

## Capítulo 4

### Módulo de Tensiones

Con este módulo comprenderá la distribución de tensiones que se origina en un contacto esférico; particularizará la geometría de los cuerpos, las propiedades del material del que están fabricados, así como crear uno ficheros importantes de configuración para los módulos siguientes. Tenga siempre presente que el objetivo final de la aplicación es predecir la vida de los elementos del contacto, así que el procedimiento está orientado hacia tal fin.

Se presentan una serie de apartados que van desde la descripción del módulo, hasta su utilidad; además aparecen las distintas posibilidades que presenta el conjunto del programa.

#### 4.1 Funcionalidad del módulo

Para calcular las tensiones en el contacto, debemos hacer uso del Módulo de Tensiones. Desde la pantalla de presentación se accede a través de la barra de menús de “Módulos”, en la opción “Cálculo de Tensiones” y “Contacto esférico” (ver figura 4.1)

En la figura 4.2 se muestra el aspecto de la ventana del módulo. La barra de menú ofrece algunas posibilidades interesantes.

- Archivo: alberga la opción “Cerrar” que permite abandonar el módulo y regresar a la pantalla inicial.
- Datos: contiene dos opciones bastante interesantes, referentes al tratamiento de ficheros (se volverá a hablar de ellas más adelante);
  - Exportar fichero de Datos Iniciales
  - Exportar Fichero de Resultados
- Ayuda: proporciona la información de versión del programa, al igual que en la pantalla inicial.

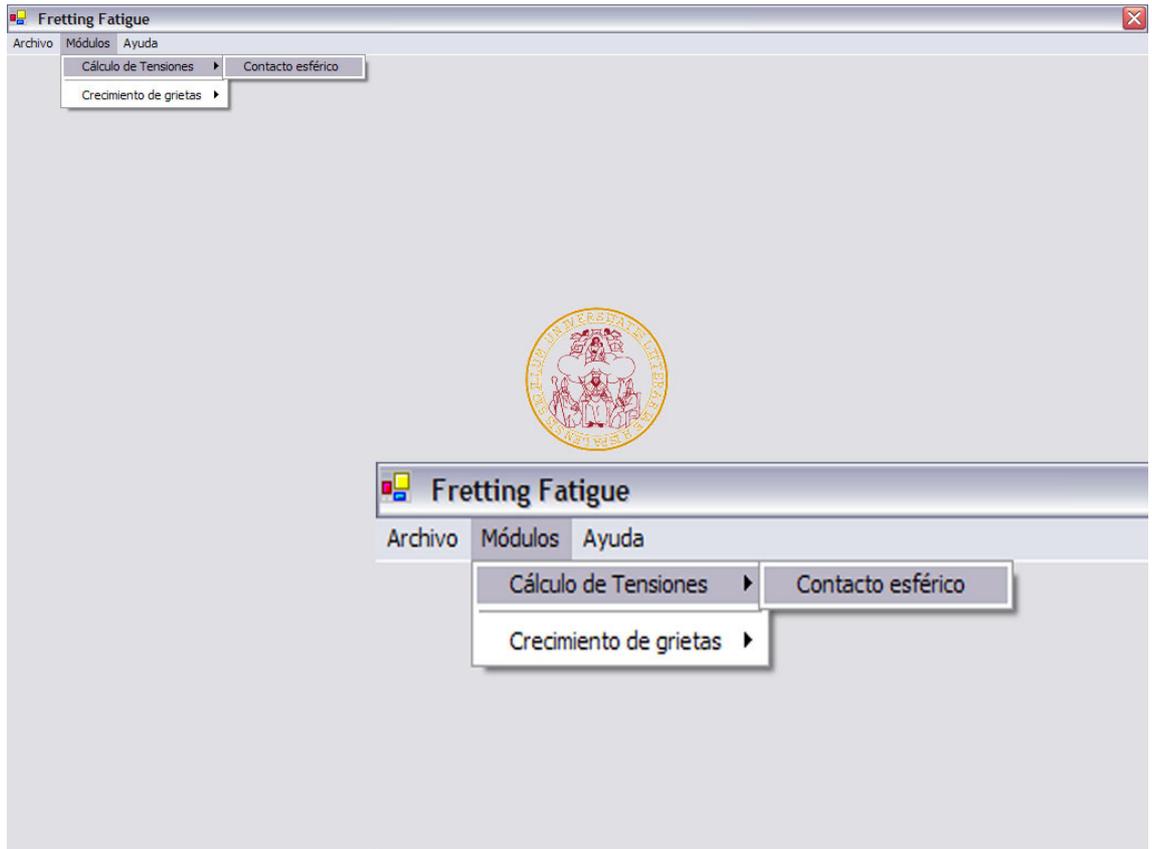


Figura 4.1: Acceso al Módulo de Tensiones desde la pantalla de presentación.

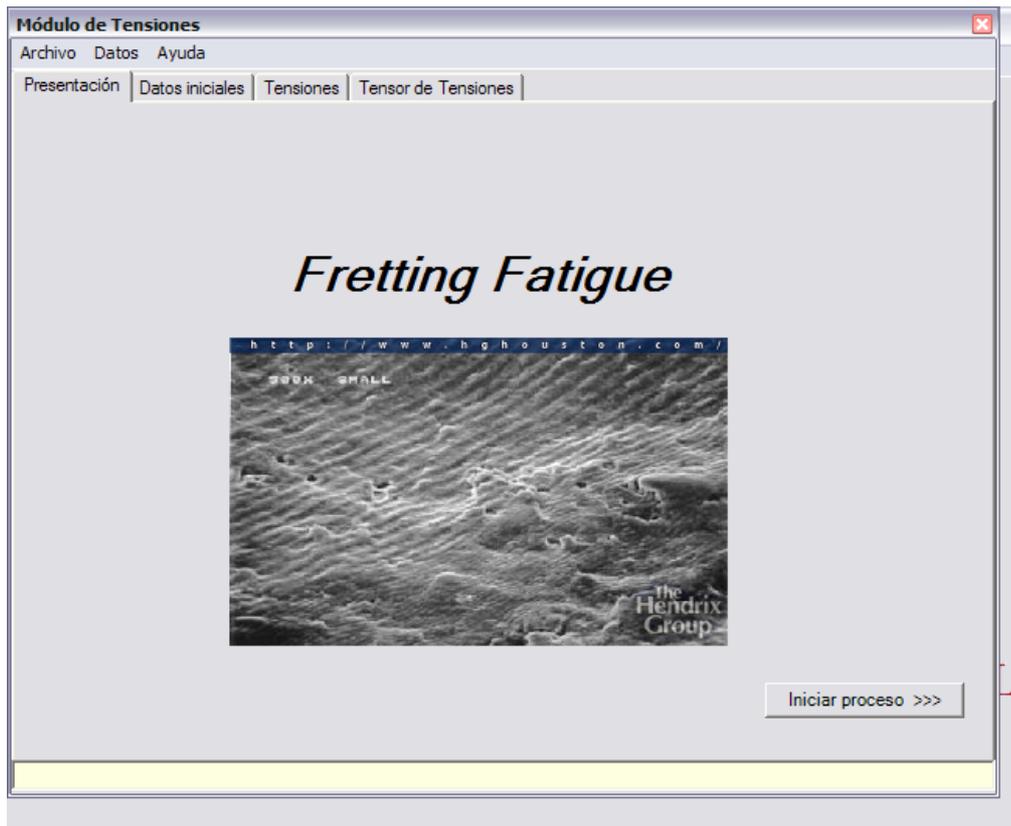


Figura 4.2: Vista del Módulo de Tensiones.



Figura 4.3: Barra de Menú y pestañas del Módulo de Tensiones.

Una característica particular de esta aplicación, es la presentación en forma de pestañas, como se observa en las figuras 4.2 y 4.3. Permite disponer de mucha información en una misma ventana sin necesidad de crear nuevas para acceder o mostrar información. Este modelo de diseño se mantendrá en los módulos siguientes.

Las pestañas que aparecen en este módulo sirven para acceder a las etapas del proceso por orden; es decir: definición de los datos de geometría, cargas y materiales, en primer lugar; y cálculo de las tensiones, en segundo.

#### Primera Etapa: Definición de los Datos Iniciales

“Datos Iniciales” es la información que caracteriza casi totalmente el problema. Está formada por información clasificada en tres bloques:

- Geometría;

- Propiedades del material; y
- Cargas aplicadas.

La figura 4.4 muestra la vista de la pestaña Datos Iniciales del Módulo de Tensiones en la que aparecen los campos a rellenar agrupados en las categorías anteriores.

Figura 4.4: Vista de la pestaña Datos Iniciales del Módulo de Tensiones.

Los campos que se aprecian hacen referencia a los siguientes conceptos:

- Radio de Esfera: radio de la esfera que modela el cuerpo esférico definido en el problema (ver Memoria).
- Material: propiedades mecánicas del material en las unidades correspondientes.
- Cargas: hace referencia a las distintas cargas que actúan sobre el conjunto; la carga normal a la superficie de contacto, la tangencial (producto de la fricción) y la tensión axial (aplicada sobre el cuerpo plano de forma remota).

**NOTA:**

En este punto es importante recordar al usuario el criterio de signos usados en esta aplicación; acuda al Capítulo 3 de la Memoria para consolidar dicha información.

En cualquier caso, el Módulo está diseñado para calcular las tensiones admitiendo que el usuario imponga el signo en los campos que aparecen en la figura 4.4; no obstante, cuando se procede a la creación del Fichero de Datos Iniciales, se toma el valor absoluto de la carga tangencial y el valor negativo de la tensión axial, lo que se corresponde con el extremo A del ciclo de carga mostrado en dicho capítulo de la Memoria.

Además de rellenar los campos, el usuario puede imponer una serie de condiciones adicionales; tales como no contabilizar la tensión axial o imponer la condición de deslizamiento global. En el primer caso lo que sucede es que el término correspondiente a la tensión axial no se suma al componente  $xx$  del tensor de tensiones. En el segundo caso, lo que ocurre es la carga tangencial toma el valor del producto del coeficiente de rozamiento y de la carga normal (valor máximo). Observe que hasta que no se liberan las opciones comentadas en la pestaña de la figura 4.4, los campos correspondientes no pueden modificarse.

#### Segunda Etapa: Cálculo de tensiones

Lo siguiente es definir el tipo de cálculo que quiere realizarse. Hasta la versión 1.1 de la aplicación, se permite obtener información puntual o a lo largo de una línea coordenada. Estas opciones se muestran en la figura 4.4 en un botón independiente para cada una. Del mismo modo puede accederse a la pestaña correspondiente haciendo clic sobre su título.

Dependiendo de la opción se seleccione, accederá a un pestaña. Los apartados siguientes le muestran el procedimiento en función de su elección.

#### **4.1.1 Cálculo de las Tensiones en una línea**

Esta es la opción más interesante, y es la que permite enlazar con los módulos siguientes. La figura 4.5 muestra el aspecto de la pestaña; observe que inicialmente algunos campos y controles están bloqueados y no son accesibles. Esto es una medida de seguridad para que defina una serie de propiedades antes de lanzar el cálculo; de otra forma proporcionarían errores difícilmente controlables.

La pestaña queda dividida en cuatro grupos de datos, por orden de uso son:

- Variable Dinámica: hace referencia a la variable que se desplaza, que cambia su valor; a lo largo de la que se pretende calcular las tensiones. Observe que al seleccionar una de las tres coordenadas cartesianas, algunos campos se vuelven accesibles.
- Rango de variables: en estos campos se definen las propiedades de la línea coordenada a lo largo de la que se calculan las tensiones. Como puede comprobar, sólo permite colocar dos valores en la variable elegida como dinámica; estos valores corresponden al mínimo (a la izquierda) y al máximo (a la derecha) del nombre de la variable. En los casos de las variables no dinámicas, puede elegirse un único valor, estático.

**NOTA:**

Observe que en función del rango que elija, el campo “Precisión” varía su valor. Puede modificarlo según los valores propuesto por el programa, o incluir un valor personalizado, pero la máxima precisión corresponde al valor inicial, en caso de superarla se ajustará por defecto y recibirá un aviso por pantalla.

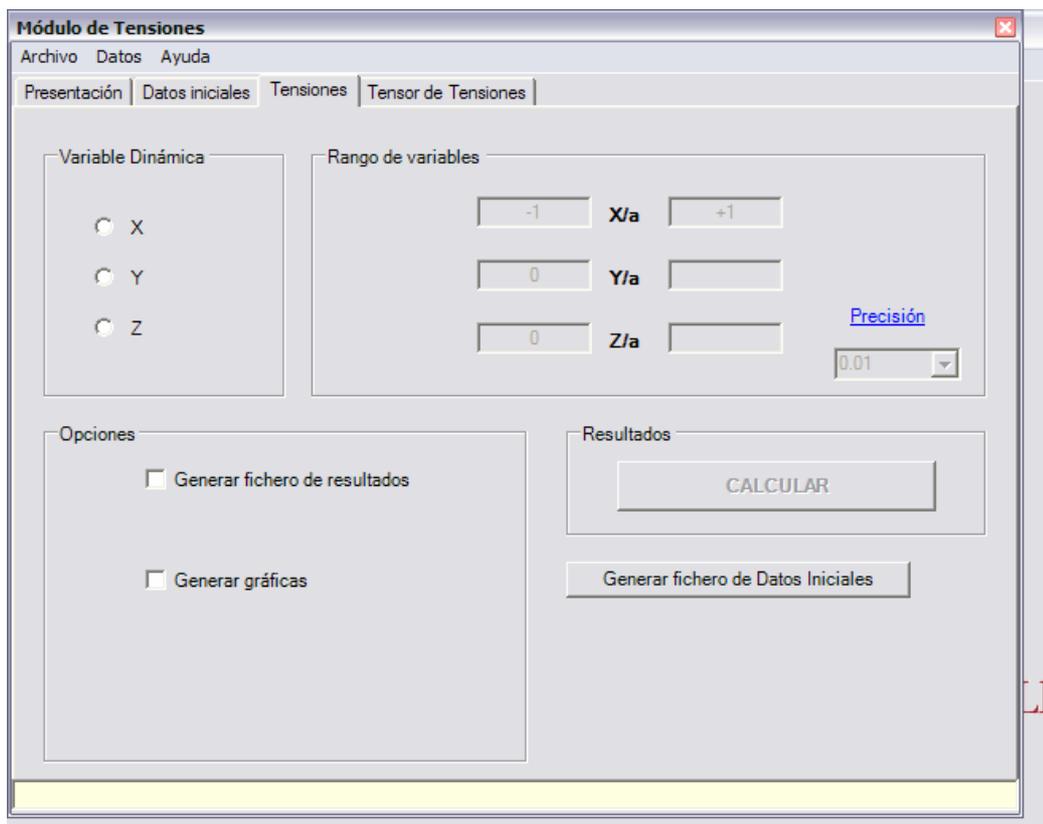


Figura 4.5: Vista de la pestaña de Tensiones del Módulo de Tensiones.

- Opciones: este apartado presenta dos opciones que además comprobará que posibilitan otras más. La opción “Generar fichero de resultados”, activada, hace que una vez calculadas las tensiones, se cree un fichero tabulado donde indique el usuario a través del formulario correspondiente; dicho fichero contiene los valores de las tensiones así como las coordenadas de cada valor. La otra opción, “Generar gráficas” permite al usuario definir, primero si quiere representar las tensiones, y segundo, cuáles son las que quiere ver, porque no todas proporcionan la misma información. La figura 4.6 muestra el detalle de las diferentes opciones.

- Resultados: aparece únicamente el botón “Calcular”, al hacer clic sobre él, se realiza el cálculo. Recibirá un mensaje por pantalla cuando haya finalizado (ver figura 4.7).

La opción “Generar fichero de Datos Iniciales” implica (una vez validada) que con anterioridad al cálculo de las tensiones, se proceda a la creación del fichero de configuración con los parámetros definidos hasta ahora, y algunos otros, que se describirán en el apartado específico de este fichero.

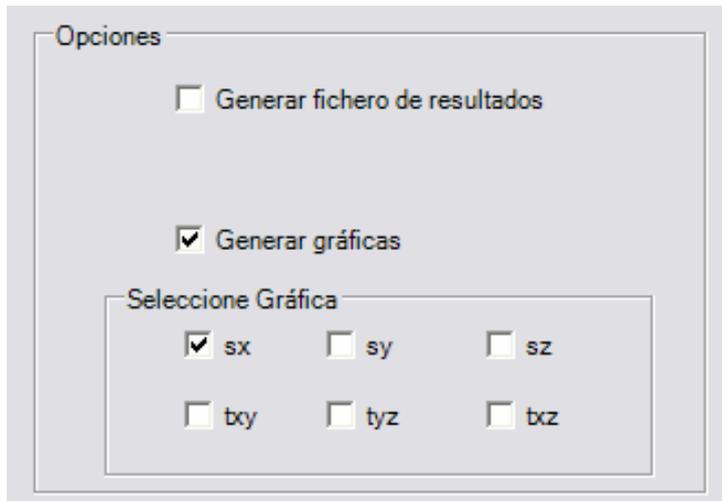


Figura 4.6: Opción “Generar gráficas”.

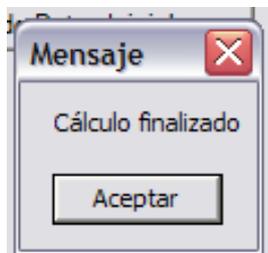


Figura 4.7: Mensaje de cálculo de tensiones finalizado.

#### 4.1.2 Cálculo del Tensor de Tensiones

Esta opción se presenta interesante cuando se quieran comprobar las contribuciones la cada una de las cargas que actúan sobre el problema: la carga normal, la tangencial y la tensión axial. La figura 4.8 muestra el aspecto de la pestaña.

En ella los datos necesarios son los valores de las coordenadas adimensionales (usando el radio de la zona de contacto), el botón “Calcular” proporciona la información demandada.

Existe una pestaña por cada una de las carga actuantes: la normal, la tangencial y la normal más la axial (si procede); sin embargo se muestran en dos escalas distintas. La primera son su valor absoluto, en Pascales; y la segunda, de forma adimensional con el

factor de tensiones  $p_0$  definido en la Memoria. Observe la figura 4.9 para apreciar la diferencia.

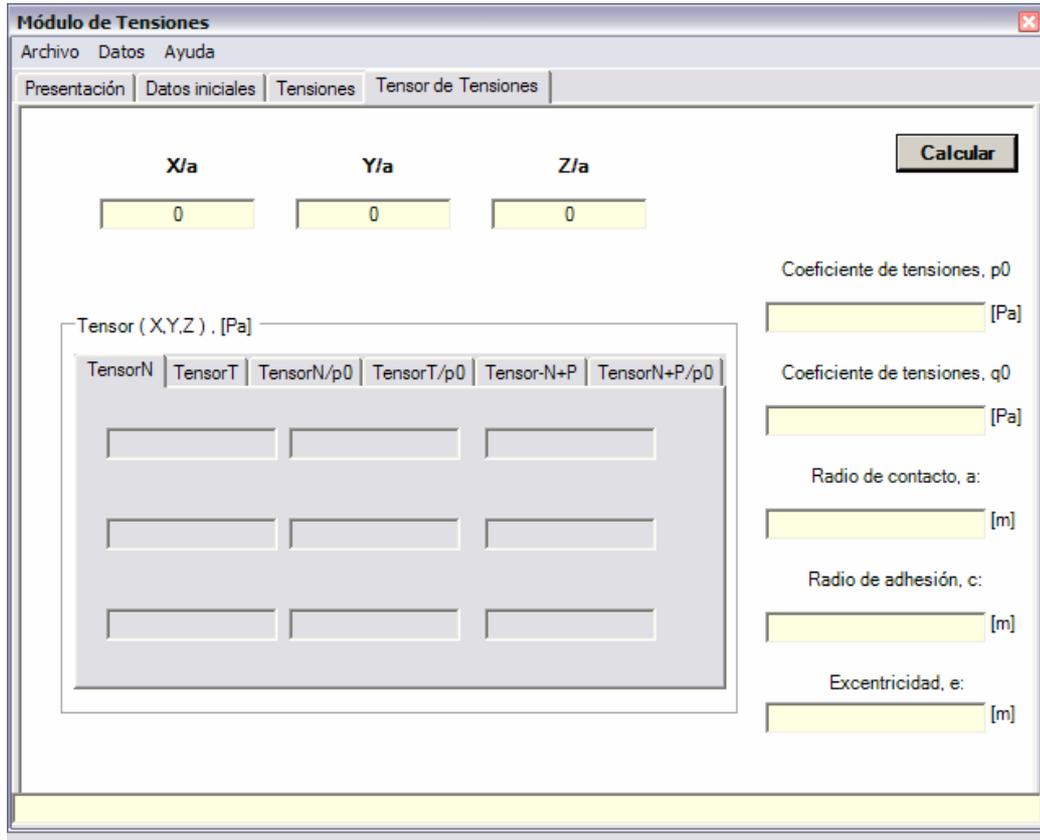


Figura 4.8: Vista de la pestaña para el cálculo del tensor de tensiones.

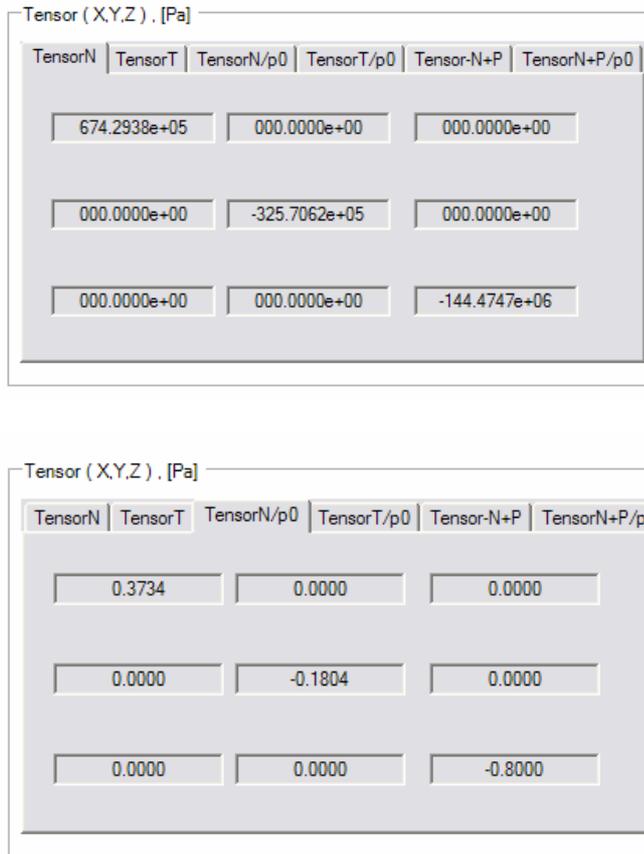


Figura 4.9: Diferencias entre las escalas del tensor de tensiones.

Por otra parte, al mismo tiempo que se muestra la información de los componentes del tensor de tensiones, se ofrece una serie de información sobre las tensiones y la zona de contacto. En la figura 4.10 se define cada uno de los campos relacionados con la referencia [4] de la Memoria.

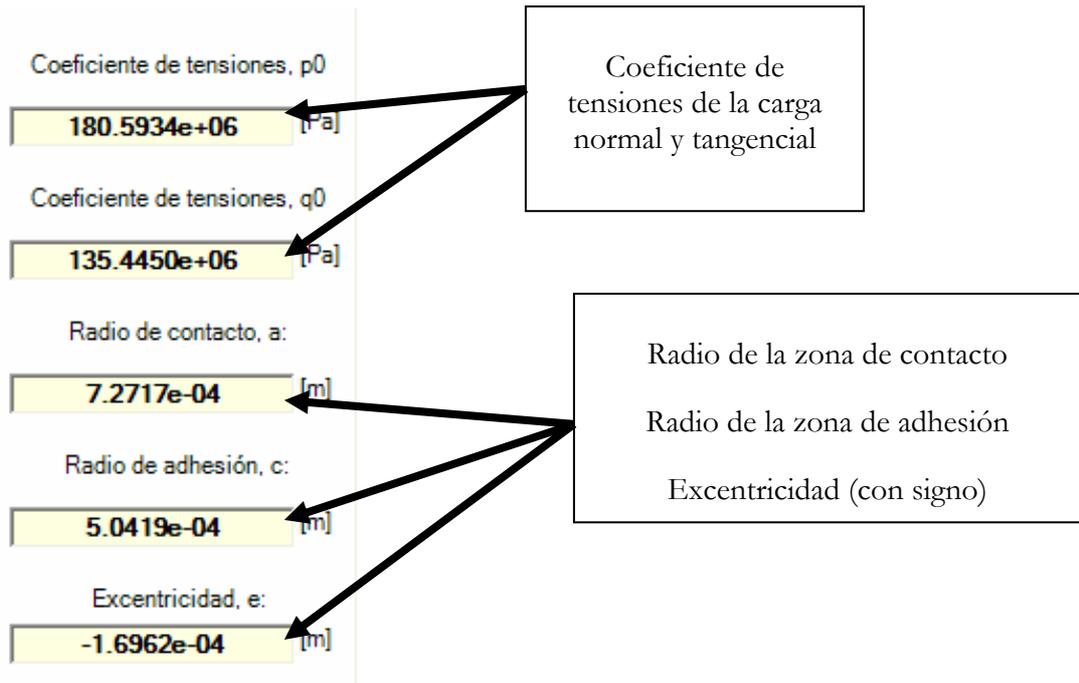


Figura 4.10: Información adicional del Módulo de Tensiones.

## 4.2 Fichero de Datos Iniciales

El fichero de Datos Iniciales es una de las partes más importantes de la aplicación. En cierto modo, toda la aplicación gira alrededor de un fichero de Datos Iniciales; así que merece la pena dedicarle un apartado en exclusiva.

Se trata de un fichero de configuración, pero no configura la aplicación, sino que configura los cálculos que realiza; es decir, define valor de variables de geometría, de cargas, de materiales...etc.

Puede crearse de forma automática en el Módulo de Tensiones, a partir de la información proporcionada por el usuario o la que proporciona la base de datos asociada (que se describe en el apartado siguiente). De esta forma, en la figura 4.5 aparece la pantalla donde se definen las variables de cálculo y puede apreciarse el botón que se resalta en la figura 4.11. El acceso a este elemento puede hacerse con anterioridad al cálculo de las tensiones, ya que no requiere de ellas para proceder. Cuando se hace clic sobre dicho botón, la aplicación crea un fichero de texto con la información relevante para cálculos siguientes; el nombre y la ubicación del fichero se deja a elección del usuario.

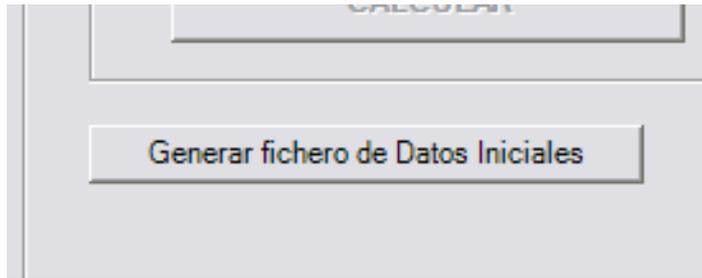


Figura 4.11: Control para generar automáticamente el fichero de Datos Iniciales.

**NOTA:**

Es bueno proceder de forma que la información sea fácilmente accesible y esté cuanto más organizada mejor; por tanto, se recomienda al usuario que tome las precauciones suficientes para lograr estos fines.

Como sabe, este punto representa el inicio de una serie de ficheros referentes a un mismo cálculo (situaciones con iguales condiciones de cálculo); por tanto, una buena forma de empezar sería creando un directorio o carpeta donde guste, pero que albergue en ella todo lo referente a un mismo fichero de Datos Iniciales, o lo que es lo mismo, todo lo referente a una configuración del cálculo.

Otra posibilidad, es crear el fichero de forma manual, es decir, con otras herramientas externas a la aplicación; por ejemplo, con el “Bloc de Notas” de Windows. En este caso, el riesgo de cometer errores aumenta de forma descontrolada, ya que este fichero es muy sensible ante determinadas acciones, tales como la inclusión de caracteres en blanco entre campos, o al final de línea o incluso añadir una línea en blanco al final del texto. Estas situaciones provocarían que la aplicación no funcionara correctamente, puede que este módulo cumpliera su cometido a la perfección, pero si tiene lugar un fallo en datos de los que se hace uso en otros módulos, el error tendría lugar allí.

Por todo ello, se recomienda al usuario que utilice la creación automática y que, en todo caso, deje las modificaciones livianas para una forma de proceder manual.

#### **4.2.1 Contenido del fichero**

El fichero está compuesto por información relativa al cálculo. En particular, puede observarse en la figura 4.12 la forma que tiene; está compuesto por información sobre las

variables en cada línea así como de datos relativos al material, la geometría y las cargas; éstas variables se muestran en la tabla 4.1 con su designación<sup>7</sup>.

```

datosini_t651.txt - Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
%Fichero de Datos Iniciales
R:100e-3
E:71e9
nu:0.3
mu:0.75
P:200
Q:100
sa:-100000000
Variable dinámica:0
Xmin:-2
Xmax:2
Y:0
Z:0.2
Precision:0.01
LE[MPa]:503
LR[MPa]:572
LF[MPa]:169
sf[MPa]:1610
b:-0.1553
c-Paris:8.8308e-11
n-Paris:3.3219
dkth[MPa m^0.5]:2.2
f:2.5
D[micras]:35
  
```

Figura 4.12: Bloc de Notas con fichero de Datos Iniciales.

Variable		Valor en figura 4.12	Definición
Fichero de Datos Iniciales	Memoria		
R	Radio de esfera	100 mm	Radio del cuerpo esférico
E	E	71 GPa	Módulo de Young
nu	$\nu$	0.3	Coefficiente de Poisson
mu	$\mu$	0.75	Coefficiente de rozamiento
P	P, N	200 N	Carga normal
Q	Q, T	100 N	Carga tangencial del Estado A

<sup>7</sup> Para más información acerca de las variables de la tabla 4.1, se remite al usuario al documento de Memoria de este Proyecto.

Sa	$\sigma_a$	-100 MPa	Tensión axial del Estado A
Variable		Valor en figura 4.12	Definición
Fichero de Datos Iniciales	Memoria		
Variable dinámica	--	0	Índice de variable dinámica
Xmin	--	-2	Rango de variable dinámica, mínimo
Xmax	--	2	Rango de variable dinámica, máximo
Y	--	0	Coordenada estática 1
Z	--	0	Coordenada estática 2
Precisión	--	0.01	Mínimo intervalo de variable dinámica.
LE	$\sigma_Y$	503 MPa	Límite elástico
LR	$\sigma_U$	572 MPa	Límite de rotura
LF	$\sigma_F$	169 MPa	Límite de fatiga
sf	$\sigma_f'$	1610 MPa	Coefficiente de endurecimiento a fatiga
b	b	-0.1553	Exponente de endurecimiento a fatiga
c-Paris	c	8.8308e-11	Coefficiente de la Ley de Paris
n-Paris	n	3.3219	Exponente de la Ley de Paris
dkth	$\Delta K_{th}$	2.2 MPa m <sup>0.5</sup>	FIT umbral
f	f	2.5	Factor de transición
D	D	35 $\mu\text{m}$	Tamaño de grano típico

Tabla 4.1: Variables que aparecen en el fichero de Datos Iniciales.

Aunque no lo crea, cada una de estas variables entre en juego llegado su momento, así que no descuide ninguno de sus valores. Esto mismo hace que en el Módulo de Tensiones no se haga uso de todas ellas, y como consecuencia, la escritura de este fichero no sea completa. Sin embargo, cuando el usuario indique que quiere generar el fichero, el programa se encargará de recordarle qué valores son necesarios.

### 4.3 Base de datos de materiales

Con motivo de aligerar el proceso de adquisición de datos para el fichero de Datos Iniciales, se ha incluido el acceso a una base de datos externa. El inconveniente que presentan los accesos a bases de datos es que suponen un tiempo de espera que se hace rentable cuando la cantidad de posibilidades es elevada; además, al tratarse de un elemento externo requiere de un controlador de la conexión, lo que se llama un “driver”; pero al

hacer la base de datos en Microsoft Access, la existencia de dicho controlador está garantizada con este gestor.

La idea es que el usuario vaya reuniendo información conforme use la aplicación, y que toda esa información le sirva para mantener el programa lo más dinámico y actualizado posible; y por otro lado, que realice la preparación del trabajo de forma rápida, y no tenga que repetir la información cada vez que quiera ejecutar el programa.

#### 4.3.1 Acceso a la base de datos de material

La figura 4.12 muestra el acceso que existe en la pestaña Datos Iniciales del Módulo de Tensiones. Al hacer clic en el enlace, aparece al cabo de unos segundos un listado de materiales que están disponibles para su elección. Al elegir uno de ellos, los campos se actualizan con el valor correspondiente, y puede proceder normalmente.

#### NOTA:

Observe que si hace uso de la base de datos de material, al generar el fichero de Datos Iniciales, no se requerirá información adicional; pero no se preocupe, la aplicación traspasa los valores de todas las propiedades de la base de datos al fichero, de forma automatizada. Puede comprobarlo abriendo el fichero generado desde la aplicación “Bloc de Notas” de Windows.

The screenshot shows the 'Módulo de Tensiones' application window. The 'Datos iniciales' tab is active. The 'Material' section contains the following fields: 'Radio de Esfera (m)' with value '100e-3', 'Módulo de Young, E (Pa)' with value '71e9', 'Coef. de Poisson,  $\nu$ ' with value '0.3', and 'Coef. de Rozamiento,  $\mu$ ' with value '0.75'. A blue link 'Listado Materiales' is circled with a dashed line. The 'Cargas' section contains: 'Carga Normal, P(N)' with value '200', 'Carga Tangencial, Q(N)' with value '100', and 'Tensión axial,  $\sigma$  [Pa]' with value '100e6'. There are two checkboxes: 'Deslizamiento global' (unchecked) and 'Incluir tensión axial' (checked). At the bottom right, there are two buttons: 'Tensiones en una línea >>>' and 'Tensor de tensiones >>>'.

Figura 4.12: Acceso a la base de datos de material.

### 4.3.2 Nuevo elemento de la base de datos

Para adicionar un nuevo elemento en la base de datos, debe ejecutar de forma externa el fichero de base de datos que se proporciona junto con el ejecutable de la aplicación.

Para ello ábralo desde Microsoft Access y observe la tabla Materiales (figura 4.13 y 4.14). Cada una de las columnas representa el valor de la variable definida en la cabecera de la tabla. Si desea añadir un nuevo material a la lista, comience una nueva línea de la tabla y no se preocupe, la numeración es automática.

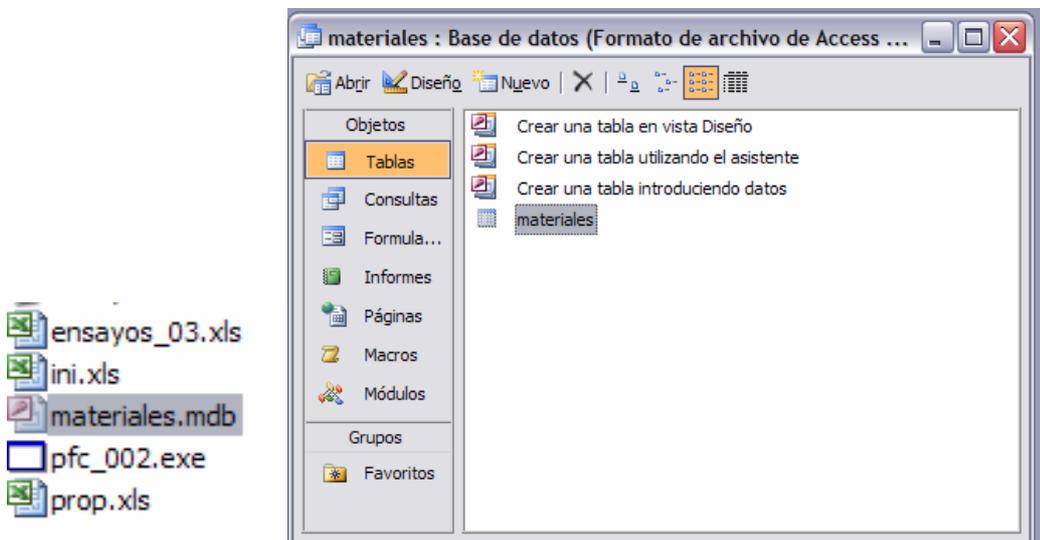


Figura 4.13: Base de datos de material. Acceso a modificación.

id	nombre	e	nu	mu	LE	LR	LF	sf	b	c-Paris	n-Paris	dkth
1	AL7075	7.1E+10	0.3	0.75	503	572	169	1610	-0.1553	8.8308E-11	3.3216	2.2
2	AL7075T6	7E+10	0.33	0.75	503	572	169	1136	-0.1294	8.8308E-11	3.3216	2.2
3	AL7075T6_ref[236]	7.1E+10	0.33	0.75	503	572	169	1917	-0.176	8.8308E-11	3.3216	2.2
4	AL7050T6_ref[239]	7.1E+10	0.33	0.75	503	572	169	1113.6	-0.1294	8.8308E-11	3.3218	2.2
5	AL7075T6_ref[240]	7.1E+10	0.33	0.75	503	572	169	1090	-0.1122	8.8308E-11	3.3216	2.2
6	AL7075T651	7.1E+10	0.3	0.75	503	572	169	1610	-0.1553	8.8308E-11	3.3216	2.2
*nérico)		0	0	0								

Figura 4.14: Base de datos de material. Tabla “materiales”.

### 4.3.3 Modificación de la base de datos

Para modificar o eliminar elementos de la base de datos, proceda como si fuera a crear uno nuevo, pero en lugar de escribir en una línea, modifique la celda que desee o elimine la fila completa.

#### 4.3.4 Precauciones con la base de datos

Las ventajas de la base de datos son innegables: recopila toda la información de cada ensayo que quiera hacerse, y lo mantiene para poder volver a usarla cuando se desee sin tener que volver a escribirlo. Sin embargo, presenta algún inconveniente adicional al tiempo de espera comentado anteriormente.

Cuando modifica (corrige un valor, crea un nuevo elemento o elimina uno ya existente), no pierda cuidado en mantener el número, identificador y tipo de los campos que forman la base de datos inicialmente. Provocaría un fallo en la aplicación que sería muy difícil de controlar. Límitese a usar la base de datos, a añadir y modificar materiales, no modifique otras propiedades porque pueden darse situaciones insospechadas.

**NOTA:**

En caso de que se modificaran propiedades de la base de datos que hagan que su funcionamiento se vea afectado, no se preocupe, le propongo dos alternativas:

- vuelva a la base de datos proporcionada en el CD original;
- vuelva a modificar las propiedades igualándolas con la base de datos original.

La alternativa segunda permite mantener la información que haya introducido el usuario; la primera vuelve a la situación inicial.

#### 4.4 Un ejemplo: A17075T651

Para confirmar que todo ha quedado bien comprendido, le proponemos al usuario realizar un ejemplo sencillo, que le permita manejarse adecuadamente en el Módulo de Tensiones.

Se trata de calcular las tensiones en el contacto para un material como el que se usa en el documento Memoria de este Proyecto. Para ello la propuesta que se le hace es que evalúe las tensiones para diferentes profundidades a lo largo de la línea  $y=0$ , desde  $x/a=-2.0$  hasta  $x/a=2.0$ ; y que represente la evolución en un gráfico conjuntamente.

En primer lugar se definen las propiedades del material, la geometría y las cargas; para completar el conjunto de datos necesario para el cálculo de las tensiones. La tabla 4.2 muestra cada uno de los valores de las variables.

PROPIEDAD	VALOR
Límite Elástico (LE, $\sigma_y$ ), [MPa]	503
Límite de Rotura (LR, $\sigma_U$ ), [MPa]	572
Límite de Fatiga (LF, $\sigma_f$ ), [MPa]	169
Módulo de Young (E), [GPa]	71
Coefficiente de Poisson	0.3
Tamaño típico de grano (D) [ $\mu\text{m}$ ]	35
Coefficiente de rozamiento ( $\mu$ )	0.75
Coefficiente de Resistencia a fatiga ( $\sigma_f'$ , MPa)	1610
Exponente de Resistencia a fatiga (b)	-0.1553
Coefficiente de la Ley de Paris, c [Mpa $\text{m}^{0.5}$ ]	8.8308e-11
Exponente de la Ley de Paris, n	3.3219
FIT Umbral para grieta larga ( $K_{th\infty}$ ) [MPa $\text{m}^{0.5}$ ]	2.2
Radio de la esfera (R) [mm]	100
Carga Normal, P [N]	200
Carga Tangencial, Q [N]	$\pm 100$
Tensión axial, $\sigma_a$ [MPa]	$\pm 100$

Tabla 4.2: Propiedades del material Al7075T651.

### Paso 1: Inicio de la aplicación

Lo primero que tenemos que hacer es “arrancar” la aplicación. Para ello ejecutamos el fichero ejecutable. De esta forma accedemos a la pantalla inicial de la figura 4.15.

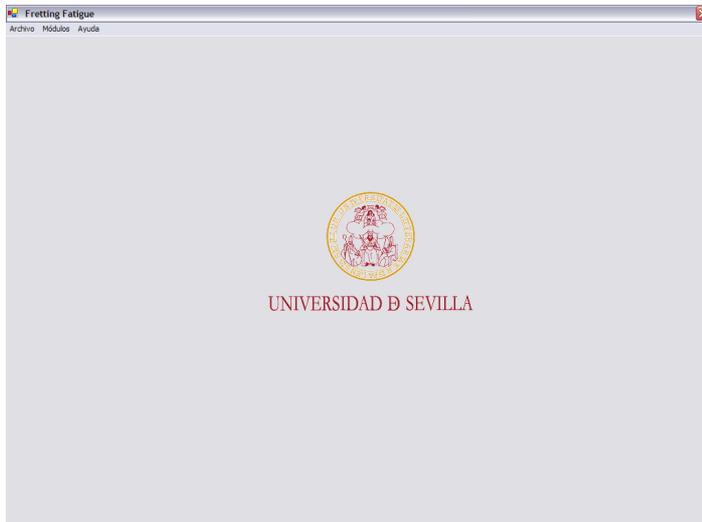


Figura 4.15: Pantalla inicial para el ejemplo.

### Paso 2: Inicio del Módulo de Tensiones

Accedemos al menú Módulos, la opción Cálculo de tensiones y Contacto esférico. La figura 4.16 muestra la vista de dicho módulo.

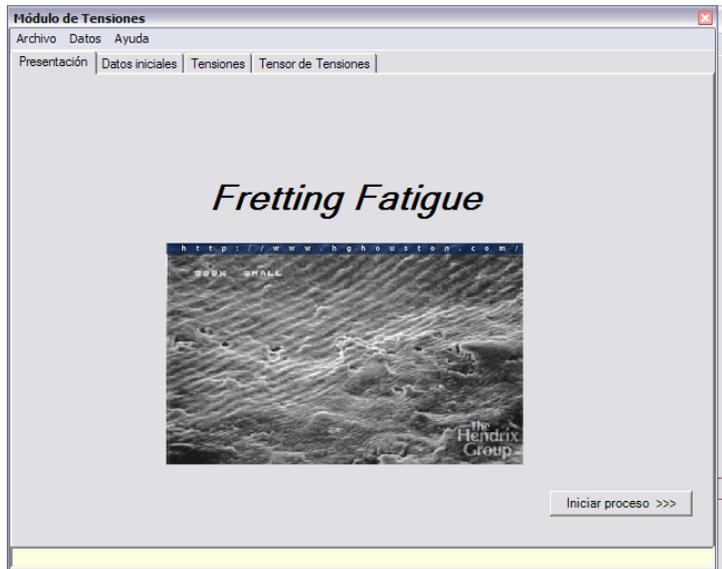


Figura 4.16: Módulo de Tensiones para el ejemplo.

### Paso 3: Propiedades del material

Procedemos haciendo clic bien en el botón “Iniciar proceso” bien en la pestaña “Datos Iniciales”. Con ello accedemos a la pestaña de datos del material. Desde aquí, podemos actuar de dos formas:

- Si el material existe en la base de datos, puede aprovecharse para no tener que introducir los datos manualmente;
- Si no existe tendremos que introducir datos por teclado.

La primera situación se comprueba haciendo clic sobre el enlace Listado de materiales marcado en la figura 4.17. Aparece un listado en el que podemos buscar el material Al7075T651. Puede comprobar que aparece en último lugar (tenga en cuenta que la posición del material puede variar en función de las modificaciones que sufra la base de datos), y que por tanto podemos hacer uso de sus propiedades.

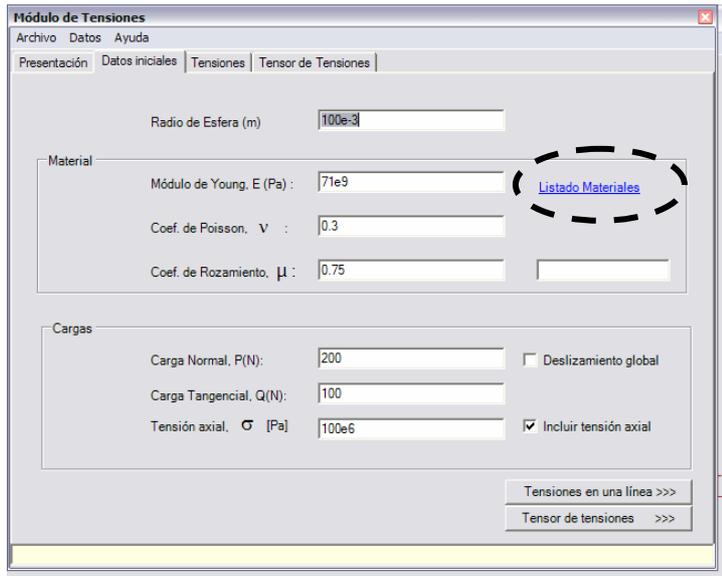


Figura 4.17: Vínculo a la base de datos de material para el ejemplo.

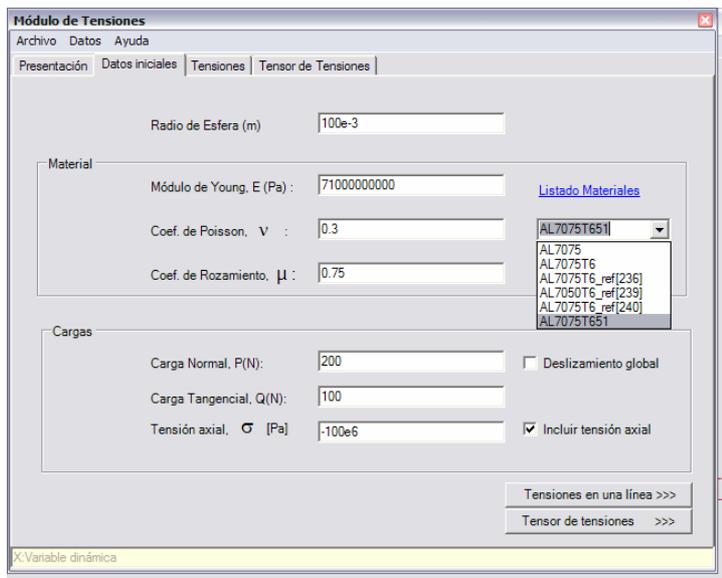


Figura 4.18: Listado de materiales en la base de datos para el ejemplo.

Observe que se rellenan automáticamente los campos del formulario con los valores correspondientes del material. La figura 4.19 muestra tales valores. Además observe que aparece un número “6” en el campo debajo del listado de materiales; corresponde a la posición del material en la base de datos.

The screenshot shows the 'Módulo de Tensiones' software interface. The window title is 'Módulo de Tensiones' and it has a menu bar with 'Archivo', 'Datos', and 'Ayuda'. Below the menu bar are tabs: 'Presentación', 'Datos iniciales', 'Tensiones', and 'Tensor de Tensiones'. The 'Tensiones' tab is active. The interface is divided into two main sections: 'Material' and 'Cargas'. In the 'Material' section, there are input fields for 'Radio de Esfera (m)' (100e-3), 'Módulo de Young, E (Pa)' (7100000000), 'Coef. de Poisson, ν' (0.3), and 'Coef. de Rozamiento, μ' (0.75). There is also a 'Listado Materiales' link and a dropdown menu showing 'AL7075T651'. In the 'Cargas' section, there are input fields for 'Carga Normal, P(N)' (200), 'Carga Tangencial, Q(N)' (100), and 'Tensión axial, σ [Pa]' (-100e6). There are checkboxes for 'Deslizamiento global' (unchecked) and 'Incluir tensión axial' (checked). At the bottom right, there are two buttons: 'Tensiones en una línea >>>' and 'Tensor de tensiones >>>'. A status bar at the bottom left shows 'X:Variable dinámica'.

Figura 4.19: Campos de formulario rellenos con datos proveniente de la base de datos.

Si por el contrario, desea introducir los datos de forma manual puede hacerlo, pero posteriormente deberá introducir también datos que no aparecen en el formulario aunque sí en la tabla 4.2.

#### Paso 4: Geometría y cargas

Se rellenan los campos correspondientes sin mayor dificultad según la información de la tabla 4.2.

En este caso, se incluye la tensión axial y no se fuerza el deslizamiento global, así que las opciones correspondientes se dejan tal y como aparecen. Observe la figura 4.19 para cualquier duda.

#### Paso 5: Configuración del cálculo

Pase a la pestaña siguiente o haga clic sobre el botón “Tensiones en una línea”; debe aparecer la vista que se muestra en la figura 4.20.

Seleccione en primer lugar la variable dinámica; en este caso, será la variable  $x$ , cuyo rango va desde  $-2.0$  hasta  $+2.0$ ; rellene por tanto los campos correspondientes. De las variables estáticas,  $y$  toma el valor  $0.0$  y  $z$  tomará varios valores, ya que el objetivo es evaluar las tensiones a diferentes profundidades. En este caso, la opción que se propone es repetir el cálculo tantas veces como sea necesario con un valor de  $z$  diferente.

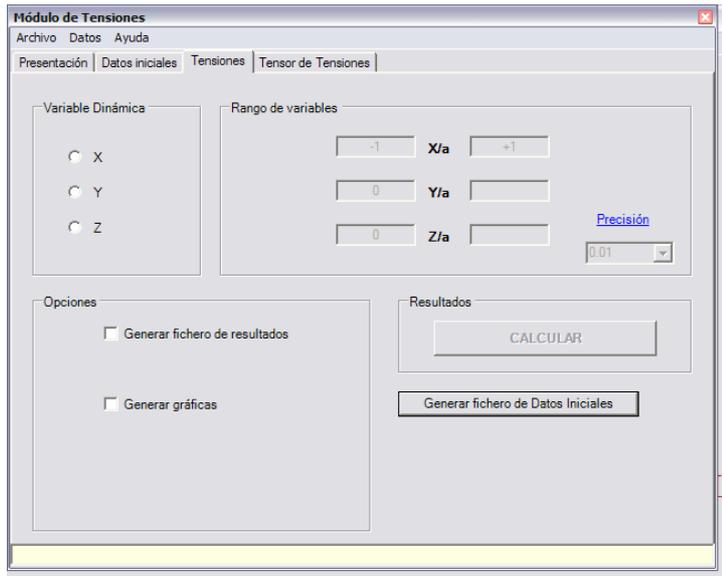


Figura 4.20: Pestaña de Tensiones en una línea, para el ejemplo.

NOTA:

No olvide que las coordenadas con las que trabaja son coordenadas adimensionales, y que por tanto se toman a partir del radio de la zona de contacto.

La figura 4.21 muestra la ventana completada para el caso  $\xi=0$ , la propuesta consiste en evaluar las tensiones para  $\xi=0, 0.5$  y  $1.0$ , por ejemplo. Observe que en la figura aparece marcada la opción “Generar fichero de resultados”, puesto que estamos interesados en acumular los datos de los distintos cálculos para recopilar la información en un único gráfico. Este mismo procedimiento puede aplicarse para otras muchas profundidades.

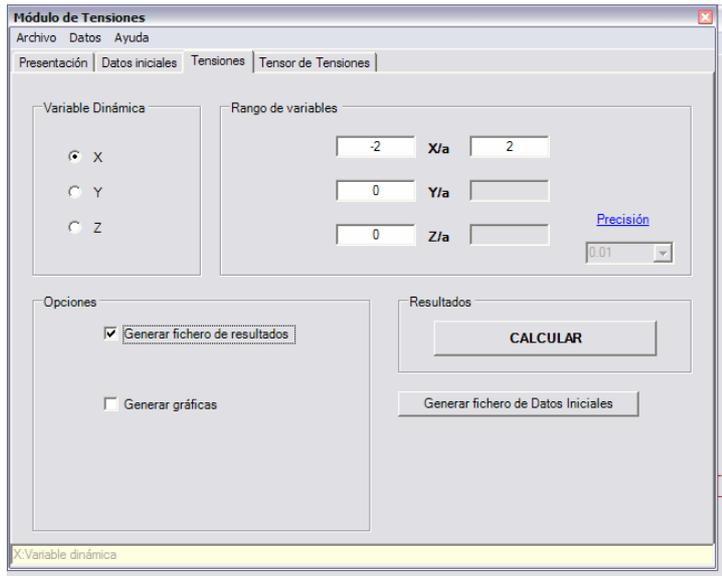


Figura 4.21: Módulo de Tensiones para ejemplo con  $z=0$ .

Si se quisiera ver la evolución de las tensiones para cada caso, debe marcarse la casilla de “Generar gráficas” y seleccionar las componentes que queramos visualizar. La figura 4.22 muestra la ventana con estas opciones; en este caso, se han seleccionado todas las componentes, sin embargo descubrirá que algunas son nulas.

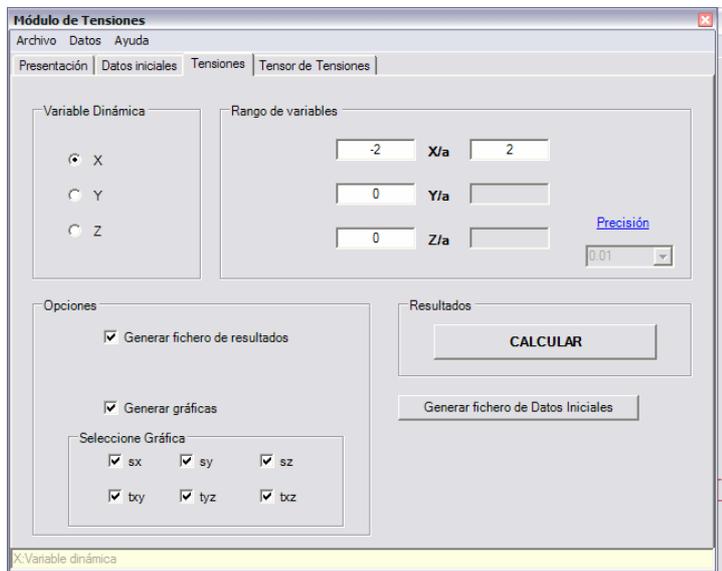


Figura 4.22: Módulo de Tensiones para el ejemplo con  $z=0$  y gráficas seleccionadas.

#### Paso 6: Generar fichero de datos iniciales

Este momento es el indicado para crear el fichero de Datos iniciales. Si hacemos clic sobre el botón “Generar fichero de Datos Iniciales” aparecerá un formulario que permite colocar el fichero donde mejor corresponda, además de darle nombre. La figura 4.23 muestra este formulario; en este caso, el fichero se guarda en una nueva carpeta del directorio “Mis Documentos”, con el nombre “datos\_t651\_z0.txt”.

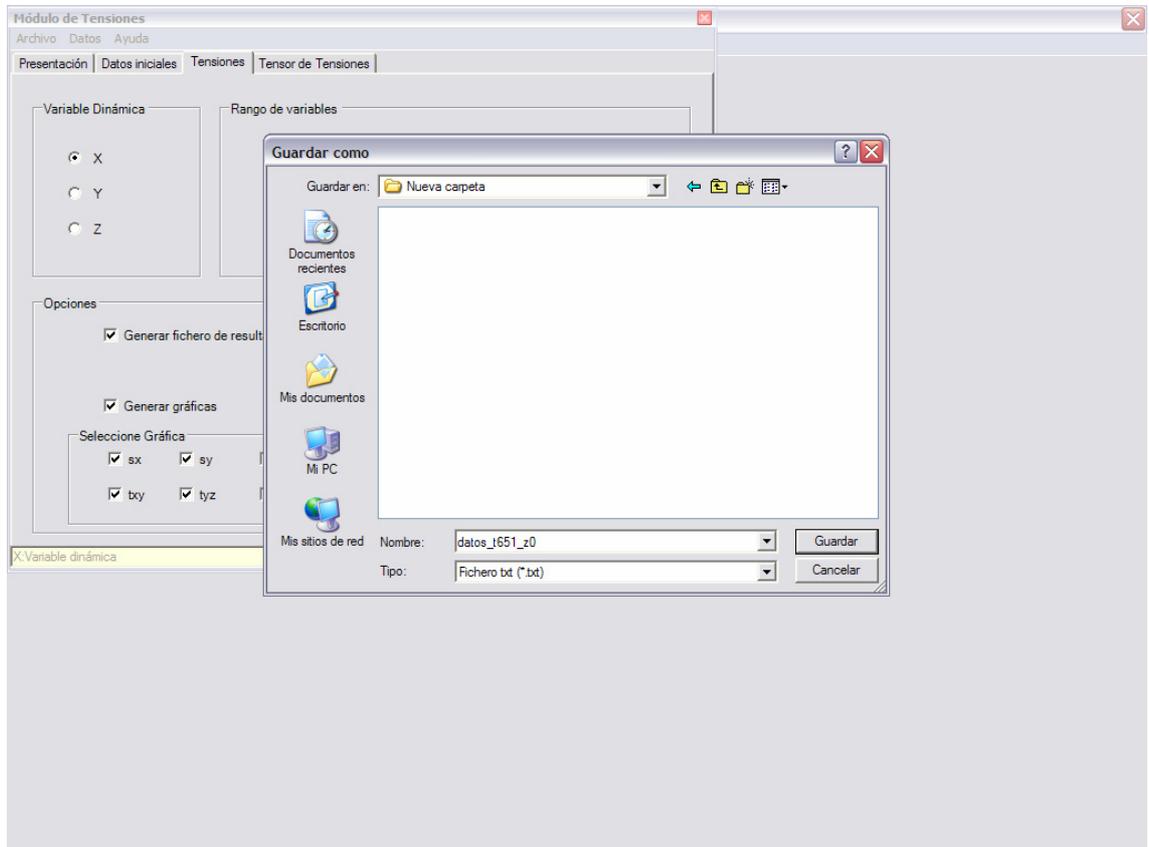


Figura 4.23: Generar fichero de Datos Iniciales para el ejemplo.

**NOTA:**

Si la introducción de los datos no se ha realizado a través de la base de datos de material, sino que ha sido de forma manual, al generar el fichero de Datos Iniciales el programa solicitará los datos complementarios mediante la ventana 4.24.

En cualquier caso, se rellenan los datos correctamente y el resultados es el mismo que con el método anterior.

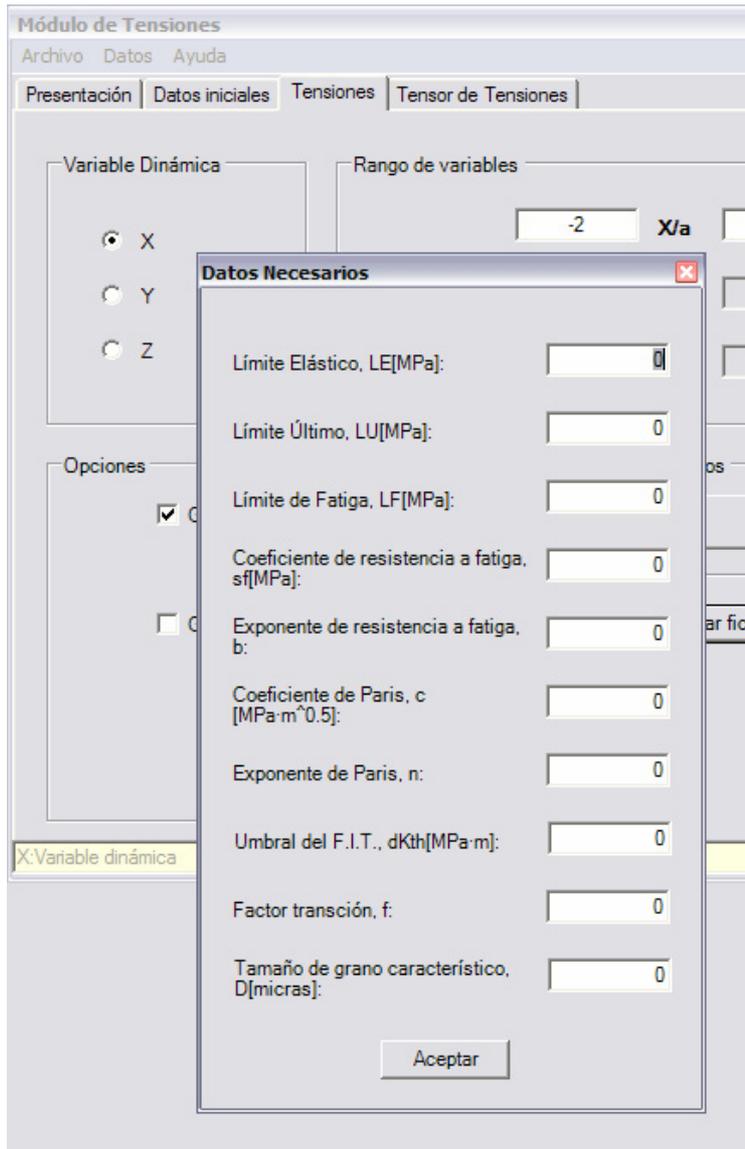


Figura 4.24: Ventana para complementar los datos del fichero Datos Iniciales.

#### Paso 7: Cálculo de las tensiones para $z=0$ .

Haciendo clic en el botón “Calcular” se procede al cálculo de las tensiones según la configuración establecida anteriormente. La figura 4.25 muestra el mensaje cuando se terminan las operaciones de cálculo. Cuando acepte dicho mensaje, se generarán las gráficas que solicitó en la figura 4.22 y se le solicitará el nombre del fichero de resultados (por ejemplo “tensiones\_t651\_z0.xls”); se muestran en la figura 4.26 y 4.27.

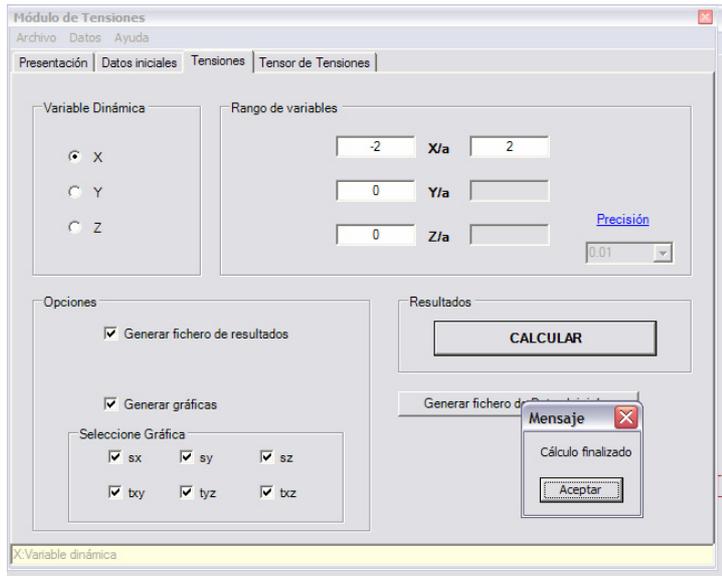


Figura 4.25: Mensaje de cálculo finalizado para el ejemplo.

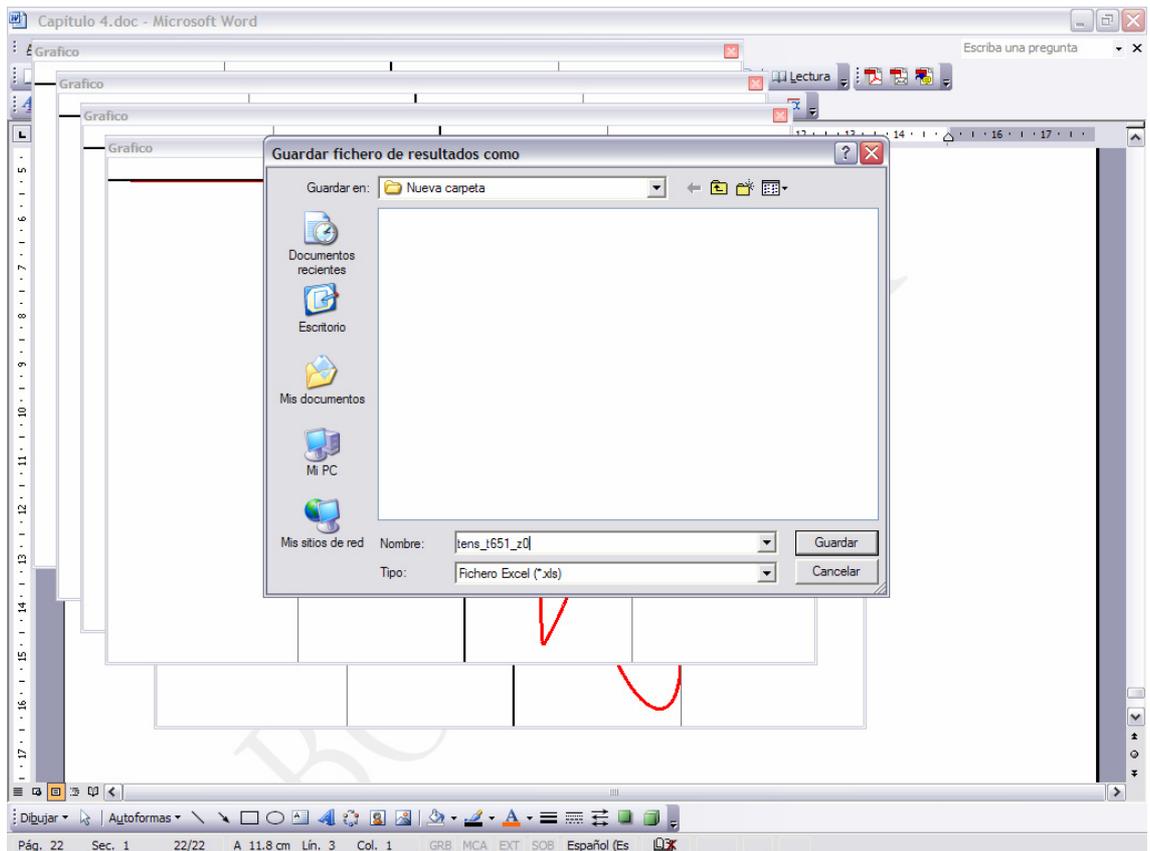


Figura 4.26: Formulario para guardar fichero de resultados del ejemplo.

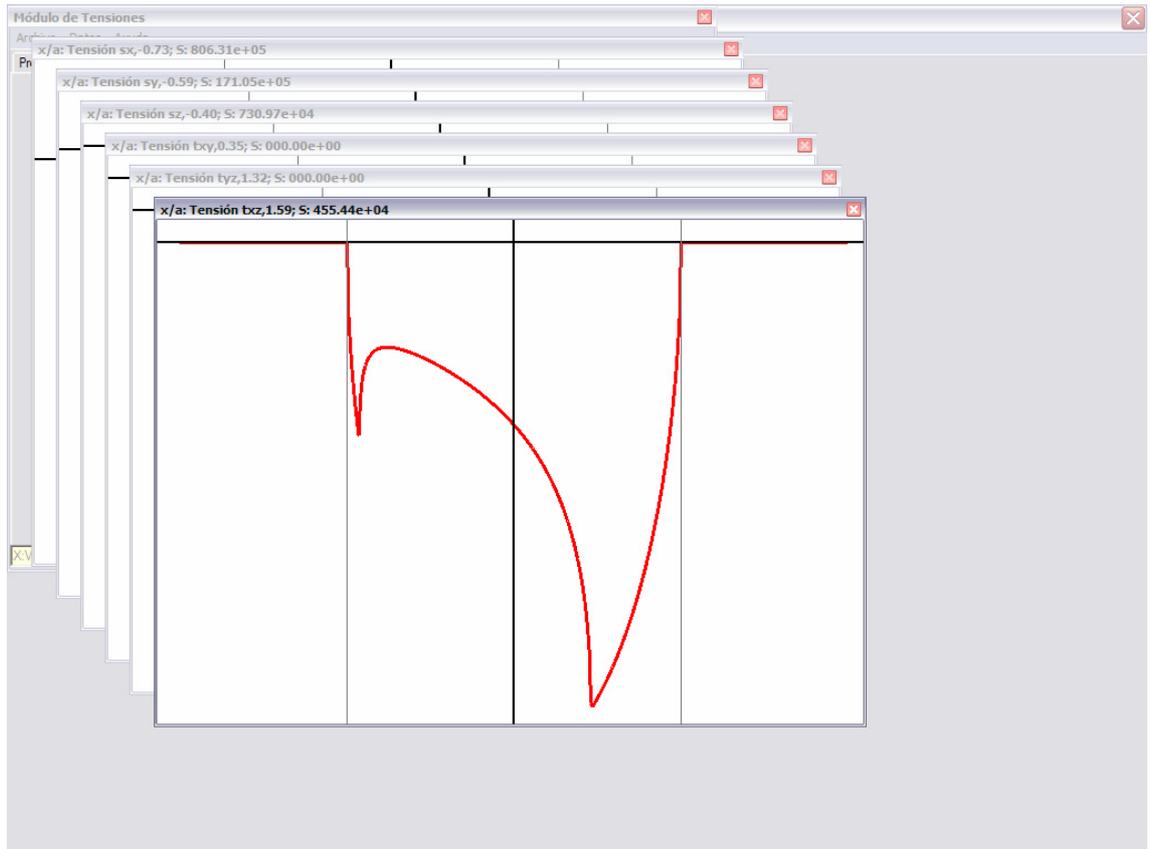


Figura 4.27: Gráficas seleccionadas para el ejemplo.

NOTA:

Observe que cada gráfica tiene un nombre en la barra de título, junto con las coordenadas del cursor cuando se mueve sobre su área gráfica.

Paso 8: Tensiones para varias profundidades

Para los casos  $\xi=0.5$  y  $1.0$  se realizan las mismas operaciones, pero sólo tendrá que modificar el valor de la variable  $\xi$  y volver a calcular. Los ficheros de resultados se llaman: “tens\_t651\_z05.xls” y “tens\_t651\_z10.xls”; del mismo modo se han generado ficheros de Datos Iniciales para continuar evaluando para varias profundidades en módulos siguientes.

Paso 9: Recopilar datos de varias profundidades

Una vez calculada las tensiones para varias profundidades, deben representarse de forma conjunto. Para ello se hace uso de un programa generalmente extendido como es Microsoft Excel que forma parte del paquete de programas de Microsoft Office.

La figura 4.28 muestra el primero de los ficheros de resultados desde Excel; observe la ventaja de tener el texto tabulado, cada valor ocupa una celda independiente, y aparecen ordenados por filas y columnas.

The screenshot shows a Microsoft Excel spreadsheet titled 'Microsoft Excel - tens\_t651\_z0.xls'. The spreadsheet contains the following data:

%Tensiones en contacto esférico%											
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	%Tensiones en contacto esférico%										
2											
3	Radio de con	0.00072717	m								
4	Radio de adh	0.00050419	m								
5	Excentricidad	-0.00016962	m								
6	Coefficiente de	180593364	Pa								
7	Matriz de tensiones y coordenadas										
8											
9	xa	ya	za	sx	sy	sz	txy	tyz	txz		
10	-2	0	0	123913187	-5180756.2	0	0	0	0		
11	-1.99	0	0	124149970	-5224094.73	0	0	0	0		
12	-1.98	0	0	124390361	-5267899.74	0	0	0	0		
13	-1.97	0	0	124634437	-5312175.34	0	0	0	0		
14	-1.96	0	0	124882275	-5356925.53	0	0	0	0		
15	-1.95	0	0	125133958	-5402154.26	0	0	0	0		
16	-1.94	0	0	125389566	-5447865.32	0	0	0	0		
17	-1.93	0	0	125649186	-5494062.42	0	0	0	0		
18	-1.92	0	0	125912905	-5540749.1	0	0	0	0		
19	-1.91	0	0	126180814	-5587928.79	0	0	0	0		
20	-1.9	0	0	126453005	-5635604.72	0	0	0	0		
21	-1.89	0	0	126729574	-5683779.96	0	0	0	0		
22	-1.88	0	0	127010619	-5732457.38	0	0	0	0		
23	-1.87	0	0	127296242	-5781639.61	0	0	0	0		
24	-1.86	0	0	127586547	-5831329.07	0	0	0	0		
25	-1.85	0	0	127881642	-5881527.88	0	0	0	0		
26	-1.84	0	0	128181638	-5932237.91	0	0	0	0		
27	-1.83	0	0	128486650	-5983460.69	0	0	0	0		
28	-1.82	0	0	128796796	-6035197.42	0	0	0	0		
29	-1.81	0	0	129112198	-6087448.92	0	0	0	0		
30	-1.8	0	0	129432981	-6140215.61	0	0	0	0		
31	-1.79	0	0	129759276	-6193497.47	0	0	0	0		
32	-1.78	0	0	130091217	-6247293.99	0	0	0	0		
33	-1.77	0	0	130428942	-6301604.14	0	0	0	0		
34	-1.76	0	0	130772596	-6356426.34	0	0	0	0		
35	-1.75	0	0	131122326	-6411758.39	0	0	0	0		

Figura 4.28: Microsoft Excel con el fichero de resultados.

Las operaciones que debe realizar son las siguientes. Cree un nuevo libro en blanco, y dótele de tantas hojas como valores de profundidad haya calculado (en este ejemplo, tres). Abra cada uno de los ficheros de resultados, uno a uno, y copie todas sus celdas a cada una de las hojas del libro nuevo. Para facilitar el trabajo, puede darle nombre a las hojas, por ejemplo, el valor de profundidad de los datos que contiene.

En cada hoja aparecen unos datos de encabezado que no son requeridos salvo el que corresponde a “Coeficiente de tensiones,  $p_0$ ”, ya que nos permitirá adimensionar las tensiones. Por lo tanto, una vez copiados todos los datos en hojas independientes, crearemos una nueva hoja para recopilar los datos (“Resumen”, por ejemplo). En ella importaremos los datos de las hojas que los contienen para poder modificarlos sin hacerlo directamente. La figura 4.29 muestra el estado del libro de Excel llegados a este punto.

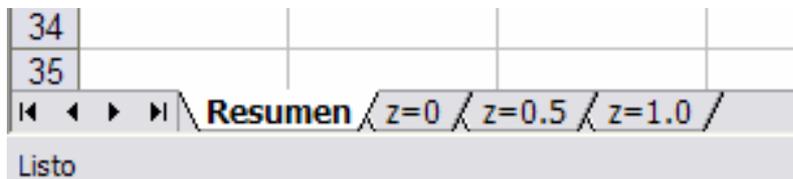
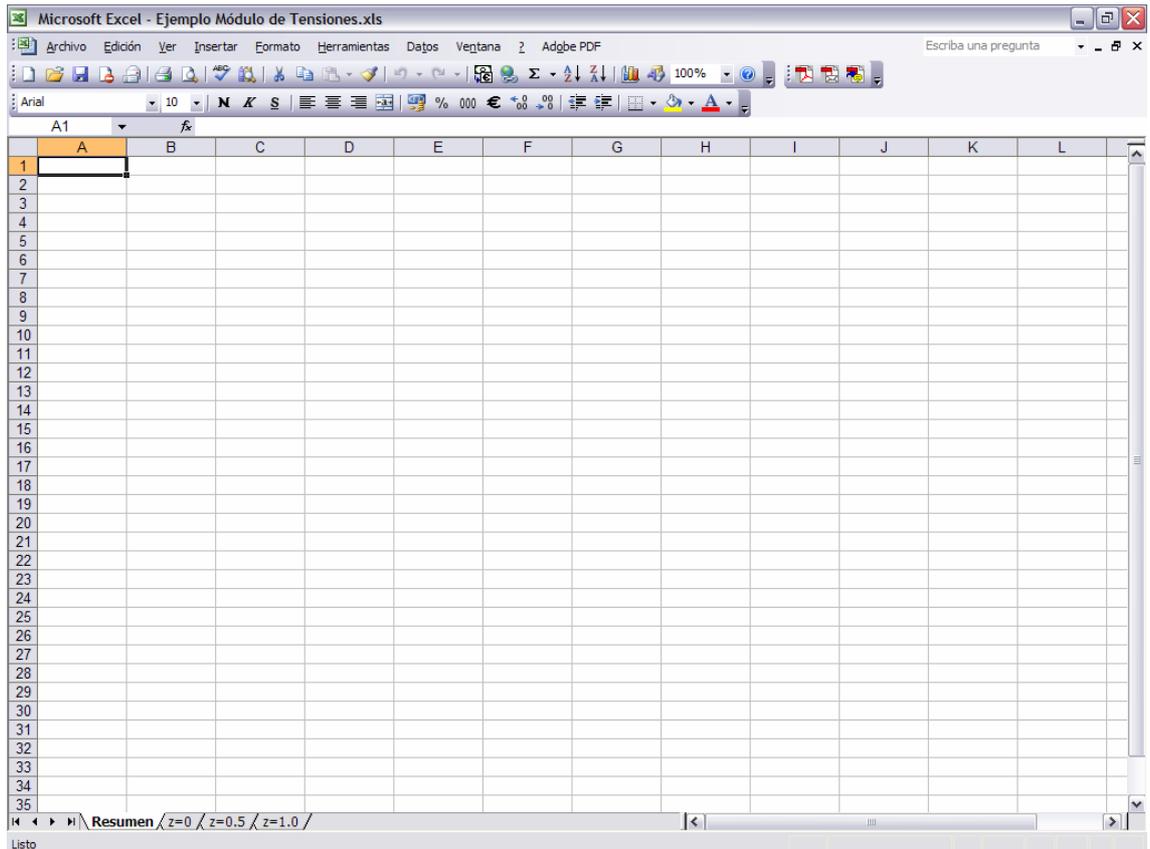


Figura 4.29: Nuevo libro de Excel. Resumen de datos.

Ahora se deben importar los datos de las hojas  $z=0$ ,  $z=0.5$  y  $z=1.0$ , pero sólo los referente a las tensiones y los valores de las coordenadas (pero sólo en un caso puesto que son las mismas para todos). La figura 4.31 muestra el estado al que debe llegarse tras importar los datos, y la 4.30 un proceso de importación a modo de ejemplo. Además en la figura 4.31 se observa ya iniciado el proceso de adimensionalización de las tensiones con el coeficiente  $p_0$ . Observe que las tensiones ya adimensionalizadas se colocan en columnas cuya cabecera es la profundidad a la que se evalúan, esto ahorra trabajo cuando se representa gráficamente, ya que Excel toma por defecto el encabezado como el título de cada curva.

Esto mismo puede hacerse para el resto de componente de tensiones no nulas. El resultado final se muestra en la figura 4.32.

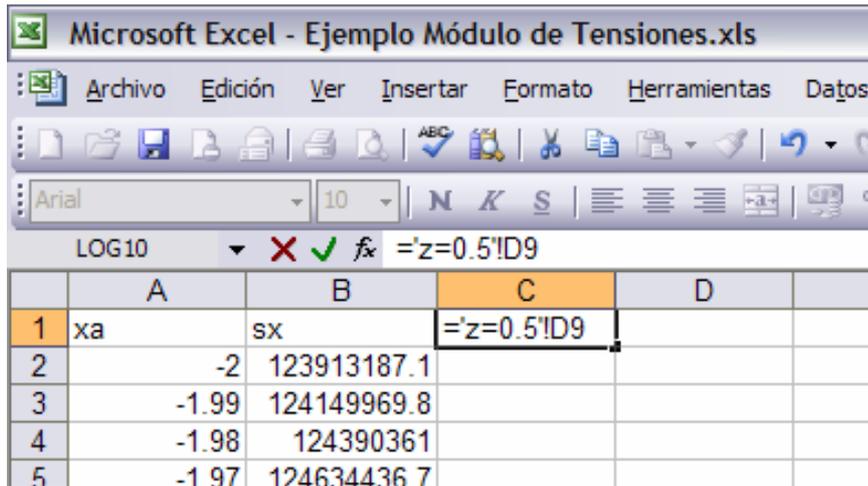


Figura 4.30: Importar datos de otras hojas.

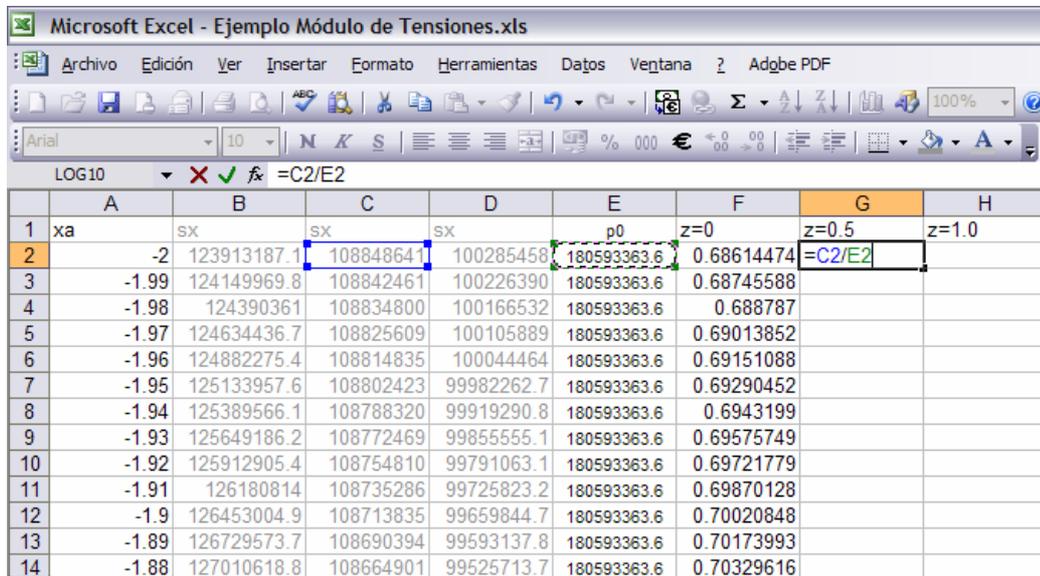


Figura 4.31: Datos importados de otras hojas.

Manual de Usuario - Capítulo 4  
Módulo de Tensiones

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	z/a	z	z²	p0	z=0	z=0.5	z=1.0	z²	z³	z⁴	z⁵	p0	z=0	z=0.5	z=1.0	z²
2	-2	123913187.1	100949641.2	100285457.9	180593363.6	0.896144743	0.602727002	0.55930087	-590756.204	-3408620.91	-1893731.99	180593363.6	-0.0289741	-0.01887456	-0.01048616	
3	-1.99	124149963.8	108842460.7	100226389.9	180593363.6	0.887455681	0.602639579	0.554983793	-5224094.732	-3428205.27	-1897774.75	180593363.6	-0.0282739	-0.0188301	-0.01050655	
4	-1.98	124390361	108834800.2	100166532.4	180593363.6	0.887806999	0.602651161	0.554652344	-5267899.741	-3447906.44	-1901780.91	180593363.6	-0.0281695	-0.0189021	-0.01053074	
5	-1.97	124634436.7	108825609	100105989	180593363.6	0.89013852	0.602600266	0.554316543	-5312175.336	-3467725.14	-1905749.67	180593363.6	-0.0280612	-0.01892084	-0.01055271	
6	-1.96	124882275.4	10881834.7	100044464.1	180593363.6	0.89150878	0.602540605	0.553976414	-5366925.534	-3487662.25	-1909680.88	180593363.6	-0.02796291	-0.01893224	-0.01057448	
7	-1.95	125133957.6	108802423.5	99982262.72	180593363.6	0.892930458	0.602471881	0.553631987	-5402164.258	-3507716.74	-1913574.45	180593363.6	-0.0278736	-0.01894233	-0.01059604	
8	-1.94	125389566.1	108788320.3	99959290.84	180593363.6	0.8943199	0.602393787	0.553283293	-5447865.32	-3527895.66	-1917430.31	180593363.6	-0.02779168	-0.01895202	-0.01061739	
9	-1.93	125649186.2	10877468.6	99935955.14	180593363.6	0.895767494	0.602306012	0.552933069	-5494062.415	-3548194.14	-1921248.48	180593363.6	-0.02771728	-0.01896147	-0.01063853	
10	-1.92	12591305.4	108754910.3	99913063.3	180593363.6	0.897277787	0.602208233	0.552573257	-5540749.101	-3568695.44	-1925029.03	180593363.6	-0.0276508	-0.01897005	-0.01065947	
11	-1.91	126180884	108735281	99725522.23	180593363.6	0.898790278	0.602100121	0.552210004	-5587928.788	-3589380.93	-1928772.08	180593363.6	-0.02759205	-0.01897827	-0.01068019	
12	-1.9	126453004.9	108713834.9	99538944.72	180593363.6	0.700208482	0.60189129	0.551846661	-5635604.721	-3609932.09	-1932477.82	180593363.6	-0.02754065	-0.01898613	-0.01070071	
13	-1.89	126729573.7	108693034.3	99353172.82	180593363.6	0.701739926	0.601851542	0.55177285	-5683779.864	-3630630.56	-1936146.52	180593363.6	-0.02749281	-0.01899403	-0.01071203	
14	-1.88	127010618	108674000.6	99167513.74	180593363.6	0.703236158	0.601801705	0.551703937	-5732457.379	-3651559.09	-1939778.5	180593363.6	-0.02744825	-0.01900219	-0.01072144	
15	-1.87	127296241.7	108657288.3	98982584.66	180593363.6	0.704877738	0.601751477	0.551635077	-5781639.612	-3672616.65	-1943374.17	180593363.6	-0.02740786	-0.01901063	-0.01073005	
16	-1.86	127586548.6	10864290.6	98798763.8	180593363.6	0.706685245	0.601702478	0.551568204	-5831329.066	-3693808.34	-1946934.03	180593363.6	-0.02737083	-0.01901943	-0.01073786	
17	-1.85	127881642	10862932.6	98615265.44	180593363.6	0.708659277	0.601654001	0.551501501	-5881635.491	-3715135.49	-1950458.64	180593363.6	-0.02733628	-0.01902853	-0.01074488	
18	-1.84	128181638.3	10861664.6	98431904.97	180593363.6	0.709780447	0.601606458	0.551435271	-5932237.91	-3736600.61	-1953948.66	180593363.6	-0.02730489	-0.01903796	-0.01075196	
19	-1.83	128486500.2	108604295.4	98249289.89	180593363.6	0.71146939	0.601560296	0.551370196	-5983460.691	-3758206.47	-1957404.84	180593363.6	-0.02727523	-0.01904772	-0.01075874	
20	-1.82	128796796	108592503.4	9806841.89	180593363.6	0.71386761	0.601515603	0.551306445	-6035397.421	-3779956.06	-1960828.02	180593363.6	-0.02724811	-0.01905786	-0.01076577	
21	-1.81	129112197.6	108581282.5	97889421.81	180593363.6	0.716933224	0.601472463	0.551244632	-6087448.923	-3801892.67	-1964218.14	180593363.6	-0.02722304	-0.01906831	-0.01077347	
22	-1.8	129433280.8	108570889.6	97712893.79	180593363.6	0.716705008	0.601430846	0.551184635	-6140125.614	-3823999.86	-1967579.25	180593363.6	-0.02720003	-0.01907923	-0.01078098	
23	-1.79	129759275.7	108561304.2	97538990.18	180593363.6	0.718516302	0.601390882	0.551133207	-6193497.47	-3846101.53	-1970909.51	180593363.6	-0.02717925	-0.01909032	-0.01078876	
24	-1.78	130091216.6	108552619.8	97367405.12	180593363.6	0.720394359	0.601352609	0.551092605	-6247293.988	-3868419.19	-1974211.17	180593363.6	-0.02716051	-0.01910168	-0.01079681	
25	-1.77	130428942.2	108544524.5	97197409.12	180593363.6	0.722344447	0.601316016	0.551057633	-6301604.343	-3890985.57	-1977485.62	180593363.6	-0.02714389	-0.01911339	-0.01080494	
26	-1.76	130772596	108536916.1	97028629.29	180593363.6	0.724362362	0.601281016	0.551024255	-6356426.345	-3913776.56	-1980734.35	180593363.6	-0.02712937	-0.01912545	-0.01081352	
27	-1.75	131122326.3	108529819.6	96860988.96	180593363.6	0.726439324	0.601247609	0.550992404	-6411788.392	-3936843.3	-1983959.59	180593363.6	-0.02711693	-0.01913788	-0.01082268	
28	-1.74	131478286.4	108523235.8	96695318.15	180593363.6	0.728683493	0.601215803	0.550962193	-6467597.415	-3959588.69	-1987161.33	180593363.6	-0.02710651	-0.01915063	-0.01083211	
29	-1.73	131840635.4	1085171329	96539236.11	180593363.6	0.730044118	0.601185694	0.550933542	-6523939.625	-3982620.15	-1990343.22	180593363.6	-0.02709703	-0.01916374	-0.01084191	
30	-1.72	132209537.4	1085115065.7	96382773.87	180593363.6	0.732034411	0.601157053	0.550906353	-6580781.252	-4006244.83	-1993506.71	180593363.6	-0.02708847	-0.01917723	-0.01085195	
31	-1.71	132585062.9	108506362.8	96226992.94	180593363.6	0.734644093	0.601130089	0.550880651	-6638188.476	-4029993.67	-1996680.96	180593363.6	-0.02708084	-0.01919108	-0.01086226	
32	-1.7	132967588.4	108501673.96	96071840.32	180593363.6	0.736882251	0.601104728	0.550856458	-6696181.361	-4053703.45	-1999787.31	180593363.6	-0.02707414	-0.01920528	-0.01087284	
33	-1.69	133357296.6	108497490.21	95918348.56	180593363.6	0.73884363	0.601080914	0.550833644	-6754742.778	-4077374.75	-2002809.22	180593363.6	-0.02706831	-0.01921987	-0.01088401	
34	-1.68	133754177.4	108493817.3	95767395.73	180593363.6	0.740637278	0.601058619	0.550812193	-6813018.917	-4101203.32	-2005822.34	180593363.6	-0.02706336	-0.01923484	-0.01089557	
35	-1.67	134158527.6	108490627.1	95618950.46	180593363.6	0.742287288	0.601037802	0.550791992	-6872257.202	-4125433.13	-2008829.45	180593363.6	-0.02705927	-0.01924995	-0.01090746	
36	-1.66	134570551.7	108487932.2	95473042.95	180593363.6	0.743795779	0.601018411	0.550772997	-6931948.193	-4150133.71	-2011823.53	180593363.6	-0.02705593	-0.01926518	-0.01091964	
37	-1.65	134990461.9	108485734.28	95329518.99	180593363.6	0.744748296	0.601000228	0.550755181	-6992270.477	-4175339.02	-2014793.77	180593363.6	-0.02705326	-0.01928053	-0.01093211	
38	-1.64	135418479	108484019.3	95187409.91	180593363.6	0.745953019	0.600983242	0.550738512	-7052637.957	-4201638.1	-2017845.27	180593363.6	-0.02705121	-0.01929608	-0.01094491	
39	-1.63	135854832.4	108482739	95046772.63	180593363.6	0.75226924	0.600967373	0.550723013	-7113607.325	-4227225.01	-2020959.75	180593363.6	-0.02704972	-0.01931239	-0.01095809	
40	-1.62	136299761	10848193.6	94907649.84	180593363.6	0.75472344	0.600952654	0.550709449	-7174971.824	-425314.91	-2024148.75	180593363.6	-0.02704879	-0.01932949	-0.01097169	
41	-1.61	136753913.2	108481663.2	94770639.43	180593363.6	0.757245607	0.600939019	0.550696951	-7236712.605	-4279324.12	-2027324.27	180593363.6	-0.02704831	-0.01934746	-0.01098576	
42	-1.6	137216441.1	108481405.4	94634911.28	180593363.6	0.759800364	0.600926444	0.550685475	-7298908.582	-4305709.24	-2030492.24	180593363.6	-0.02704828	-0.01936619	-0.01099924	
43	-1.59	137688937.7	108481154.9	94499506.49	180593363.6	0.762423009	0.600914938	0.550675003	-7361626.758	-4332772.17	-2033642.86	180593363.6	-0.02704861	-0.01938567	-0.01101327	
44	-1.58	138170357.7	108480917.5	94365387.85	180593363.6	0.765091003	0.600904403	0.550664548	-7424971.734	-4360050.26	-2036770.89	180593363.6	-0.02704929	-0.01940592	-0.01102748	
45	-1.57	138661208.1	108480684.6	94232659.63	180593363.6	0.767813373	0.600894854	0.550654101	-7488985.395	-4387726.37	-2040010.67	180593363.6	-0.02705023	-0.01942697	-0.01104248	
46	-1.56	139160494.1	108480453.8	94101317.79	180593363.6	0.770593621	0.600886244	0.550644658	-7554024.788	-4415823.97	-2043387.17	180593363.6	-0.02705145	-0.01944875	-0.01105762	

Figura 4.32: Datos importados al completo.

Para terminar, lo que debemos hacer es representar gráficamente cada grupo de tensiones para distintas profundidades en un mismo gráfico. En Excel existe una utilidad bastante desarrollada que permite hacerlo. Así que seleccionamos la columna de  $x/a$  y las tres que se quiere representar, junto con la utilidad de Excel. El resultado, una vez configurado a gusto de cada usuario, se muestra en la figura 4.3

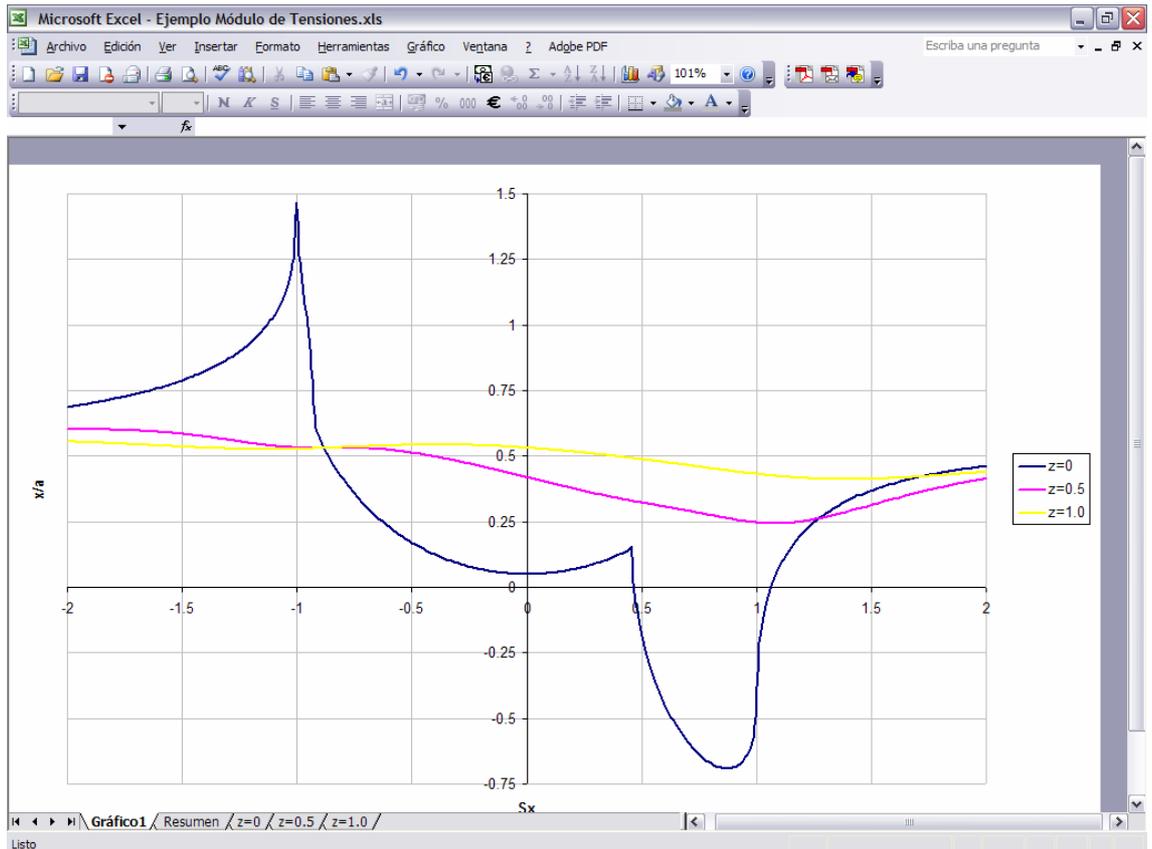


Figura 4.33: Gráfico de tensiones  $\sigma_x$  para el ejemplo.