



DESENVOLVIMENTO DE UMA INTERFACE COMPUTACIONAL APLICADA AO PROJETO DE SISTEMAS ENGRENADOS

Jorge Nei Brito

FUNREI – Fundação de Ensino Superior de São João del Rei - Departamento de Mecânica
Praça Frei Orlando, 170 – 36.300-000 – São João del Rei – MG – Brasil
E-mail: brito@gelnet.com.br

Marcelo Becker

Paulo Henrique Fialho de Freitas

Franco Giuseppe Dedini

UNICAMP – Faculdade de Engenharia Mecânica – Departamento de Projeto Mecânico
Caixa Postal 6051 – 13.083-970 – Campinas – SP – Brasil
E-mail: becker@fem.unicamp.br dedini@fem.unicamp.br

***Resumo.** Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento de uma interface computacional aplicada ao projeto de Sistemas Engrenados. Assim, a seqüência de projeto, trabalhosa e tediosa, devido à extensiva consulta a tabelas, gráficos e formulários, é eliminada. Essa interface permite que mudanças nas variáveis sejam rapidamente analisadas e que seu projeto final, otimizado, saia pronto para a execução, incluindo as tolerâncias admissíveis e o grupo de família para qual foi projetado.*

***Palavras chave:** Sistemas engrenados, Programa ENGRENA, Tecnologia de grupo, Controle dimensional, Correção de dentes.*

1. INTRODUÇÃO

As primeiras engrenagens de que se tem conhecimento são as da Carruagem Chinesa, 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 à qual 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 Arquimedes 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. 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

prestaram muita atenção para o problema de perfis de dentes cinematicamente corretos, o que permitiria uma relação de velocidades constantes (perfis conjugados). Embora a curva cicloidal já tivesse sido conhecida a mais de 200 anos, até 1674 ela ainda não fora empregada para perfis de dentes de engrenagens. No próximo século e meio, debateu-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 preferidos para a fabricação dos relógios. A primeira engrenagem cilíndrica de dentes retos e cônica, foram cortadas com a forma de *cut-ters*, a qual correspondia aos espaços entre os dentes. 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 aproximadamente os meados do século 19 ainda não havia aparecido as máquinas especiais para cortar engrenagens.

O desenvolvimento da siderurgia brasileira na década de 1970 ficou evidenciado pela sua grande expansão. A consequência desse processo é o reconhecimento internacional de que o Brasil é considerado um dos melhores fabricantes de aço plano. Nesse processo de desenvolvimento a siderurgia recebe a maioria de seus equipamentos do Japão. Após esse período houve como consequência natural, o aspecto competitivo, ou seja, outros fabricantes na busca de seu “market-share” introduziram equipamentos de alta qualidade. As modificações mais significativas no que se refere à transmissão de potência foram nos Sistemas Engrenados.

As engrenagens aparecem em quase todas as máquinas e desta forma são frequentemente projetadas. O que tem forçado o aperfeiçoamento das engrenagens é a exigência de que elas sejam mais econômicas, mais silenciosas, mais leves e com maior capacidade de transmissão de potência. As transmissões por engrenagens são usualmente projetadas utilizando métodos estáticos, com a aplicação de fatores empíricos para compensar os efeitos de carregamento especiais e das propriedades dinâmicas dos componentes do sistema. A partir da década de setenta, 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, objetivando a otimização do projeto do dente de engrenagem: (Kasuba & Evans, 1981; Lin & Huston, 1986; Lewicki, 1986; Queiroz & Brazzalle, 1978 e Milovic & Turrin, 1983).

Numa segunda linha de pesquisa, têm-se estudado o comportamento dinâmico global da transmissão devido às excitações geradas pelo engrenamento, incluindo os erros geométricos de fabricação, flexibilidade dos dentes e defeitos da superfície do perfil ativo dos dentes: (Randall, 1988; Umezawa & Houjoh, 1998; Magalhães, 1990; Brito, 1994; Velloso & Eduardo, 1993; Brito & Carlos, 1994; Brito & Neto, 1995; Brito & Neto, 1995; Brito *et al.*, 1998 e Brito & Neto, 1998).

Na convergência dessas duas tendências, surgem os sistemas automatizados de projetos de engrenagens. Assim, tem-se uma terceira linha de pesquisa voltadas para o desenvolvimento de programas para cálculo de engrenagens: (Dedini e Kurihara, 1997; Kurihara e Dedini, 1998; Rey *et al.*, 1998; Zapico *et al.*, 1998 e Pertence & Junior, 1998). Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento de uma interface computacional aplicada ao projeto de Sistemas Engrenados – Programa *ENGRENA*, fruto de um projeto de pesquisa financiado pela FAPEMIG – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais, (Brito, 1999). Assim, a seqüência de projeto, trabalhosa e tediosa, devido à extensiva consulta a tabelas, gráficos e formulários, é eliminada. Essa interface permite que mudanças nas variáveis sejam rapidamente analisadas e que seu projeto final, otimizado, saia pronto para a execução, incluindo as tolerâncias admissíveis e o grupo de família para qual foi projetado.

2. O PROGRAMA *ENGRENA*

O programa de dimensionamento de Sistemas Engrenados – *ENGRENA*, foi desenvolvido em Visual Basic 5.0. O programa realiza o dimensionamento de engrenagens cilíndricas de dentes retos e helicoidais, cônicas de dentes retos e parafuso sem-fim e coroa. Para o dimensionamento das engrenagens cilíndricas de dentes retos e helicoidais, o programa *ENGRENA* permite a geração dos dados geométricos, controle dimensional, estudo do perfil dos dentes e a geração dos desenhos a serem enviados à fabricação. Para todos os tipos de engrenagens o programa permite também a codificação das peças dimensionadas. A Fig. 1 mostra o fluxograma do programa *ENGRENA*.

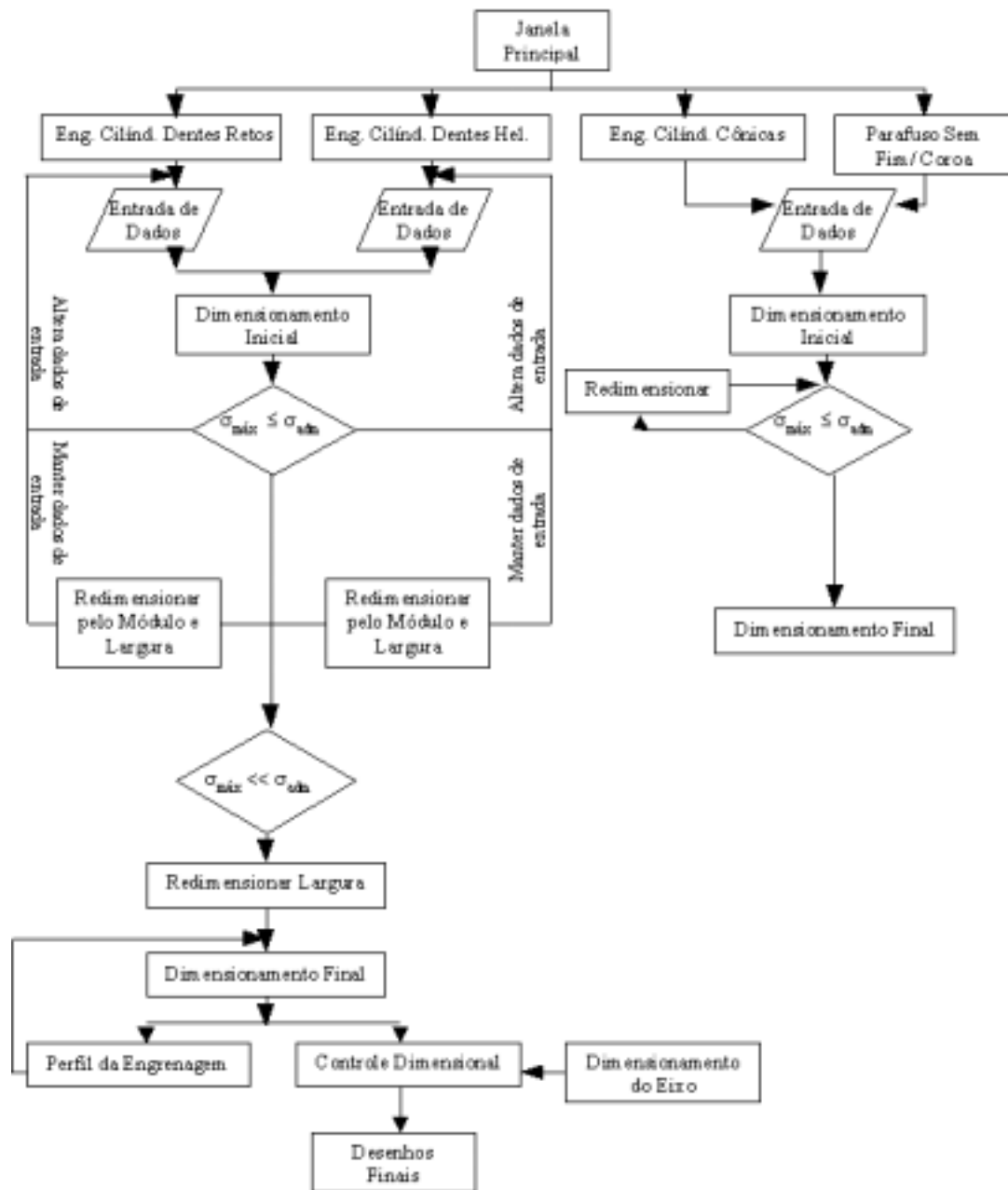


Figura 1 – Fluxograma do programa *ENGRENA*.

2.1 Entrada de dados

Ao iniciar o programa, o usuário pode escolher o tipo de par engrenado a ser dimensionado: engrenagens cilíndricas de dentes retos e helicoidais, cônicas de dentes retos e parafuso sem-fim e coroa. A seguir, é necessário entrar com os dados da engrenagem, do acionamento e do tipo de aplicação a qual a transmissão destina-se. O programa possui uma vasta biblioteca de tipo de aplicação que determinam os fatores de forma e serviço a serem utilizados no dimensionamento das transmissões (Melconian, 1995). A Fig. 2 mostra a tela de entrada de dados.

Figura 2 – Tela de entrada de dados.

2.2 Dimensionamento das engrenagens

Para o dimensionamento das engrenagens cilíndricas de dentes retos e helicoidais e das engrenagens cônicas de dentes retos, utilizou-se o critério do desgaste, também conhecido como “método bd^2 ”, onde b é a largura e d o diâmetro primitivo da engrenagem. Após o dimensionamento faz-se a verificação da resistência à flexão no pé do dente. Se o valor da tensão máxima no pé do dente superar o limite da tensão admissível do material escolhido, o programa oferece três opções ao usuário: manter o material escolhido e redimensionar o par engrenado pela largura ou pelo módulo; retornar à tela de entrada de dados e alterar apenas o material escolhido e retornar à tela de entrada de dados e alterar outras variáveis de projeto. A Fig. 3 mostra as telas de redimensionamento e dos resultados dos redimensionamentos.

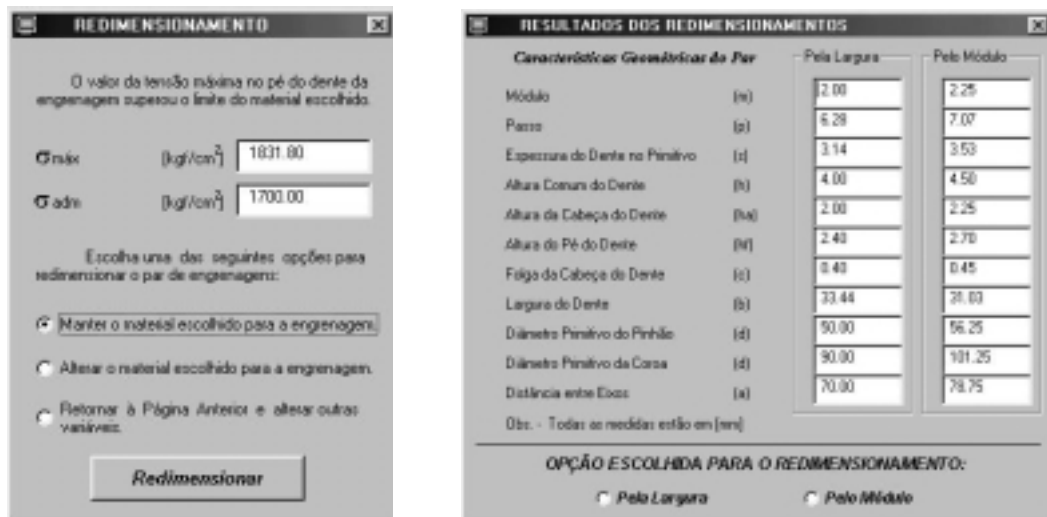


Figura 3 - Telas de redimensionamento do par de engrenagens.

No projeto do sem-fim e coroa, dimensiona-se a coroa para os critérios de resistência ou pressão de contato e no sem-fim, verifica-se a deformação que é causada pelas componentes da transmissão. Também é verificada a potência dissipada, que é transformada em calor, devido ao maior atrito durante a transmissão de potência do sem-fim e coroa.

2.3 Visualização do par de engrenagens projetado

A tela de resultados do dimensionamento do par de engrenagens projetado, Fig.4, mostra, além das características geométricas dos dentes, as características geométricas do pinhão e da coroa e os valores das tensões admissível (σ_{adm}) e máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$) a que o par está sujeito. Para evitar o superdimensionamento, o programa oferece ao usuário a opção de diminuir a largura das engrenagens, de forma que a tensão máxima fique compreendida no intervalo $[0,95 \sigma_{adm} ; \sigma_{adm}]$. Esta tela também permite visualizar cada engrenagem separadamente, engrenadas e em animação de engrenamento.

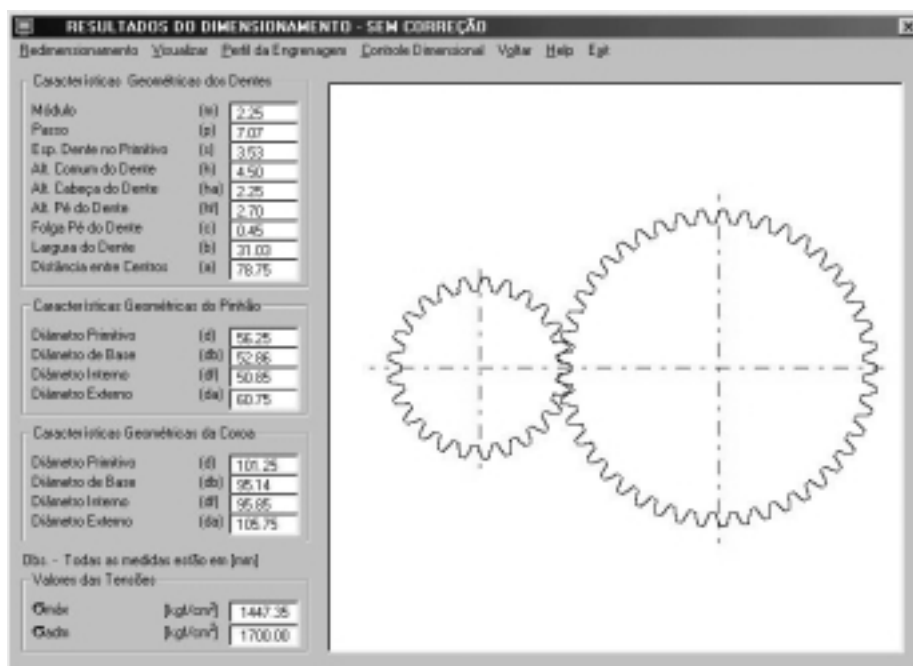


Figura 4 – Tela de resultados do dimensionamento.

2.4 Estudo do perfil dos dentes das engrenagens

O traçado do perfil de engrenagens torna-se necessário em diversas situações de projeto e de controle de qualidade, destacando-se:

- no projeto e no controle de ferramentas, tais como moldes de injeção, coquilhas para fundição sobre 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, 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 fácil ou rapidamente obtidos.
- no controle do perfil de engrenagens obtidas através de diferentes processos de fabricação, na falta de equipamento específico para esta finalidade.

Na solução analítica para determinação do perfil do dente das engrenagens cilíndricas de evolvente, com e sem correção, desenvolveu-se as curvas evolvente e trocóiide em coordenadas cartesianas e polares. Também foram estudados os tipos de engrenamento: zero, vê zero e vê (Queiroz, 1978; Milovit, 1983; Buckingham, 1949 e Maitra, 1985). Na tela de resultados do dimensionamento, Fig.4, tem-se a opção para este estudo. A Fig. 5, mostra a tela do traçado do perfil do pinhão.



Figura 5 - Tela do traçado do perfil do pinhão.

2.5 Estudo do controle da qualidade e erros de engrenamento

Na tela de resultados do dimensionamento, Fig.4, tem-se a opção para o estudo do controle da qualidade e erros de engrenamento em engrenagens cilíndricas. São estudados os erros de fabricação divididos em três categorias principais: inspeção do blanque, como corpo da engrenagem; inspeção do dentado e inspeção do dentado em posição de funcionamento (NBR 10095, 1989 e Brito & Neto, 1998).

Como dados de entrada o usuário deve fornecer: a qualidade desejada do par; diâmetro do furo do pinhão e da coroa e afastamentos superior e inferior desejados para o ajuste entre a engrenagem e o eixo onde ela será montada. O programa também calcula o diâmetro dos eixos onde as engrenagens serão montadas, utilizando o método de San Venant e Tresca. A Fig. 6 mostra as telas de entrada de dados e os resultados do controle dimensional.

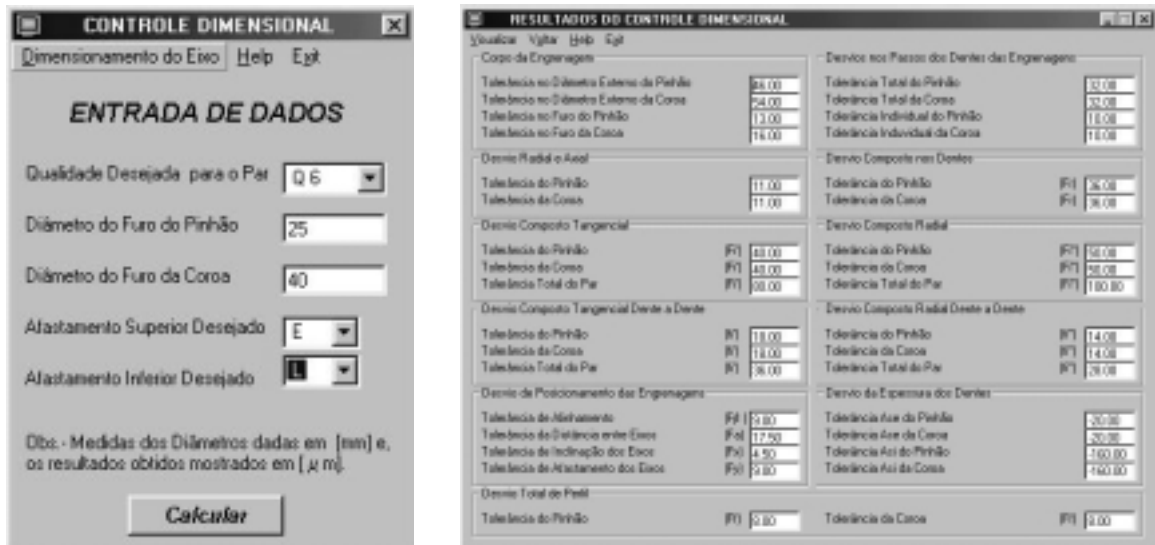


Figura 6 - Telas de entrada de dados e os resultados do controle dimensional.

2.6 Tecnologia de Grupo

Uma novidade que o programa *ENGRENA* trás é a aplicação da Tecnologia de Grupo. Uma das vantagens dessa técnica na área de projetos é a facilidade de recuperação das informações contidas nos desenhos de uma mesma família de peças para utilização no projeto de uma nova peça ou produto (Groover, 1984; Burbigde, 1975; Hyer, 1984; Hyer & Wemmerlov 1988 e Hyer 38). Ao invés de utilizar uma codificação automática, optou-se por ter uma tela própria para que o usuário realize a codificação. Essa opção permite que o usuário se familiarize com a tecnologia de grupo. A Fig. 7 mostra a tela de codificação da peça projetada.



Figura 7 – Tela de codificação da peça projetada.

2.7 Saída gráfica

Outra novidade que o programa *ENGRENA* apresenta é uma saída gráfica no ambiente Visual Basic, que permite a impressão do projeto final, pronto para fabricação, nos formatos A3 ou A4, Fig. 8.

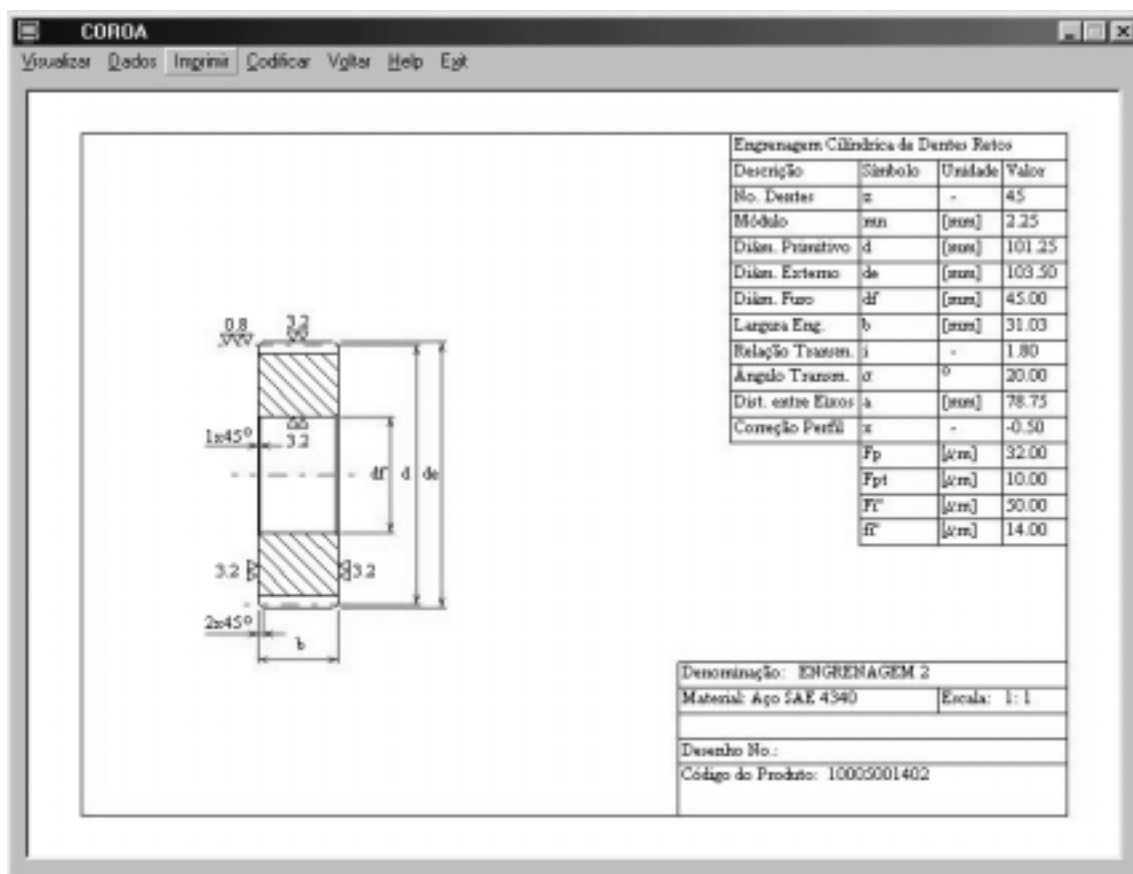


Figura 8 – Tela do desenho final da coroa.

3. CONCLUSÕES

Atualmente os programas de interface gráfica com o usuário, principalmente em ambiente Windows, vem adquirindo importância cada vez maior na área de projetos. Este trabalho além de permitir ao usuário a visualização de todas as telas de todo o processo de dimensionamento, permite uma saída gráfica em impressoras, no formato A4 ou A3. Dessa forma este trabalho torna-se uma poderosa ferramenta didática.

Atualmente encontra-se em fase de implementação a interface do programa *ENGRENA* com o *software* da MicroStation, que é uma poderosa ferramenta CAD, com excelentes saídas gráficas. Como sugestão de prosseguimento do trabalho, sugere-se a implementação de outras metodologias de dimensionamento, afim de que o usuário possa comparar os resultados obtidos pelos vários métodos de cálculo. Sugere-se também a implementação de dimensionamento de engrenagens de perfis especiais e do projeto das ferramentas para sua fabricação.

Agradecimentos

À FAPEMIG – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais pelo apoio ao Projeto TEC 1019/96 e ao Gabrielle Patrícious Khater da Flender do Brasil Ltda.

REFERÊNCIAS

Brito, J. N., 1999, Desenvolvimento de uma interface computacional aplicada ao projeto de sistemas engrenados, Relatório Final FAPEMIG, 135p.

- Brito, J. N., 1994, Estudo dos efeitos dos erros geométricos e dos defeitos superficiais de engrenamento no comportamento dinâmico de redutores de eixos flexível, Tese de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 106p.
- Brito, J. N. & Carlos, V. P. C., 1994, Desenvolvimento de um método interagido com CAD para análise dimensional de sistemas engrenados, Relatório Final do Projeto de Iniciação Científica, CNPq/PIBIC/FUNREI, 95p.
- Brito, J. N. & Carlos, V. P. C., 1995, Identificação da influência dos efeitos dos erros geométricos e dos defeitos superficiais nas vibrações medidas em redutores e multiplicadores, Relatório Final do Projeto de Iniciação Científica, CNPq/PIBIC/FUNREI, 112p.
- Brito, J. N. & Neto, F.P.L., 1995, Efeito de defeitos superficiais de engrenamento no comportamento dinâmico de redutores de eixos flexíveis, XIII Congresso Brasileiro e II Congresso Ibero-Americano de Engenharia Mecânica - COBEM-CIDIM/95, Belo Horizonte – MG - Brasil, Dezembro / 1995.
- Brito, J. N., Pinto, A. A. & Teatini, C. E., 1998, Identificação de defeitos superficiais tipo *pitting* em um motoredutor de velocidades através da análise de vibrações, 8º Congreso Chileno de Ingeniería Mecánica, Universidad de Concepción, Concepción - Chile, octubre, pp. 339 - 343.
- Brito, J. N. & Neto, F. P. L., 1998, 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, Nº 20, pp. 23 – 32.
- Buckingham, E., 1949, Analytical mechanics of gears, Second Edition, Dover Publications, Inc., 546p.
- Burbidge, J.L., 1975, Introduction of Group Technology, Ed. Heinemann, London.
- Dedini, F. G. & Kurihara, R., 1997, Desenvolvimento de um programa para projeto e visualização de engrenagens, nos anais do III Congresso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, Havana, Cuba, vol. 13, pp. 1 - 7.
- Groover, M. P. & Zimmers, J. R., 1984, CAD/CAM Computer aided design and manufacturing, Printice Hall, New Jersey.
- Hyer, N.L. & Wemmerlov, U., 1984, Group Technology and Productivity, Harvard Business Review, July-August.
- Hyer, N.L. & Wemmerlov, U., 1988, Assessing the Merits of Group Technology, Manufacturing Engineering, pp.107 - 109.
- Hyer, N.L. & Wemmerlov, U., 1989, Group Technology in the US manufacturing industry: a survey of current practices, International Journal of Production Research, vol.27, nº.8, pp. 1287 - 1304.
- Kasuba, R. & Evans, J. W., 1981, An extended model for determining dynamic loads in spur gearing, ASME: Journal of Mechanical, vol. 103, pp. 398 - 409.
- Kurihara, R. & Dedini, F. G., 1998, Desenvolvimento de um programa para apoio ao projeto de trens de engrenagens cilíndricas, nos anais do V Congresso de Engenharia Mecânica Norte Nordeste, Fortaleza – CE – Brasil, 27 – 30 Outubro / 1998, vol.1, pp. 25 - 32.
- Lewicki, D. G., 1986, Predicted effect of dynamic load on pitting fatigue life for low-contact-ratio spur gears, NASA TP-2610 ASVCOM TR-86-C-21, 20 p.
- Lin, E. H. & Huston, R. L., 1986, Dynamic loading on parallel shaft gears, NASA Contractor Report 179173, 76 p.
- Magalhães, F. L., 1990, Amplificação torcional em trens de acionamento modelo para impacto em engrenagens com folga, Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 211 p.
- Maitra, GM., 1985, Handbook of Gear Design, Tata McGraw - Hill Publishing Company Limited, 488p.

- Melconian, S., 1995, Elementos de Máquinas, 3ª Edição, Editora Érica Ltda., 273p.
- Milovici, M. & Turrin, M., 1983, Traçado do perfil de engrenagens cilíndricas de evolvente, Revista Mundo Mecânico, maio, pp. 2 - 7.
- NBR 10095, 1989, Engrenagens cilíndricas de evolvente, precisão dimensional, padronização, ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 43p.
- Pertence, A. E M & Junior, L. M. L., 1998, Desenvolvimento de um programa didático para o cálculo de engrenagens cilíndricas, Revista de Ensino de Engenharia da ABENGE – Associação Brasileira de Ensino de Engenharia, Nº 19, pp. 31 – 39.
- Queiroz, A. A. & Brazzalle, R. R., 1978, Determinação do perfil de engrenagens de evolvente com mini-calculadoras, Revista Mundo Mecânico, setembro, pp. 28 - 30.
- Randall, R. B., 1988, Cepstrum analysis and gearbox fault diagnosis, B&K Application Note 233-80, 20 p.
- Rey G.G., Toll, A. G. & Ballester, V. G., 1998, Procedimiento para la obtención de la geometría básica de engranajes cilíndricos a reconstruir, 8º Congreso Chileno de Ingeniería Mecánica, Universidad de Concepción, Concepción - Chile, octubre, pp. 51 - 56.
- Umezawa, K. & Houjoh, H., 1988, Estimation of the vibration of in-service gears by monitoring the exterior vibration, JSME International Journal, Series III, Vol. 31, Nº 3, pp. 588 - 592.
- Velloso, V. R. e Eduardo, A. C., 1993, Análise do desgaste nos dentes de engrenagens cilíndricas de dentes retos, Relatório Final do Projeto de Iniciação Científica, CNPq/PIBIC/FUNREI, 94p.
- Zapico, A. O., Sánchez, A. B. & Velasco, J. M. S., 1998, Possibilidades de empleo de los mecanismos planetarios simples de double engrane, 8º Congreso Chileno de Ingeniería Mecánica, Universidad de Concepción, Chile, octubre, pp. 57 - 60.

DEVELOPMENT OF A COMPUTATIONAL INTERFACE APPLIED TO THE DESIGN OF GEARS

Abstract. *In this paper, the development of a computational interface applied to the design of gears is presented. Using this interface, the tedious and laborious sequence of design, due to the extensive use of tables, graphics and formulas is eliminated. This interface allows that changes in the project variables should be quickly analyzed. So, the final project, optimized, is already to be done, including the tolerance adjusts and the design family group.*

Keywords: *Gear systems, ENGRENA program, Group technology, Dimensional control, Quality control.*