

# Software educativo para el diseño mecánico de ruedas dentadas en ingeniería.

M. Berzal

E. Gómez

C. Vereda

C. Barajas

J. Caja

P. Maresca

Grupo de Innovación Educativa:

“Nuevas metodologías docentes en ingeniería mecánica y de fabricación”

Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad Politécnica de Madrid

Ronda de Valencia, 3. Madrid, 28012. España

## RESUMEN

El cálculo y diseño de engranajes resulta ser en general una tarea difícil, ya que una vez conocidas las fuerzas que actúan sobre las ruedas dentadas, se han de calcular las tensiones que aparecen sobre los dientes. Las expresiones obtenidas de la normativa correspondiente dependen de infinidad de coeficientes, que ajustan las condiciones teóricas con las particulares de cada sistema, siendo éstos función del material, de la tolerancia, de las condiciones de trabajo, etc. Debido a la complejidad en la selección de los coeficientes los alumnos que afrontan el estudio de esta materia comenten todo tipo de errores, perdiendo el significado físico del cálculo de la tensión y de cada uno de los coeficientes modificativos.

Partiendo de las normas ISO 6336-1:2006, ISO 6336-2:2006, ISO 6336-3:2006, ISO 6336-5:15:2003 e ISO 6336-6:2006 se desarrolla una aplicación para:

1. Entender el significado físico de los coeficientes modificativos de la tensión flexión y de picadura.
2. Adquirir práctica en el diseño y en el cálculo de engranajes.
3. Obtener información más específica para aplicaciones específicas.

El programa se divide en cuatro secciones fundamentales: Apuntes, Introducción, Cálculos, y Estadísticas. Dentro de los *Apuntes*, se describen teórica y prácticamente todos los conceptos necesarios para el diseño de las ruedas dentadas. De la misma manera, en la *Introducción* se da una visión general de cómo funciona el programa, las principales secciones, cómo acceder a las ayudas, etc. Una vez desarrollados los conceptos teóricos y prácticos, es posible afrontar los *Cálculos*. Con un fin didáctico, tanto para el alumno como para el profesor se realizan unas *Estadísticas* con las que poder comparar los resultados obtenidos

## 2. ANTECEDENTES

El proceso para poder llegar a una aplicación ha tenido varias fases. En la primera aproximación se utilizaron las expresiones dadas por las normas AGMA tanto para el desgaste superficial como para la tensión en el pie del diente:

$$\sigma = W' K_O K_V' K_S \frac{K_H K_B}{b m_i Y_J} \quad \text{Ec. (1)}$$

$$S_F = \frac{\sigma_{FP} Y_N}{\sigma Y_\theta Y_Z} \quad \text{Ec. (2)}$$

$$\sigma_c = Z_E \sqrt{W^T K_O K_V' K_S \frac{K_H Z_R}{d_1 b Z_I}} \quad \text{Ec. (3)}$$

$$S_H = \frac{\sigma_{HP} Z_N Z_W}{\sigma_c Y_\theta Y_Z} \quad \text{Ec. (4)}$$

El mayor problema de la utilización de las ecuaciones anteriores son las unidades y la designación de los materiales que se realiza en el sistema anglosajón, diferente a los que los alumnos normalmente utilizarán en su próxima vida laboral.

En una segunda aproximación se utilizaron las normas DIN:

$$\sigma_F = \frac{W_{Fl} Y_F Y_\epsilon Y_\beta}{m_n} \quad \text{Ec. (5)}$$

$$S_F = \frac{\sigma_{FD} Z_R Y_S}{\sigma_F} \quad \text{Ec. (6)}$$

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{W_{Ht} u + 1}{d_1 u}} Z_H Z_M Z_\epsilon \quad \text{Ec. (7)}$$

$$S_H = \frac{\sigma_{HD} K_L Z_R}{\sigma_H} \quad \text{Ec. (8)}$$

Si se comparan las ecuaciones Ec. (1) a Ec. (4) con las ecuaciones Ec. (5) a Ec. (8) parece existir una gran

simplificación. Esto no es del todo cierto, ya que dentro de las fuerzas específicas se tienen en cuenta factores como el dinámico o el de aplicación.

En la fase actual se están utilizando las normas ISO 6336:

$$\sigma_{H0} = Z_H Z_E Z_\epsilon Z_\beta \sqrt{\frac{F_t}{d_1 b} \frac{u+1}{u}} \quad \text{Ec. (9)}$$

$$\sigma_{H1} = Z_B \sigma_{H0} \sqrt{K_A K_V K_{H\beta} K_{H\alpha}} \quad \text{Ec. (10)}$$

$$\sigma_{H2} = Z_D \sigma_{H0} \sqrt{K_A K_V K_{H\beta} K_{H\alpha}} \quad \text{Ec. (11)}$$

$$\sigma_{HP} = \frac{\sigma_{Hlim} Z_{NT}}{S_{Hmin}} Z_L Z_V Z_R Z_W Z_X = \frac{\sigma_{HG}}{S_{Hmin}} \quad \text{Ec. (12)}$$

$$S_{Hi} = \frac{\sigma_{HGi}}{\sigma_{Hi}} > S_{Hmin} \quad \text{Ec. (13)}$$

$$\sigma_{F0} = \frac{F_t}{b m_n} Y_F Y_S Y_\beta Y_B Y_{DT} \quad \text{Ec. (14)}$$

$$\sigma_F = \sigma_{F0} K_A K_V K_{F\beta} K_{F\alpha} \quad \text{Ec. (15)}$$

$$\sigma_{FP} = \frac{\sigma_{Flim}}{S_{Fmin}} Y_{\delta rel T} Y_{Rrel T} Y_X = \frac{\sigma_{FG}}{S_{Fmin}} \quad \text{Ec. (16)}$$

$$S_{Fi} = \frac{\sigma_{FGi}}{\sigma_{Fi}} \geq S_{Fmin} \quad \text{Ec. (17)}$$

Las ecuaciones Ec. (9) a Ec. (13) determinan el coeficiente de seguridad a desgaste superficial; por su parte las ecuaciones Ec. (14) a Ec. (17) determinan el coeficiente de seguridad a flexión en la base del diente. El proceso de selección y cálculo en este punto se ha complicado en gran medida. No por las operaciones aritméticas de dichas ecuaciones, sino por la selección de los coeficientes y de las propiedades de los materiales.

### 3. FASES DE DESARROLLO

El programa se ha desarrollado en tres fases fundamentales:

1. Desarrollo de hojas de cálculo para la norma AGMA y DIN simplificadas.
2. Desarrollo de aplicaciones para las normas DIN.
3. Desarrollo de aplicaciones para las normas ISO.

En la primera fase se realiza una hoja de cálculo. Dentro de ésta se agrupaban por un lado los coeficientes, las tensiones y los coeficientes de seguridad, tanto para desgaste superficial como para flexión en la base del diente. Como las ecuaciones utilizadas son muy simples, no se realizaba ningún tipo de programación sobre la hoja de cálculo, y una vez introducidos todos los parámetros, la hoja mostraba el coeficiente de seguridad. A pesar de que la hoja daba una visión de global del cálculo de las tensiones de trabajo y de los coeficientes de seguridad, no se podía separar del uso del manual donde se encontraban las tablas y gráficos de los cuales se extraían los coeficientes. En un par de tentativas posteriores, y para hacer más autónoma a la hoja de cálculo, se insertaron las tablas y los gráficos dentro de hojas del mismo libro. El resultado fue muy positivo y el tiempo de cálculo se redujo considerablemente debido a la organización de los conceptos dentro de la hoja.

Aunque con la creación de la hoja de cálculo se alcanzó una mayor comprensión y menor tiempo de cálculo, se pensó en integrar las tablas, y los gráficos una vez transformados en ecuaciones dentro de un programa de ordenador. Los primeros programas se realizaron en Fortran 90, bajo un entorno DOS.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Fuerza Específica de Trabajo w	625	Factor Dinámico Kv	1.0029680
Fuerza Específica de la Carga w1	625	Factor de Trabajo K1	1.25
Fuerza Específica de la Carga w2	945.210813	Índice de fuerza en relación a la calidad del diente Cq	11
Fuerza Específica de Trabajo w CR	625	Calidad	11
Fuerza Específica de la Carga w1 CR	625	Coeficiente de Carga CF	0.023
Fuerza Específica de la Carga w2 CR	1095.210813	Coeficiente de Distribución de Carga Frontal Kfa	1.51880845
Esfuerzo de Flexión 1 Mea	387.2526884	Factor de Distribución de Carga Frontal Kfb	1.747884771
Esfuerzo de Flexión 2 Mea CR	387.2526884	Factor de Forma del Diente YFa	3.06
Seguridad por Fatiga 1	0.82871109	Factor de Forma del Diente YG	3.09
Seguridad por Fatiga 2 CR	0.46481789	Factor de Carga Parcial Yc	0.588152861
Fuerza Tangencial N	15000	Factor de Carga Parcial Yd	0.572146291
Ancho de los Dientes mm	30	Factor de Inclinación angular Fbeta	1.4684476
Ancho de los Dientes mm conalesa	30	Entrada en el paso de engrane beta2 micras	80
Velocidad Periferia m/s	0.1	Factor auxiliar q1	1
módulo normal mm	5	Fbeta	500
Coeficiente de engrane e1	1.51880845	Factor de Rugosidad Z1	0.8
Coeficiente de engrane crenail	1.747884771	Factor de Rugosidad Z2	0.8
d1 mm	42.5	Factor de Entaladura	1
d2 mm	42.5	Entrada de datos	
R cabeza 1 mm	47.5		
R cabeza 2 mm	47.5		
R base 1 mm	39.93693638		
R base 2 mm	39.93693638		
Ángulo de Presión	0.34906585		
Resistencia a Fatiga 40°C/45/MPa	290		
Resistencia a Fatiga 45°C/45/MPa	200		
Y1	17		
Y2	17		
Relación de Transmisión u	1		

Figura 1. Fase Iª: Utilización de una hoja de cálculo para el cálculo del coeficiente de seguridad.

Dentro del programa se incluyeron las tablas y los gráficos, de tal forma que el programa preguntaba sobre los distintos coeficientes, y posteriormente realizaba de una forma controlada por el usuario la selección del parámetro requerido. El programa era sencillo y rápido, pero no contaba con un entorno gráfico donde realizar las selecciones. Se sopesaron las diferentes posibilidades y se optó por actualizar la aplicación de Fortran 90 a Visual Basic. El Visual Basic tiene la gran ventaja de generar un formularios y objetos gráficos de una manera más o menos sencilla, muy diferente a la se podría hacer con otros lenguajes de programación. Se podrían haber utilizado un lenguaje de más alto nivel que gestionase mejor los recursos del ordenador e hiciese que el programa fuese más rápido. Pero se optó por la sencillez ante la programación y ante futuras actualizaciones. La versión en Visual Basic ganó en claridad y en la interfase de entrada y salida de datos.

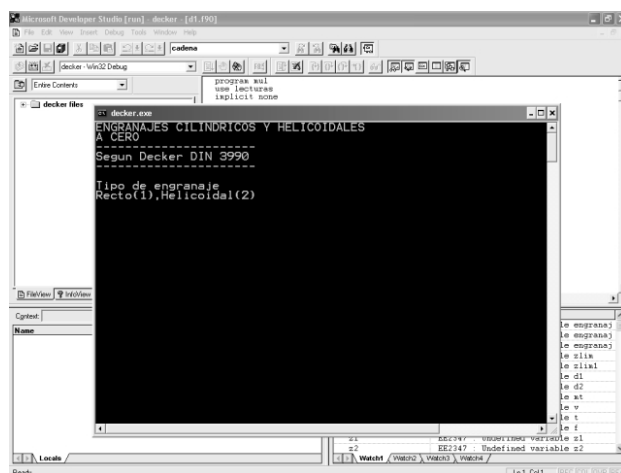


Figura 2. Fase II: Utilización de programas en Fortran 90 y en Visual Basic para la determinación de la tensión de trabajo y el coeficiente de seguridad.

La fase de desarrollo actual, sigue manteniendo al Visual Basic como lenguaje de programación, aunque para cálculos más complejos se utilizan librerías hechas en Fortran 90, cambiado la normativa de cálculo a la ISO 6336. La norma se divide en cinco partes partes:

1. Conceptos básicos y factores de influencia.
2. Cálculo del diente a desgaste superficial.
3. Cálculo del diente a flexión.
4. Propiedades de los materiales
5. Cálculo bajo cargas variables.

Como se ha visto en la introducción se ha pasado de un método más o menos simplificado en las primeras fases, a un estudio más general.

#### 4. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SOFTWARE

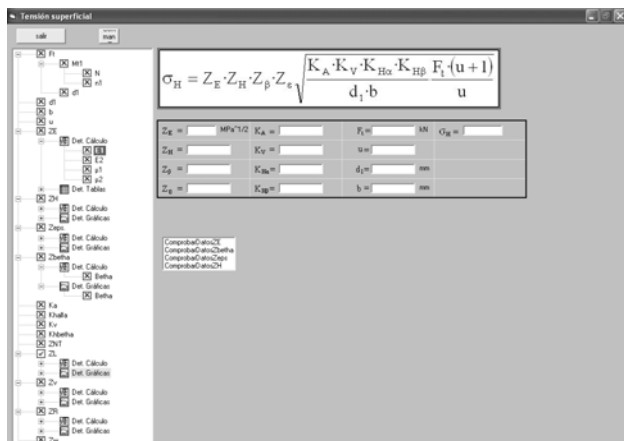


Figura 3. Esquema de cálculo de la tensión superficial. En la izquierda de la pantalla se muestra el conjunto de coeficientes utilizados en la expresión y el estado de cálculo de cada uno. También muestra la posibilidad de obtener los parámetros mediante tablas o gráficos. Una vez completado el cálculo aparece el resultado de la tensión en la parte central de la pantalla.

El programa informático se divide en las siguientes partes:

1. Introducción
2. Apuntes
3. Cálculos
4. Estadísticas

La primera parte es el esquema de funcionamiento del programa. Debido a lo general del mismo, esta sección tiene como objetivo primordial no perder el sentido de los cálculos y de la selección de los distintos parámetros. Por este motivo, aunque se trate de la parte más generalista y con menos contenido científico, se trata de una de las más importantes para la comprensión física del cálculo.

Aunque los conceptos teóricos deben ser asimilados desde una fuente exterior, en este caso las clases o las normas, se cuenta con una serie de ayudas estáticas que facilitan al alumno la comprensión de algún paso del cálculo en concreto. El sistema de ayuda se realiza en un procesador de texto, partiendo de una plantilla, y posteriormente impreso en un fichero “pdf” (portable document format) Este tipo de archivos permite la lectura y la impresión sin que el usuario pueda modificar los contenidos del mismo.

El núcleo del programa está constituido fundamentalmente por los módulos de cálculo y selección de los coeficientes. La

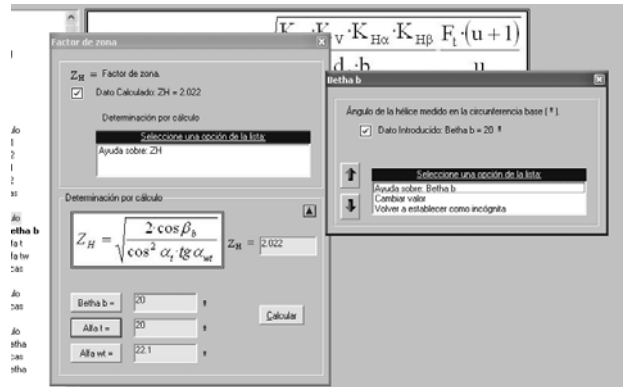


Figura 4. Entrada del factor de forma Z<sub>H</sub> utilizando las ecuaciones dadas en la norma. Antes de poder obtener un coeficiente se han de determinar todos los parámetros de los que depende Z<sub>H</sub>, casillas azules.

ventaja que tenía la hoja de cálculo frente a los programas posteriores era la visión global que daba, ya que esquematizaba el cálculo en unas pocas casillas. Esto se había perdido completamente con las aplicaciones en Fortran y Visual Basic. Para retomar este concepto, en la versión actual existe un registro de todos coeficientes que proporciona información sobre la situación del cálculo de cada parámetro. Así en el formulario principal de cálculo aparece la expresión general y un esquema con los coeficientes calculados y no calculados. La norma da la posibilidad en muchos factores, de que éstos se calculen analíticamente o gráficamente. El programa incorpora ambas opciones. La opción analítica se basa en la introducción de los datos en un formulario, mientras que la visual presenta el gráfico en el formulario y el usuario selecciona el punto en el mismo.

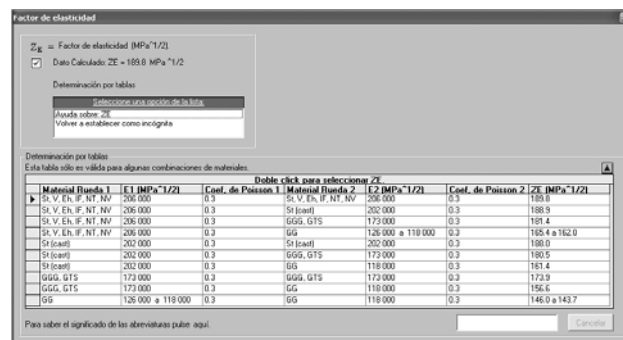


Figura 5. Ejemplo de la utilización de la base de datos de materiales para el cálculo del factor de elasticidad.

Los cálculos anteriores dependen de una forma muy importante del material y de las tolerancias que se obtengan en el sistema final. De la importancia de éstos, surge la necesidad de crear una base de datos accesible en cualquier parte de cálculo. Ésta incorpora las propiedades mecánicas necesarios para el cálculo de los engranajes. La ventaja fundamental de esta forma de trabajo reside en la actualización externa que se realiza de los datos, sin tener que tocar ni una línea de código del software de cálculo.

La sección de estadísticas recoge la utilización y el tiempo de resolución de los problemas propuestos. Esta función además de crear un registro de las actividades que se llevan a cabo con el programa, permite al alumno y al profesor llevar un control del

tiempo empleado en cada uno de los coeficientes y en cada uno de los cálculos. Estos datos se tratan posteriormente, para posibles mejoras y análisis.

## 5. CONCLUSIONES

El objetivo fundamenta de este software *es crear una guía para guiar el aprendizaje de los alumnos*, de tal forma que en cada momento del cálculo comprendan físicamente el significado del mismo, para futuras generalizaciones en las aplicaciones a diseñar.

El Grupo de Innovación Educativa “**Nuevas Metodologías Docentes en Ingeniería Mecánica y de Fabricación**” de la Universidad Politécnica de Madrid está realizando programas y simulaciones por ordenador con el fin de mejorar la enseñanza de las enseñanzas técnicas. Según la experiencia del grupo, el alumno trata de acceder al conocimiento haciendo pequeñas parcelas de tareas reiterativas, especialmente en la parte práctica de las asignaturas, dejando a un lado la gran capacidad de generalizar que dan los conceptos teóricos.

El programa formaría parte del conjunto de prácticas de simulación que los alumnos llevarían a cabo en las instalaciones de nuestros laboratorios de nuestro Departamento.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] International Standard ISO 6336-1. Basic principles, introduction and general influence factors.
- [2] International Standard ISO 6336-2. Calculation of load capacity of spur and helical gears. Calculation of surface durability.
- [3] International Standard ISO 6336-3. Calculation of load capacity of spur and helical gears. Calculation of tooth bending strength.
- [4] International Standard ISO 6336-5. Calculation of load capacity of spur and helical gears. Strength and quality of material.
- [5] International Standard ISO 1328-1. Cylindrical gears- ISO system.accuracy- Part 1: Definitions and allowable values of deviations relevant to corresponding flanks of gear teeth.
- [6] K.H. Decker Maschinenelemente. Fachbuchverlag Leipzig, 2000.
- [7] G. Gonzalez Rey, Gonzalo Cálculo de Engranajes Cilíndricos. CUJAE, 2001
- [8] P. Lafont. Cálculo de engranajes paralelos. ETSII 1997.
- [9] T. E. Shoup Using spreadsheet modules to augment the desing of spur gear teeth. 10<sup>th</sup> IFToMM congress in Finland (vol 4, pg 1770-1775)
- [10] J.I. Pedrero, A. Rueda, A. Fuentes. Determination of the ISO tooth form factor for involute spur and helical gears. Mechanism and Machine Theory 34 (1999) 89-103
- [11] M. Berzal, E. Gómez , C. Barajas , Caja J. Programa de aprendizaje para el cálculo de engranajes cilíndricos rectos y helicoidales según normas DIN. Jornadas de Innovación Educativa. Escuela Politécnica de Zamora junio de 2006. ISBN: 84-689-9304-2
- [12] E. Gómez, M. Berzal, C. Barajas, J. Caja, V. Bernardo. Metodología docente interactiva para el aprendizaje de tecnología de fabricación. Jornadas de Innovación Educativa. Escuela Politécnica de Zamora, junio de 2006. ISBN: 84-689-9304-2
- [13] K.H. Decker. Elementos de Máquinas. URMO, 1980.
- [14] J.E. Shigley, C.R. Mischke, Diseño en Ingeniería Mecánica. Sexta Edición. McGrawHill. 2004