

**O SISTEMA DE PRECISÃO DE ENGRENAGENS CILÍNDRICAS
COM DENTADO EM EVOLVENTE DE CÍRCULO.
A APLICAÇÃO DO CONTROLO DO ENGRENAMENTO RADIAL.**

José António dos Santos Almacinha *
Jorge Humberto Oliveira Seabra **

**CETRIB - Unidade de Tribologia e Manutenção Industrial
Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Rua dos Bragas - 4099 Porto codex - Portugal**

RESUMO:

A qualidade dos sistemas de engrenamento, necessária para garantir as características funcionais pretendidas em termos de velocidade de funcionamento, duração da vida em serviço, nível sonoro do funcionamento e capacidade de carga, está muito dependente da precisão dos processos de fabricação utilizados. A avaliação do nível de qualidade das engrenagens é normalmente realizada através do controlo de parâmetros característicos, comparando os resultados obtidos com valores das tolerâncias dos erros especificados em documentos normativos.

Neste texto, após uma breve enumeração dos vários critérios de precisão previstos na normalização ISO e da referência às possíveis origens dos erros que se pretende caracterizar, faz-se a análise do Controlo do Engrenamento Radial, um dos processos de verificação de rodas dentadas mais difundidos industrialmente, discutindo-se o alcance dos resultados e das conclusões que podem ser obtidas.

Finalmente, a título de exemplo, analisam-se os resultados do controlo do engrenamento radial de um veio-pinhão.

* Assistente - DEMEGI - FEUP.

** Professor Auxiliar - DEMEGI - FEUP.

Nomenclatura

| | |
|---------------|---|
| a' | - Entre-eixo |
| a'' | - Entre-eixo de trabalho do teste do engrenamento radial |
| b | - Largura do dentado |
| d | - Diâmetro primitivo de corte [$z m_n / \cos \beta$] |
| d_a | - Diâmetro da cabeça (addendum) |
| d_b | - Diâmetro de base [$d \cos \alpha_t$] |
| d_i | - Diâmetro do furo ou do veio que materializa o eixo de referência |
| f' | - Salto tangencial |
| f'' | - Salto radial |
| f_a | - Desvios da distância entre eixos (\pm) |
| f_f | - Erro total de perfil (F_α - ISO/DIS 1328-1) |
| $f_{f\alpha}$ | - Erro de forma do perfil (ISO/DIS 1328-1) |
| $f_{f\beta}$ | - Erro de forma de hélice (ISO/DIS 1328-1) |
| $f_{H\alpha}$ | - Erro de inclinação do perfil (ISO/DIS 1328-1) |
| $f_{H\beta}$ | - Erro de inclinação de hélice (ISO/DIS 1328-1) |
| f_{pb} | - Erro individual de passo de base real (\pm) |
| f_{pn} | - Erro individual de passo circular real (\pm) |
| f_{pt} | - Erro individual de passo circular aparente (\pm) |
| f_x | - Erro de inclinação do veio |
| f_y | - Erro de obliquidade do veio |
| j_n | - Folga normal entre dentes |
| j_t | - Folga circular entre dentes |
| m_n | - Módulo normal (real) |
| m_t | - Módulo aparente [$m_n / \cos \beta$] |
| p_b | - Passo de base |
| p_n | - Passo circular real [$m_n \pi$] |
| p_t | - Passo circular aparente [$m_t \pi$] |
| s_n | - Espessura normal do dente [$m_n (\pi / 2 + 2 x \tan \alpha_n)$] |
| x | - Coeficiente de desvio (desvio) |
| x''_1 | - Coeficiente de desvio da roda testada a considerar no engrenamento radial |
| z | - Número de dentes |
| $A_{a''k}$ | - Desvios da distância entre eixos do engrenamento radial ($k = i, e$) |
| E_{sk} | - Desvios da espessura normal dos dentes ($k = i, m, s$) |
| F'_i | - Erro composto tangencial |
| F''_i | - Erro composto radial |
| F_p | - Erro total de divisão |
| F_{pk} | - Erro acumulado de passos circulares sobre um sector de k passos |
| F_r | - Falso redondo radial |

| | |
|----------------------|---|
| F_{β} | - Erro total de distorção |
| N_b | - Número de dentes danificados da roda testada |
| Q | - Classe de precisão (qualidade) |
| R_s | - Campo dos erros (flutuação) da espessura dos dentes (DIN 3960) |
| T_s | - Tolerância da espessura dos dentes |
| W_k | - Cota tangencial sobre k dentes |
| α'' | - Ângulo de pressão aparente de funcionamento do engrenamento radial |
| α_n | - Ângulo de pressão normal (real) |
| α_t | - Ângulo de pressão aparente ($\tan \alpha_t = \tan \alpha_n / \cos \beta$) |
| β | - Ângulo de hélice primitiva |
| $\text{inv } \alpha$ | - Involuta de α ($\tan \alpha - \alpha$) |
| índice 1 | - para quantidades associadas à roda testada |
| índice L | - para quantidades associadas à roda padrão |

Introdução

O desenvolvimento tecnológico, verificado nas últimas décadas, tem fomentado a procura de sistemas de engrenamento que obedecem a requisitos, cada vez mais rigorosos, em termos de capacidade de carga, velocidade de funcionamento, duração da vida em serviço e nível sonoro do funcionamento.

A qualidade dos sistemas de engrenamento, necessária para garantir as características de funcionamento pretendidas, depende, fundamentalmente, da precisão dos processos de fabricação utilizados, mas também, de uma concepção adequada, da conformidade dos materiais constituintes, de uma montagem cuidada e de uma boa lubrificação.

Em todos os componentes de qualquer produto de engenharia existem diferenças inevitáveis entre as dimensões e as geometrias nominais de projecto e as dimensões e as geometrias reais do produto acabado. Assim, por exemplo, numa caixa de velocidades ou num redutor, as rodas dentadas têm dentes com perfis não exactamente iguais às formas teóricas de evolvente de círculo e as suas distâncias entre eixos não são exactamente iguais aos respectivos valores nominais.

Os limites admissíveis para essas variações são estabelecidos pela especificação de uma classe de precisão de fabrico, que tem associadas as tolerâncias a que devem obedecer os erros dos parâmetros característicos de uma engrenagem cujos controlos estejam previstos, de modo a poderem ser assegurados os requisitos funcionais pretendidos.

Neste texto, utilizar-se-ão conceitos sobre precisão de engrenagens, expostos na normalização ISO, necessários à especificação dos critérios de precisão (parâmetros característicos), complementados pelas normalizações DIN e Suíça (VSM-SNV), sempre que necessário.

Actualmente, está em curso o processo de revisão da norma ISO 1328 - "Engrenagens paralelas em evolvente - Sistema ISO de precisão" com vista a possibilitar uma convergência com a normalização DIN, que deverá também ser revista, de modo a ter uma única norma de precisão em toda a Europa, [1]. Sempre que tal se justifique, faz-se referência a alterações e a parâmetros novos propostos no projecto de norma ISO, [2].

1 - Critérios de precisão

Num sistema de engrenamento, podem detectar-se vários tipos de erros com origens eventualmente diversas e que podem ter ocorrido em diferentes fases do processo produtivo. A sequência lógica das operações de fabrico de uma engrenagem é a seguinte:

- maquinaria do corpo de cada uma das rodas;
- execução do dentado de cada uma das rodas;
- montagem das duas rodas dentadas nas condições de funcionamento.

Assim, um sistema de controlo de qualidade de engrenagens deve comportar, sucessivamente [3]:

- o controlo do corpo de cada uma das rodas;
- o controlo do dentado de cada uma das rodas;
- o controlo das condições de montagem da engrenagem.

As definições completas dos diferentes critérios de precisão previstos na normalização podem ser encontradas nos documentos normativos ISO citados e também na norma DIN 3960 [4]. Nesta secção do texto, enumeram-se apenas os parâmetros característicos que têm tolerâncias quantificadas nas normas, referem-se, sucintamente, as possíveis origens dos erros que se pretende caracterizar e fornecem-se algumas recomendações a ter em conta na execução prática e na interpretação das suas respectivas medições.

1.1 - Controlo do corpo da roda

Este controlo pode incluir as seguintes verificações, conforme indicação da figura 1.1:

- a) Dimensões e geometria do furo ou do veio que materializa o eixo de referência.
- b) Diâmetro da cabeça e falso redondo de rotação (batimento radial) do cilindro da cabeça.
- c) Falso redondo de rotação e empenamento (batimento axial) das superfícies de referência.

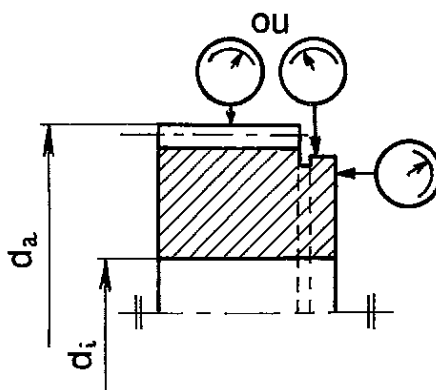


Figura 1.1 - Elementos de referência do corpo da roda, [3].

Uma adequada especificação dos elementos de referência do corpo é fundamental para uma correcta execução das operações de montagem da roda dentada na máquina de talhar e do seu posterior controlo de precisão, tendo também influência nas condições de montagem e funcionamento da engrenagem.

1.2 - Controlo do dentado

Os critérios de precisão utilizados para o controlo do dentado podem ser classificados em erros individuais, quando dizem respeito a características isoladas (parâmetros individuais) do dentado, e em erros compostos, quando a medição pode ser considerada como uma resultante de vários erros individuais.

1.2.1 - Erros (parâmetros) individuais

1.2.1.1 - Erros de divisão

Estes erros são geralmente originados pela máquina de talhar (mecanismo divisor, folgas, etc), pela ferramenta de corte (desgaste da aresta de corte, imprecisão do passo, etc) ou por um mau posicionamento da engrenagem [5,6].

- Erro individual de passo circular aparente - $(\pm) f_{pt}$.
- Erro individual de passo circular real - $(\pm) f_{pn}$.
- Erro individual de passo de base real - $(\pm) f_{pb}$.

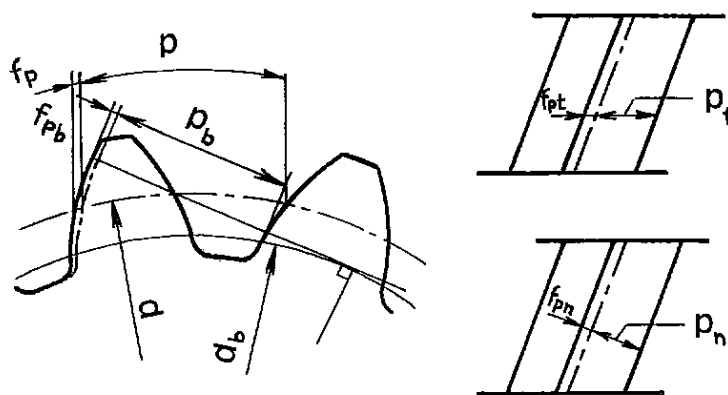


Figura 1.2 - Erros individuais de passo.

A medição do passo circular, representado na figura 1.2, pode ser executada em rodas talhadas por geração ou por fresa de forma. Os resultados obtidos podem ser influenciados por uma eventual excentricidade do dentado relativamente ao eixo da roda e pela presença de erros de forma do perfil [7,8].

O erro de passo circular pode ser determinado através de uma medição das cordas entre dois pontos, dos passos angulares (rodas pequenas e médias) ou ainda por meio de uma máquina de controlo de várias coordenadas lineares.

A medição do passo de base, representado na figura 1.2, só deve ser realizada em rodas talhadas por fresa de forma ou rectificadas por processos em que os dois planos das mós de rectificação simulam um dente de corte virtual. Os resultados obtidos são independentes de qualquer excentricidade do dentado e podem permitir deduzir o ângulo de pressão e o círculo de base através de uma média das medições efectuadas, desde que os erros de forma do perfil e de hélice sejam pequenos (rodas rectificadas). Nas rodas intermutáveis, o passo de base deve ser igual em todas as rodas.

- Erro acumulado de passos circulares sobre um sector de k passos - F_{pk} .
- Erro total de divisão - F_p .

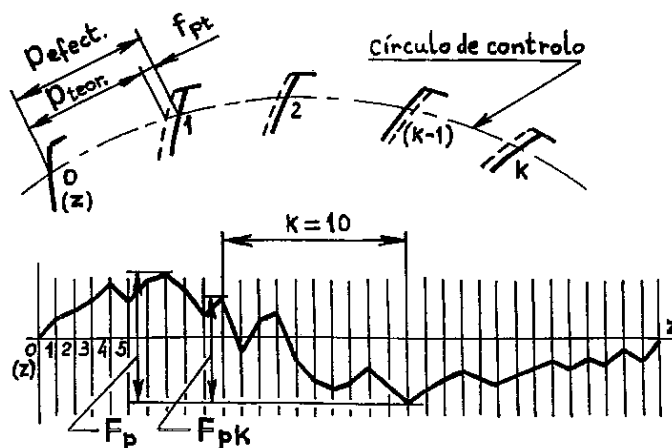


Figura 1.3 - Erros acumulados de passos circulares.

No caso de um dentado de muito grande qualidade ou em engrenagens de grande velocidade, a configuração do diagrama do erro acumulado, figura 1.3, é importante. As zonas de forte inclinação implicam o surgimento de acelerações e esforços dinâmicos prejudiciais ao engrenamento [8].

A determinação dos erros acumulados de passo não deve ser executada a partir dos erros de passo real. O diagrama dos erros acumulados de passos circulares pode apresentar um andamento sinusoidal devido, basicamente, ao erro acumulado de passos induzido pela talhadora (sem-fim ou prato do sistema de indexação), a um posicionamento excêntrico do prato de indexação ou a uma montagem excêntrica da roda a talhar na máquina [7].

Qualquer excêntricidade do dentado relativamente ao eixo da roda provoca um erro total de divisão com uma amplitude dupla daquela.

1.2.1.2 - Erros de perfil

O erro total de perfil - f_f (F_α - ISO/DIS 1328) - pode ser decomposto num erro de forma e num erro de inclinação do perfil.

Na maior parte dos aparelhos de controlo, o perfil nominal de evolvente é representado por um segmento de recta. Os erros de perfil são registados como desvios em relação a esse segmento, conforme se indica na figura 1.4.

a) Erro de forma do perfil - $f_{f\alpha}$ (ISO/DIS 1328).

Este erro pode compreender uma ondulação do perfil, provocada pela ferramenta (deficiente afiamento, posicionamento incorrecto com aumento de pressão sobre determinadas zonas da roda a talhar) ou resultante de irregularidades da rotação do mecanismo de divisão. Ondulações de perfil mínimas podem dar origem a vibrações e ruído que põem em causa o bom comportamento de engrenagens para grandes velocidades [5,6, 8].

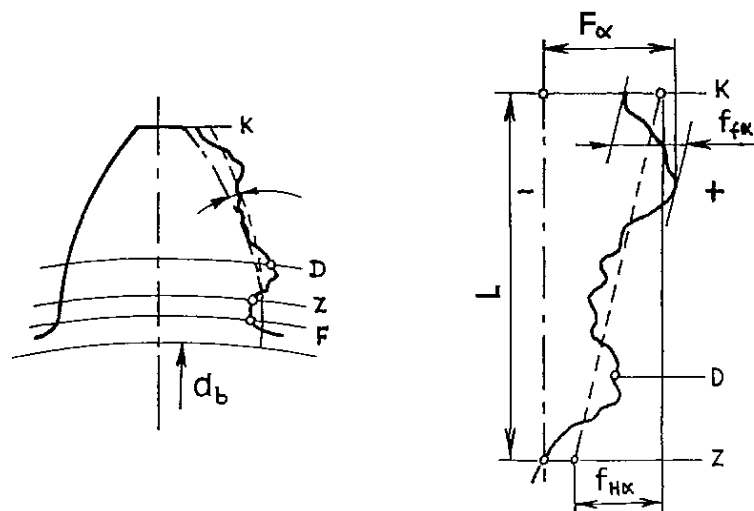


Figura 1.4 - Erro de perfil.

b) Erro de inclinação do perfil - $f_{H\alpha}$ (ISO/DIS 1328).

Este erro de inclinação pode ser causado por um erro do ângulo de pressão ou pela excentricidade do círculo de base dos dentes, resultante da não coincidência entre o eixo da roda e o eixo de rotação da operação de maquinagem, de uma inadequada afinação da máquina ou de um incorrecto posicionamento da ferramenta de corte, figura 1.5, [4, 5].

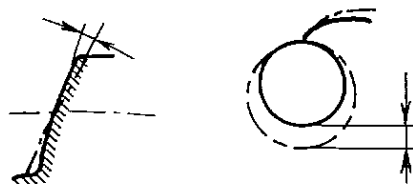


Figura 1.5 - Erros de ângulo de pressão e de círculo de base.

Quando uma roda e a sua conjugada têm erros de inclinação de perfil iguais, o seu engrenamento processa-se correctamente.

A consideração do valor médio dos erros de inclinação dos flancos de uma roda permite eliminar a influência de eventuais erros de excentricidade e empenamento e pode ser utilizado para corrigir a regulação da talhadora.

1.2.1.3 - Erros de distorção

O erro total de distorção - F_β - pode ser decomposto num erro de forma de hélice e num erro de inclinação de hélice.

Os aparelhos de controlo da distorção são maioritariamente concebidos de forma a que a hélice nominal seja representada por um segmento de recta. Os erros de hélice são registados como desvios em relação a esse segmento, conforme sugere a figura 1.6.

O erro total de distorção pode ter origem numa trajectória deficiente do cortante, num erro do ângulo de hélice provocado pelo mecanismo diferencial ou numa incorrecta fixação da roda na talhadora [5,6].

a) Erro de forma de hélice - $f_{f\beta}$ (ISO/DIS 1328).

Este erro do traço do flanco pode compreender uma ondulação longitudinal com as mesmas origens da ondulação de perfil.

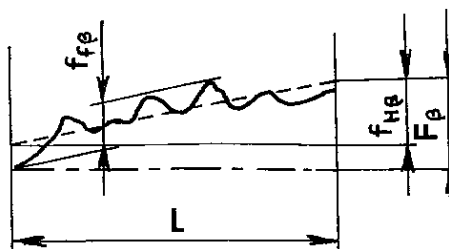


Figura 1.6 - Erro de distorção.

b) Erro de inclinação de hélice - $f_{H\beta}$ (ISO/DIS 1328).

Este erro de inclinação pode ser causado por um erro do ângulo de hélice ou pela não coincidência do eixo da roda com o eixo de rotação da operação de talhagem, que pode incluir uma obliquidade originada por erros de falso redondo axial ou por defeito de montagem [4,8].

1.2.1.4 - Falso redondo

O falso redondo radial - F_r - representa, basicamente, o dobro da excentricidade dos dentes relativamente ao eixo da roda, num plano de medição perpendicular ao eixo e aproximadamente a meia altura dos dentes, mas também inclui a irregularidade do espaçamento entre dentes resultante de erros de passo e dos flancos direitos e esquerdos dos dentes, [4,8].

A excentricidade pode ser representada por uma senoide seguindo aproximadamente a linha média do diagrama representado na figura 1.7. Esta senoide não coincide forçosamente com a do diagrama do erro acumulado de passos circulares, que se refere apenas a uma das famílias de flancos.

O falso redondo radial pode ter origem no mecanismo divisor da talhadora ou numa deficiente fixação da peça, [5]. Não intervêm na criação de ruído de funcionamento, pois a sua frequência é geralmente baixa [9], mas tem influência sobre a uniformidade da velocidade angular da engrenagem.

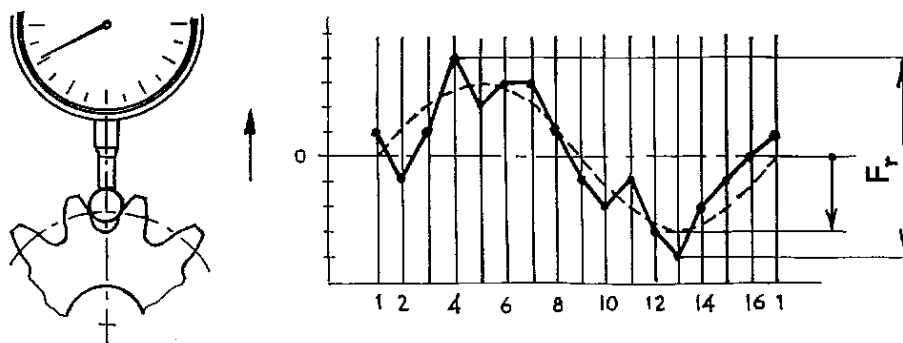


Figura 1.7 - Erro de falso redondo (batimento radial).

Este tipo de controlo não fornece uma indicação inequívoca quanto à qualidade efectiva de uma roda, já que não dá uma informação separada sobre os erros individuais e compostos respeitantes a cada uma das famílias de flancos. Assim, este controlo só pode servir, de forma limitada, como critério de análise da qualidade funcional de uma roda dentada, sendo por isso subalternizado no projecto de revisão da norma ISO, [1].

O controlo do falso redondo deve ser fundamentalmente aplicado em engrenagens que têm de funcionar, sem possibilidade de emperramento, com uma folga entre dentes mínima e também para rodas padrão utilizadas no controlo radial do engrenamento. Para além disso, utiliza-se frequentemente para verificar se a peça estava correctamente centrada na máquina e sem empenamento.

A medição do falso redondo torna-se supérflua, quando a roda deve ser submetida ao controlo do engrenamento radial.

1.2.1.5 - Tolerância da espessura dos dentes

A selecção da tolerância e dos desvios da espessura dos dentes é fundamental para o estabelecimento dos valores limite da folga entre dentes, e deve reger-se por necessidades do processo produtivo. O tratamento destes parâmetros encontra-se desenvolvido num trabalho publicado no nº 79 da revista Tecnometal [10].

1.2.2 - Erros compostos

A medição dos erros compostos pode ser efectuada através do controlo do engrenamento tangencial (num flanco) e do engrenamento radial (sobre dois flancos).

No controlo do engrenamento, os dentes de uma roda são conjugados com os dentes da roda oponente e os efeitos combinados dos seus erros geométricos individuais, em trabalho, são determinados como erros compostos e acumulados. Estes erros podem ser imputados apenas a uma das rodas (roda testada), se a roda utilizada como conjugada for uma roda padrão, com erros suficientemente pequenos para poderem ser negligenciáveis quando comparados com os erros da roda testada. É normal, utilizar rodas padrão com uma qualidade, de pelo menos três graus, superior à especificada para a roda a controlar.

Se os erros da roda conjugada não podem ser desprezados (quando o teste é realizado com as duas rodas da transmissão), os erros compostos e acumulados só podem ser globalmente atribuídos à engrenagem.

Durante o engrenamento, os erros do dentado produzem irregularidades na transmissão do movimento que podem ser registadas em diagramas de coordenadas cartesianas ou polares, com anamorfose.

1.2.2.1 - Controlo do engrenamento tangencial

Neste processo de medição, as rodas engrenam com o entre-eixo teórico de funcionamento e folga entre dentes, de forma ao contacto entre dentes se dar apenas em flancos homólogos. Através de registo gráfico, figura 1.8, podem definir-se os seguintes parâmetros, [3,5]:

a) O erro composto tangencial - F'_j - representa a amplitude total do diagrama e resulta do efeito combinado de F_p , F_r e da flutuação das espessuras dos dentes R_s .

O erro composto tangencial é equivalente ao erro total de divisão funcional máximo, pelo que o controlo do engrenamento tangencial pode substituir o controlo de F_p e, em certa medida, o de f_{pt} .

b) O salto tangencial - f'_i - é representado pela amplitude máxima das pequenas ondulações, distantes de um só passo, e resulta do efeito combinado de f_p , f_f , F_β e de R_s .

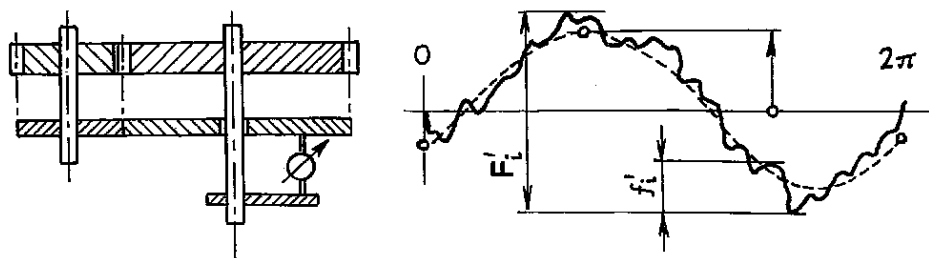


Figura 1.8 - Controlo do engrenamento tangencial.

A análise do diagrama dos erros compostos tangenciais fornece indicações limitadas para uma previsão do ruído de funcionamento esperado e para o conhecimento dos erros individuais. Ondulações curtas, repetindo-se dente a dente, indicam um erro sistemático do ângulo de pressão, de perfil ou do traço do flanco. Por sua vez, desvios curtos e isolados resultam de erros irregulares de passo, de perfil ou de hélice, [8].

Este processo de controlo de engrenagens é o que se aproxima mais das condições efectivas de funcionamento. No entanto, é ainda pouco utilizado no controlo geral de engrenagens devido à sua complicada concretização, aliada à impossibilidade de identificar, com segurança, a natureza e a amplitude dos erros individuais em presença e as necessárias correcções a fazer na máquina-ferramenta.

No projecto de redutores, em certos domínios onde se torna necessária uma transmissão o mais uniforme possível, este método é o mais adequado.

1.2.2.2 - Controlo do engrenamento radial

Neste processo de medição, o suporte de uma das rodas (a roda padrão, quando utilizada) é móvel e uma força aplicada na direcção da linha entre centros obriga as duas rodas a engrenarem permanentemente sem folga entre dentes, de forma ao contacto se dar, simultaneamente, sobre os dois flancos dos dentes. As variações da distância entre eixos, provocadas por erros individuais, podem ser registadas graficamente, figura 1.9, permitindo a definição dos seguintes parâmetros, [3,5]:

a) O erro composto radial - F''_i - representa a amplitude total do diagrama e resulta do efeito combinado de F_p , F_r e da flutuação das espessuras dos dentes R_s .

b) O salto radial - f''_i - é representado pela amplitude máxima das pequenas ondulações, distantes de um só passo, e resulta do efeito combinado de f_p , f_f , F_β e de R_s .

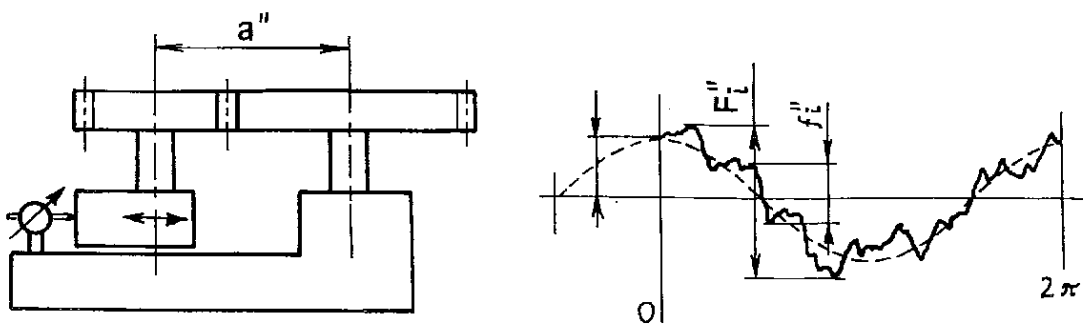


Figura 1.9 - Controlo do engrenamento radial.

Este método de controlo é o objecto principal deste trabalho e será tratado de forma mais desenvolvida em secções seguintes deste texto.

1.3 - Controlo da engrenagem

Este controlo pode comportar as seguintes verificações:

- a) O erro do entre-eixo - $(\pm) f_a$.
- b) O erro de paralelismo dos eixos, através dos seus dois componentes:
 - o erro de inclinação - f_x ;
 - o erro de obliquidade - f_y .
- c) A folga entre dentes ("backlash") - J_t, J_n , [10].
- d) O erro composto da engrenagem (de acordo com a secção 1.2.2).

2 - Classes de precisão

O sistema ISO de precisão de engrenagens paralelas com dentado em evolvente de círculo cobre um campo muito vasto que vai desde os dentes de precisão excepcional até aos dentes de qualidade grosseira. Para tal, estabeleceram-se doze classes de precisão (qualidades), numeradas de 1 a 12 por ordem decrescente de qualidade. A versão revista da norma deverá prever uma classe 0 reservada a engrenagens de grande precisão.

G. Henriot [11] fornece, a título indicativo, relações entre classes de precisão mais convenientes para diferentes aplicações mecânicas e quais os processos de maquinagem necessários à sua obtenção, conforme se mostra na figura 2.1.

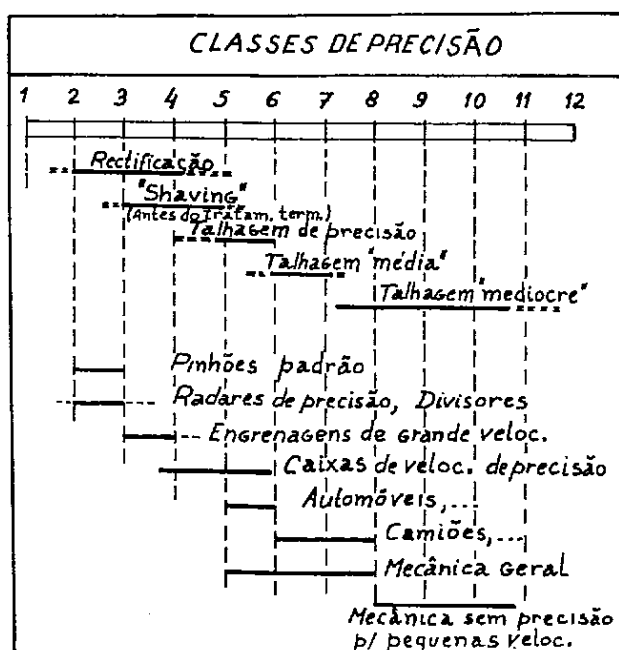


Figura 2.1 - Classes de precisão de rodas dentadas: processos de obtenção e aplicações.

A ISO 1328 sugere também a conveniência em adoptar, em aplicações gerais, a mesma classe de precisão para todos os parâmetros do dentado das duas rodas de uma engrenagem. O projecto de revisão da norma ISO estabelece, implicitamente, uma hierarquia entre os diferentes critérios, ao consagrar que, na ausência de qualquer especificação de controlo, a qualidade de uma roda é determinada a partir dos resultados do controlo dos seguintes parâmetros, [1]: f_{pt} , F_p , F_{pk} , f_f , F_β e, indirectamente, de F'_i .

No entanto, em aplicações particulares e após acordo entre o fabricante e o cliente, diferentes classes podem ser adoptadas para diferentes critérios de precisão, de forma a evitar custos de produção desnecessários, desde que todos os parâmetros que constituem cada um dos grupos funcionais previstos conservem a mesma classe de precisão.

- Grupo I (precisão cinemática): F_{pk} , F_p , F_r , F''_i , F'_i .
- Grupo II (funcionamento silencioso e capacidade de carga): f_{pt} , f_{pn} , f_{pb} , f_f , f''_i , f'_i .
- Grupo III (capacidade de carga): F_β , f_x , f_y .

A futura versão desta norma deverá conter ligeiras alterações na composição destes grupos, de acordo com propostas da DIN.

No toleranciamento por grupos funcionais, não se torna necessário controlar todos os parâmetros pertencentes a cada um dos grupos especificados, já que, em certos casos, eles estão relacionados uns com os outros, conforme se referiu na secção anterior. Assim, cada grupo funcional deverá poder ser controlado por diferentes combinações dos seus parâmetros, formando classes de controlo, conforme está já previsto na norma DIN 3961, [12].

A verificação da conformidade da qualidade de um dentado com uma determinada classe de precisão especificada é feita por comparação dos resultados das medições de controlo com os valores numéricos indicados, nas tabelas da ISO 1328, para as tolerâncias relativas aos critérios de precisão a utilizar na definição dessa qualidade. Na normalização DIN, a quantificação das tolerâncias associadas aos diferentes parâmetros característicos estende-se por vários documentos, [12 a 17].

3 - Análise do controlo do engrenamento radial

3.1 - Parâmetros característicos avaliados

Os modelos evoluídos de aparelhos de controlo do engrenamento radial trabalham acoplados a micro-processadores que permitem fazer a aquisição e o tratamento da informação resultante das irregularidades da transmissão.

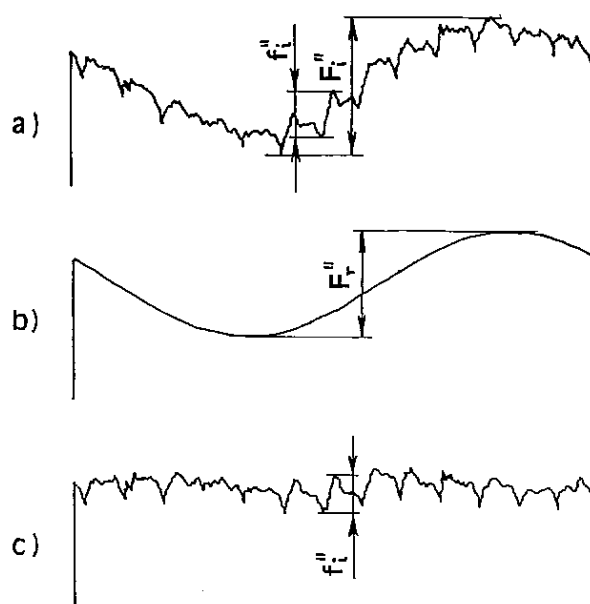


Figura 3.1 - Parâmetros característicos do engrenamento radial

Assim, a partir do diagrama do engrenamento radial, representado na figura 3.1 a), é possível definir:

- O erro composto radial - F''_i - que é igual à diferença entre a máxima e a mínima distância entre eixos de trabalho a'' , figura 1.9, verificada durante uma rotação completa da roda testada.

- O salto radial - f''_i - que é a maior variação do entre-eixo de trabalho ocorrida num deslocamento angular correspondente à duração do engrenamento de um dente.

Através de um tratamento do sinal proveniente do engrenamento, recorrendo à análise de Fourier, é também possível efectuar a separação das componentes de período longo e curto, obtendo as curvas correspondentes aos seguintes parâmetros característicos:

- O falso redondo (batimento) radial de trabalho - F''_r - é a distância entre os pontos de maior e menor amplitude da componente de maior período de oscilação, figura 3.1 b). Esta componente corresponde à linha média do diagrama representando o engrenamento radial, resultante da supressão das componentes de maior frequência.

- O salto radial - f''_i - representado pela curva da componente de menor período de oscilação, figura 3.1 c), em que a periodicidade por rotação completa está relacionada com o número de dentes da roda testada. Em função deste diagrama, é possível detectar o número total de dentes N_D considerados danificados por ultrapassarem a tolerância estabelecida para o salto radial.

O controlo da distância entre eixos do engrenamento radial a'' , utilizando uma roda padrão, pode ser usado como processo indirecto de verificação da espessura dos dentes da roda testada, [4,5].

Para uma roda com um número de dentes z_1 e uma roda padrão com um número de dentes z_L e um coeficiente de desvio x_L , o valor de a'' pode ser obtido por:

$$a'' = ((z_1 + z_L) m_t) / 2 (\cos \alpha_t / \cos \alpha'') \quad (3.1)$$

em que, o ângulo de pressão aparente de funcionamento α'' resulta da expressão:

$$\text{inv } \alpha'' = \text{inv } \alpha_t + 2 \tan \alpha_n (x''_1 + x_L) / (z_1 + z_L) \quad (3.2)$$

O coeficiente de desvio efectivo da roda testada x''_1 , a considerar na definição do entre-eixo do engrenamento radial, pode ser determinado a partir de:

$$x''_1 = ((s_n + E_{sk}) / m_n - \pi / 2) / (2 \tan \alpha_n) \quad (3.3)$$

Admitindo um desvio da espessura dos dentes $E_{sk} = 0$, podem determinar-se as dimensões nominais para x''_1 , α'' e a'' . Quando se utilizam os valores de E_{sm} , E_{ss} , E_{si} , obtêm-se, respectivamente, os valores médios, máximos e mínimos para estes parâmetros.

O aparelho de medição deve ser ajustado de modo a que a linha média do diagrama do engrenamento radial corresponda ao valor médio do entre-eixo de funcionamento previsto. O valor de a''_{med} requerido nessa operação pode ser materializado com a ajuda de blocos padrão (grau 1) e, se necessário, regulando a precisão do ajuste através do micro-processador.

Neste teste, os efeitos do falso redondo (batimento) radial e do erro total de distorção (e dos flancos dos dentes danificados) são também contabilizados. Deste modo, o teste detecta todos os efeitos que restringem a folga entre dentes derivados de imperfeições na roda.

3.2 - Tolerâncias especificadas, metodologia e campo de aplicação

Os valores numéricos (μm) das tolerâncias relativas aos parâmetros característicos controlados por este método, indicados nos diferentes documentos normativos, resultam do arredondamento aos números normais mais próximos dos valores obtidos através de expressões que são função do módulo e do diâmetro primitivo de corte.

- Norma ISO 1328:

$$TF''_i = (2 m_n + 0.5 d^{0.5} + 25) 1.6 (Q - 5) \quad p/Q \leq 6 \quad (3.4)$$

$$TF''_i = ((2 m_n + 0.5 d^{0.5} + 25) 1.6) 1.4 \quad p/Q = 7$$

$$TF''_i = ((2 m_n + 0.5 d^{0.5} + 25) 2.24) 1.25 (Q - 7) \quad p/Q \geq 8$$

$$Tf''_i = (0.63 m_n + 0.1575 d^{0.5} + 8) 1.4 (Q - 5) \quad p/Q \leq 8 \quad (3.5)$$

$$Tf''_i = ((0.63 m_n + 0.1575 d^{0.5} + 8) 1.4^3) 1.25 (Q - 8) \quad p/Q > 8$$

A norma ISO não prescreve valores de tolerância para as classes de precisão de 1 a 3, porque admite que as tolerâncias deveriam ser, praticamente, da mesma ordem de grandeza que as das rodas padrão utilizadas no controlo.

No caso do controlo dos erros compostos de uma engrenagem, a ISO admite que os erros podem atingir um valor igual à soma dos erros compostos de cada uma das rodas e por isso as respectivas tolerâncias devem ser iguais à soma das tolerâncias das duas rodas. No entanto, quando uma das rodas tem um número de dentes múltiplo do da outra, o erro composto da engrenagem pode vir diminuído.

- Norma DIN 3961:

$$TF''_i = (2 + 2.57 m_n^{0.5} + (3.12 + 0.432 \log m_n) d^{0.25}) 1.4 (Q - 5) \quad (3.6)$$

$$Tf''_i = (1.8 m_n^{0.5} + 1.6 d^{0.25} - 1) 1.4 (Q - 5) \quad (3.7)$$

e consequentemente,

$$TF''_r = TF''_i - Tf''_i \quad (3.8)$$

A DIN considera que, em geral, as tolerâncias previstas pela ISO são demasiado amplas. As tolerâncias do erro composto radial, nomeadamente, têm amplitudes muito grandes, comparativamente às outras tolerâncias.

No controlo dos erros compostos de uma engrenagem (duas rodas com qualidades aproximadas), a DIN especifica que o teste deve ser repetido com os flancos permutados (esquerdo e direito). Se os erros admitidos para cada uma das rodas forem iguais a F_{11} e F_{12} , atendendo à lei de propagação do erro quadrático, o valor esperado da medição deve ser igual a $F_1 = (F_{11}^2 + F_{12}^2)^{0.5}$.

Assim, no controlo do engrenamento radial de duas rodas, nomeadamente rodas padrão, com uma qualidade de dentado aproximadamente igual, o valor admissível para as tolerâncias dos erros verificados globalmente na engrenagem é igual a 1.4 vezes a tolerância indicada na norma. Este procedimento DIN justifica a especificação de valores numéricos de tolerâncias para classes de grande precisão.

A norma DIN 3961 indica também, para cada grupo funcional, as classes de precisão mais apropriadas para a aplicação do controlo do engrenamento radial:

- Grupo II (funcionamento silencioso e capacidade de carga): classes de precisão 6 a 10.
- Grupo III (capacidade de carga): classes de precisão 4 a 11.
- Serviço geral (sem requisitos funcionais especiais): classes de precisão 4 a 12.

Os erros admissíveis nas rodas padrão devem ser suficientemente pequenos quando comparados com os erros das rodas a controlar (aproximadamente 1:5). As classes de precisão previstas para as rodas padrão são as seguintes, [5, 18]:

- **Classe 2** - para verificação de controladores de engrenagens e própria para controlar engrenagens nas classes 4 e 5.
- **Classe 3** - para controlar rodas das classes 6 e 7. Estas classes são as mais utilizadas.
- **Classe 4** - para controlar rodas das classes 8 e superiores.

No controlo de rodas com um pequeno número de dentes deve evitar-se a ocorrência de contacto entre a cabeça dos dentes da roda padrão e a zona do perfil junto à concordância de pé da roda testada. Quando a roda tem um número de dentes $z_1 < 17$ ou um coeficiente de desvio $x_1 \geq + 0.7$, deve recorrer-se a uma roda padrão especial para permitir a verificação completa do flanco activo dos dentes.

Quando a largura do dentado da roda a testar é maior do que a da roda padrão, deve ser efectuada uma primeira medição a meio da zona engrenamento, complementada com medições nas zonas situadas a 20 mm dos bordos.

A força que assegura o contacto permanente das duas rodas, sem folga entre dentes, deve ser regulada em função do material das rodas, da largura do dentado e do diâmetro primitivo de corte, de forma a evitar a ocorrência de pequenas deformações dos flancos dos dentes que podem influenciar os resultados das medições.

O controlo do engrenamento radial pode ser aplicado, para além das rodas e engrenagens cilíndricas exteriores e interiores de dentados recto e helicoidal, a engrenagens de parafuso sem-fim / roda de coroa e engrenagens cónicas. A não existência de normas especificando tolerâncias apropriadas a este tipo de engrenagens é colmatada pela utilização dos documentos normativos relativos às engrenagens cilíndricas.

3.3 - Avaliação qualitativa dos erros individuais do dentado a partir dos diagramas do erro composto radial

O controlo do engrenamento radial permite detectar, de uma forma bastante rápida, a ocorrência de anomalias durante a fabricação. Vários documentos normativos, trabalhos publicados e catálogos técnicos apresentam interpretações dos diagramas que registam as irregularidades na transmissão do movimento, com vista a uma avaliação qualitativa de diferentes erros individuais do dentado, [5, 8, 9 e 19]. Na figura 3.2, estão representadas várias configurações de diagramas do engrenamento radial que permitem detectar a influência de diferentes erros individuais.

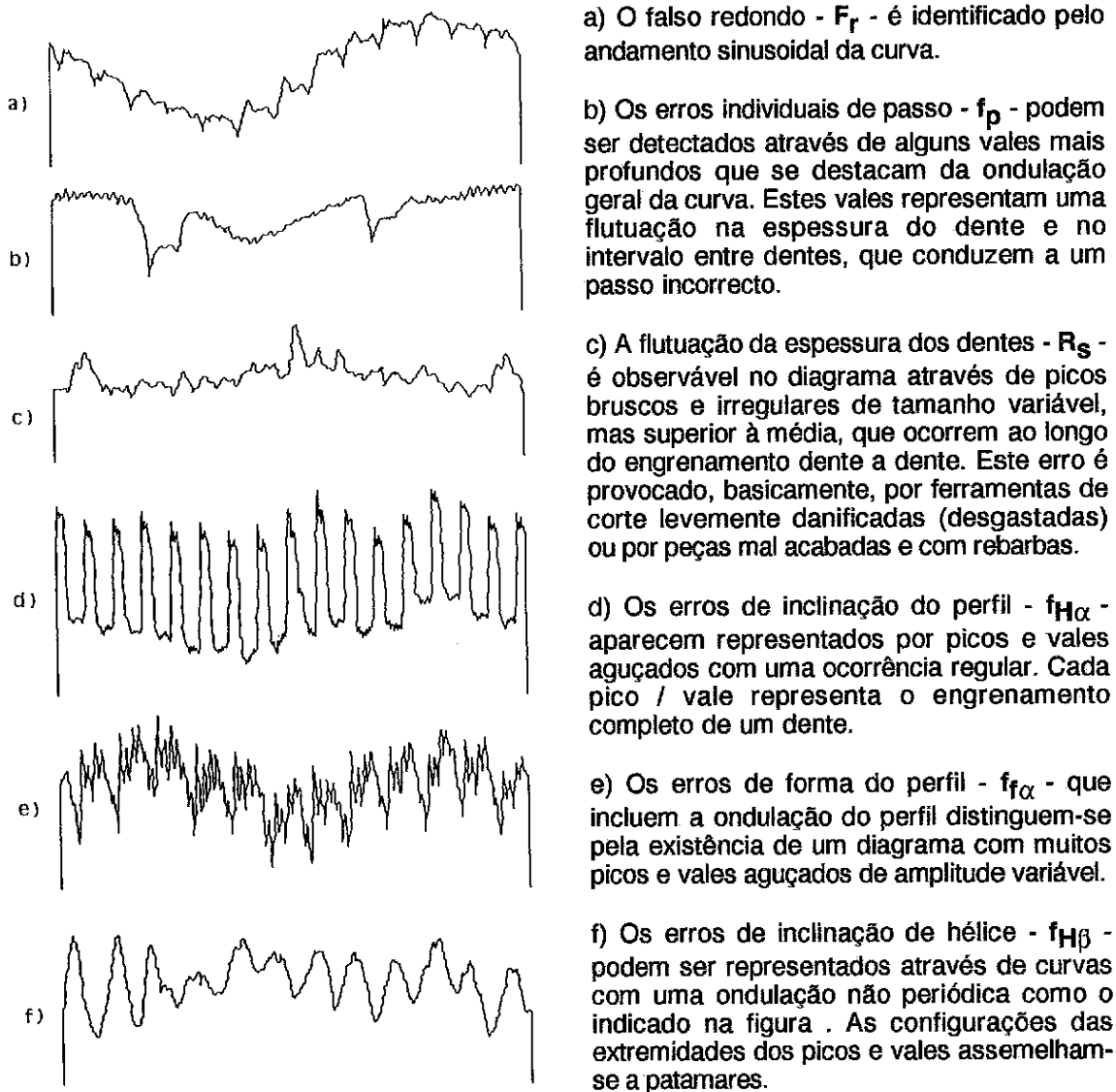


Figura 3.2 - Interpretação de diagramas do engrenamento radial

3.4 - Extensão e validade da informação disponibilizada

O controlo do engrenamento radial é um processo simples, económico e com bastante difusão. Este procedimento é apropriado, particularmente, para rodas que devem funcionar com uma folga entre dentes mínima, já que o registo das variações do entre-eixo tem praticamente o mesmo significado que o da folga entre flancos.

Este tipo de medição permite efectuar a prospecção da totalidade da superfície dos flancos dos dentes interveniente no engrenamento da roda testada e, conseqüentemente, detectar todos os defeitos não periódicos que podem provocar acelerações muito importantes e originar ruídos de choque. Estes defeitos podem ser provocados por acidentes de manutenção (mossas), por deterioração local de uma aresta da ferramenta de corte ou por uma avara aderente à ferramenta.

O salto do dente é um erro periódico cuja frequência depende da frequência de rotação e do número de dentes da roda testada. Os efeitos dinâmicos destes erros (acelerações importantes) podem afectar o nível sonoro de funcionamento (ruído de sirene), [9].

Por outro lado, o alcance deste processo de controlo é bastante limitado. O resultado das medições depende, entre outras características, da roda padrão conjugada, já que a razão de condução e o ângulo de pressão de funcionamento do par roda testada / roda padrão podem exercer uma forte influência.

Atendendo a que os valores registados dependem simultaneamente dos flancos esquerdos e dos direitos, os erros individuais das duas famílias de flancos podem-se reforçar, atenuar ou mesmo anular, de acordo com o respectivo sinal e a sua posição relativa, influenciando os resultados das medições. Não existem processos que permitam atribuir um determinado erro a um dos flancos, em particular.

Os diagramas do engrenamento radial podem apresentar, por vezes, andamentos idênticos para conjuntos de erros de perfil bastante diferentes, [20].

Na maior parte dos processos de maquinação de engrenagens, o dentado é criado por geração, produzindo-se ao mesmo tempo flancos esquerdos e direitos, dentro do campo de trabalho. Se o ângulo de pressão de funcionamento do engrenamento radial é igual ao de corte, este controlo faz intervir, na grandeza instantânea da medição, os mesmos pontos de contacto da talhagem, em idêntica posição instantânea de geração. Conseqüentemente, o diagrama do erro composto radial deverá mostrar, em primeiro lugar, as variações de entre-eixo ocorridas durante a operação de corte. No entanto, os defeitos cinemáticos do processo de geração, que dão origem a erros de perfil e também a erros de passo e de hélice, escapam à medição, não permitindo deduzir qualquer relação com erros de forma de flanco nem com erros de passo individuais e acumulados, [8].

Assim, o resultado de um controlo do engrenamento radial não deve, em geral, ser utilizado como elemento decisivo para caracterizar a qualidade global de uma roda. É perfeitamente possível que rodas com erros compostos radiais muito pequenos apresentem uma qualidade insuficiente em termos dos erros respeitantes a apenas uma família de flancos e portanto também relativamente ao seu comportamento em serviço.

Neste trabalho, efectuou-se uma análise de dois exemplares deste pinhão, produzidos em séries de fabrico distintas, que nos ensaios de funcionamento das máquinas foram identificados como causadores de um nível sonoro inaceitável, tendo-se, por isso, procedido à sua substituição.

Na figura 4.2, apresentam-se as condições de medição e os resultados do controlo do engrenamento radial de cada um dos veios-pinhão, com uma roda padrão da classe 3 com $z_L = 40$ e $x_L = 0.0$ de acordo com a norma DIN 3970 [18].

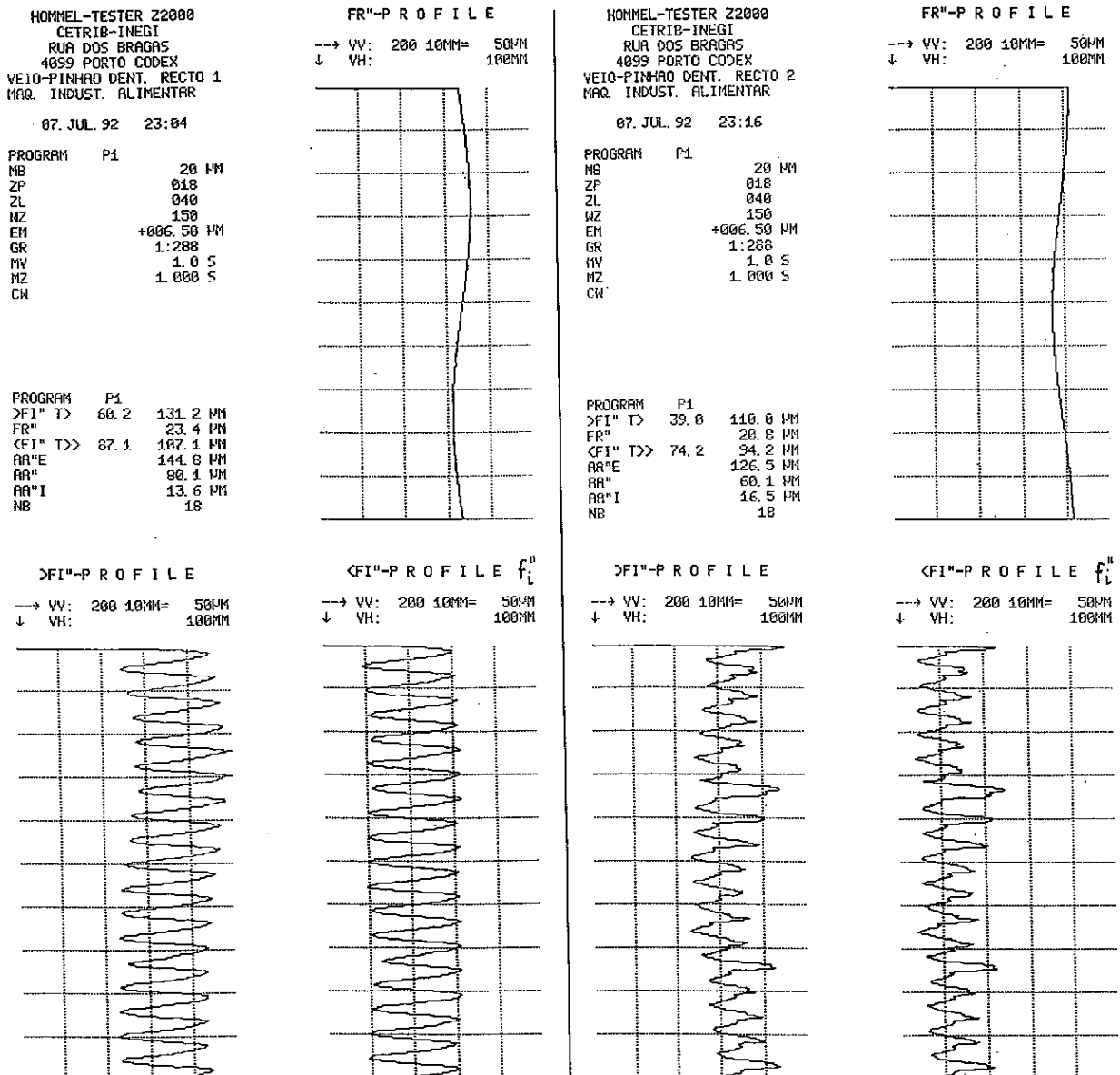


Figura 4.2 - Controlo do engrenamento radial de 2 exemplares de um veio-pinhão com $z_1 = 18$.

A análise dos gráficos de F''_i , F''_r , e f''_i , obtidos após ensaio, permite efectuar a seguinte avaliação qualitativa dos erros individuais do dentado de cada um dos pinhões:

- Pinhão 1 - erros de inclinação de perfil e alguma excentricidade dos dentes relativamente ao eixo da roda.

- Pinhão 2 - erros de inclinação de perfil menores, excentricidade dos dentes com uma ordem de grandeza idêntica à anterior, alguma flutuação da espessura dos dentes e mau afiamento da ferramenta de corte utilizada, observável através do aparecimento de irregularidades locais no andamento das curvas de F''_i e f''_i .

- Em ambos os pinhões não se detectam erros de passo assinaláveis, pelo que, o mecanismo divisor da talhadora deve estar em bom estado.

As possíveis origens dos erros individuais assinalados e o processo interpretativo dos gráficos estão descritos nas secções 1.2 e 3.3 deste texto.

Na tabela 4.1, podem comparar-se os valores numéricos obtidos nos ensaios, para F''_i , F''_r , f''_i e para os desvios máximo $A_{a''e}$ e mínimo $A_{a''i}$ da distância entre eixos do engrenamento radial a'' , com os valores especificados na normalização ISO e DIN e os desvios do entre-eixo a'' , correspondentes à qualidade ISO 7 FG especificada.

| Parâmetros | Pinhão 1 | Pinhão 2 | ISO 7 | DIN 7 |
|----------------|----------------|----------------|----------------|-------|
| F''_i | 131.2 | 110.0 | 71 | 22 |
| f''_i | 107.1 | 94.2 | 20 | 9 |
| F''_r | 23.4 | 20.8 | 51 | 13 |
| $A_{a''e}$ | +0.1448 | +0.1265 | | |
| $a'' A_{a''i}$ | 57.901 +0.0136 | 57.901 +0.0165 | 57.901 ± 0.020 | |

Tabela 4.1 - Comparação entre os resultados de ensaio e valores especificados na normalização.

Os dois pinhões analisados não respeitam a qualidade do dentado nem os desvios da espessura dos dentes especificados no projecto. Os valores registados permitem estabelecer a seguinte classificação dos exemplares controlados, em função dos diferentes parâmetros considerados:

Erro composto radial F''_i - pinhão 1: qualidades ISO 10 (140) e mais fraca do que DIN 12 (125);
- pinhão 2: qualidades ISO 9 (112) e DIN 12.

Salto radial f''_i - em ambos os pinhões, qualidades inferiores a ISO 12 (71) e a DIN 12 (50), tendo sido excedidos os valores admissíveis para a classe ISO 7 em todos os 18 dentes.

Falso redondo radial de trabalho F''_r - ambos os pinhões respeitam as qualidades ISO 7 e DIN 9 (27), definidas através da expressão (3.8).

As características avaliadas permitem classificar a talhagem efectuada como medíocre (figura 2.1). Esta circunstância pode ter as suas origens:

- na pouca rigidez da fixação entre pontos do pinhão na máquina de talhar;
- nas características de dureza do aço especificado (205 HB);
- no facto da talhagem ser realizada numa só operação de corte.

Os valores limite encontrados para a distância entre eixos do engrenamento radial a'' indicam que devem existir dentes, em ambos os pinhões, com espessuras superiores aos valores máximos especificados no projecto. O posterior controlo da cota tangencial sobre k dentes possibilitou a confirmação desta conclusão. Este facto deve certamente acarretar uma diminuição da folga entre dentes da engrenagem em funcionamento.

A frequência de rotação do pinhão em funcionamento (755 r.p.m.) origina uma primeira frequência do erro composto de 12.6 Hz e uma frequência do salto do dente de 226.5 Hz. Como as amplitudes do salto radial f''_i , verificadas nos ensaios, são elevadas e a sua frequência está dentro da gama audível (16 a 1.5E4 Hz), este erro apresenta características que justificam o aparecimento de um nível de ruído superior ao admissível, durante o ensaio de funcionamento do equipamento.

Conclusões

A avaliação do nível de qualidade dos sistemas de engrenamento, necessário para garantir as características funcionais pretendidas, é normalmente realizada através do controlo de parâmetros característicos, definidos e quantificados na normalização.

Os erros individuais de dentado (passo, perfil, flanco e falso redondo) podem ser controlados separadamente, através de diversos processos de medição (equipamento convencional e máquinas de medir 3D), mas, no entanto, apresentam quase sempre alguma interdependência.

O controlo dos erros de perfil e de flanco dos dentes é realizado, habitualmente, em apenas 3 ou 4 dentes da roda testada, o que por vezes pode dificultar a detecção de erros não periódicos.

O controlo do falso redondo só deve servir, de forma limitada, como critério de análise da qualidade funcional de uma roda dentada, sendo por isso subalternizado no projecto de revisão da norma ISO 1328.

No equipamento convencional, apesar do seu custo relativamente elevado, a medição do passo, do perfil, do flanco e do falso redondo requer diferentes aparelhos e bastante tempo de operação. As máquinas de medir 3D permitem reduzir bastante os tempos de execução das medições e facultam a emissão automática de documentação relativa ao ensaio, mas o seu custo atinge valores da ordem de 40 a 50 MEscudos.

O controlo dos erros individuais de dentado é indispensável na verificação de rodas padrão e de engrenagens de mecanismos de posicionamento e na regulação e correcção das talhadoras e rectificadoras, principalmente no início de cada nova série de fabrico de rodas dentadas de boa qualidade.

O controlo dos erros compostos permite verificar o efeito combinado dos erros geométricos individuais de duas rodas em trabalho. Estes erros podem ser imputados apenas a uma das rodas, se a roda testada for conjugada com uma roda padrão. Os processos de avaliação dos erros compostos são muito utilizados no controlo de fabricação.

O controlo do engrenamento tangencial não é, normalmente, de fácil concretização, mas é muito importante na avaliação da qualidade de engrenagens de grande precisão, quando se pretende uma transmissão com boa uniformidade.

O controlo do engrenamento radial permite detectar, de forma bastante rápida, a ocorrência de anomalias durante o processo de fabrico. Esta análise pode comportar, uma avaliação qualitativa da influência dos diferentes erros individuais de dentado na configuração do diagrama do erro composto radial, a quantificação dos parâmetros F''_i , f''_i e F''_r e a verificação indirecta da espessura dos dentes das rodas testadas com roda padrão, através do controlo de a'' .

Este processo de controlo é apropriado para rodas que devem funcionar com uma pequena folga entre dentes e permite efectuar a prospecção da totalidade da superfície dos flancos dos dentes. O custo do equipamento necessário a este tipo de ensaio pode variar entre 10 e 15 MEscudos.

Em termos do controlo de recepção, o resultado de um controlo do engrenamento radial não deve, em geral, ser utilizado como elemento decisivo para caracterizar a qualidade global de uma roda, mas é apropriado para estabelecer a qualidade de rodas com módulos muito pequenos.

O controlo do engrenamento radial é bastante útil para efectuar o controlo da fabricação em série de pequenas rodas.

O projecto de revisão da norma ISO 1328 estabelece que, na ausência de qualquer especificação de controlo, a qualidade de uma roda deve ser determinada, no controlo de recepção, a partir dos resultados do controlo de f_{pt} , F_p , F_{pk} , f_f , F_β , e, indirectamente, de F'_i .

Em aplicações particulares e após acordo entre o fabricante e o cliente, podem ser adoptadas classes de precisão distintas para parâmetros característicos englobados em diferentes grupos funcionais e dentro destes estabelecidas classes de controlo, de forma a evitar custos de produção elevados.

Agradecimentos

Os autores agradecem a colaboração técnica prestada pelo Engenheiro Altino Moreira da Silva, da empresa FELINO, S. A. .

Referências

- [1] - FAURE, L. - Evolution du Controle de la Precision des Engrenages Après la Revision de la Norme ISO 1328. 4èmes Journées d'Etudes Transmissions Mécaniques. ECAM Lyon: CETIM. 1990, p. 127-154.
- [2] - ISO / DIS 1328 - 1. 1990 - Cylindrical gears. ISO system of accuracy. Part 1: Definitions and allowable values of deviations relevant to corresponding flanks of gear teeth. ISO.
- [3] - ISO 1328. 1975 - Engrenages parallèles à développante - Système ISO de précision. ISO.
- [4] - DIN 3960. 1980 - Concepts and parameters associated with cylindrical gears and cylindrical gear pairs with involute teeth. DIN.

- [5] - VDI / VDE 2608. 1975 - Single flank and two flank composite error test of spur and helical gears with involute profile. VDI / VDE. (em alemão)
- [6] - FERREIRA JORGE; J.M. - Engrenagens - (Cálculo. Controlo Geométrico. Talhagem). Portugal: Ed. CETOP, 1983.
- [7] - MAAG GEAR BOOK (Calculation and Manufacture of Gears and Gear Drives for Designers and Works Engineers). Zurich: Maag Gear-Wheel Company Ltd, 1963.
- [8] - SN 215535. 1982 - Méthodes de contrôle des engrenages. Contrôle d'engrenages cylindriques à dentures en développante. VSM-SNV.
- [9] - GIGAND, R. - Considerations sur le contrôle des engrenages. Bulletin de la S.E.I.E. France. 1968, 55, p. 9, 22.
- [10] - ALMACINHA, J.A.; SEABRA, J.O. - Aplicação de Sistemas de Precisão Normalizados na Especificação da Folga Entre Dentes de Rodas Cilíndricas de Engrenagens Exteriores. O Controlo Dimensional da espessura dos dentes. Revista TECNOMETAL. Porto: AIMMN. 1992, 79, p. 7, 20.
- [11] - HENRIOT, G. - Traité Théor. et Pratique des Engrenages. 5^a ed. Paris: Dunod, 1983, tome 2.
- [12] - DIN 3961. 1978 - Tolerances for Cylindrical Gear Teeth. Bases. DIN.
- [13] - DIN 3962. Part 1. 1978 - Tolerances for Cylindrical Gear Teeth. Tolerances for deviations of Individual Parameters. DIN.
- [14] - DIN 3962. Part 2. 1978 - Tolerances for Cylindrical Gear Teeth. Tolerances for Tooth Trace Deviations. DIN.
- [15] - DIN 3962. Part 3. 1978 - Tolerances for Cylindrical Gear Teeth. Tolerances for Pitch-span Deviations. DIN.
- [16] - DIN 3963. 1978 - Tolerances for Cylindrical Gear Teeth. Tolerances for Working Deviations. DIN.
- [17] - DIN 3964. 1980 - Deviations of Shaft Centre Distances and Shaft Positions Tolerances of Casings for Cylindrical Gears. DIN.
- [18] - DIN 3970. Part 1. 1974 - Master Gears for Checking Spur Gears. Gear Blank and Tooth System. DIN.
- [19] - VSM 15535. 1954 - Engrenages à denture en développante. Directives concernant les méthodes de contrôle. Engrenages cylindriques. VSM.
- [20] - MUNRO, R.G. - Effect of Geometrical Errors on the Transmission of Motion Between Gears. Proc. Instn. Mech. Engrs. 1969-70, vol. 184, Pt 30, p. 79-84.