

Engrenagens automotivas: fatores de influência e exigências

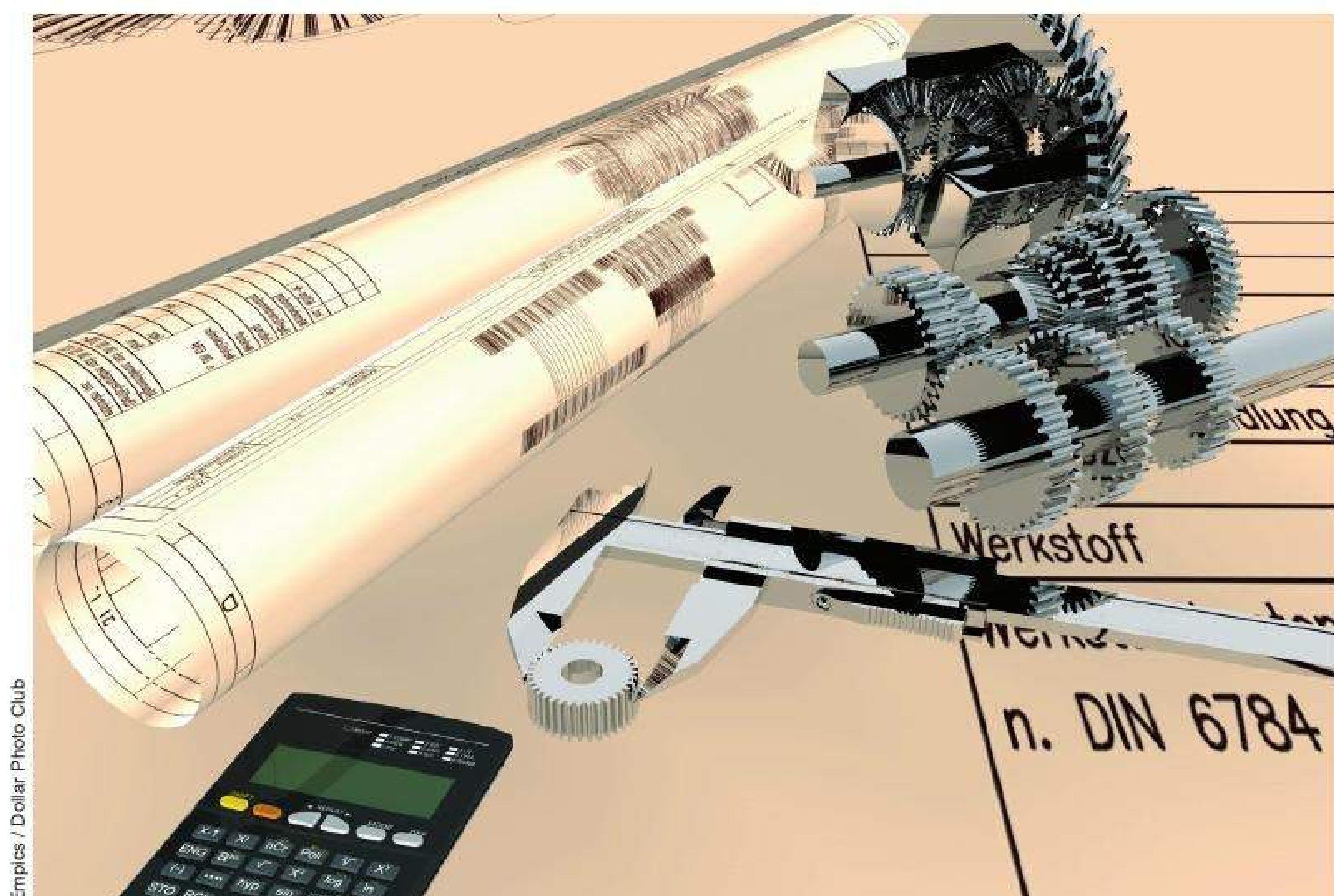
O que deve ser levado em conta no trabalho de transmissão feito por meio de engrenagens?

É possível encontrar engrenagens em uma infinidade de aplicações, que vão desde minúsculos relógios até enormes transmissões navais, passando por diversos dispositivos que utilizamos no dia a dia, tais como ferramentas elétricas, eletrodomésticos, veículos, etc.

As engrenagens são concebidas para transmitir torque e movimento de rotação

de um eixo para outro, tendo-se definida uma relação de velocidades entre eles e com os mesmos girando em sentidos opostos.

Os eixos dos dois elementos (motor e movido) de um engrenamento podem ocupar entre si diversas posições relativas. Em função disso, as engrenagens são construídas em diversos formatos (cilíndricas, cônicas, hiperboloides, para transmissão com corrente, entre outros). As engrenagens cilíndricas, tanto retas quanto helicoidais, constituem o sistema mais aplicado na indústria, sobretudo na automotiva, poden-



Empics / Dollar Photo Club

Exigências

do atingir altíssimas rotações e elevadas capacidades de carga.

Projetos de alto nível técnico levam em conta algumas exigências básicas que podem influenciar no trabalho de transmissão feito por meio das engrenagens, tais como: resistência, rendimento, precisão na transmissão, vida útil requerida, peso (que é fundamental em veículos rodoviários e aeroaviários, por exemplo), rumorosidade (baixo nível de ruído), estabilidade (baixo nível de vibração) e custo.

Com relação à resistência, os dentes devem ser capazes de suportar os esforços de flexão e pressão exercidos em seus flancos. Em outras palavras, os coeficientes de segurança à flexão e à pressão devem ser superiores a um valor mínimo arbitrado em função dos riscos inerentes àquela aplicação.

Todavia, é importante salientar que para a determinação desses coeficientes são necessários muitos outros fatores de influência (mais de 30) que são determinantes para a eficácia de um projeto e não devem ser confundidos com as exigências básicas do mesmo. Os fatores de influência são termos que integram as equações utilizadas para calcular os coeficientes de segurança, e os cálculos para a sua determinação são altamente complexos e requerem o uso de *softwares* especializados, tais como o aplicativo Progear.

Engrenagens automotivas – principais características

As engrenagens estão presentes em praticamente todas as partes de um veículo e exercem funções críticas no seu funcionamento. Por essa razão, é de fundamental importância estar atento a todos os fatores de influência que acabamos de mencionar.

Voltando aos coeficientes de segurança, a indústria automotiva tem adotado para a flexão SF_{\min} entre 1,40 e 1,50 e para a pressão SH_{\min} entre 1,00 e 1,20. O SF_{\min} , normalmente, é maior que SH_{\min} , já que uma fratura por flexão, em um ou mais dentes, determina o fim da vida de uma engrenagem, interrompendo o funcionamento do equipamento.

Muitos fatores contribuem para que essas condições sejam satisfeitas, entre eles a seleção do material e de seu tratamento térmico. Para atender às exigências descritas aqui, os aços para cementação são os mais adequados.

Outra condição fundamental para as aplicações automotivas é a intercambiabilidade. As tolerâncias dimensionais devem ser especificadas para que uma eventual substituição da peça não dificulte ou prejudique as condições de montagem ou de funcionamento.

Para que as engrenagens atendam a capacidade de carga necessária, elas devem



Pavlodargmynet / Dollar Photo Club

ser dimensionadas em função das condições de trabalho, que podem ser muito diferentes umas das outras.

A transmissão pode ser contínua e suave, sem reversões ou variações de torques, sem trancos ou sobrecargas, mas pode também ser intermitente, com muitas partidas por hora, com reversões frequentes, além de sofrer trancos, sobrecargas e trabalhar com grande variação de torque.

A combinação dessas irregularidades (provocadas tanto pelo motor quanto pela máquina movida) pode ser expressa pelo fator de aplicação KA. Para aplicações automotivas, valores de KA entre 1,25 e 1,50 são aceitos, já que os motores de combustão provocam choques moderados e a máquina movida, que neste caso é o automóvel, pode sofrer choques uniformes ou leves.

Com relação ao rendimento, à precisão na transmissão, à vida útil requerida e o peso, a qualidade do dentado tem forte influência. A norma DIN 3961 fornece 12 graus de qualidade para as rodas dentadas. A escala vai de 1 a 12, sendo o grau de qualidade

1 o mais preciso. A precisão da engrenagem é determinada pela exatidão de cada flanco de seus dentes e também pela exatidão do espaçamento entre esses dentes ao redor do cilindro, que é chamado passo. A exatidão aqui mencionada é função dos desvios máximos permitidos, também chamados microgeometria, nos diferentes graus de qualidade normalizados. A indústria automotiva adotou, para os seus diferentes dispositivos, graus de qualidade entre 6 e 8.

Com relação à rumorosidade e à estabilidade, além do grau de qualidade, que influencia sobremaneira o resultado da aplicação, outras características são relevantes: os graus de recobrimento de perfil e de hélice, a distância entre os mancais, os diâmetros dos eixos e as modificações nos flancos dos dentes, entre outras.

Quando em trabalho, podemos considerar as engrenagens como um sistema elástico vibrante, dotado de uma frequência própria de vibração e de certo grau de amortecimento sujeito a ação de impulsos.

O ruído provocado nas transmissões

por engrenagens é um dos problemas mais preocupantes, tanto para os usuários dos equipamentos quanto para os engenheiros. Não se trata apenas de um desconforto sonoro, mas de um indicativo de que algo pode não estar bem.

Nesse caso, o problema pode estar no projeto, na fabricação ou na montagem das engrenagens no equipamento.

De olho em mais detalhes:

■ Grau de recobrimento de perfil

O grau de recobrimento de perfil é a relação distância de contato/passos base. A distância de contato, também chamada duração de engrenamento, é o comprimento, na linha de ação, compreendido entre o início e o fim do engrenamento. Já o passo base é o passo circular medido ao longo da circunferência de base (ver figura 1).

Dessa maneira, o grau de recobrimento de perfil indica a quantidade de dentes engrena-

dos simultaneamente durante o ciclo de engrenamento. Exemplificando: se o grau de recobrimento de perfil de um par engrenado é 1,80, então, dois pares de dentes estarão em contato 80% do tempo e um único par de dentes estará em contato os outros 20% do tempo.

Para a maioria das aplicações automotivas é recomendável que o grau de recobrimento de perfil não seja inferior a 1,40, mas uma redução no nível de ruído e um acréscimo na capacidade de carga podem ser conseguidos com um grau de recobrimento de perfil = 2,00.

Não é fácil obter essa condição, pois ela depende das características geométricas das rodas, tais como número, tamanho (módulo) e altura dos dentes, entre outras. A maioria das aplicações automotivas possui grau de recobrimento de perfil entre 1,60 e 2,00.

Para a obtenção de um alto grau de recobrimento de perfil, dentes altos são indispensáveis. Sua altura chega a 80%, ou mais, da máxima permitida (onde os flancos anti-homólogos de um mesmo dente se encontram), deixando a espessura circular

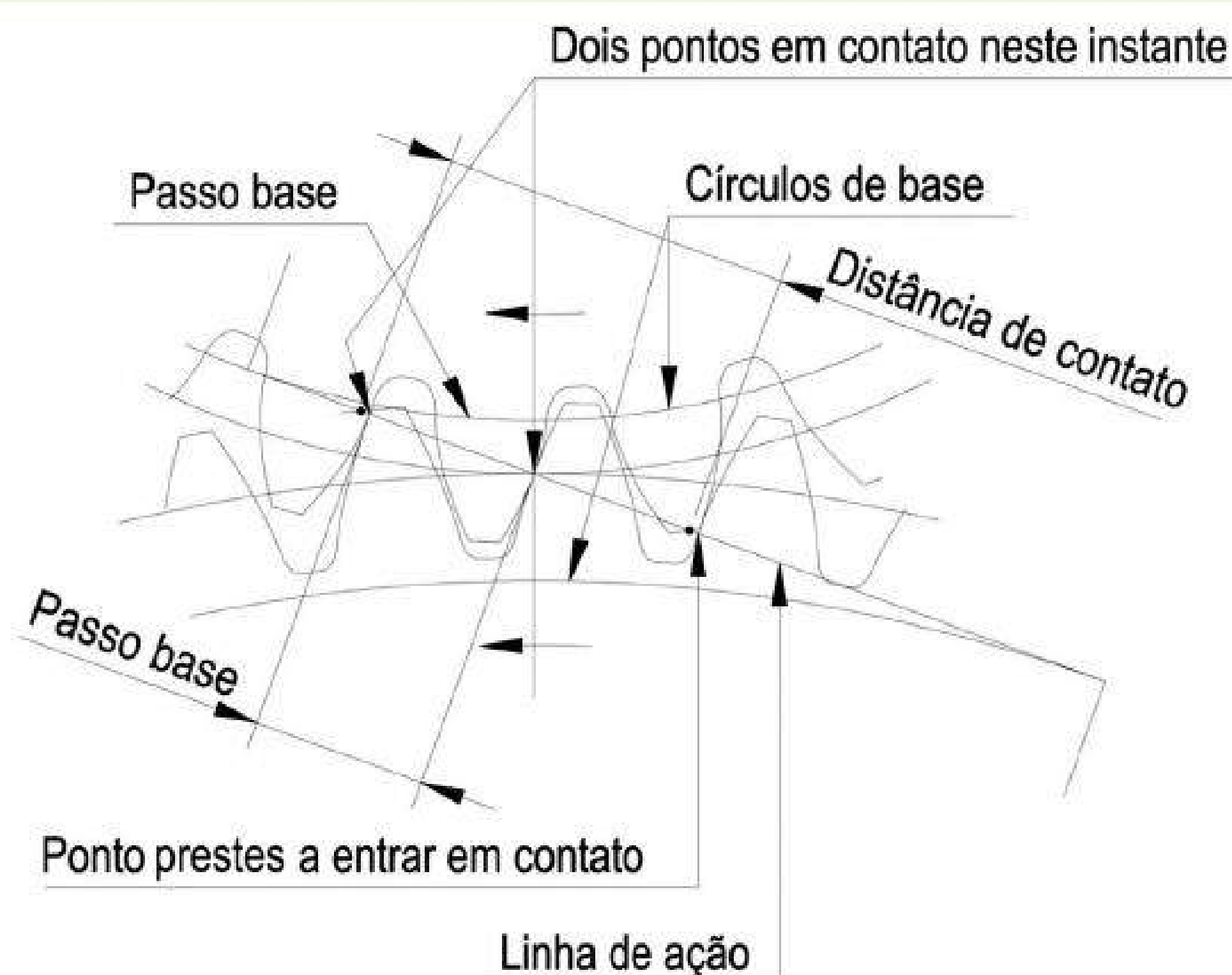


Figura 1:
Grau de
recobrimento
de perfil = 2

normal do dente na cabeça entre 25% e 30% do módulo normal.

■ Recobrimento de hélice

O grau de recobrimento de hélice é um número que determina a quantidade de pares de dentes que se engrenam simultaneamente ao longo da extensão de contato, verificado na direção axial. Esse valor para as rodas com dentes retos é zero.

Quanto maiores a extensão de contato e o ângulo de hélice, maior será o grau de recobrimento de hélice. O ângulo de hélice para as engrenagens automotivas, dependendo da aplicação (normalmente o ângulo de hélice é adotado em função da velocidade angular), chega a 35° sobre o diâmetro de referência (d).

Outra característica que pode reduzir o ruído é a modificação nos flancos dos dentes, feita no perfil evolvente e/ou na linha de flancos (linha que passa sobre o flanco, de uma lateral à outra do dente no sentido da hélice).

No tratamento térmico, o resfriamento é mais rápido na cabeça do dente porque há menos massa nessa região, e esse fenôme-

no pode provocar uma deformação do tipo protuberância. O resultado desse fenômeno é uma transmissão ruidosa.

Nas rodas onde os dentes não são beneficiados por um acabamento posterior ao tratamento térmico, uma modificação no perfil evolvente pode ser oportuna. A mais comumente aplicada é conhecida como perfil K, onde se mantém a evolvente exata com uma determinada extensão em torno da linha primitiva e, a partir dos extremos dessa extensão, procede-se um tombamento negativo, muito pequeno (ordem centesimal), uma em direção à cabeça e outra em direção ao pé do dente, cuja representação gráfica lembra a letra K (ver figura 2). Esses recuos se prestam a compensar as protuberâncias formadas no choque térmico.

Na linha de flancos, a modificação tem por objetivo minimizar os efeitos provocados pelos erros na direção da hélice (proveniente da fabricação), de paralelismo ou cruzamento dos eixos (provenientes das posições dos mancais e da elasticidade desigual da caixa), de flexão dos eixos, sobre-

Arquivo Norberto Mazzo

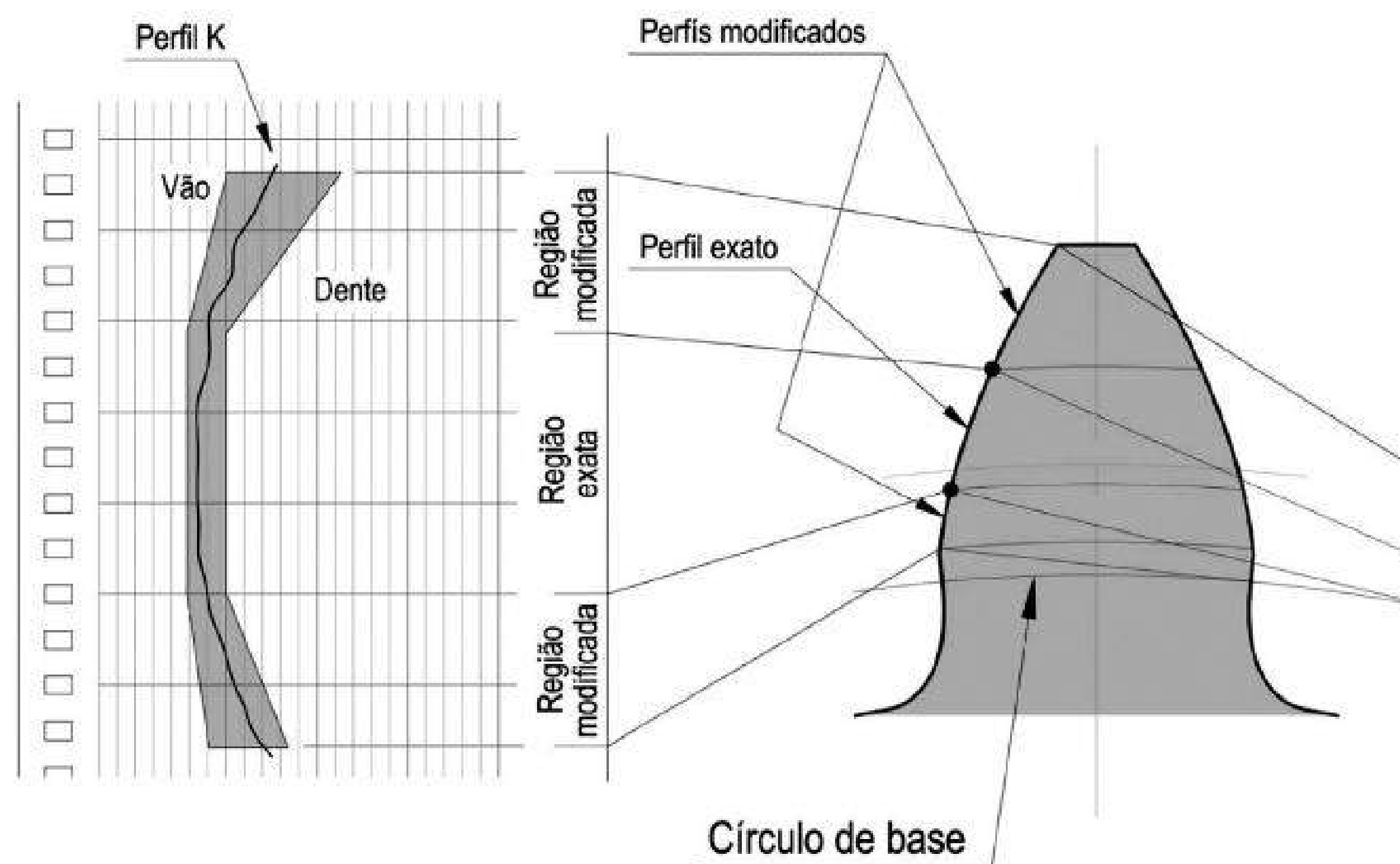


Figura 2:
Modificação do
perfil evolvente

tudo nas rodas posicionadas em balanço, entre outros. O principal benefício dessa modificação é uma melhor distribuição da carga ao longo da largura do dente.

A modificação mais utilizada nas engrenagens automotivas para a linha de flancos é o abaulamento (*crowning* – ver figura 3). Sua altura (flecha), também muito pequena (ordem centesimal), geralmente é determinada em função da largura do dentado.

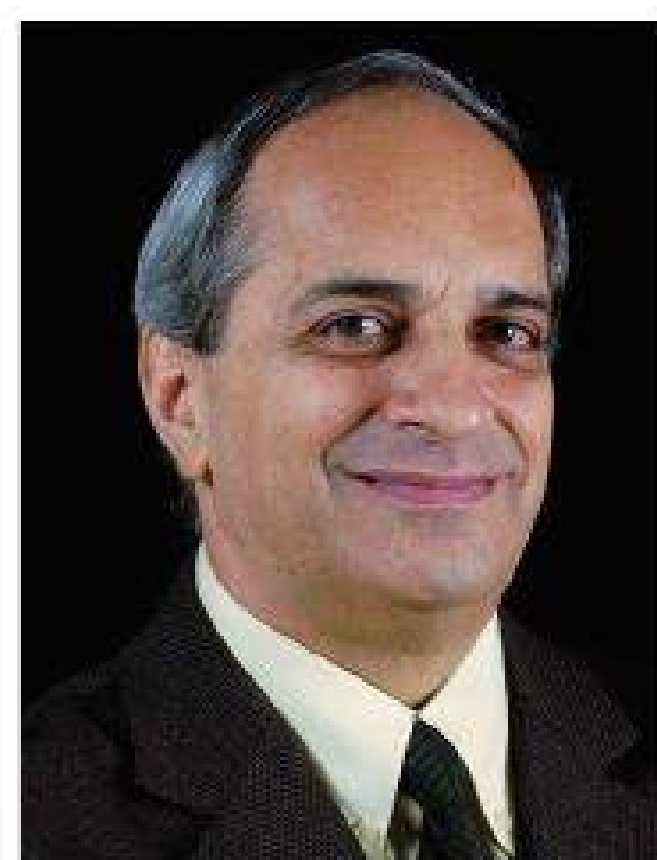
Custo – desafio maior?

A indústria automotiva tem buscado cada vez mais reduzir as dimensões das engrenagens e, conseqüentemente, seu custo e peso, por meio de melhoria da qualidade, o que significa respeitar tanto tolerâncias mais rigorosas quanto exigências de acabamentos superiores, mantendo-se a capacidade de carga.

Isso, porém, constitui um grande desafio para as engenharias, tanto a de produtos quanto a de processos, pois melhorar a qualidade implica, sem dúvida, economizar no material, no tratamento térmico, no tem-

po de usinagem e nas ferramentas de corte. Por outro lado, pode-se elevar o custo operacional para a retificação ou o *honing* (operações utilizadas para o acabamento nos flancos dos dentes, após o tratamento térmico), além do maior investimento com equipamentos e ferramental.

Enfim, a fórmula para a tão desejada matemática de se fazer mais com menos continua sendo o maior desafio na fabricação de engrenagens, incluindo as automotivas.

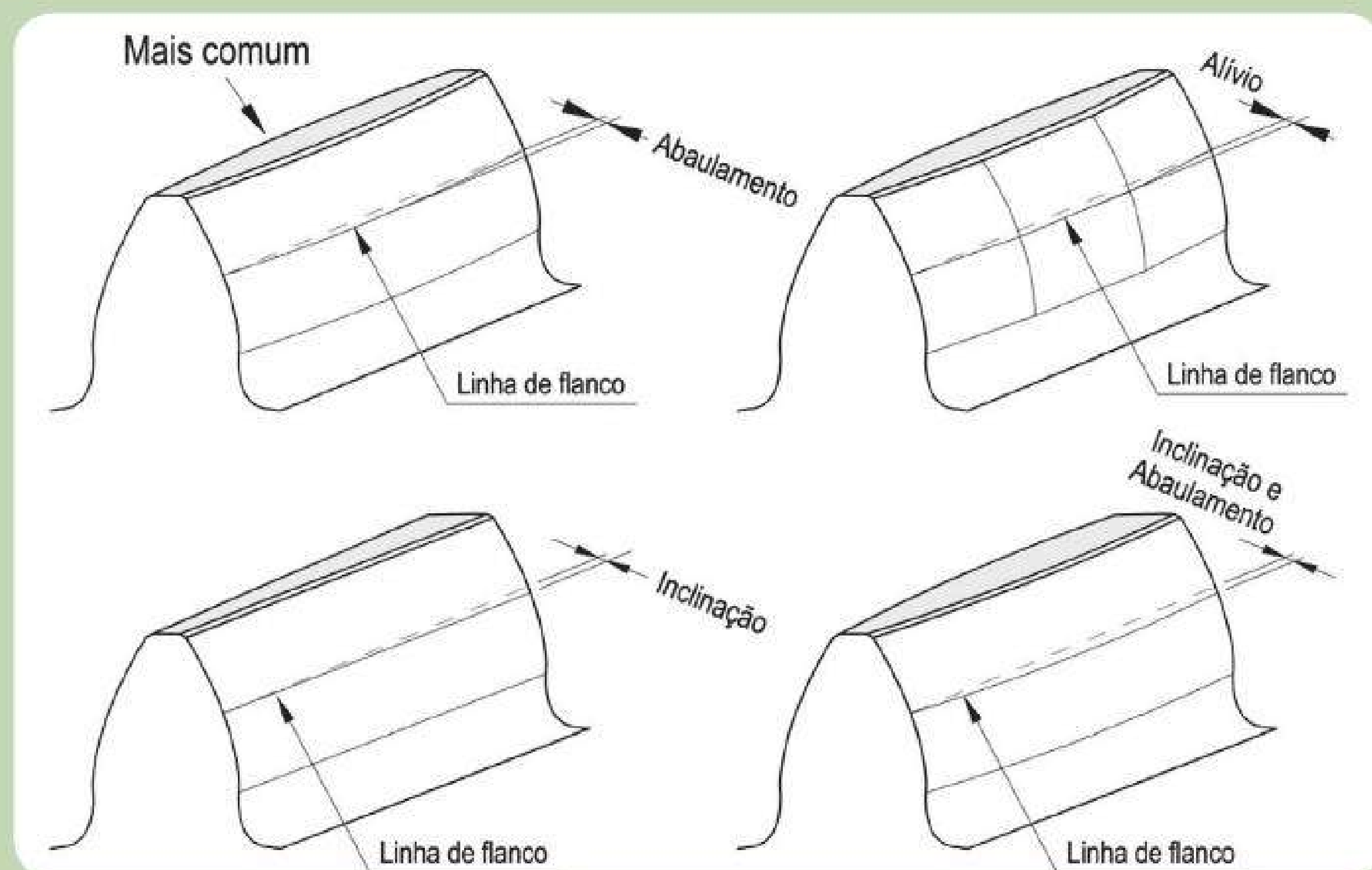


Norberto Mazzo
Consultor em
engrenagens

Companhia de Imprensa Assessoria

Para saber mais:

Mazzo, N., *Engrenagens cilíndricas – da concepção à fabricação*. 2ª edição. São Paulo: Blucher, 2013.



Arquivo Norberto Mazzo

Figura 3:
Modificação na
linha de flancos