

Adaptación al Entorno Windows del Programa TRITE para Análisis Estático de Estructuras

Julio Massa y Martín Díaz

Dto. de Estructuras – Facultad de C. E. F. y N. – Universidad Nacional de Córdoba.

Casilla de Correo 916 – 5000 Córdoba – Argentina. e-mail: jmassa@efn.uncor.edu

Resumen – Se presenta el desarrollo de un software preprocesador para el programa “TRITE” que permite analizar pórticos espaciales en régimen elástico lineal bajo cargas estáticas. Se escribieron más de 13000 nuevas líneas de código fuente, que compiladas en un archivo ejecutable y dos Librerías de Enlace Dinámico (DLL) conforman un nuevo programa de computación denominado W-TRITE. El nuevo programa, que incluye como módulo de cálculo al programa TRITE escrito en lenguaje FORTRAN, es de uso libre y está disponible en la Web. El software desarrollado permite analizar estructuras de barras tridimensionales con diversas hipótesis de carga y determinar la envolvente de las hipótesis. Se obtienen los valores de los desplazamientos y giros de los nudos, los esfuerzos y tensiones de Von Mises en los extremos de las barras, reacciones de apoyo, y fuerzas de interacción entre pares de nudos relacionados. El preprocesador se desarrolló para funcionar bajo el sistema operativo Microsoft Windows y fue escrito en el lenguaje de programación C++ usando las Interfases de Programación de Aplicaciones (APIs) nativas de Windows y las APIs de la Biblioteca Gráfica Abierta OpenGL. El sistema fue desarrollado en el Entorno Integrado de Desarrollo (IDE) para el lenguaje de programación C/C++ de Bloodshed, Dev-C++, que es distribuido bajo Licencia Pública General (GNU). El preprocesador aquí presentado potencia al programa TRITE adaptándolo al entorno Windows y dotándolo de capacidades gráficas que permiten visualizar la estructura desde diversos ángulos a voluntad del usuario.

Palabras Clave – Análisis estructural. Interfases de Windows.

I. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se presenta el desarrollo de un software preprocesador para el programa “TRITE” [1] para adaptarlo al entorno Windows y agregarle capacidades gráficas que permiten visualizar la estructura.

El programa TRITE tiene su origen en un Trabajo Final de Carrera en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Río Cuarto en la década de los 80'; en esa época el programa se denominó CELEB (Cálculo Estático Lineal de Estructuras de Barras) [2]. Todo el desarrollo posterior se realizó en el Departamento de Estructuras de la Universidad Nacional de Córdoba. En la década de los 90' se lo modificó sustancialmente y se lo llamó TRIDI (por tridimensional). Seguidamente se le agregó un pre y un posprocesador para incluir una biblioteca de 12 tipos de secciones que cubren los casos más frecuentes, para los cuales el programa calcula automáticamente las rigideces de las barras y determina las tensiones efectivas de Von Mises en los extremos de las barras, y el programa pasó a llamarse TRITE (TRI por tridimensional y TE por tensiones).

El programa TRITE permite analizar pórticos espaciales bajo cargas estáticas, con diversos tipos de apoyos y una variada gama de tipos de cargas, admitiendo desplazamientos prefijados y cambios de temperatura y calculando desplazamientos, reacciones, esfuerzos y tensiones. Cuando se consideran varias hipótesis de carga, el programa determina la envolvente de todas las variables del problema. El programa ha sido largamente utilizado en la docencia y en numerosos Trabajos Finales de Carrera y de manera natural se ha ido transfiriendo a las empresas del medio por los alumnos y egresados debido a su libre distribución. Esto provee la retroalimentación necesaria para mejorar el sistema.

La entrada de datos del programa TRITE se hace modificando un archivo ASCII que se usa como “formulario” [1] y que tiene un aspecto similar a la primera parte de la salida que figura en las últimas páginas de este trabajo en la sección IV-B. En el año 1998 se desarrolló un preprocesador para la entrada

de datos en un entorno Windows y un posprocesador para visualizar la estructura y su deformada, dicho programa se denominó WINTRITE [3]. Esta versión del programa no tuvo difusión porque utilizaba el motor de la base de datos del programa DELPHI y no se disponía de autorización para emplearlo. Por ello en el año 2005 se desarrolló el programa W-TRITE [4] que brinda prestaciones similares al WINTRITE pero utiliza software de distribución libre.

El programa W-TRITE permite modificar e incorporar datos en cualquier momento en un entorno Windows que va desplegando una serie de ventanas que contienen cuadros de diálogo donde se ingresan los datos. La estructura se puede visualizar en la pantalla a través de un gráfico en tres dimensiones que muestra la estructura en una perspectiva cuyo punto de vista puede ser cambiado de posición mediante rotaciones alrededor de dos ejes cartesianos. La vista puede ser ampliada, reducida, desplazada hacia sus costados, o desplazada hacia arriba o abajo para observar en detalle algún sector.

II. DESCRIPCIÓN DE LAS HERRAMIENTAS DE PROGRAMACIÓN UTILIZADAS

El programa W-TRITE se desarrolló para funcionar bajo el sistema operativo Microsoft Windows. Fue escrito en el lenguaje de programación C++ [5] [6] [7] y usa las APIs (Interfases de Programación de Aplicaciones) nativas de Windows (Win32) [8] [9] [10]. Esta no es la única manera de programar para Windows, sin embargo de esta forma se obtiene mejor performance, mayor potencia y gran versatilidad en el uso de las características de Windows. Los ejecutables son relativamente pequeños y no requieren librerías externas para su funcionamiento (excepto las DLLs propias de Windows). Se utilizaron, además, las APIs de la Biblioteca Gráfica Abierta OpenGL.

El sistema fue desarrollado con el Entorno Integrado de Desarrollo (IDE) para el lenguaje de programación C/C++ de Bloodshed, Dev-C++ [11], que es distribuido bajo GNU General Public License. En el resto de esta sección se describen las características de las herramientas de programación utilizadas para desarrollar el programa W-TRITE.

A. El Lenguaje C/C++

C/C++ es el lenguaje por excelencia para programar en Windows [9]. Microsoft utiliza este lenguaje para la mayoría de sus desarrollos, salvo algunas utilidades sencillas que son realizadas en Visual Basic.

C++ es un lenguaje de programación orientada a objetos que toma como base el lenguaje C, diseñado a mediados de los ochenta, por Bjarne Stroustrup. La programación orientada a objetos tiene una filosofía de programación distinta a la de C (programación estructurada) aunque con C++ es posible, pero no especialmente recomendable, mezclar ambos estilos de programación. En términos generales, se puede ver a C++ como una extensión de C. Sin embargo, aunque C++ se definió a partir del estándar de C de 1989, ha evolucionado por separado y existen pequeñas divergencias entre ellos.

Actualmente existe un estándar, denominado ISO C++ [7], al que se han adherido la mayoría de los fabricantes de compiladores. Existen también algunos intérpretes como ROOT (enlace externo). Las principales características del C++ son la abstracción (encapsulación), el soporte para programación orientada a objetos (polimorfismo) y el soporte de plantillas o programación genérica (Templates). Por ende, se puede decir que C++ es un lenguaje que abarca tres paradigmas de la programación: La programación estructurada, la programación genérica y la programación orientada a objetos.

El lenguaje de programación C/C++ es de uso general, con una sintaxis sumamente compacta y de alta portabilidad. Es común que lo caractericen como un lenguaje de “bajo nivel”. C++ añade propiedades poco comunes en otros lenguajes de alto nivel: la posibilidad de redefinir los operadores y la identificación de tipos en tiempo de ejecución (RTTI).

Características del C/C⁺⁺

- Es un lenguaje estructurado de nivel medio, no tan bajo como Assambler ni tan alto como Ada o Haskell. Esto permite una mayor flexibilidad y potencia, a cambio de menor abstracción.
- Permite casi cualquier conversión de tipos. No es necesario que los tipos sean exactamente iguales para poder hacer conversiones, basta con que sean parecidos.
- No lleva a cabo comprobación de errores en tiempo de ejecución, por ejemplo no se sobrepasen los límites de los arreglos. El programador es responsable de llevar a cabo esas comprobaciones.
- Tiene un reducido número de palabras clave, unas 32 en C89 y 37 en C99.
- Dispone de una biblioteca estándar que contiene numerosas funciones siempre disponibles, además de las extensiones que proporcione cada compilador o entorno de desarrollo.

B. Interfases de Programación de Aplicaciones Win32

Win32 [12][13] es un conjunto de APIs (Application Programming Interface) disponible para los sistemas operativos Microsoft Windows. Es un conjunto de funciones, tipos y mensajes pre-definidos para poder programar sobre los sistemas operativos de 32 bits de Microsoft. Estas funciones o librerías se enlazan en tiempo de ejecución y no de compilación, disminuyendo el espacio que ocupa el programa [8][13].

Win32 es la API de 32 bits que se utiliza en todas las versiones modernas de Microsoft Windows, consiste en un conjunto de funciones C que se exponen a las aplicaciones a través de bibliotecas de enlace dinámico, denominadas DLL (Dynamically Linked Library). Las principales DLLs que forman Win32 son kernel32.dll, user32.dll y gdi32.dll. Aunque la implementación de Microsoft de esta API está protegida por copyright, nada impide a otros fabricantes de software desarrollar sus propias versiones de esta misma API, de tal manera que aplicaciones diseñadas para funcionar bajo Windows puedan ejecutarse en otros entornos.

Las características primarias de las API de Windows son las funciones y los mensajes internos y externos de Windows. Las funciones Windows son el corazón de las aplicaciones Windows. Hay más de 600 funciones de Windows disponibles para ser llamadas por cualquier lenguaje, como C o Visual Basic. Las principales ventajas que se obtienen usando APIs son la gran funcionalidad que pueden darle a una dada aplicación, y la gran velocidad de proceso, ya que a menudo es mucho más rápido realizar una función a través de una API adecuada que por medio del lenguaje en sí mismo.

Las API Win32 permiten una interfase gráfica con aspecto y funcionalidad familiar, común a la mayoría de utilidades de Windows donde no es necesario instalar archivos de sistema ni archivos adicionales para el funcionamiento del programa. Los mensajes son utilizados por Windows para permitir que dos o más aplicaciones se comuniquen entre sí y con el propio sistema Windows. Se dice que las aplicaciones Windows son conducidas por mensajes o sucesos. Conocer todas las APIs de Windows es imposible, ya que tiene gran similitud con aprenderse la guía de teléfonos.

C. Interfases de Programación de Aplicaciones - API

Una interfase de programación de aplicaciones, API (Application Programming Interface), es un conjunto de especificaciones de comunicación entre componentes de software. Constituye un método para conseguir abstracción en la programación, generalmente, aunque no necesariamente, entre los niveles o capas inferiores y los superiores del software. Uno de los principales propósitos de una API es proporcionar un conjunto de funciones de uso general, por ejemplo, para dibujar ventanas o iconos en la pantalla. De esta forma, los programadores aprovechan las ventajas de la API haciendo uso de su funcionalidad, y evitan el trabajo de programar todo desde el principio. Las APIs son abstractas: el software que proporciona una cierta API generalmente es llamado la implementación de esa API.

D. Librerías Dinámicas

Casi todas las APIs de Windows se unen formando librerías de enlace dinámico [9] [14] [15]. Las librerías dinámicas (Dynamic Link Libraries, abreviadamente DLLs) permiten que las aplicaciones Windows compartan código y recursos. Una DLL es actualmente un fichero ejecutable que contiene funciones que pueden ser utilizadas por todas las aplicaciones.

Si bien en DOS es usual a utilizar librerías de enlace estático, que a la hora de compilar se incluyen junto con el código y cuando se ejecuta la aplicación todas las librerías se cargan en memoria esperando a ser invocadas, cuando se trabaja con DLLs, el enlace con la aplicación es dinámico en tiempo de ejecución.

Una DLL no se incluye dentro del código, en el momento que se llama a la función, la DLL se carga en memoria, es utilizada por la API, y a continuación se descarga. La gran ventaja que posee este método es que no es necesario tener gran cantidad de código cargado en memoria a la hora de ejecutar la aplicación. Además, al utilizar las DLLs que proporciona Windows, las mismas están disponibles en cualquier máquina con este sistema operativo y no es necesario agregarlas.

La utilización de librerías dinámicas tiene varias ventajas. Una ventaja es que se pueden actualizar sin tener que modificar los programas que las utilizan por estar separadas del programa, otra ventaja es el ahorro de memoria principal y de disco ya que como es Windows quien administra la utilización de las DLLs, no existe duplicidad de código cuando varias aplicaciones las utilizan.

E. Biblioteca de Gráficos Abierta OpenGL

OpenGL [16] [17] es una biblioteca gráfica desarrollada originalmente por Silicon Graphics Inc. (SGI) para proveer “una interfase entre un software y un hardware de gráficos”. OpenGL que significa Open Graphics Library, es una API para diseñar gráficos en 2D y 3D, soportada por cualquier sistema operativo, solamente hace falta una tarjeta gráfica con soporte para OpenGL. En esencia es un motor de gráficos de 3D y una librería de modelado que es extremadamente portátil y muy rápida.

Usando OpenGL se pueden crear excelentes gráficos en 3D con la calidad visual de un trazador de líneas. La ventaja más grande del uso de OpenGL es que es más rápido que el trazador de líneas. Usa algoritmos cuidadosamente desarrollados y optimizados por SGI, un líder mundial en gráficos por computadora y animaciones.

OpenGL está enfocado para ser usado con el hardware de los computadores y está diseñado y optimizado para la presentación y manipulación de gráficos en 3D. Se usa para una gran variedad de propósitos: en ingeniería, en CAD, en aplicaciones arquitectónicas y hasta para generar dinosaurios por computadoras para películas. La introducción de las normas industriales de APIs de 3D a los sistemas operativos del mercado, tales como Microsoft Windows, ha tenido grandes repercusiones. Con el avance de los microprocesadores de PC rápidos, los gráficos en 3D se han convertido en un componente típico de diversas aplicaciones, no solo para juegos y aplicaciones científicas.

Entre las características de OpenGL puede mencionarse que es multiplataforma (hay incluso un OpenGL ES para móviles), y que gestiona la generación de gráficos 2D y 3D por hardware ofreciendo al programador una API sencilla, estable y compacta. Además permite la creación de extensiones, una serie de añadidos sobre las funcionalidades básicas, en aras de aprovechar la evolución tecnológica.

Siendo OpenGL multiplataforma puede encontrarse en una gran cantidad de plataformas (Linux, Unix, Mac OS, Microsoft Windows, etc.). En Linux se encuentra además Mesa, usada con la autorización de SGI. Aunque Mesa usa la sintaxis de comandos de OpenGL o su máquina de estados, los autores no poseen la licencia OpenGL de SGI. Por ello no se considera a Mesa ni como un reemplazo ni como compatible con OpenGL.

III. EL PROGRAMA W-TRITE

En este trabajo se presenta un software pre procesador para el programa TRITE. El programa TRITE y su preprocesador se integran en el programa W-TRITE constituido por un archivo ejecutable y dos DLL. El módulo de cálculo está escrito en lenguaje FORTRAN y se utiliza para analizar pórticos espaciales en régimen elástico lineal bajo cargas estáticas.

A. Requerimientos e Instalación del Programa

Para la utilización del programa W-TRITE es necesario ser usuario del sistema operativo Windows, tener conocimientos de análisis estructural de pórticos y disponer de un procesador Intel Pentium, similar o superior y un sistema operativo MS Windows 95 o superior.

El programa no requiere instalar ningún tipo de archivo de sistema adicional, simplemente se debe copiar la carpeta con el contenido del programa W-TRITE en algún lugar del disco rígido, que puede ser un directorio del disco C, y crear, si se quiere, un acceso directo del archivo ejecutable “W-TRITE.exe” en el escritorio, el menú inicio o ambos, según se prefiera.

B. Entrada de Datos

A continuación, se describe sucintamente como se entran los datos para correr el programa W-Trite, una descripción más detallada puede verse en la referencia [4]. El listado minucioso de toda la información que debe contener el archivo de datos se puede consultar en la referencia [1].

Ejecución del programa

Una vez iniciado el programa picando el archivo ejecutable W-TRITE.exe o su acceso directo, se abre una ventana de Windows de aspecto similar a la mayoría de las aplicaciones para ese sistema operativo, donde se observan las utilidades básicas. En el menú popup “Archivo” aparecen varias opciones: “Nuevo” para empezar un nuevo proyecto, “Abrir”, para cargar un proyecto guardado con anterioridad, y además “Guardar”, “Guardar como” y “Salir”. Una vez iniciado el programa se puede cargar un archivo nuevo o abrir uno existente.

En todos los cuadros de diálogos, para cambiar el foco del cursor, es decir: para pasar de un cuadro de texto a otro se puede usar tanto la tecla “TAB” como la tecla “Enter”, esta facilidad fue introducida para la rápida incorporación de datos, según la preferencia del usuario.

El programa asume que los datos y resultados están dados en unidades consistentes.

Número de nudos y barras

Al comenzar un archivo nuevo, aparece en la pantalla el cuadro de diálogo de la Figura 1 para entrar la cantidad de nudos y barras de la estructura que se quiere analizar. Hay dos opciones: llenar los cuadros de texto con los valores de los números de nudos y barras y picando el botón “Siguiente” para continuar la carga de datos a modo de un asistente y así definir una estructura con sus cargas, o presionar el botón “Cancelar” para introducir luego la información mediante los cuadros de diálogo del menú “Modificar”.

Figura 1 es un cuadro de diálogo con el título "Barras y Nudos". Contiene dos campos de entrada de texto: "Número de barras" y "Número de nudos". En la parte inferior, hay dos botones: "Cancelar" y "Siguiente >>".

Figura 1

Figura 2 es un cuadro de diálogo con el título "Barra número 1". Contiene cuatro campos de entrada de texto: "Nudo inicial de la barra", "Nudo final de la barra", "Tipo de sección" y "Tipo de material". A la derecha de "Tipo de sección" y "Tipo de material" hay botones "Cargar" y "Quitar". En la parte inferior, hay tres botones: "<< Atrás", "Cancelar" y "Siguiente >>".

Figura 2

Datos de las barras

Después de introducir la cantidad de nudos y barras, picando el botón “Siguiente” aparece un cuadro de diálogo como el de la Figura 2 para introducir el nudo inicial y final, el material y el tipo de sección de cada barra. El número del nudo inicial de la barra debe ser menor que el del nudo final. En la ventana, aparecen dos cuadros de lista vacíos y dos botones (“Cargar” y “Quitar”) en cada uno de ellos para seleccionar el tipo de sección y de material. Para definir una barra hay que cargar la o las secciones y el o los materiales que se van a utilizar, no hace falta cargar todas las secciones o materiales al mismo tiempo, pudiéndose agregar o quitar secciones o materiales en cualquier momento.

Cuando las listas de secciones y materiales no se encuentran vacíos se puede utilizar el botón “Quitar” para dejar de ver una sección o un material en dichas listas, para ello simplemente se debe seleccionar una sección o un material de la lista y picar “Quitar”, esta operación no borra la sección o el material quitado, simplemente lo saca de la lista. Esta utilidad sirve para, en el caso de tener muchos datos, ver en la lista solamente los elementos más usados, pudiéndose volver a incorporar en cualquier momento esos elementos.

Datos de las secciones

Al picar el botón “Cargar sección” aparece el cuadro de diálogo de la Figura 3. Para incorporar las secciones hay dos opciones: seleccionar alguna de las 12 tipos de sección de la lista de la izquierda que constituye la biblioteca del programa y picar el botón “Agregar”, o picar el botón “Nueva” para definir una sección que no figura en la biblioteca.

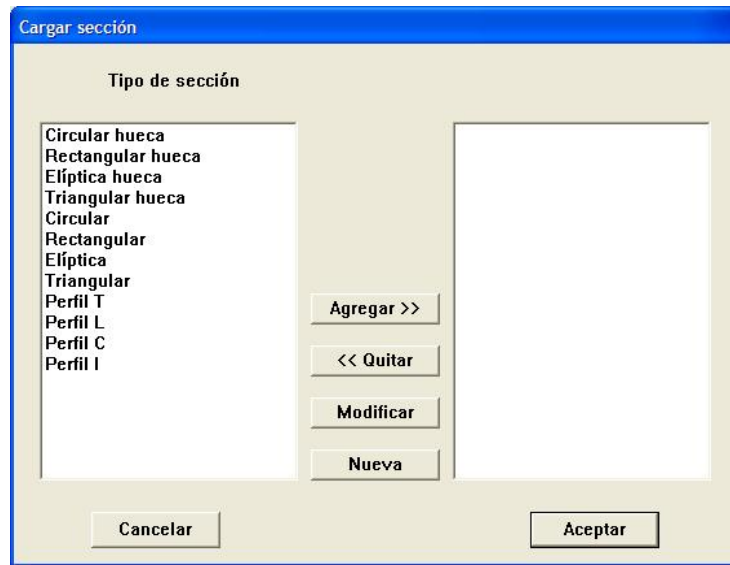


Figura 3

Para eliminar alguna sección anteriormente definida, se la selecciona en la lista que aparece a la derecha en el cuadro de diálogo “Cargar sección” y se pica “Quitar”. Si se desea modificar una sección, se selecciona la sección a modificar y se pica “Modificar”. Una vez introducidas las secciones necesarias se pica el botón “Aceptar” del cuadro de diálogo para cargar secciones y continuar con la ejecución del programa.

Incorporación de una sección de catálogo

Una vez seleccionada una sección de la biblioteca del cuadro de lista que se encuentra a la izquierda en la ventana “Cargar sección”, al picar el botón “Agregar” (ver Figura 3), aparece un cuadro de diálogo como el de la Figura 4. En el cuadro de texto superior hay que dar un nombre para identificar la sección que se está incorporando. A continuación hay que introducir las dimensiones

requeridas según el croquis que aparece en la parte derecha en la Figura 4 (en este caso se ha seleccionado una sección T) y el valor que toma el ángulo β en grados. El lector interesado puede consultar los detalles sobre los ejes locales de las barras y sobre el ángulo β en las referencias [1] [4] y [18].

Figura 4

Figura 5

Incorporación de una sección que no figura en el catálogo

Para definir una sección cuya geometría no está contemplada en la biblioteca del programa (lista izquierda de la Figura 3), hay que picar el botón “Nueva” en esa ventana para abrir un cuadro de diálogo como el de la figura 5. Hay que introducir un nombre para identificar la sección y llenar los cuadros de texto con las propiedades de la sección (área, momentos de inercia, rigidez torsional, áreas de corte) que deben ser calculadas por el usuario y ángulo β .

Datos de los materiales

El botón “Cargar material” del cuadro de diálogo de la Figura 7 permite entrar los materiales picando el botón “Nuevo” que abre un cuadro de diálogo como el de la figura 8. Si la lista ubicada a la izquierda en el cuadro de diálogo de la Figura 7 ya contiene el material a utilizar porque figura en la base de datos con las propiedades de los materiales, basta seleccionarlo de esa lista y picar “Agregar”.

Figura 7

Figura 8

Para los materiales nuevos, al igual que en el caso de las secciones, hay que dar un nombre para identificar al material que se va a introducir, y especificar todos los valores de las propiedades que solicita el cuadro de diálogo. Una vez realizados los cambios necesarios hay que picar el botón “Aceptar” para continuar la ejecución del programa.

Coordenadas de los Nudos

Terminada la carga de todas las barras se procede a cargar las coordenadas de los nudos llenando un cuadro de diálogo como el de la Figura 9, para cada nudo. Si el nudo que se está definiendo está relacionado cinemáticamente con otro nudo, se deberá indicar el número del nudo con el cual está relacionado y la manera, indicando qué desplazamientos o giros serán iguales según los ejes coordenados del sistema global. Si en el nudo hay un apoyo (restricción) se debe indicar también en esta instancia, para ello hay dos tipos de restricciones posibles: global o inclinado.

Figura 9

Figura 10

Apoyos inclinados respecto al sistema de coordenadas globales

Según se observa en la Figura 10, estos apoyos se pueden definir de dos maneras: a) dando las coordenadas de un punto extremo de una barra biarticulada ficticia; b) dando los cosenos directores que definen una dirección y un sentido. Se puede prefijar el desplazamiento o la rigidez. El desplazamiento prefijado es la proyección del desplazamiento del apoyo sobre la dirección inclinada.

Apoyos definidos en el sistema de coordenadas globales

Los apoyos en el sistema global se definen en el cuadro de diálogo “Apoyos globales” de la Figura 11. Para cada uno de los seis grados de libertad (tres desplazamientos y tres giros) se prefija alguna de las siguientes condiciones: grado de libertad libre, grado de libertad totalmente restringido, apoyo elástico o desplazamiento o giro prefijado.

Figura 11

Hipótesis de carga

En cada una de las hipótesis de carga se pueden aplicar los tipos de carga que se observan en la Figura 12. Pueden ser cargas en los nudos y/o cargas en las barras: cargas concentradas, cargas axiales de variación lineal, cargas transversales según ejes principales de inercia de variación lineal, cambio de temperatura con variación lineal en el espesor, y el peso propio de la estructura.

Figura 12

En esta ventana se pueden observar los botones para cargar a la estructura con los distintos tipos de cargas. También están las opciones de copiar (esto es cargar con una carga igual a la que se copia), modificar y quitar una condición de carga previamente introducida. Para cualquiera de estas tres acciones el procedimiento es siempre el mismo: se selecciona la condición de carga en cuestión y se pica el botón correspondiente.

La descripción detallada de cómo aplicar las cargas en las barras y de cómo modificar los datos de carga de una barra se ha omitido por razones de espacio y puede consultarse en la referencia [4].

C. Visualización de la Estructura

Una vez definida la estructura puede ser visualizada picando “Estructura” en el menú “Ver”. La vista en perspectiva se puede rotar alrededor de los ejes cartesianos x e y (en el plano de la vista) con las opciones de “Rotar” del menú “Ver”, o más fácilmente a través del teclado con los botones \uparrow , \downarrow , \leftarrow y \rightarrow . La vista también puede ser ampliada o reducida mediante “Ampliar” o “Reducir” del menú “Ver” o por teclado con las teclas “+” y “-”. Con las barras de desplazamiento horizontal y vertical se puede trasladar el punto de vista en estas direcciones. Mediante este mecanismo el analista puede ver la estructura desde distintos ángulos para verificar que no se han cometido errores en los datos de entrada.

D. Archivo de Salida

La salida del programa conteniendo los resultados de los cálculos se encuentra en un archivo de texto de códigos ASCII (Figura 13), para verlo hay dos opciones: picar “Resultados” en el menú “Ver” ó picar “Calcular” en el menú “Trite”. Si se introduce algún cambio en los datos de la estructura, al ver posteriormente la salida según la opción del menú “Ver” no se van a tener en cuenta las modificaciones, simplemente van a mostrarse los resultados anteriormente calculados, en cambio picando “Calcular” del menú “Trite” se logra que el módulo de cálculo “TRITE” realice nuevamente los cálculos según los datos modificados.

El archivo de salida puede abrirse utilizando cualquier editor de textos de códigos ASCII, por ejemplo el editor de texto "Bloc de notas" de Windows, es recomendable guardarlo con otro nombre. Si no es guardado con otro nombre se sobrescribirá cada vez que se calcule una estructura.

```

SALIDA - Bloc note
File Modifica Formato Visualizza ?

-----
Programa TRITE                                autor: Julio C. MASSA
última revisión: 3/ 2/05                      Dto. Estructuras - F.C.E.F. y N.
Análisis de PÓRTICOS ESPACIALES              Univ. Nacional de Córdoba - Arg.
-----
                                           fecha: 26/ 9/2005      hora: 0:34

C:\Documentos\entrada|

NUDOS   BARRAS   APOYOS   INCLI   PAR-REL   SEC   MAT   HIPO   COMB   MAX
17       20       6        0        0        5    1    1    0    0

CONECTIVIDADES Y PROPIEDADES DE LAS BARRAS
BARRA  I    J SEC MAT   BARRA  I    J SEC MAT   BARRA  I    J SEC MAT
1     1    2  1  1     8     7    8  1  1    15    11   14  4  1
2     2    3  1  1     9     8    9  1  1    16    12   13  5  1
3     3    4  1  1    10     7   10  4  1    17    13   14  5  1
4     4    5  1  1    11     9   11  4  1    18    13   15  2  1
5     5    6  1  1    12    10   11  1  1    19    10   16  1  1
6     3    7  1  1    13     8   13  3  1    20    11   17  1  1
7     4    9  1  1    14    10   12  4  1

COORDENADAS DE LOS NUDOS
NUDO    X      Y      Z    NUDO    X      Y      Z
1      0.000  26.000  0.000  10     0.000  26.000  235.000
2      0.000  26.000  60.000  11     0.000 -26.000  235.000
3      0.000  26.000 105.000  12     0.000  26.000  285.000
    
```

Figura 13

La primera parte de la salida reproduce todos los datos para permitir su verificación. Además, la salida provee:

- Propiedades de las secciones de catálogo calculadas por el programa (área, momentos de inercia, rigidez torsional, áreas de corte).
- Cosenos directores de los *Ejes Locales* y *Principales* de cada una de las barras.
- Para cada Hipótesis de carga la salida provee:
 - Desplazamientos y giros de cada uno de los nudos.
 - Esfuerzos en los dos extremos de cada barra referidos a *Ejes Principales de Inercia*.
 - Tensiones máximas efectivas de Von Mises en los extremos de cada barra cuando la sección pertenece a la biblioteca del programa.
 - Reacciones de apoyo.
 - Reacciones en los apoyos inclinados.
- Cuando hay varias hipótesis de carga el programa determina la envolvente de todas las variables del problema.
- Estabilidad del Equilibrio (*Pandeo*).

El programa TRITE utiliza la teoría lineal que considera el equilibrio en el sistema indeformado y por lo tanto: no puede detectar la posibilidad de Pandeo del conjunto estructural. No obstante hace una verificación, un tanto burda, de la posibilidad de pandeo de cada barra en forma aislada.

Verificación a Pandeo: Para cada una de las barras comprimidas se compara la tensión de compresión (CargaAxial/área) con la tensión crítica de pandeo:

$$\lambda < \lambda_o \rightarrow \sigma_{\text{crít}} = \sigma_f - \frac{4 \pi^2 E}{3 (\lambda_o)^{3.5}} (\lambda)^{1.5} \quad \lambda > \lambda_o \rightarrow \sigma_{\text{crít}} = \frac{\pi^2 E}{(\lambda)^2} \text{ (Euler)}$$

donde: $\lambda_o = 4,8 \sqrt{E / \sigma_f}$ λ es la esbeltez y σ_f es la tensión de fluencia.

Esta verificación es válida para barras biarticuladas. Puede usarse también estando del lado de la seguridad cuando los desplazamientos de los extremos de la barra en la dirección transversal a la barra, están fuertemente restringidos. La verificación que realiza el programa no es válida cuando una barra muy comprimida es subdividida en varias, agregando nudos intermedios o alguno de los extremos de una barra muy comprimida tiene muy escasa restricción al desplazamiento en la dirección transversal a la barra.

IV. EJEMPLO: GUINCHE ELEVADOR PARA MATRICES

Para ilustrar el uso del programa se toma como ejemplo el caso de un elevador de matrices en una máquina inyectora de plástico (Figura 17). Se requiere analizar un equipo para elevar piezas desde el nivel del piso al espacio entre platos de trabajo de la máquina operadora, con una capacidad de izado superior a los 1500 Kg y con limitaciones de desplazamiento.

Se trata de rediseñar un equipo que falló en operación. Como condición de rediseño se especifica una carga: 1500 Kg, una hipótesis de sobrecarga del 50% y el peso propio, para las distintas posiciones del brazo de izado de cargas, se considera la distancia máxima medida a 90 grados del eje longitudinal de la máquina, siendo esta posición la más desfavorable y la que ocasionó la falla del equipo.

Consideraciones geométricas: tanto las secciones de las barras, como el número y disposición están definidas dado que el equipo está operando desde hace ya tiempo. No se puede modificar radicalmente la estructura principal.

A. Archivo de Datos del Ejemplo

La estructura consta de 17 nudos y 20 barras con tres tipos diferentes de secciones pero del mismo material. La Figura 14 muestra la lista donde se pueden ver, modificar, copiar o eliminar las barras.

Modificar Barras					
Barra	Nudo inic.	Nudo final	Sección	Material	
1	1	2	1	1	
2	2	3	1	1	
3	3	4	1	1	
4	4	5	1	1	
5	5	6	1	1	
6	3	7	1	1	
7	4	9	1	1	
8	7	8	1	1	
9	8	9	1	1	
10	7	10	1	1	
11	9	11	1	1	
12	10	11	1	1	
13	8	13	2	1	
14	10	12	1	1	
15	11	14	1	1	
16	12	13	1	1	
17	13	14	1	1	

Figura 14

Modificar Nudos

Nodos	Coord. X	Coord. Y	Coord. Z	Relac. c/nudo	Apoyo Glob.	Apoyo Incl.
1	0.000000	26.000000	0.000000		X	
2	0.000000	26.000000	60.000000		X	
3	0.000000	26.000000	105.000000			
4	0.000000	-26.000000	105.000000			
5	0.000000	-26.000000	60.000000		X	
6	0.000000	-26.000000	0.000000		X	
7	0.000000	26.000000	185.000000			
8	0.000000	0.000000	185.000000			
9	0.000000	-26.000000	185.000000			
10	0.000000	26.000000	235.000000			
11	0.000000	-26.000000	235.000000			
12	0.000000	26.000000	285.000000			
13	0.000000	0.000000	285.000000			
14	0.000000	-26.000000	285.000000			
15	0.000000	170.000000	285.000000			
16	-47.000000	36.000000	-20.000000		X	
17	-47.000000	-36.000000	-20.000000		X	

Cancelar Aceptar

Figura 15

La lista de nudos, después de entrar los datos se muestra en la Figura 15. Se observa que la estructura sólo tiene apoyos globales. El primer análisis se realiza considerando un solo nudo cargado con 2250 Kg y considerando el peso propio de la estructura como se muestra en al Figura 16. La situación más desfavorable es cuando el nudo 15 está a 90 grados del eje longitudinal de la máquina.

Carga estructural

Hipótesis de carga

Nudo	Px	Py	Pz	Mx	My	Mz
15	0.000000	0.000000	-2250.00	0.000000	0.000000	0.000000

Cargar en nudo

Carga concentrada

Carga distribuida

Carga térmica

Copiar

Modificar

Quitar

☐ Variación térmica uniforme en toda la estructura

☒ Considerar peso de la estructura

Cancelar Aceptar

Figura 16

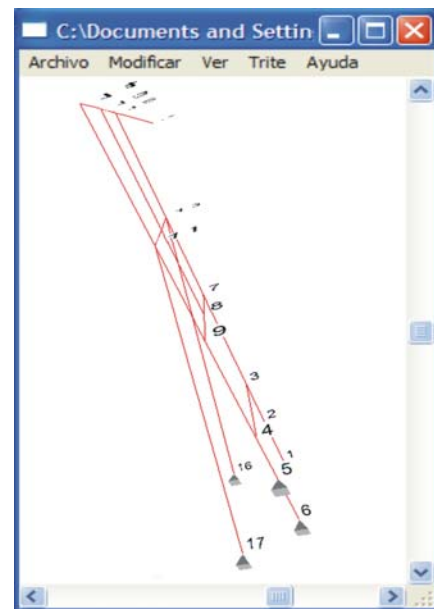


Figura 17

En la Figura 17 se muestra una vista en perspectiva del modelo utilizado para analizar la estructura del guinche del ejemplo. El usuario del programa puede rotar la vista en perspectiva alrededor de los ejes cartesianos x e y para visualizar la estructura desde diversos ángulos.

En las dos páginas siguientes se muestra el archivo de salida del guinche del ejemplo (Figura 17). Como es práctica habitual el archivo ASCII se ha “pegado” en el WORD usando fuente “Courier” para mantener el encolumnado de la salida. Para esta hipótesis de carga se observan nudos donde la tensión efectiva (Von-Mises) supera el valor de fluencia y se producen deformaciones permanentes. Para solucionar el problema, se propone soldar dos perfiles doble “T” a las barras laterales de secciones circulares del caso anterior para aumentar la resistencia estructural. Se modifican las secciones de las barras cuyas tensiones resultaron excesivas y se realiza una nueva corrida. Este procedimiento se repite hasta satisfacer las condiciones de diseño.

B. Archivo de Salida del Ejemplo

```

-----
Programa TRITE                                autor: Julio C. MASSA
última revisión: 3/ 2/05                      Dto. Estructuras - F.C.E.F. y N.
Análisis de PÓRTICOS ESPACIALES              Univ. Nacional de Córdoba - Arg.
-----
C:\W-Trite\entrada                            fecha: 11/ 9/2005        hora: 16:11

NUDOS      BARRAS      APOYOS      INCLI      PAR-REL      SEC      MAT      HIPO      COMB      MAX
 17         20         6         0         0         3         1         1         0         0

CONECTIVIDADES Y PROPIEDADES DE LAS BARRAS
BARRA  I   J   SEC  MAT      BARRA  I   J   SEC  MAT      BARRA  I   J   SEC  MAT
 1     1   2   1    1        8     7   8   1    1        15    11  14   1    1
 2     2   3   1    1        9     8   9   1    1        16    12  13   1    1
 3     3   4   1    1       10     7  10   1    1        17    13  14   1    1
 4     4   5   1    1       11     9  11   1    1        18    13  15   2    1
 5     5   6   1    1       12    10  11   1    1        19    10  16   1    1
 6     3   7   1    1       13     8  13   3    1        20    11  17   1    1
 7     4   9   1    1       14    10  12   1    1

COORDENADAS DE LOS NUDOS
NUDO      X      Y      Z      NUDO      X      Y      Z
 1      0.000  26.000  0.000    10      0.000  26.000  235.000
 2      0.000  26.000  60.000    11      0.000 -26.000  235.000
 3      0.000  26.000 105.000    12      0.000  26.000  285.000
 4      0.000 -26.000 105.000    13      0.000   0.000  285.000
 5      0.000 -26.000  60.000    14      0.000 -26.000  285.000
 6      0.000 -26.000   0.000    15      0.000 170.000  285.000
 7      0.000  26.000 185.000    16     -47.000  36.000 -20.000
 8      0.000   0.000 185.000    17     -47.000 -36.000 -20.000
 9      0.000 -26.000 185.000

DIMENSIONES DE LAS SECCIONES DE CATÁLOGO
SEC  COD  FORMA      D1      D2      D3      D4      BETA
 1   24   DOBLETE...  8.000   4.200   0.6000   0.3900   1.000
 2   24   DOBLETE... 12.00   5.800   0.7700   0.5100   90.00
 3    1   CIRC HUECO  7.000   0.560

PROPIEDADES DE LAS SECCIONES
SEC  COD  InerciaYp      InerciaZp      Itorsion      BETA
 1   24   79.367840    7.4424141    0.72203526    1.000000
 2   24   330.690348    25.1550008    2.18219415    90.000000
 3    1   59.180285     59.1802849    118.360570     0.000000

SEC  COD  ÁREA      AcorteYp      AcorteZp
 1   24   7.692000    4.200539     2.753412
 2   24   14.26660     7.444230     5.482467
 3    1   11.32984     5.681209     5.681209

PROPIEDADES DE LOS MATERIALES
TipoMAT  MÓDULO E      MÓDULO G      ALFA      PESO ESP      SIGMAadm
 1        2100000.0  850000.0      0.0000110  0.007800     2400.00

NUDO  FUERZA X  FUERZA Y  FUERZA Z  MOMENTO X  MOMENTO Y  MOMENTO Z
 15    0.000    0.000 -2250.000    0.00    0.00    0.00

Dirección PESO PROPIO      CosX= 0.000000  CosY= 0.000000  CosZ=-1.000000

APOYOS GLOBALES      CÓDIGO=( 0 LIBRE 1 NULO 2 RESORTE 3 PREFIJADO )
NUDO  X Y Z      X Y Z      DATO X      DATO Y      DATO Z
 2     1 1 1      1 1 1      0.0000      0.0000      0.0000
      0.0000      0.0000      0.0000
 1     1 1 1      1 1 1      0.0000      0.0000      0.0000
      0.0000      0.0000      0.0000
 5     1 1 1      1 1 1      0.0000      0.0000      0.0000
      0.0000      0.0000      0.0000
 6     1 1 1      1 1 1      0.0000      0.0000      0.0000
      0.0000      0.0000      0.0000
16     1 1 1      1 1 1      0.0000      0.0000      0.0000
      0.0000      0.0000      0.0000
17     1 1 1      1 1 1      0.0000      0.0000      0.0000
      0.0000      0.0000      0.0000
-----

```

RESULTADOS DE LA HIPÓTESIS DE CARGA 1

ADVERTENCIA:

Los desplazamientos son MUY GRANDES -----> REVISAR condiciones de apoyo

NUDO	DESPLA X	DESPLA Y	DESPLA Z	GIRO X	GIRO Y	GIRO Z
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	0.000000	0.000000
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	0.000000	0.000000
3	0.0578	0.0006	-0.0215	-0.000648	0.002262	-0.002029
4	-0.0464	0.0006	0.0152	-0.000553	-0.001797	-0.002041
.						
15	2.7687	0.6077	-72.6866	-0.632585	0.000350	-0.015894
16	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	0.000000	0.000000
17	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	0.000000	0.000000

LA MÁXIMA TENSIÓN ES 44282.0 EN EL NUDO 13 DE LA BARRA 18

TENSIONES RELATIVAS (TvmMISES/TENSIÓNadm) ORDENADAS DECRECIENTES

BARRA	NUDO	Tvm/Tadm	BARRA	NUDO	Tvm/Tadm	BARRA	NUDO	Tvm/Tadm
18	13	18.45	11	9	0.86	12	10	0.25
16	13	4.56	2	2	0.69	19	16	0.16
17	13	3.92	9	8	0.61	20	17	0.14
14	12	1.21	6	3	0.59	3	4	0.05
10	7	1.15	7	9	0.58	5	5	0.00
13	13	0.99	4	5	0.52	1	1	0.00
15	11	0.97	8	8	0.46			

ESFUERZOS Y TENSIONES DE VON MISES EN LOS EXTREMOS DE LAS BARRAS

BAR	NU	AXIAL	CorteYp	CorteZp	TORSOR	FlectorYp	FlectorZp	TENSIÓN
1	1	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2
	2	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2
2	2	7713.3	28.2	102.4	27.7	-10723.8	423.8	1662.8
	3	-7710.6	-28.2	-102.4	-27.7	6117.0	846.8	1549.6
.								
18	13	0.0	2268.9	0.0	0.0	0.0	384108.0	44282.0
	15	0.0	-2250.0	0.0	0.0	0.0	0.0	651.5
19	10	685.6	-2.8	-16.5	37.1	1191.8	-304.3	235.1
	16	-700.9	2.9	19.4	-37.1	3471.9	-440.8	390.5
20	11	-618.7	-3.1	18.7	36.9	-1638.9	-363.0	265.4
	17	603.4	3.1	-15.8	-36.9	-2832.2	-446.8	347.3

NO hay barras comprimidas donde AXIAL/ÁREA > Tcrítica

Listado de 4 barras comprimidas donde AXIAL/AREA > 0.050 * TENSadm

BARRA	Hipót.	AXIAL	AXIAL/AREA	RADIOgiro	ESBELTEZ
2	1	7711.943	1002.593	0.984	45.748
6	1	7765.293	1009.529	0.984	81.330
10	1	7133.127	927.344	0.984	50.831
14	1	7441.880	967.483	0.984	50.831

REACCIONES DE APOYO

NUDO	FUERZA X	FUERZA Y	FUERZA Z	MOMENTO X	MOMENTO Y	MOMENTO Z
2	-102.85	26.44	7715.09	-236.6	-10729.5	27.7
1	0.00	0.00	1.80	0.0	0.0	0.0
5	88.58	22.47	-5459.69	-207.5	8680.8	27.8
6	0.00	0.00	1.80	0.0	0.0	0.0
16	107.72	-25.53	692.41	-351.9	-3482.0	-34.0
17	-93.45	-23.38	-595.84	-104.1	2865.0	-55.6

V. CONCLUSIONES

Se desarrolló un preprocesador que potencia al programa TRITE al adaptarlo al entorno Windows y darle capacidades gráficas que permiten visualizar la estructura desde diversos ángulos a voluntad del usuario. El módulo de cálculo está escrito en lenguaje FORTRAN y se utiliza para analizar pórticos espaciales en régimen elástico lineal bajo cargas estáticas.

El programa W-TRITE funciona bajo el sistema operativo Microsoft Windows. Fue escrito en el lenguaje de programación C++ y usa las APIs nativas de Windows y las APIs de OpenGL, de esta forma se obtiene una excelente performance y gran potencia y versatilidad en el uso de las características de Windows. Los ejecutables son relativamente pequeños y no requieren librerías externas para su funcionamiento, excepto las DLLs propias de Windows y del programa.

La programación se realizó en el IDE para el lenguaje de programación C/C++ de Bloodshed, Dev-C++ que es distribuido bajo GNU. El software para cálculo estructural aquí presentado es de uso libre y está disponible en la Web. El programa no requiere instalar ningún tipo de archivo de sistema adicional, simplemente se debe copiar la carpeta con el contenido del programa W-TRITE en algún lugar del disco rígido.

REFERENCIAS

- [1] J. Massa, *Programa Trite – Manual del usuario*, Página Web de la F.C.E.F.yN. de la UNC: www.efn.uncor.edu/departamentos/estruct/calculo_1/SOFT_CEL.HTME, 2005.
- [2] E. Barbero, *CELEB: Programa para Cálculo Estático Lineal de Estructuras de Barras*, Trabajo Final, Carrera de Ingeniería Mecánica, Asesor: J. Massa, Universidad Nacional de Río Cuarto, 1983.
- [3] G. Fontana, *Adaptación al entorno Windows y agregado de capacidades gráficas al programa TRITE para análisis de pórticos tridimensionales*, Trabajo Final, Carrera de Ingeniería Aeronáutica, Asesor: J. Massa, F.C.E.F.yN., U.N.C., 1998.
- [4] M. Díaz, *W-Trite, Sistema Informático para Análisis de Pórticos Tridimensionales*, Trabajo Final, Carrera de Ingeniería Aeronáutica, Asesor: J. Massa, F.C.E.F.yN., U.N.C., 2005.
- [5] H. Schildt, *C ++ Manual de referencia*, Ed. Mc Graw-Hill, 2005.
- [6] G. Urrutia, *Tutorial “Curso de C ”*, cursoc@elrincondelc.com, www.elrincondelc.com, 2004.
- [7] International Standard ISO/IEC 14882, *Programming Languages – C++*, 2005.
- [8] M. Alonso, *Tutoriales Visual C ++ para Windows*, http://alonso_m.tripod.com, 2002.
- [9] C. Petzold, *Programming Windows*, 5th Edition, Microsoft Press, 1998.
- [10] *Ayuda de Microsoft Developer Network (MSDN)*, <http://www.eu.microsoft.com/spain/msdn/>.
- [11] *Ayuda del Entorno de Desarrollo Integrado (IDE) Dev-C++*, <http://www.bloodshed.com/>, 2005.
- [12] C. Tello, *Programación en Windows 32 bits*, progwin@terra.es, <http://articulos.conclase.net/>.
- [13] *Tutoriales: Los rincones del API Win32*, <http://www.lawebdejm.com/>.
- [14] *Cygwin User's Guide*, <http://www.cygwin.com/cygwin-ug-net/>, 2004.
- [15] J. Richter, *Programming Applications for Microsoft Windows*, 4th Edition, Microsoft Press, 1999.
- [16] R. Wright, M. Sweet y R. Wright Jr, *OpenGL Super Bible*, 3rd Edition, Ed. Waite Group, 2005.
- [17] F. Serrano García, *KILE- Tutorial 1, Introducción a OpenGL*.
- [18] J. Massa y C. Prato, *Análisis Estructural - Problemas Estáticos*, Ed. Dto. Estructuras. U.N.C. 2003.