováveis de serem investigados. Ele fornece o menor número de corridas para as quais os k fatores podem ser estudados em um planejamento fatorial completo. Porque há somente dois níveis de cada fator, devemos supor que a resposta seja aproximadamente linear na faixa dos níveis dos fatores escolhidos.

2.5.4 Planejamento 2^2

O tipo mais simples de planejamento 2^k é o 2^2 , ou seja, dois fatores A e B, cada um com dois níveis. Geralmente esses níveis são considerados como baixo e alto do fator em referência. O planejamento 2^2 é demonstrado na Figura 42, o planejamento pode ser geometricamente como um quadrado, com $2^2 = 4$ corridas, ou combinações de tratamentos, formando os vértices do quadrado, no planejamento 2^2 , é prática demonstrar os níveis, baixo e alto dos fatores A e B pelos sinais – e +, respectivamente.

Uma notação especial é usada para marcar as combinações dos tratamentos, de forma geral, uma combinação de tratamentos é representada por uma série de letras minúsculas, se uma letra estiver presente, o fator correspondente é corrido no nível alto naquela combinação de tratamento com ambos os fatores no nível baixo. Por exemplo, a combinação de tratamentos com 2^4 , com A e C no nível alto e B e D no nível baixo é denotada por ac.

Os efeitos de interesse no planejamento 2^2 são os efeitos principais A e B e o fator de interação de segunda ordem AB. Sejam as letras a, b e ab os totais de todas as n observações tomadas nesses pontos dos planejamentos, desta forma tornam-se claro a estimativa dos valores, pois para estimar o efeito principal do fator A, devemos fazer a média das observações no lado direito do quadrado conforme demonstrado na Figura 42, estando A no nível alto, e subtrair desse valor a média das observações no lado esquerdo do quadrado, em que A está no nível baixo.

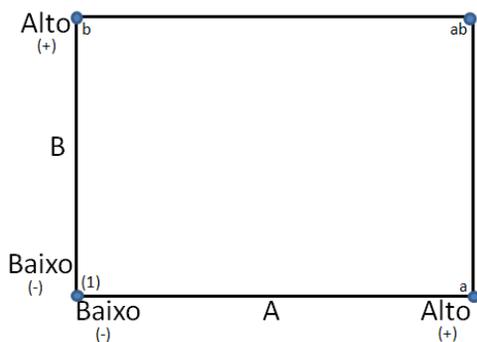


Figura 42. Planejamento fatorial 2^2

— — —

(21)

Similarmente, o efeito principal de B é encontrado fazendo a média das observações no topo do quadrado, estando B no nível alto, e subtraindo a média das observações na parte inferior do quadrado, estando B no nível baixo:

$$\text{---} \quad \text{---} \quad \text{---} \quad (22)$$

Finalmente, a interação AB é estimada tomando a diferença nas médias das diagonais demonstradas na Figura 42 ou:

$$\text{---} \quad \text{---} \quad \text{---} \quad (23)$$

As grandezas entre colchetes nas equações 21, 22 e 23 são chamadas de contrastes, podemos citar como exemplo o contraste de A na equação abaixo:

$$\text{Contraste}_A = a + ab - b - (1) \quad (24)$$

Nestas equações, os coeficientes dos contrastes são sempre +1 ou -1, uma tabela de sinais mais e menos, podendo ser utilizada para determinar o sinal de cada combinação de tratamento para um contraste particular. Os nomes das colunas são os efeitos principais A e B, a interação AB e I, que representa o total. Os nomes das linhas são as combinações dos tratamentos, podemos observar que os sinais na coluna AB são o produto de sinais das colunas A e B, conforme demonstrado na Tabela 5.

Tabela 5. Sinais para os Efeitos no Planejamento 2².

Combinação dos tratamentos	Efeito Fatorial			
	I	A	B	AB
(I)	+	-	-	+
a	+	+	-	-
b	+	-	+	-
ab	+	+	+	+

Os contrastes são usados no cálculo das estimativas dos efeitos e nas somas dos quadrados para A, B e interação AB. As fórmulas das somas dos quadrados são:

$$\text{-----} \tag{25}$$

$$\text{-----} \tag{26}$$

$$\text{-----} \tag{27}$$

A análise de variância é completada pelo cálculo da soma total dos quadrados SQ_T (com 4^{n-1} graus de liberdade), como usual, sendo a soma dos quadrados do erro SQ_E [com $4^{(n-1)}$ graus de liberdade] obtida pela subtração.

2.5.5 Metodologia de superfície de resposta

Segundo Montgomery (2003) a metodologia de superfície de resposta é um conjunto de técnicas estatísticas e matemáticas que são úteis para modelagem e análise nas aplicações em que a resposta de interesse seja influenciada por várias variáveis e o objetivo seja aperfeiçoar essa resposta. Por exemplo, o rendimento (Y) de um processo químico é uma função dos níveis de temperatura (x_1) e concentração de alimentação (x_2). Esta relação pode ser expressa de seguinte forma:

$$Y = f(x_1, x_2) + \varepsilon \tag{28}$$

Em que ε representa o erro observado na resposta Y . Denotando-se $E(Y) = f(x_1, x_2) = \eta$, então a superfície representada por $\eta = f(x_1, x_2)$ é chamada de uma superfície resposta.

Em muitos casos a relação entre a resposta (Y) e as variáveis independentes (X) é desconhecida. Então, uma primeira etapa na metodologia de superfícies de resposta é o ajuste desta relação entre a Y e as variáveis independentes.

Se esta relação apresenta uma função linear entre as variáveis independentes e a resposta, a mesma é denominada de modelo de primeira ordem, e é dada por:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (29)$$

Porém, se o sistema apresenta curvatura, então um polinômio de alto grau deve ser usado, sendo denominada de modelo de segunda ordem, representado por:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (30)$$

3. METODOLOGIA

Os experimentos foram realizados em uma empresa de autopeças americana especializada em fabricar sistemas de direção. Pinhões de sistemas de direção foram empregados como corpos de prova conforme Figura 43. Os pinhões são fabricados em aço SAE 4320-H com dureza no núcleo variando de 295/460 HV2 e uma camada de cementação na superfície de 600 HV2. As especificações das dimensões gerais do acabamento e perfil evolvente do dente estão previstas conforme a norma ISO 1328-1 (1995), ISO 1328-2 (1997) e ISO TR 10064-1 (1992).



Figura 43. Pinhão empregado no sistema de direção (TRW, 2010).

A Figura 44 mostra uma foto do pinhão com a região de engrenamento onde é definido o ponto de ajuste entre pinhão e cremalheira, que corresponde ao ponto de aplicação de carga máxima no dente durante o engrenamento.

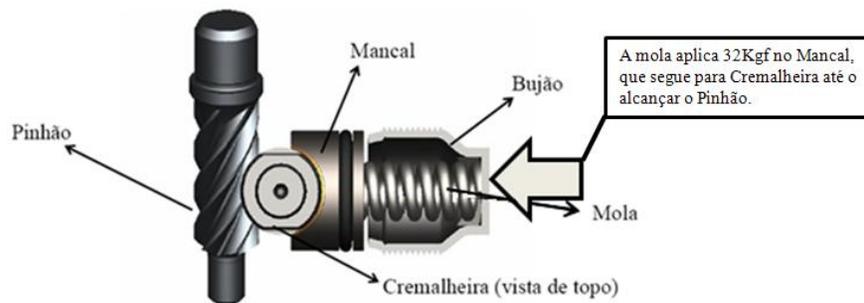


Figura 44. Ponto de aplicação da carga no pinhão (TRW, 2010).

O equipamento empregado no experimento foi um centro de usinagem específico para o processo de “honing” da marca Fässler, modelo HMX-400 conforme demonstrado na Figura 45, este equipamento possui nove graus de liberdade de acordo com a Figura 46. O comando do centro de usinagem é SINUMERIK modelo 840 D.



Figura 45. Equipamento de honer modelo HMX-400 (Fässler, 2008)

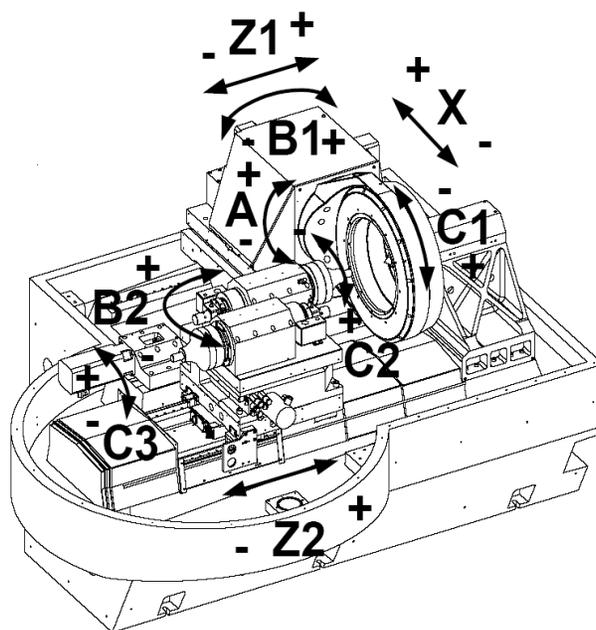


Figura 46. Desenho esquemático dos 9 graus de liberdade (Fässler, 2008).

Abaixo estão descritos as nomenclaturas dos eixos de acordo com os nove graus de liberdade do equipamento:

X = Eixo de avanço;

Z1 = Eixo de oscilação axial;

A = Eixo de ajuste do cruzamento axial;

B1 = Eixo de giro;

Z2 = Eixo linear porta peças;

B2 = Eixo de giro do porta peças;

C1 = Fuso porta rebolo “direct drive”;

C2 = Fuso porta peças 1 “direct drive”;

C3 = Fuso porta peças 2 “direct drive”;

O acabamento foi realizado com um rebolo dentado interno dressável a base epóxi de conforme demonstrado na Figura 47 Para a construção do perfil foi empregado um dressador padrão com a geometria do produto com uma cobertura de diamante demonstrado na Figura 48.



Figura 47. Detalhe do rebolo dentado (Fässler, 2008).

O rebolo utilizado no experimento apresenta uma composição de Óxido de Alumínio (Al_2O_3), Composto sintético (óxido de Alumínio sinterizado) e Carbetto de Silício prensando em um aglutinante a base de resina epóxi. O módulo de elasticidade da liga do rebolo é de 21.000 N.mm^{-2} e a densidade de $2,45 \text{ g.cm}^{-3}$ de acordo com Hermes (2008). Para a realização do processo de “Honing”, inicialmente faz-se o perfilamento do dentado interno

no rebolo de corte, transferindo para o rebolo a geometria do dressador que tem exatamente o perfil evolvente e ângulo de hélice dos dentes do pinhão. Em seguida foi realizado o processo de “Honing” propriamente dito que consiste na transferência da geometria do rebolo para o produto. A dressagem tem sua essência na recomposição da geometria da superfície de usinagem do rebolo para garantir a qualidade no aspecto dimensional e acabamento final do produto.



Figura 48. Dressador para rebolo dentado (Fässler, 2008).

O Equipamento Fässler HMX-400 possui boa flexibilidade para ajustes dos erros provenientes da distorção pós-tratamento térmico dos pinhões em telas parametrizadas de acesso rápido para os ajustes no processo, quando necessária a intervenção do operador da máquina, de acordo com a Figura 49. A modificação desses parâmetros foi amplamente utilizada na execução do planejamento experimental.

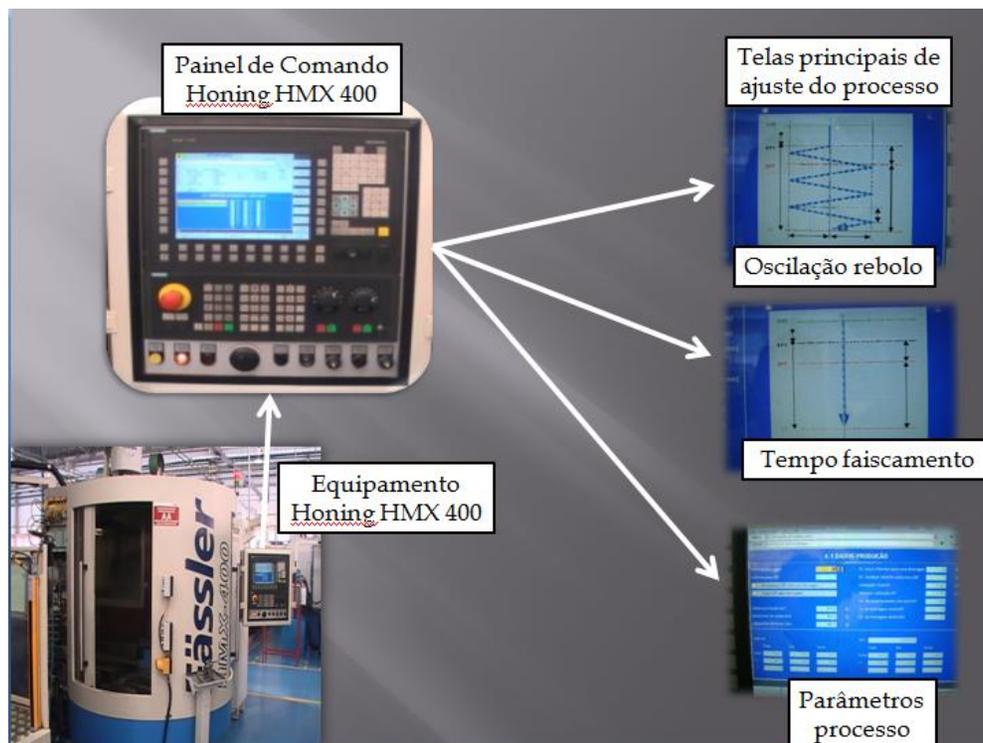


Figura 49. Telas parametrizadas, equipamento HMX-400 (Fässler, 2008).

As Figuras 50 e 51 mostram detalhes do sistema de fixação do rebolo e o cabeçote com fixação por pinça. O pinhão é montado na placa de fixação e apresenta um segundo ponto de apoio posicionado dentro do cabeçote de usinagem. O eixo z se desloca no sentido axial da máquina, exatamente na dimensão do comprimento do pinhão que deve ser usinado. O detalhe “A” da Figura 51 demonstra o perfil do rebolo.

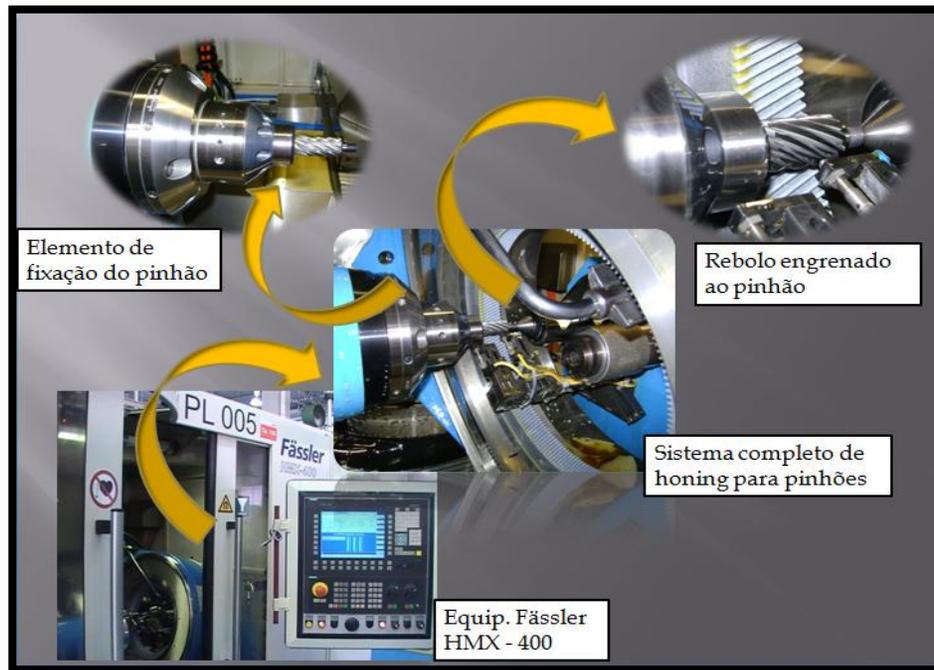


Figura 50. Detalhe do cabeçote de usinagem, HMX-400 (Fässler, 2008).

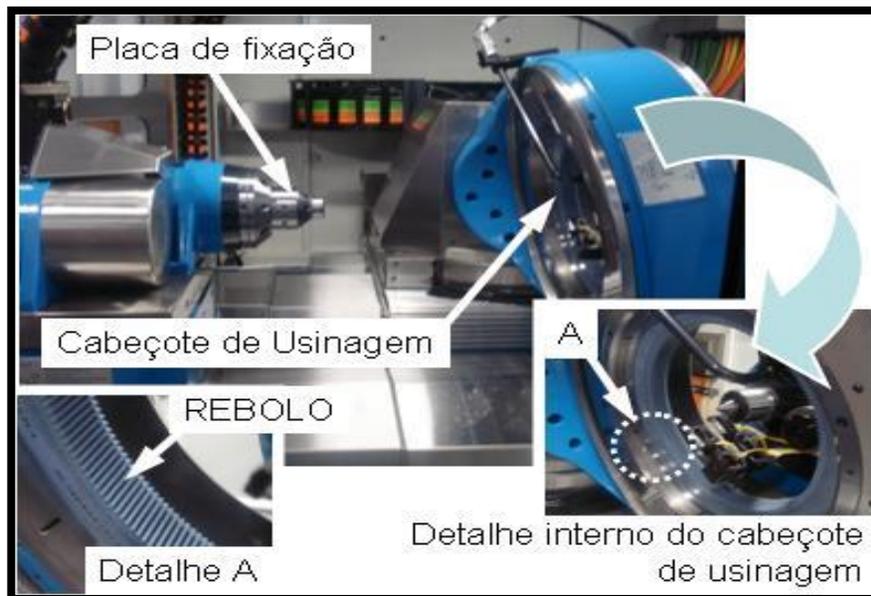


Figura 51. Detalhe do cabeçote de usinagem, HMX-400 (Fässler, 2008).

O objetivo dos experimentos era encontrar os parâmetros de ótimo no processo de “Honing” dos pinhões, atingindo a maior qualidade com o menor tempo de fabricação, o

critério de aceitação utilizado foi a medição do perfil e ângulo de hélice gerado pelo processo de “Honing” e compará-lo com as especificações de desenho do produto, tendo como principais características de medições os desvios do perfil transversal e os erros de hélice. Todos estes parâmetros estão de acordo com a DIN 3962 (1978). A Figura 52 mostra o diagrama do teste e a representação dos desvios transversais do perfil do dente. A Figura 53 mostra o diagrama com a região onde é medido o erro de hélice.

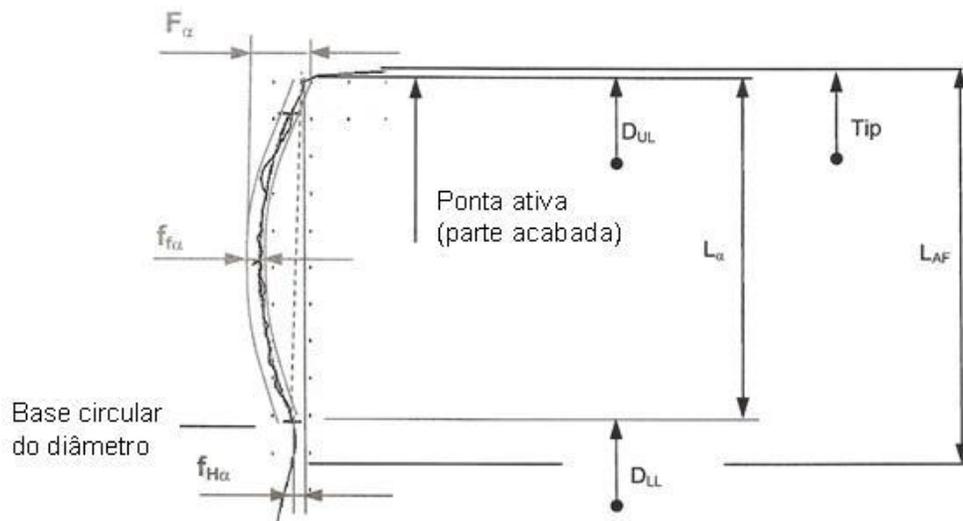


Figura 52. Perfil transversal. (Silva et al., 2009)

Em que:

- L_{AF} : Faixa de medição do perfil transversal (evolvente);
- L_{α} : Faixa de análise do perfil transversal entre D_{UL} e D_{LL} ;
- D_{LL} : Análise inicial do diâmetro;
- D_{UL} : Análise do diâmetro final;
- F_{α} : Desvio total do perfil do dente;
- $f_{H\alpha}$: Desvio da inclinação do dente;
- $f_{f\alpha}$: Desvio da forma do dente.

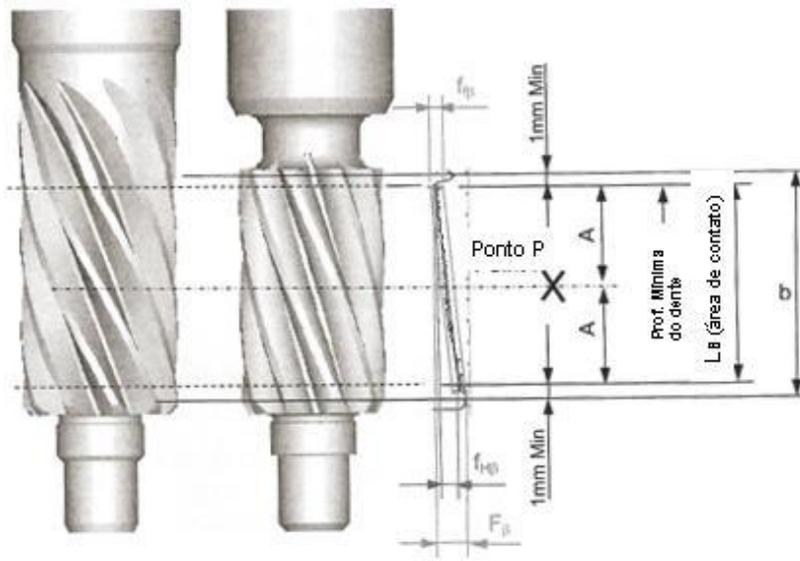


Figura 53. Diagrama da representação do erro de hélice. (Silva et al., 2009).

Em que:

L_{β} : Faixa de teste da linha do dente;

B: Largura da face;

F_{β} : Desvio total da hélice;

$f_{H\beta}$: Desvio da inclinação da hélice;

$f_{F\beta}$: Desvio da forma da hélice.

As medições dos desvios do perfil transversal e os erros de hélice dos dentes do pinhão foram executadas em uma medidora especial de engrenagens do fabricante “Strjirny Celákovice” da República Tcheca de nome “Gear Spect” modelo DO 3 PC, conforme demonstrado na Figura 54.

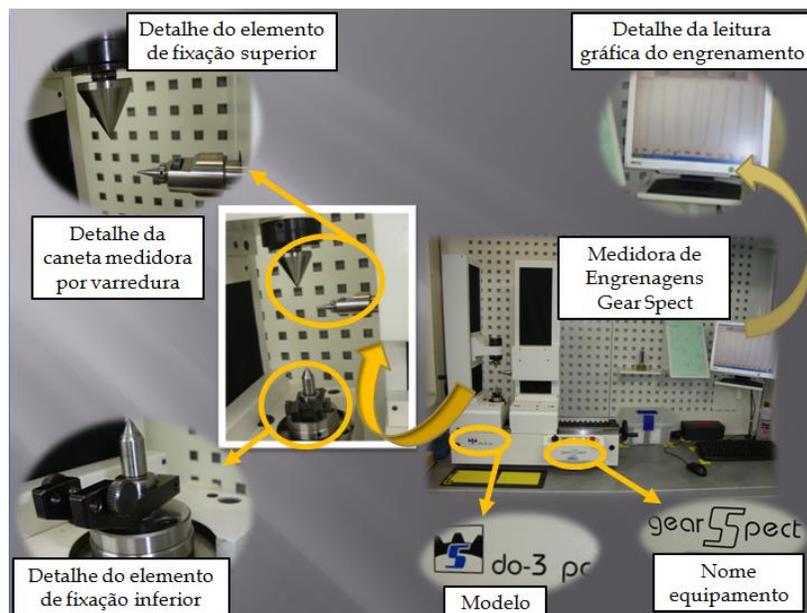


Figura 54. Equipamento de medir dentes de engrenagens (Strjirny Celákovice, 2007)

A técnica estatística utilizada para encontrarmos melhores parâmetros no processo de “honing” dos pinhões de direção foi superfície de resposta, visto o seu potencial de identificar pequenas variações de processo que são relevantes, o software utilizado no desenvolvimento do experimento foi o Minitab versão15 (Minitab®, 2008). Após a realização do planejamento experimental foi realizado análise de regressão linear entre os parâmetros de processo tempo de ciclo e velocidade de corte. A Tabela 6 mostra os parâmetros analisados durante os experimentos com seus níveis de variação.

Tabela 6. Fatores adotados no planejamento experimental

Fatores	Parâmetros de processo		
	Mínimo	Máximo	Unidade
Rotação da Peça	4000	6000	rpm
Tempo de oscilação	0	30	segundos
Avanço por passe no eixo “x”	0,001	0,006	micrometros
Avanço por passe no eixo “z”	100	600	micrometros / min.
Tempo de Centelhamento	0	5	segundos

Para comprovação dos testes foram realizadas 54 experimentos com três repetições, após serem definidos os parâmetros ótimos de processo o ponto ideal foi repetido para mais 30 amostras onde verificou-se sua distribuição dentro de uma curva normal. Finalizando o experimento, analisamos a aplicação final da qualidade do engrenamento no teste de funcionabilidade do mecanismo de direção. A tabela 7 apresenta o planejamento experimental com todos os parâmetros de entrada que foram relacionados no experimento. Os elementos dimensionais considerados como avaliação para o melhor engrenamento pinhão/cremalheira, e que foram empregados como variáveis de saída e de análise do processo são:

Evolvente:

F_{α} : Desvio total do perfil do dente;

$f_{H\alpha}$: Desvio da inclinação do dente;

$f_{f\alpha}$: Desvio da forma do dente.

Ângulo de hélice:

F_{β} : Desvio total da hélice;

$f_{H\beta}$: Desvio da inclinação da hélice;

$f_{f\beta}$: Desvio da forma da hélice.

Tabela 7. Planejamento experimental com dados de entrada (Minitab®, 2008).

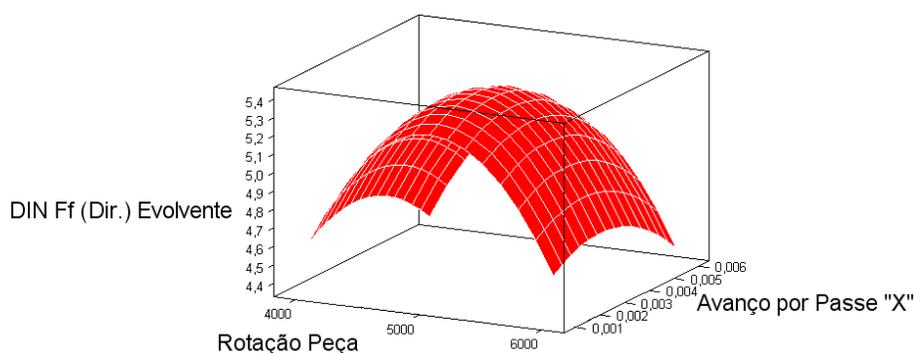
Ordem Padrão	Ordem Seguida	Blocos	Rotação Peça	Tempo de Oscilação	Avanço / passe "X"	Avanço / passe "Z"	Tempo de Centelhamento
-	-	-	[RPM]	[s]	[mm/min]	[mm/min]	[s]
1	1	1	4000	0	0,001	100	0
2	2	1	6000	30	0,001	100	0
3	3	1	6000	0	0,006	100	0
4	4	1	4000	30	0,006	100	0
5	5	1	6000	0	0,001	600	0
6	6	1	4000	30	0,001	600	0
7	7	1	4000	0	0,006	600	0
8	8	1	6000	30	0,006	600	0
9	9	1	6000	0	0,001	100	5
10	10	1	4000	30	0,001	100	5
11	11	1	4000	0	0,006	100	5
12	12	1	6000	30	0,006	100	5
13	13	1	4000	0	0,001	600	5
14	14	1	6000	30	0,001	600	5
15	15	1	6000	0	0,006	600	5
16	16	1	4000	30	0,006	600	5
17	17	1	5000	15	0,0035	350	2,5
18	18	1	5000	15	0,0035	350	2,5
19	19	1	5000	15	0,0035	350	2,5
20	20	1	5000	15	0,0035	350	2,5
21	21	2	6000	0	0,001	100	0
22	22	2	4000	30	0,001	100	0
23	23	2	4000	0	0,006	100	0
24	24	2	6000	30	0,006	100	0
25	25	2	4000	0	0,001	600	0
26	26	2	6000	30	0,001	600	0
27	27	2	6000	0	0,006	600	0
28	28	2	4000	30	0,006	600	0
29	29	2	4000	0	0,001	100	5
30	30	2	6000	30	0,001	100	5
31	31	2	6000	0	0,006	100	5
32	32	2	4000	30	0,006	100	5
33	33	2	6000	0	0,001	600	5
34	34	2	4000	30	0,001	600	5
35	35	2	4000	0	0,006	600	5

36	36	2	6000	30	0,006	600	5
37	37	2	5000	15	0,0035	350	2,5
38	38	2	5000	15	0,0035	350	2,5
39	39	2	5000	15	0,0035	350	2,5
40	40	2	5000	15	0,0035	350	2,5
41	41	3	4000	15	0,0035	350	2,5
42	42	3	6000	15	0,0035	350	2,5
43	43	3	5000	0	0,0035	350	2,5
44	44	3	5000	30	0,0035	350	2,5
45	45	3	5000	15	0,001	350	2,5
46	46	3	5000	15	0,006	350	2,5
47	47	3	5000	15	0,0035	100	2,5
48	48	3	5000	15	0,0035	600	2,5
49	49	3	5000	15	0,0035	350	0
50	50	3	5000	15	0,0035	350	5
51	51	3	5000	15	0,0035	350	2,5
52	52	3	5000	15	0,0035	350	2,5
53	53	3	5000	15	0,0035	350	2,5
54	54	3	5000	15	0,0035	350	2,5

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A Figura 55 demonstra as relações criadas entre os parâmetros de processo e a qualidade de engrenamento através da técnica estatística de superfície de resposta. Os gráficos compreendem curvas no espaço com variações em função dos parâmetros de entrada nos eixos X, Y e Z e pontos sobre a superfície, mínimos ou máximos, que variam de acordo com os parâmetros de saída. Os comportamentos das curvas do flanco direito e esquerdo são similares, desta forma, podemos interpretar os dados de saída abaixo como flanco direito e flanco esquerdo de cada pinhão analisado.

Planejamento Experimental - Superfície de Resposta - Processo Honing



Hold values: Tempo de: 15,0 Avanço e: 350,0 Tempo de: 2,5

Figura 55. Divergência de perfil total, evolvente (Minitab®, 2008)

O gráfico de superfície de resposta da Figura 55 demonstra a divergência de perfil total da evolvente. Foram plotadas as variáveis de entrada avanço por passe no eixo "x" (balanço radial do rebolo) e rotação da peça em função do perfil total da evolvente. Conforme pode ser observado os parâmetros de ótimo estão concentrados com os melhores resultados em 6000 rpm de rotação da peça e 0,001 mm/min, de avanços no eixo "x", tendo como resultado a qualidade de engrenamento classificada em DIN 4. Essa qualidade

representa uma diminuição na divergência de perfil da evolvente em 5 DIN comparando com a especificação do produto que requer DIN 9.

Essa diminuição na qualidade DIN 9 para DIN 4 demonstra que comparando os dois parâmetros analisados o uso de altas rotações gera proporcionalmente altas velocidades de corte favorecendo o recalque de material e gerando uma melhoria na formação do perfil total do pinhão. Paralelo a essa condição, temos um baixo valor de avanço que permite fortalecer a teoria proposta por Marinescu et al. (2007) em relação ao efeito do engajamento dos grãos abrasivos conforme pode ser observado na Figura 56. Assim, os grãos abrasivos posicionados em seqüência como ocorrem na grande maioria dos processos abrasivos, permitem também uma correção mais fina da forma gerada quando se tem baixos valores de avanço. O processo apresentou para o perfil total da evolvente o mesmo comportamento para o perfil do dente no lado esquerdo reduzindo a categoria de DIN 9 para DIN 4.

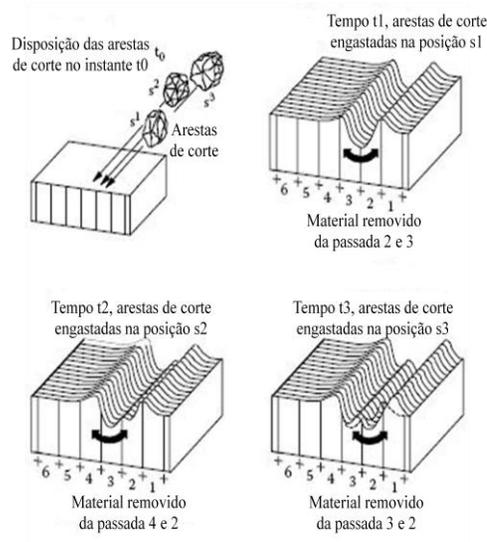
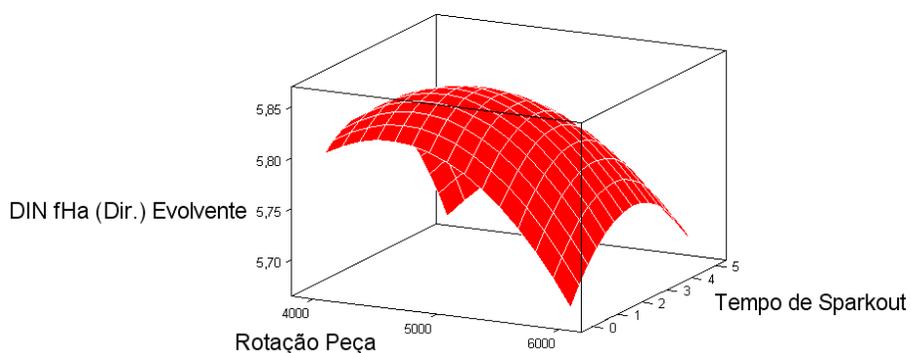


Figura 56. Modelo plano de engajamento para arestas de corte sucessivas (Marinescu et al., 2007)

Planejamento Experimental - Superfície de Resposta - Processo Honing



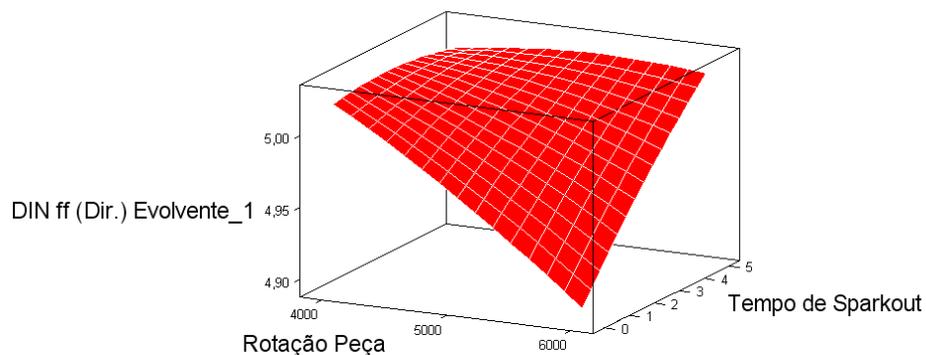
Hold values: Tempo de: 15,0 Avanço p: 0,0035 Avanço e: 350,0

Figura 57. Divergência de perfil de ângulo, evolvente (Minitab®, 2008)

O gráfico de superfície de resposta da Figura 57 demonstra a divergência de perfil de ângulo da evolvente. Foram plotadas as variáveis de entrada sendo o tempo de centelhamento e rotação da peça em função do perfil de ângulo da evolvente. Conforme pode ser observado os parâmetros de ótimo estão concentrados com os melhores resultados em 6000 rpm para rotação da peça e 0 segundos tempo centelhamento, tendo como resultado a qualidade de engrenamento classificada em DIN 5. Da mesma, forma essa qualidade representa uma diminuição na divergência de perfil de ângulo da evolvente em 4 DIN comparando com a especificação do produto que requer DIN 9.

Esta diminuição se mantém em relação ao emprego de altas rotações e conseqüentemente altas velocidades de corte. Considerando o centelhamento do processo, segundo Marinescu (2007) e Malkin (2009), valores pequenos de tempo de centelhamento representam menos “queima” da peça e conseqüentemente o recalçamento do material em uma condição menos agressiva, pois a queima pode provocar alterações microestruturais que modificam a dureza superficial da peça. O rebolo usado para o processo de “Honing” é resinóide, portanto, segundo os autores melhorias de perfil em peças retificadas com tempo de centelhamento maiores são obtidas somente para rebolos vitrificados.

Planejamento Experimental - Superfície de Resposta - Processo Honing



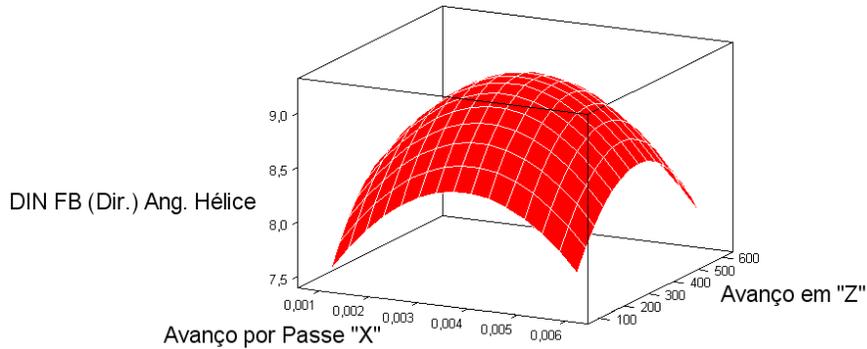
Hold values: Tempo de: 15,0 Avanço p: 0,0035 Avanço e: 350,0

Figura 58. Divergência de perfil de forma, evolvente (Minitab®, 2008)

O gráfico de superfície de resposta da Figura 58 demonstra a divergência de perfil de forma da evolvente. Foram plotadas as variáveis de entrada sendo o tempo de centelhamento (faiscamento da peça durante o processo de “honing”) e rotação da peça em função do perfil de forma da evolvente. Conforme pode ser observado os parâmetros de ótimo estão concentrados com os melhores resultados em 6000 rpm para rotação da peça e 0 segundos tempo centelhamento, tendo como resultado a qualidade de engrenamento classificada em DIN 4. Essa qualidade representa uma diminuição na divergência de perfil de forma da evolvente em 5 DIN comparando com a especificação do produto que requer DIN 9.

Da mesma forma que ocorreu no gráfico anterior, temos o ponto de ótimo para a divergência de perfil de forma da evolvente que ficou concentrado no mesmo ponto (6000 rpm e centelhamento 0 segundos). A grande diferença que se pode observar entre os gráficos das Figuras 57 e 58 estão relacionadas com sua forma tendo um valor mais ajustado devido à grande curvatura do gráfico de acordo com Montgomery (1997), Ganguli (2002) e Box e Draper (1987). Para a Figura 58 temos uma grande região plana demonstrando que existe um ajuste muito pequeno e impreciso para essa região. Assim, a medida que se aproxima do ponto de ótimo observamos uma tendência de grande curvatura no gráfico confirmando o ponto de ótimo para os valores de 6000 rpm com tempo de centelhamento de 0 segundos.

Planejamento Experimental - Superfície de Resposta - Processo Honing



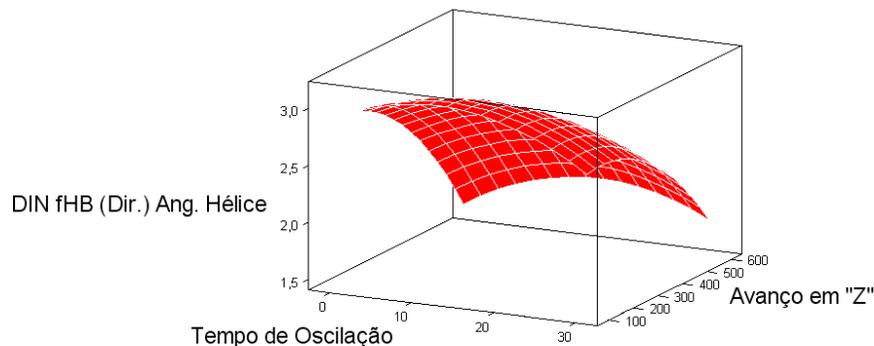
Hold values: Rotação: 5000,0 Tempo de: 15,0 Tempo de: 2,5

Figura 59. Divergência de perfil total, evolvente (Minitab®, 2008)

O gráfico de superfície de resposta da Figura 59 demonstra a divergência de ângulo de hélice total. Foram plotadas as variáveis de entrada sendo o avanço em "z" (mergulho do rebolo na peça) e avanço por passe no eixo "x" (balanço radial do rebolo) em função do ângulo de hélice total. Conforme pode ser observado os parâmetros de ótimo estão concentrados com os melhores resultados em 0,001 mm/min para avanço no eixo "x" e 100 mm/min para avanço no eixo "z", tendo como resultado a qualidade de engrenamento classificada em DIN 7. Essa qualidade representa uma diminuição na divergência de ângulo de hélice total em 2 DIN comparando com a especificação do produto que requer DIN 9.

Nota-se no gráfico da Figura 59 que os melhores pontos são obtidos com os menores valores de avanço nos dois eixos. Dessa forma, o uso de valores de avanço pequenos tanto no sentido do mergulho radial do rebolo como no sentido do avanço da peça no eixo "x" proporciona uma correção mais fina da divergência de ângulo de hélice total. Isso confirma as informações obtidas no gráfico da Figura 55 onde menores avanços também proporcionaram correções mais precisas para a divergência de perfil total. A curvatura da Figura 59 mostra que os pontos de ótimo estão bem definidos considerando que o formato da curva apresenta uma tendência clara para os pontos de mínimo

Planejamento Experimental - Superfície de Resposta - Processo Honing



Hold values: Rotação: 5000,0 Avanço p: 0,0035 Tempo de: 2,5

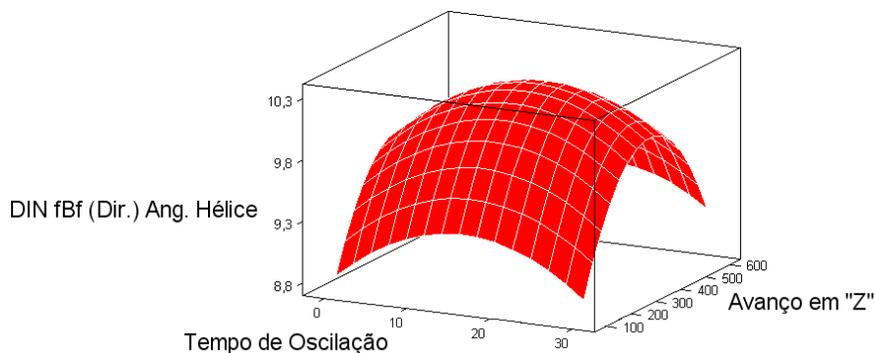
Figura 60. Divergência de ângulo de hélice (Minitab®, 2008)

O gráfico de superfície de resposta da Figura 60 demonstra a divergência de ângulo de hélice. Foram plotadas as variáveis de entrada sendo o avanço em "z" (mergulho do rebole na peça) e o tempo de oscilação (tempo em que o rebole reproduz movimento de zig-zag no perfil do dente do pinhão) em função do ângulo de hélice. Conforme pode ser observado os parâmetros de ótimo estão concentrados com os melhores resultados em 0 segundo para tempo de oscilação e 600 mm/min para avanço no eixo "z", tendo como resultado a qualidade de engrenamento classificada em DIN 1. Essa qualidade representa uma diminuição da divergência de ângulo de hélice em 8 DIN comparando com a especificação do produto que requer DIN 9.

Nesse gráfico ocorre uma tendência a diminuição da qualidade DIN no ponto de maior velocidade de avanço. Entretanto, nota-se que a diferença básica nesses dois experimentos foi a oscilação da peça no movimento "zig-zag", esse efeito induz um movimento de corte em múltiplos sentidos equivalente a passagem da peça repetidas vezes pelo mesmo ponto de contato ou em pontos muito próximos em uma escala micrométrica, gerando assim uma correção mais fina, mesmo quando foi aplicada a maior velocidade de avanço. Com

velocidades menores, pode-se considerar que o efeito de engajamento torna-se nulo ou insignificante no processo de “Honing”

Planejamento Experimental - Superfície de Resposta - Processo Honing



Hold values: Rotação: 5000,0 Avanço p: 0,0035 Tempo de: 2,5

Figura 61. Divergência angular de forma da hélice (Minitab®, 2008)

O gráfico de superfície de resposta da Figura 61 demonstra a divergência angular de forma da hélice. Foram plotadas as variáveis de entrada sendo o avanço em “z” (mergulho do reboło na peça) e o tempo de oscilação (tempo em que o reboło reproduz movimento de zig-zag no perfil do dente do pinhão) em função da forma angular da hélice. Conforme pode ser observado os parâmetros de ótimo estão concentrados com os melhores resultados em 0 segundo para tempo de oscilação e 100 mm/min para avanço no eixo “z”, tendo como resultado a qualidade de engrenamento classificada em DIN 8. Essa qualidade representa uma diminuição da divergência angular de forma da hélice em 1 DIN comparando com a especificação do produto que requer DIN 9.

Para a correção da forma da hélice ocorreu o ponto de ótimo em uma velocidade menor ao contrário da correção de divergência do ângulo de hélice. Apesar de visualmente os pontos de 0 segundo e 30 segundos apresentarem-se próximos, conforme pode ser observado no gráfico da Figura 61, o ponto de ótimo definido é exatamente o tempo de 0 segundo. Considerando a redução da qualidade DIN na forma da hélice para DIN 8,

diminuindo exatamente um ponto e que o gráfico tem um comportamento bem definido devido ao seu formato bem curvo, pode-se avaliar que na divergência de ângulo de hélice total outro ponto de ótimo poderia ser melhor definido em função da tendência que se observa na curva da Figura 60 de minimizar em um ponto além dos intervalo de valores pré-estabelecido.

A Figura 62 demonstra a interação existente entre a velocidade de corte e o tempo de ciclo observado no experimento, a relação entre ambas está diretamente ligada aos parâmetros de processo adotados que são: rotação da peça, tempo de oscilação, avanço por passe no eixo “x”, avanço por passe no eixo “z” e tempo de centelhamento.

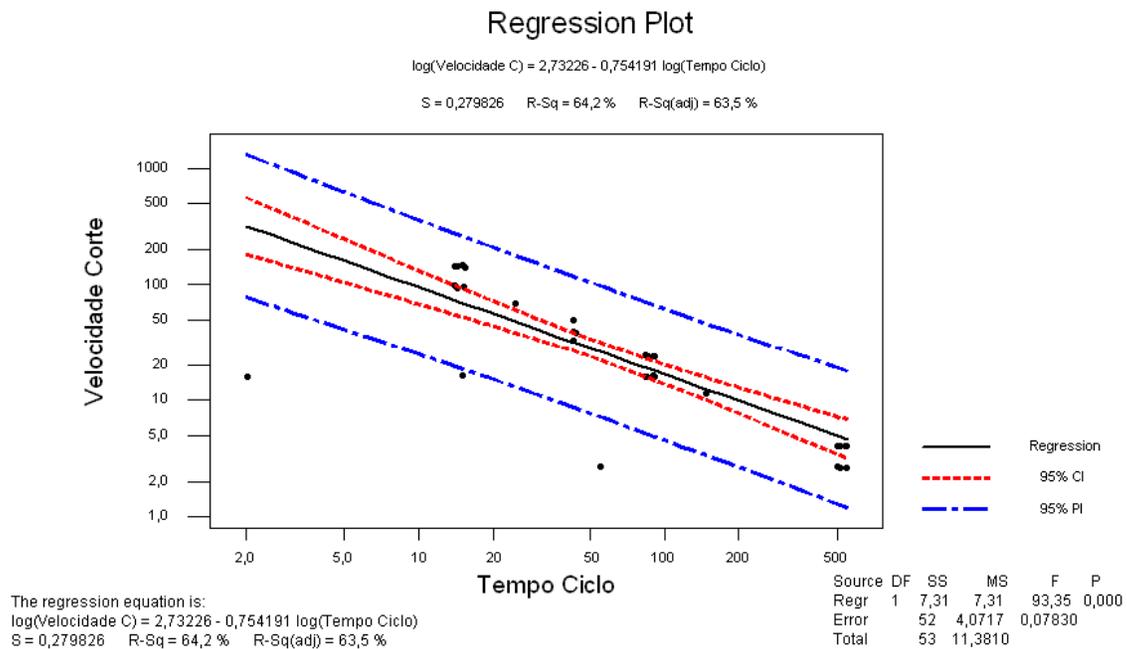


Figura 62. Regressão linear entre o tempo de ciclo e a velocidade de corte (Minitab®, 2008)

Com base no planejamento experimental realizado e a análise de superfície de resposta, podemos determinar o ponto de ótimo no processo de “honing” para o pinhão objeto deste estudo, como sendo o experimento realizado número 05, ao qual foi adotado os parâmetros de processo de rotação da peça em 6000 rpm, tempo de oscilação 0 segundos,

avanço por passe em “x” com 0,001mm, avanço em “z” em 600 mm/min. e tempo de centelhamento em 0 segundos. Embora todas os outros 53 experimentos apresentaram sob a óptica da qualidade, resultados satisfatórios, o experimento 05 apresentou a seguinte qualidade de engrenamento:

Para envolvente as reduções foram:

- Ff (Desvio total do perfil do dente) DIN 6;
- fHa (Desvio da inclinação do dente) DIN 5;
- ff (Desvio da forma do dente) DIN 4;

E para ângulo de hélice as reduções ficaram da seguinte forma:

- FB (Desvio total da hélice) DIN 7;
- fHB (Desvio da inclinação da hélice) DIN 3;
- fBf (Desvio da forma da hélice) DIN 6;

Para comprovar a distribuição normal, nos parâmetros de processo do experimento 05, realizamos um segundo experimento, repetindo os parâmetros de processo descritos acima, em 30 novas amostras, conforme demonstrados nas Figuras 63 a 68. Segundo Slack et al. (1996) a capacidade do processo é a medida da aceitabilidade da variação do processo, é dada pela razão entre a faixa de especificação e a variação natural do processo, isto é em 3 desvios-padrão acima e 3 desvios padrão abaixo da média.

Davis, Aquilano e Chase (2001) ressaltam que o coeficiente de capacidade de processo “Cp” não indica especificamente quão bem está o desempenho do processo. É preciso calcular o índice de capacidade “Cpk”, para determinar se a média do processo está próxima ao limite de especificação superior ou inferior. Quando o Cpk é igual ao Cp, então a média do processo está centrada entre os dois limites de especificação. Caso contrário, a média do processo se aproximará ao limite de especificação correspondente ao menor valor resultante do cálculo dos dois coeficientes Cpk.

Uma distribuição com $C_p \geq 1,33$ (C_p = coeficiente de capacidade de processo) é considerada indicativa de que o processo é “capaz” e quando o $C_p < 1,00$ indica que o

processo é “não-capaz”. A simples medida de Cp pressupõe que a média da variação do processo está no ponto médio da faixa de especificação, razão pela qual se torna necessário avaliar o índice Cpk para compreender a capacidade do processo levando em consideração a média das amostras versus a média dos limites de controle relacionados ao produto (SLACK et al., 1996).

O índice de capacidade permite a comparação da faixa característica do processo com as especificações, portanto através da análise dos índices de Cp e Cpk podemos saber se o processo é capaz de atender a especificação do produto com os parâmetros de processo adotados no experimento 05. As Figuras 63 à 68 mostram os índices de Cp e Cpk para as características F_f , fHa , ff , FB , fHB e fBf dimensionadas no 2º experimento.

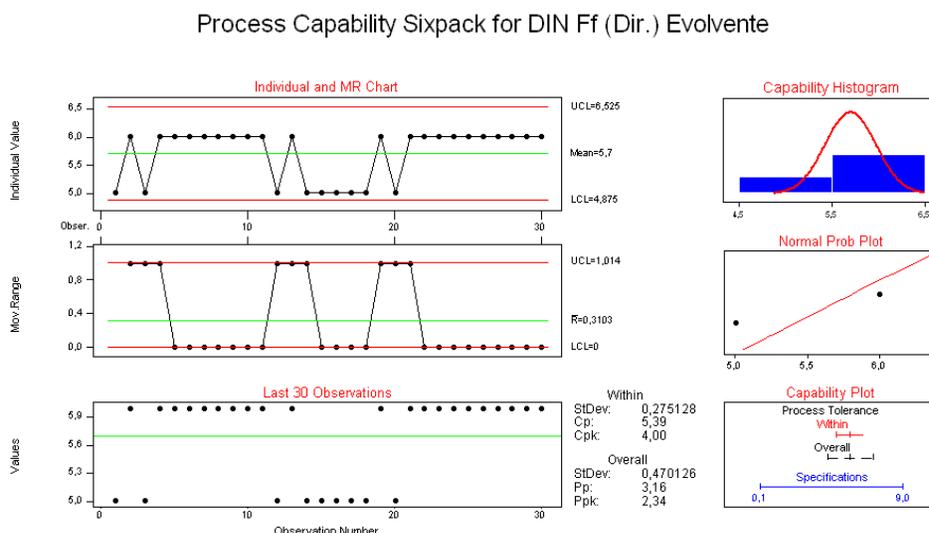


Figura 63. Gráfico de normalidade para divergência de perfil total, evolvente (Minitab®, 2008)

O gráfico “Capability Plot”, da Figura 63, permite observar os índices de CP 5,39 e CPK 4,00, capacidade de reproduzir a mesma dimensão e centralização da dimensão encontrada em relação ao campo de tolerância, respectivamente, acima do valor mínimo aceitável de 1,33 para esta característica, baseado na especificação de produto de máximo DIN 9. O gráfico “Normal Prob Plot”, da Figura 63, demonstra os limites estabelecidos em

DIN 5 e DIN 6, a linha transversal indica a probabilidade normal de distribuição das amostras ao longo de sua evolução. O gráfico “Capability Histogram”, da Figura 63, demonstra a distribuição das amostras ao longo da qualidade encontrada na forma de DIN, podemos observar a curva de Gauss nas amostras dimensionadas dentro do limite de aproximadamente 4 a 6 DIN.

O gráfico “Value”, da Figura 63, são demonstrados os índices de qualidade DIN e estão entre 5 e 6 DIN. O gráfico individual “Mov Range”, da Figura 63, indica a diferença entre os pontos de medição a cada nova observação. O gráfico individual “Individual Value”, da Figura 63, indica efetivamente, em cada ponto a qualidade DIN encontrada na amostra dimensionada, podemos observar os limites superior e inferior estabelecidos com 3 desvios padrões acima e abaixo da linha média e os valores registrados neste gráfico estão na média em DIN 6.

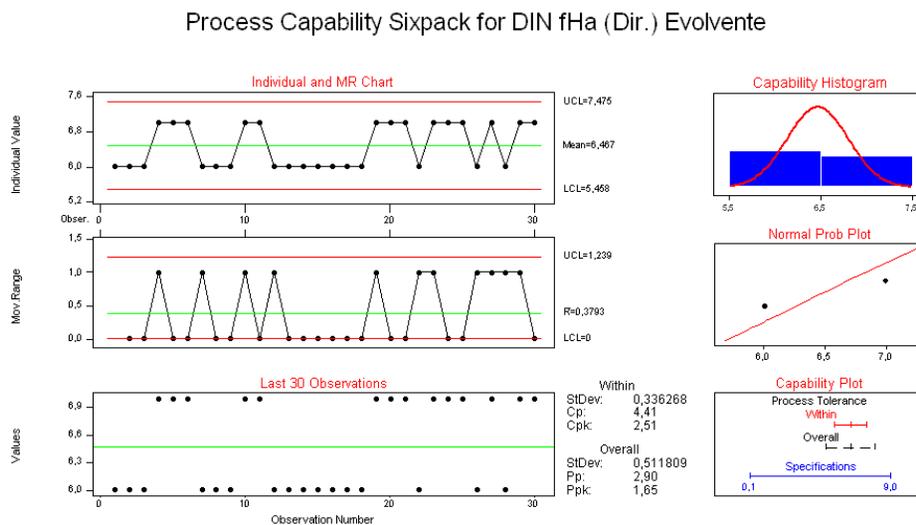


Figura 64. Gráfico de normalidade para divergência do perfil da hélice, evolvente (Minitab®, 2008)

O gráfico “Capability Plot”, da Figura 64, podemos observar os índices de CP 4,41 e CPK 2,51, capacidade de reproduzir a mesma dimensão e centralização da dimensão encontrada em relação ao campo de tolerância, respectivamente, acima do valor mínimo aceitável de 1,33 para esta característica, baseado na especificação de produto de máximo

DIN 9. O gráfico “Normal Prob Plot”, da Figura 64, temos os limites estabelecidos em DIN 6 e DIN 7, a linha transversal indica a probabilidade normal de distribuição das amostras ao longo de sua evolução.

O gráfico “Capability Histogram”, da Figura 64, demonstra a distribuição das amostras ao longo da qualidade encontrada na forma de DIN, podemos observar a curva de Gauss nas amostras dimensionadas dentro do limite de aproximadamente 5 a 7 DIN. O gráfico “Value”, da Figura 64, são demonstrados que os índices de qualidade DIN e estão entre 6 e 7 DIN. O gráfico individual “Mov Range”, da Figura 64, indica a diferença entre os pontos de medição a cada nova observação.

O gráfico individual “Individual Value”, da Figura 64, indica efetivamente, em cada ponto a qualidade DIN encontrada na amostra dimensionada, podemos observar os limites superior e inferior estabelecidos com 3 desvios padrões acima e abaixo da linha média e os valores registrados neste gráfico estão na média em DIN 6.

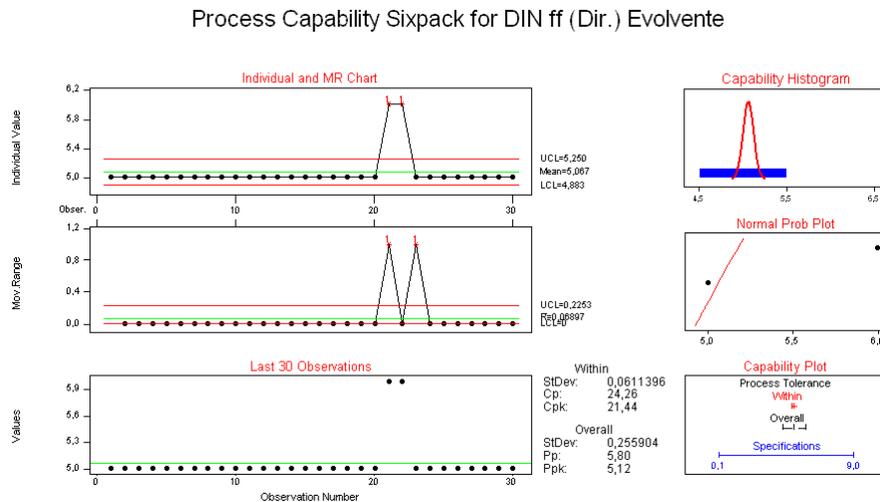


Figura 65. Gráfico de normalidade para divergência do perfil de forma evolvente (Minitab®, 2008)

O gráfico “Capability Plot”, da Figura 65, podemos observar os índices de CP 24,26 e CPK 21,44, capacidade de reproduzir a mesma dimensão e centralização da dimensão encontrada em relação ao campo de tolerância, respectivamente, acima do valor mínimo

aceitável de 1,33 para esta característica, baseado na especificação de produto de máximo DIN 9.

O gráfico “Normal Prob Plot”, da Figura 65, temos os limites estabelecidos em DIN 5 e DIN 6, a linha transversal indica a probabilidade normal de distribuição das amostras ao longo de sua evolução. O gráfico “Capability Histogram”, da Figura 65, demonstra a distribuição das amostras ao longo da qualidade encontrada na forma de DIN, podemos observar a curva de Gauss nas amostras dimensionadas dentro do limite de aproximadamente 4 a 5 DIN. O gráfico “Value”, da Figura 65, são demonstrados que os índices de qualidade DIN e estão entre 5 e 6 DIN.

O gráfico individual “Mov Range”, da Figura 65, indica a diferença entre os pontos de medição a cada nova observação. O gráfico individual “Individual Value”, da Figura 65, indica efetivamente, em cada ponto a qualidade DIN encontrada na amostra dimensionada, podemos observar os limites superior e inferior estabelecidos com 3 desvios padrões acima e abaixo da linha média e os valores registrados neste gráfico estão na média em DIN 5.

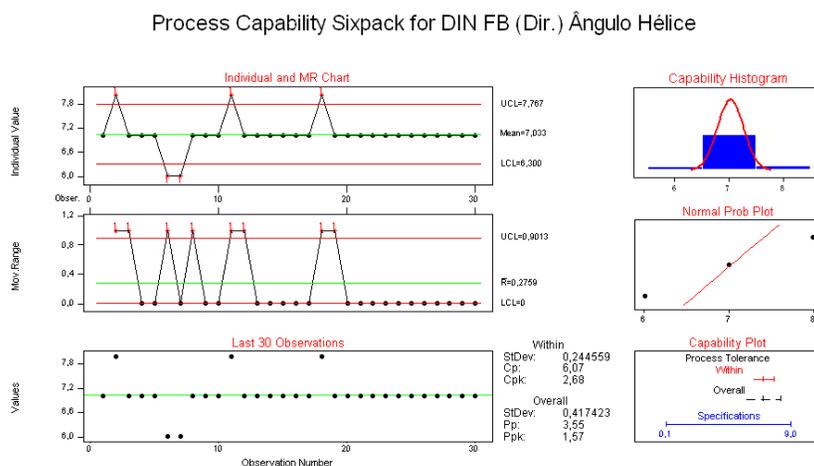


Figura 66. Gráfico de normalidade para divergência de ângulo de hélice total (Minitab®, 2008)

O gráfico “Capability Plot”, da Figura 66, podemos observar os índices de CP 6,07 e CPK 2,68, capacidade de reproduzir a mesma dimensão e centralização da dimensão encontrada em relação ao campo de tolerância, respectivamente, acima do valor mínimo

aceitável de 1,33 para esta característica, baseado na especificação de produto de máximo DIN 9.

O gráfico “Normal Prob Plot”, da Figura 66, temos os limites estabelecidos em DIN 6 e DIN 8, a linha transversal indica a probabilidade normal de distribuição das amostras ao longo de sua evolução. O gráfico “Capability Histogram”, da Figura 66, demonstra a distribuição das amostras ao longo da qualidade encontrada na forma de DIN, podemos observar a curva de Gauss nas amostras dimensionadas dentro do limite de aproximadamente 6 a 8 DIN.

O gráfico “Value”, da Figura 66, são demonstrados que os índices de qualidade DIN e estão entre 6 e 8 DIN. O gráfico individual “Mov Range”, da Figura 66, indica a diferença entre os pontos de medição a cada nova observação. O gráfico individual “Individual Value”, da Figura 66, indica efetivamente, em cada ponto a qualidade DIN encontrada na amostra dimensionada, podemos observar os limites superior e inferior estabelecidos com 3 desvios padrões acima e abaixo da linha média e os valores registrados neste gráfico estão na média em DIN 7.

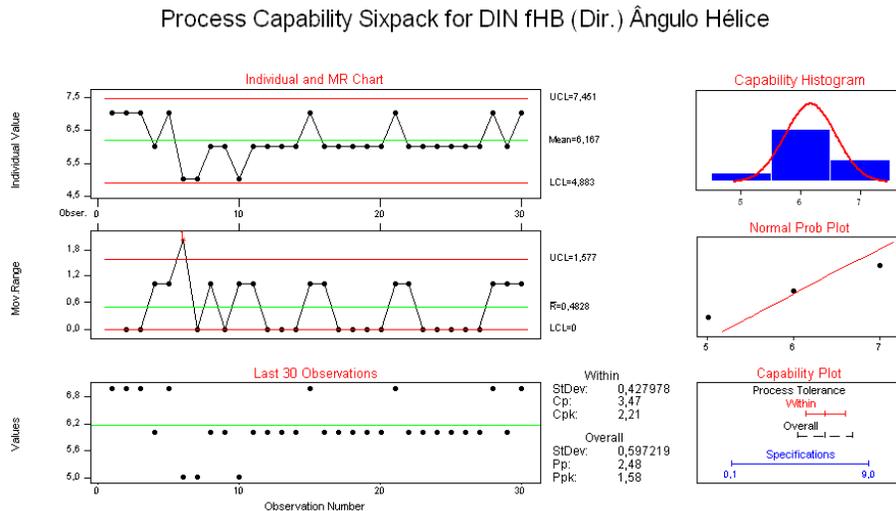


Figura 67. Gráfico de normalidade para divergência de ângulo de hélice (Minitab®, 2008)

O gráfico “Capability Plot”, da Figura 67 podemos observar os índices de CP 3,47 e CPK 2,21, capacidade de reproduzir a mesma dimensão e centralização da dimensão

encontrada em relação ao campo de tolerância, respectivamente, acima do valor mínimo aceitável de 1,33 para esta característica, baseado na especificação de produto de máximo DIN 9.

O gráfico “Normal Prob Plot”, da Figura 67, temos os limites estabelecidos em DIN 5 e DIN 7, a linha transversal indica a probabilidade normal de distribuição das amostras ao longo de sua evolução. O gráfico “Capability Histogram”, da Figura 67, demonstra a distribuição das amostras ao longo da qualidade encontrada na forma de DIN, podemos observar a curva de Gauss nas amostras dimensionadas dentro do limite de aproximadamente 5 a 7 DIN.

O gráfico “Value”, da Figura 67, são demonstrados que os índices de qualidade DIN e estão entre 5 e 7 DIN. O gráfico individual “Mov Range”, da Figura 67, indica a diferença entre os pontos de medição a cada nova observação. O gráfico individual “Individual Value”, da Figura 67, indica efetivamente, em cada ponto a qualidade DIN encontrada na amostra dimensionada, podemos observar os limites superior e inferior estabelecidos com 3 desvios padrões acima e abaixo da linha média e os valores registrados neste gráfico estão na média em DIN 6.

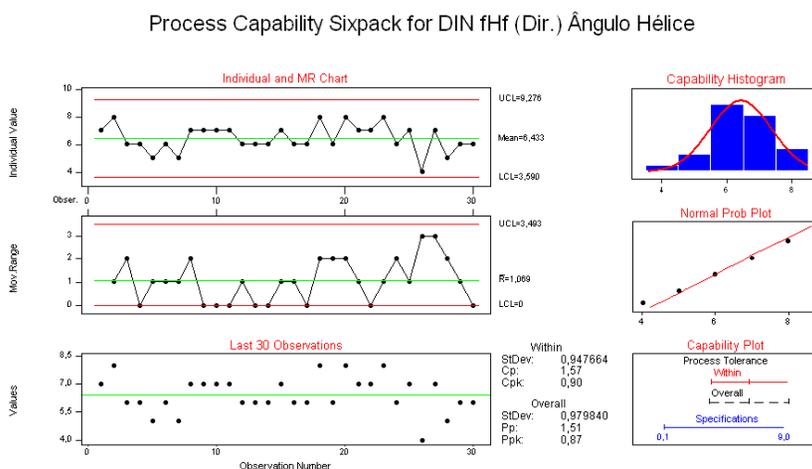


Figura 68. Gráfico de normalidade para divergência de angular de forma da hélice (Minitab®, 2008)

O gráfico “Capability Plot”, da Figura 68, podemos observar os índices de CP 1,57 e CPK 0,90 , capacidade de reproduzir a mesma dimensão e centralização da dimensão encontrada em relação ao campo de tolerância, respectivamente, o valor de CP está acima do valor mínimo aceitável de 1,33, já o CPK está abaixo do valor mínimo aceitável, demonstrando que o processo é capaz, porém descentralizado, necessitando de um ajuste de processo, para centralização dos valores medidos, baseado na especificação de produto de máximo DIN 9.

O gráfico “Normal Prob Plot”, da Figura 68, temos os limites estabelecidos em DIN 4 e DIN 8, a linha transversal indica a probabilidade normal de distribuição das amostras ao longo de sua evolução. O gráfico “Capability Histogram”, da Figura 68, demonstra a distribuição das amostras ao longo da qualidade encontrada na forma de DIN, podemos observar a curva de Gauss nas amostras dimensionadas dentro do limite de aproximadamente 4 a 8 DIN.

O gráfico “Value”, da Figura 68, são demonstrados que os índices de qualidade DIN e estão entre 4 e 8 DIN. O gráfico individual “Mov Range”, da Figura 68, indica a diferença entre os pontos de medição a cada nova observação. O gráfico individual “Individual Value”, da Figura 68, indica efetivamente, em cada ponto a qualidade DIN encontrada na amostra dimensionada, podemos observar os limites superior e inferior estabelecidos com 3 desvios padrões acima e abaixo da linha média e os valores registrados neste gráfico estão na média em DIN 6.

A Figura 69 demonstra a aplicação de carga no mecanismo de direção, especialmente a forças transmitidas ao pinhão no mecanismo de direção em sua aplicação veicular. Neste gráfico podemos verificar as forças de empurrar e puxar a cremalheira, girando sobre o pinhão, sendo para o lado direito os valores de 25,91 Kgf (mínimo) e 25,96 Kgf (máximo) e esquerdo são de 25,18 Kgf (mínimo) e 25,85 Kgf (máximo), na região central $+ / - 30^\circ$. Esta é considerada como a região de conforto, pois é neste ponto que o mecanismo de direção parte para o sentido horário e anti-horário mais vezes, e nesta região, podemos observar homogeneidade nos valores de carga.

HISTÓRICO - OP80

PROD. SELECIONADO: **HPS** NÚMERO DA PEÇA: **069092** STATUS DO PRODUTO: **OK**

RACK PULL

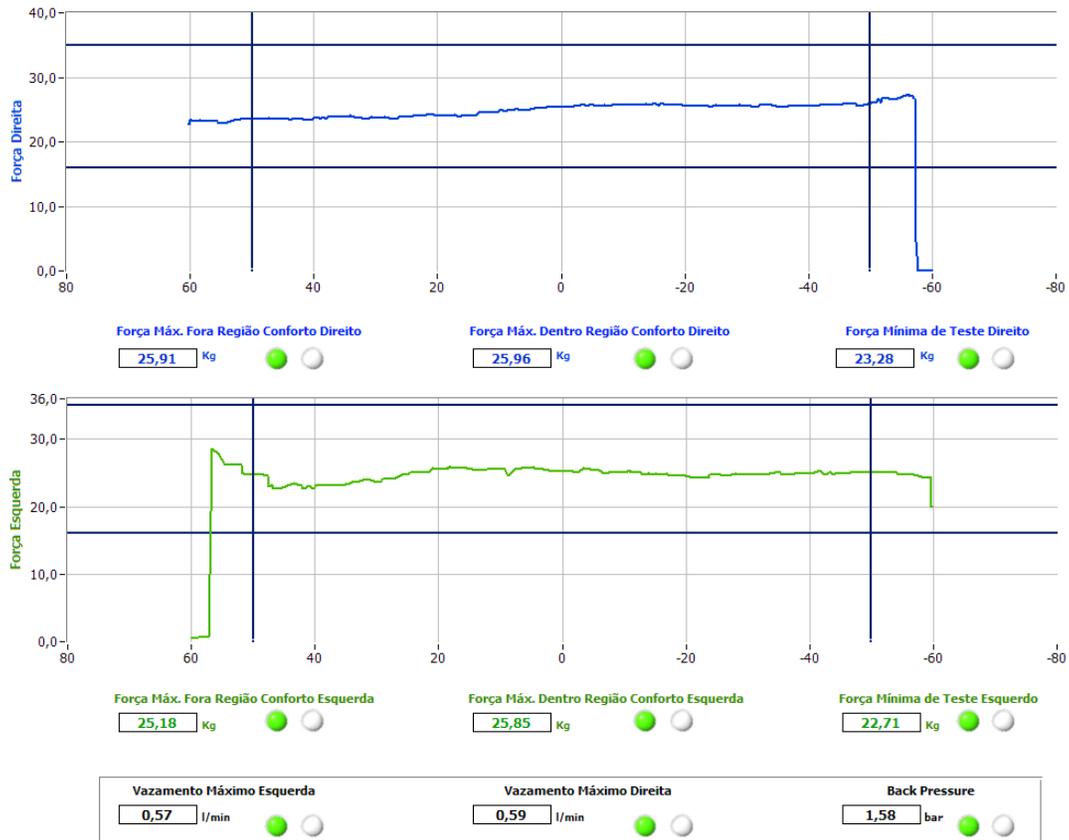


Figura 69. Gráfico de rack-pull mecanismo direção (TRW, 2010)

5. CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos nas medições dos erros dos perfis evolventes e dos ângulos de hélice dos dentes de engrenagens, pode-se concluir que:

- ✓ Conforme os dados obtidos, nota-se excelente qualidade de perfil e hélice e ângulo de hélice alcançando valores muito precisos de tolerância na faixa DIN 6;
- ✓ Os dados mostram uma alta capacidade de eliminação de erros de evolvente e ângulo de hélice através do processo de “honing”;
- ✓ Elevada capacidade de remover grandes volumes de material e de introduzir correções de ângulo de hélice e evolvente do pinhão “honeado” sem ter que construir novo dressador ou novo rebolo, onde toda correção é realizada via CNC do equipamento HMX 400;
- ✓ Excelentes qualidades de perfil e hélice com redução para as faixa de DIN 6 atingindo em alguns casos DIN 2;
- ✓ A metodologia de superfície de resposta permitiu a determinação dos parâmetros de processo ideais, com maior produtividade e qualidade sem a necessidade de muitas intervenções no processo de “honing”;

Além disso, o trabalho permitiu o aprofundamento na compreensão do comportamento do erro de engrenamento no sistema de direção veicular. Foram adquiridos conhecimentos na área de simulações de sistemas de direção, bem como experiência com modelos matemáticos simplificados. Através destas ferramentas o autor obteve expressivo ganho de entendimento referente ao comportamento do processo de honing de pinhões em condições extremas de processo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BANZATO, D. A.; KRONKA, S. N. Experimentação agrícola. 2.ed. Jaboticabal: FUNEP, 1992. 247 p.

BASTOW, DONALD, Car Suspension and Handling, / rev. by Geoffrey P. Howard, London, Warrendale, PA, USA : Pentech Press: Society of Automotive Engineers, (1993), 3rd ed. 362p.

BOX, G. E. P. WILSON, K. B. On the Experimental Attainment of Optimum Conditions. – With discussion. Journal of the Royal Statistical Society, (1951), B 13, p. 1-45.

BOX, G. E. P., BEHNKEN, D. W. Some New Three Level Designs for the Study of Quantitative Variables. Technometrics, (1960), v.2, n. 4, p. 455-475.

BOX, G. E. P., HUNTER, W. G., HUNTER, J. S. Statistics for Experimenters. New York, John Wiley & Sons, (1978), v. 1. p. 510 - 535.

BOX, G. E. P.; DRAPER, N. R. Empirical model-building and response surfaces. New York, Wiley. (Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics), 3rd ed., (1987), 669 p.

SILVA, S. P.; BRANDÃO, L.C.; ABREU, G.A.; LIMA. P.C. O processo de acabamento em pinhões de sistemas de direção. In: COBEF - Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2009, Belo Horizonte. Anais.... São Paulo : ABCM - Associação Brasileira de Ciências Mecânicas, (2009), v. 1. p. 11-20.

BRITO, J. N. Desenvolvimento de Interface Computacional Aplicado ao Projeto de Sistemas Engrenados - Engrenamento, Relatório Técnico Científico Final, Projeto Fapemig, (1999), Tec. 1019/96, 130 p.

- BRITO, J. N.; Neto, F. P. L. Estudo do Controle da Qualidade e Erros de Engrenamento em Engrenagens Cilíndricas, Revista de Ensino de Engenharia da ABENGE – Associação Brasileira de Ensino de Engenharia, (1998), n.20, p. 23–32.
- CHOU Y. K., EVANS C. J. Cubic Boron Nitride Tool Wear in Interrupted Hard Cutting, (1999), p 225-229 and 234-245.
- COLEMAN, D. E.; MONTGOMERY, D. C. A systematic approach to planning for a designed industrial experiment, Technometrics, (1993), v. 35, n.1, p. 1-12.
- DAVIS, M. M.; AQUILANO N. J.; CHASE R. B. Fundamentos da administração da produção. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, (2001), 600p.
- DENKENA, B., REICHSTEIN, M., CATONI, F. Optimized Dressing of Vitreous Bonded Worms for Continuous Generating Grinding, Proceedings of ICG (International Conference on Gears), Munich, Germany, (2005), p. 897-908.
- DIN 3962 – Tolerances for Cylindrical Gear Teeth – Tolerances for Deviations of individual Parameters, Deutsche Normen, Aug. , (1978), part 1.
- DIN 3962 – Tolerances for Cylindrical Gear Teeth – Tolerances for Tooth Trace Deviations, Deutsche Normen, Aug. , (1978), part 2.
- DIXON, JOHN C., Tires, Suspension, and Handling, Warrendale, PA; London : Society of Automotive Engineers: Arnold, (1996), v. 1. 621 p.
- DRAPER, N., LIN, D. K. J. Capacity Considerations For Two-Level Fractional Factorial Designs. Journal of Statistical Planning and Inference, (1990), n.24, p. 25-35.
- FÄSSLER COSTUMIZED SOLUTIONS. Apresentação do processo de honing de engrenagens com rebolos cerâmicos, (2008), Manual Técnico, 38 páginas.

- GANGULI, R. Optimum Design of a Helicopter Rotor for low vibration using aeroelastic analysis and Response Surface Methodology. *Journal of Sound and Vibration*, (2002), v.2, n.258, p. 327-342.
- GILLESPIE, T. D. (Thomas D.), *Fundamentals of Vehicle Dynamics*, Warrendale, PA : Society of Automotive Engineers, (1992), v. 1. 495 p.
- HERMES Abrasives. *Gear Honing Technology, Manual Técnico*, (2008), n. 54, p. 1-10.
- ISO 1328-1 Cylindrical gears - ISO system of accuracy - Part 1: Definitions and allowable values of deviations relevant to corresponding flanks of gear teeth, (1995), 2nd edition, 27 p.
- ISO 1328-2 Cylindrical gears - ISO system of accuracy - Part 2: Definitions and allowable values of deviations relevant to radial composite deviations and runout information, (1997), 2nd edition, 11 p.
- ISO TR 10064-1 Cylindrical gears - Code of inspection practice; part 1: inspection of corresponding flanks of gear teeth, (1992), 1st edition, 40 p.
- JACKON J. M., DAVIS J. C., HITCHINER P. M., MILLS B. High-speed grinding with CBN wheels-applications and future technology, *Journal Materials Processing Technology*, (2001), n. 100, p.77-88.
- JACKON J. M., MILLS B. Materials selection applied to vitrified alumina and CBN grinding wheels, *Journal os Materials Processing Technology*, (2000), n.108, p.114-124.
- KIM J-D, KANG Y-H, JIN D-X, LEE Y-S. Development of Discontinuous Grinding Wheel With Multi-Porous Grooves. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, (1997), n. 37, p.1611-1624.

- KLAGES C. P., FRYDA M. Diamond coating and CBN coatings for tools, *Internal Journal of Refractory Materials & Hard Materials*, (1998), n.16, p.171-176.
- KRUSZYN'SKI B, MIDERA S. T. Forces in gear grinding, (1998), *Ann CIRP* 1 287-290.
- KRUSZYN'SKI B. Model of gear grinding process, (1995), *Ann CIRP* 1 321-324.
- KRUSZYNSKI B. W.; LUTTERVELT C.A. Prediction of temperature and Surface Integrity in Gear Grinding, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, (1994), n.34, p. 633-640.
- LEE K. W., WONG P. K., ZHANG J. H. Study on the Grinding of advanced Ceramics With Slotted Diamond Wheels. *Journal of Materials Processing Technology*, (2000), n. 10, p. 230 - 235.
- LITVIN L. F. Computerized generation and simulation of meshing of modified spur and helical gears manufactured by shaving, *Computer methods in Applied Mechanics and Engineering*, (2001), n. 190, p. 5037 - 5055.
- LITVIN, F.L.; FAN Q.; VECCHIATO D.; DEMENEGO A.; HANDSCHUH R. F. Computerized generation and simulation of meshing of modified spur and helical gears manufactured by shaving, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, (2001), v. 190, n. 39, p. 5037-5055.
- MALKIN, S. *Grinding Technology Book*, (1989), Ellis Horwood, New York.
- MARINESCU, I.D.; HITCHINER, M.; UHLMANN, E.; BRIAN ROWE, W.; INASAKI, I. *Handbook of Machining with Grinding Wheels*, (2007), CRC Press - Taylor & Francis Group. 629 pp.
- MONTGOMERY, D. C. Introduction to factorial designs, In *design and analysis of experiments*. John Wiley & Sons, (1997), v.12, p. 189 – 243.

- MONTGOMERY, D. C., RUNGER, G. C. Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros, Verônica Calado (Trad.), Rio de Janeiro. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 2a. ed., (2003), 463p.
- MONTGOMERY, D.C. Diseño y análisis de experimentos. Trad. por Jaime Delgado Saldivar. Mexico, Ed. Iberoamérica, (1991), 45 – 52p.
- MORIWAKI I., FUJICA M. Effect of cutter performance on finished tooth form in gear shaving, Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME, (1994), v.116 n.3, p.701-705.
- NAKADA S., MORIWAKI I. Effects preshaved form and cutter performance in plungecut shaving. Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, (2007), p. 39-46.
- PIRES e ALBUQUERQUE, O. A. L. Elementos de Máquinas, Editora Guanabara Dois S.A., Rio de Janeiro, (1980), 440 p.
- POAULACHON G., MOIASAN A., AWAHIR S. I. Tool-wear mechanism in hard turning with polycrystalline cubic boron nitride tools, (2001), n. 250, p. 576-586.
- SHIGLEY, J. E. Elementos de Máquinas, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, Rio de Janeiro, (1984), 700 p.
- SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSON, R. Administração da Produção. 2.ed. São Paulo: Atlas, (2007), 726p.
- SOFTWARE MINITAB®, versão15, (2008).

STRJIRNY CELÁKOVICE. GearSpect Manual de Instrução Software GearSpect para medida de evolventes, ângulo de hélice e passos em instrumento DO – 3PC. Manual Técnico, (2007), 46 p.

TOWNSEND D. P., DUDLEY'S. Gear Handbook, Mc Graw-Hill, Inc., New York, 2nd Edition, (1991), p. 1961 - 1984.

TRW, Acervo de informações técnicas da TRW Automotive, (2010).

TSAY B. C., LIU Y. W. Spur gear generation by shaper cutters, Journal of Materials Process Technology, (2000), n.104, p. 271 - 279.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)