

## INTERFASE PARA LA CONEXIÓN DE MÓDULOS DE ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS

Fernanda Caffaratti<sup>1</sup>, Gerardo Franck<sup>2,3</sup>, Victorio Sonzogni<sup>3</sup>

1 Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral, cc 217. Ruta Nacional 168, Km 472.4, (3000) Santa Fe, Argentina.  
fernandacaffaratti@yahoo.com.ar

2 Aula CIMNE-FICH. FICH, UNL. Ruta Nacional 168 Km 472.4, (3000) Santa Fe, Argentina

3 CIMEC – INTEC, Güemes 3450, (3000) Santa Fe, Argentina.  
vsonzogni@intec.unl.edu.ar, gfranck@intec.unl.edu.ar

**Key Words:** elementos finitos, interacción fluido – estructura, interfaz, simulación computacional, GiD.

**Abstract.** *En este trabajo se ha programado un código computacional que a través de la conexión de módulos de análisis de elementos finitos abre la posibilidad de encarar problemas de interacción fluido - estructura. La comunicación entre los módulos a través de una interfaz conectora permite que, alternativamente, en un esquema escalonado (“staggered”), realmente cada uno de los programas de análisis anteriores, con los resultados relevantes del otro. La interacción fluido-estructura exige, desde luego, una tarea más compleja al precisar manejar reconstrucciones de malla, análisis de convergencia, estimación del error, entre otras. La utilización de la interfaz permite simular los efectos que ocasiona el viento sobre diferentes tipos de estructuras y las variaciones en el flujo del fluido causado por las geometrías deformadas. Mediante la construcción de este código se pretende establecer modelos de simulación computacional para comprender el comportamiento de estructuras, predecir sus respuestas, optimizar o investigar su estabilidad, o bien para evaluar alternativas. Se presentarán ejemplos a través de los cuales se puede observar el funcionamiento de la interfaz desarrollada, como una herramienta de utilidad para el usuario que permite el intercambio de información entre dos módulos del paquete GiD. Se considerarán problemas con pequeñas deformaciones.*

## 1 INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se describe la implementación de una interfaz cuya finalidad es simular la interacción fluido – estructura mediante la utilización de módulos de análisis de elementos finitos. El tema planteado es de gran importancia práctica en numerosos problemas de ingeniería, es decir, se presenta frecuentemente en aplicaciones de ingeniería civil, así como en otras ramas de la ingeniería tales como la aeronáutica, mecánica, naval, etc. En ingeniería civil los problemas que requieren el estudio de la interacción entre una estructura y un fluido se presentan por ejemplo en el caso de estructuras muy flexibles (puentes, edificios altos, torres, etc) sometidas a la acción del viento.

Los métodos numéricos desarrollados permiten analizar satisfactoriamente el comportamiento de cada campo por separado. Así los métodos de elementos finitos (Zienkiewicz, 1967) o elementos de contorno (Brebbia, 1978) permiten obtener respuestas precisas del comportamiento estructural. Esos mismos métodos, han sido aplicados satisfactoriamente para el análisis de fluidos. El acoplamiento entre ambos medios presenta problemas particulares. Generalmente las estrategias de modelado teórico para los fluidos se basan en representaciones Eulerianas, donde el marco de referencia está fijo en una posición espacial y a través de él se ve pasar al fluido. En el análisis de sólidos suele seguirse otra representación diferente, la Lagrangiana, donde el marco de referencia está vinculado a las partículas de sólido. La simulación de la interacción fluido – estructura está descrita por la deformación estructural como respuesta de las fuerzas del viento, resultando en una modificación del flujo del fluido. La falta de conocimiento sobre los posibles efectos de la interacción fluido – estructura provocó catástrofes en el pasado ( por ejemplo el colapso de Tay Bridge en Scotland en 1879, Tacoma Bridge cerca de Seattle en 1948, entre otras) Hoy, los efectos causados por el viento son bien conocidos y se pretende encarar la construcción de herramientas para evitar efectos no deseados.

En la FICH (Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas – UNL) y el Cimec – Intec existen programas que permiten tanto el análisis de fluidos, como de estructuras, sin embargo no hay códigos computacionales que específicamente permitan estudiar su interacción. El cálculo de flujo de fluidos acoplado con desplazamientos/deformaciones de la estructura es una disciplina de rápido crecimiento que ha ganado mucha atención en los últimos años.

Para el trabajo propuesto se utilizó un software denominado GiD, desarrollado en el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE – Universidad Politécnica de Cataluña). GiD es un programa gráfico de Pre y Postproceso destinado a la definición y preparación de los datos destinados a realizar una simulación numérica, así como a la visualización de sus resultados. La creación de los datos implica la definición de la geometría a estudiar, los materiales que la componen, las condiciones de contorno, fuerzas aplicadas, y otros parámetros, como por ejemplo la estrategia de resolución. El programa se encarga de crear una malla utilizando el método de elementos finitos y transferirle los datos asociados a la geometría. La ejecución del análisis puede realizarse desde el propio GiD, como si todo fuese un paquete único. El postproceso consiste en la visualización de los resultados de modo que sean fácilmente interpretables. Pueden hacerse visualizaciones por colores, curvas de nivel, etiquetas, vectores, gráficas, animaciones, etc.

GiD presenta como características propias la posibilidad de crear ventanas gráficas con estilo e interfaz definidos por el usuario, definición de cualquier tipo de datos necesario para un análisis, importación de geometrías, permite aplicar todas las condiciones de contorno o materiales sobre la geometría y generar mallas tanto de superficie como de sólidos sobre ella. También dispone de un conjunto de módulos para resolver problemas de distintas ramas de ingeniería. En este trabajo se hará uso de dos módulos en particular, TDYN para análisis de flujos y RAM Series para análisis estructural.

Tdyn es un entorno de simulación de la dinámica de fluidos reales (CFD) basado en la solución numérica de las ecuaciones de Navier-Stokes para fluidos incompresibles o ligeramente compresibles empleando el método estabilizado de los elementos finitos.

Ram Series es un entorno de análisis estructural y de cálculo de sólidos tridimensionales basado en el método de los elementos finitos. Este módulo se divide a su vez en dos, Rambshell para el análisis de vigas y cáscaras usando el método de elementos finitos, y Ramsolid para el análisis de sólidos 3D. Para la realización del código de interacción fluido-estructura se empleará el módulo Rambshell.

Mediante la utilización de éstos módulos (Tdyn – Rambshell), se pretende construir una interfaz que permita tomar los resultados del primer módulo como entrada del segundo. De esta manera el programa de TDYN se utilizará para estudiar las presiones que un fluido ejerce sobre una estructura y estas presiones serán ingresadas como datos de entrada en el módulo RAM Series, para efectuar un análisis de respuesta estructural. Una vez conocidas las deformaciones generadas por la fuerza del viento, se pretende volver a realizar el cálculo del flujo sobre la malla de elementos finitos, pero ésta vez deformada, y cerrar de esta manera el ciclo de interacción fluido - estructura. Para poder realizar el cálculo del flujo sobre la malla deformada, es necesario, previamente, aplicar un algoritmo de suavizado a la malla, con el objetivo de obtener una malla de calidad. De lo contrario, puede ocurrir que el programa de cálculo de fluidos, no funcione, debido a la presencia de elementos con volúmenes negativos (elementos plegados o invertidos)

Para la programación de la interfaz gráfica se empleará el lenguaje TCL/TK y comandos propios del GiD (programado una parte en C/C++ y otra parte está en forma de “scripts” Tcl/Tk).

El procedimiento comprende las siguientes etapas:

1. Pre-proceso
  - 1.1 Creación de la geometría a ser analizada.
  - 1.2 Asignación del material, condiciones de frontera y datos generales del problema.
  - 1.3 Generación de la malla, utilizando el mallador propio de GiD.
  - 1.4 Cálculo del programa de análisis de fluidos (Tdyn).
2. Post-proceso
  - 2.1 Visualización de resultados del programa de análisis de fluidos (velocidades, presiones)
3. Invocación de un *Tipo de Problema* que permite tomar resultados del código Tdyn (fuerzas) y aplicarlos como datos de entrada al código Rambshell (módulo de análisis

estructural). La programación se realiza en lenguaje TCL. (interfaz de interacción fluido - estructura)

4. Asignación de restricciones y materiales a la geometría en el módulo rambshell.

5. Cálculo estructural.

6. Visualización en el post-proceso de la malla deformada.

7. Una vez obtenida la malla deformada proporcionada por el módulo de análisis estructural, se empleará un suavizado de la malla de elementos finitos, a los fines de optimizar la calidad de los elementos y posteriormente volver a simular el flujo de viento sobre la geometría y continuar de esta manera el ciclo de manera iterativa hasta que el usuario desee finalizar el mismo.

## 2 PREPROCESO: CREACIÓN DE LA GEOMETRÍA , ASIGNACIÓN DE CONDICIONES, GENERACIÓN DE MALLA Y CÁLCULO.

La primera etapa para cualquier análisis incluye la creación de la geometría del problema. Esta puede ser definida usando las herramientas de Preproceso de GiD o bien importando una desde programas como Autocad. En la Figura 1 se puede observar la geometría de un problema en particular.

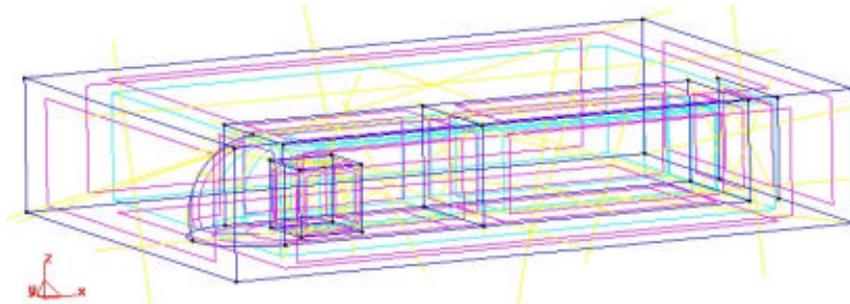


Figura 1: geometría de un problema

Finalizada la geometría, se procede a cargar el *tipo de problema* Tdyn3D y a continuación la asignación de condiciones, materiales y demás datos para poder realizar el análisis del fluido. Para el análisis del fluido se emplearán las ecuaciones de Navier-Stokes para fluidos incompresibles.

Una vez que fueron asignadas las condiciones de frontera, materiales y demás, se genera la malla, para lo cual se emplea el mallador propio de GiD.

Generada la malla, se inicia el cálculo con el módulo Tdyn, finalizando así con el primer paso de la interacción. Una vez obtenidos los resultados generados por el módulo de análisis de fluidos, se invoca un *tipo de problema*, en el cual se definirán los procedimientos necesarios para poder realizar la interacción fluido – estructura, objetivo principal del presente trabajo. A continuación se define en que consiste un “tipo de trabajo” o “problem type”.

## 3 IMPLEMENTACIÓN DE UN “TIPO DE PROBLEMA” (PROBLEM TYPES)

Un *tipo de problema* de GiD, no es más que un directorio “<nombre>.gid”, dentro del cual hay una serie de archivos ASCII que definen como se personaliza el programa, es decir, el

programa de análisis recibe la información de entrada mediante un conjunto de archivos en los que se incluye toda la información de malla, condiciones de contorno y demás datos.

El preproceso de GiD discretiza el objeto que se quiere estudiar y genera una malla de elementos, a cada uno de los cuales se les asignan materiales y condiciones. Esta información proporcionada por el preproceso de GiD (malla, materiales, condiciones,...) permite al módulo de cálculo generar resultados.

Empleando el concepto de *tipo de problema*, se puede lograr una alta personalización del sistema GiD que, en su extremo, puede llegar a dar una nueva apariencia al programa.

La configuración de GiD se hace mediante archivos de formato texto. Serán necesarios los siguientes archivos:

\*.prb: configuración de parámetros generales.

\*.mat: configuración de los materiales y sus propiedades.

\*.cnd: configuración de las condiciones impuestas en el cálculo.

\*.bas: (archivo plantilla) plantilla que indica qué y cómo debe escribir GiD en el fichero de entrada de datos para la simulación. Este archivo almacena los datos geométricos y físicos del problema.

\*.bat: archivo ejecutable por lotes llamado desde GiD. Este archivo lanza el módulo de cálculo.

\*.tcl: extensión de GiD para crear ventanas, modificarlas, etc.

No tienen porqué existir todos estos ficheros, puede haber sólo algunos.

En este trabajo, se utiliza el concepto de *tipo de problema* para lograr desarrollar una interfaz que permita realizar la interacción entre un fluido y una estructura.

#### **4 EXTENSIÓN DE GID MEDIANTE EL LENGUAJE TCL/TK**

Para la programación del *tipo de problema*, se utilizó el lenguaje Tcl/Tk. Mediante el empleo de este lenguaje se definieron los procedimientos necesarios para la interacción, como así también la creación de ventanas gráficas para facilitar la utilización del programa a los usuarios.

Tcl (Tool Command Language) es un lenguaje de programación interpretado y multiplataforma, actualmente desarrollado por *Sun Microsystems Laboratories* y distribuido de forma totalmente gratuita. Entre sus ventajas se puede mencionar la gran facilidad con la que se pueden implementar funciones en C/C++ dentro del propio intérprete de Tcl.

La extensión más conocida, que es distribuida junto con el propio Tcl, es Tk (Tool Kit). Tk añade a los comandos de Tcl, comandos capaces de crear interfaces gráficas de usuario. Es decir, Tk permite crear ventanas, botones, menús, barras de scroll y toda una serie de elementos, propios de la programación con ventanas. Por ser Tcl-Tk una librería que opera con scripts se puede desarrollar todo el código que gobierna la creación de la interfaz de usuario o mediante este nuevo lenguaje que no necesita de compilación y por tanto implica un desarrollo más rápido y sencillo. Una de las mayores ventajas de estas librerías, es que están disponibles para diversos sistemas operativos. Ello implica que el programa puede funcionar correctamente en toda una variedad de plataformas tales como con Windows, Linux, etc.

## 5 PROGRAMACIÓN DEL MÓDULO IFE (INTERACCIÓN FLUIDO - ESTRUCTURA)

Como se mencionó anteriormente, un *tipo de problema* de GiD, es un directorio “<nombre>.gid”, dentro del cual hay una serie de archivos ASCII que definen como se personaliza el programa.

En el presente trabajo se definió un *tipo de problema* denominado **IFE.gid** (IFE : Interacción Fluido – Estructura), para lo cual fue necesario agrupar todos los archivos del *tipo de problema* en el directorio \problemtypes\IFE.gid de GiD. Uno de los posibles archivos del *tipo de problema* es “IFE.tcl”. Dentro de este archivo se especificarán todos los procedimientos a ejecutar mientras el *tipo de problema* esté cargado. El punto de entrada del código Tcl es la función **InitGIDProject** que tiene el siguiente formato:

*proc InitGIDProject { dir }* Esta función es un “evento” que genera GiD cuando el usuario carga el *tipo de problema*, y *dir* contiene la ruta completa a su directorio.

A continuación se detallan los pasos generales que se siguen en el código computacional desarrollado:

- Luego de seleccionar el *tipo de problema* IFE (Interacción Fluido – Estructura) desde GiD, aparece una ventana de presentación del nuevo tipo de problema.
- A continuación, aparece una ventana gráfica que permite al usuario seleccionar un proyecto GiD resuelto con el módulo Tdyn.
- Se activa la “layer” correspondiente al cuerpo sujeto al análisis estructural y se desactivan las restantes “layers”.
- Se comienza la creación de archivos temporales necesarios para llevar a cabo la interacción entre módulos: nodos, elementos, conectividades, coordenadas nodos.
- Se obtienen las tres componentes de las fuerzas que actúan sobre cada nodo de la malla, las cuales se encuentran en un archivo generado por Tdyn.
- Carga del módulo de análisis estructural (rambshell)
- Se solicita al usuario que ingrese las condiciones y materiales al cuerpo sometido a la acción del viento.
- Importación automática de las fuerzas generadas por el módulo Tdyn sobre los nodos de la estructura. Para realizar esta importación de fuerzas se utilizan los archivos temporales creados anteriormente, es decir el archivo de fuerzas y el archivo de nodos.
- Se inicia el proceso de cálculo de rambshell.
- Se obtiene la malla deformada de la estructura.
- Se modifica el archivo de extensión “.msh” (extensión utilizada por GiD para identificar la malla de un problema), sobrescribiendo las coordenadas originales de los nodos que forman parte de la estructura sometida a la acción del fluido, por las nuevas coordenadas desplazadas. Estas nuevas coordenadas fueron obtenidas a partir de un archivo generado por el módulo de análisis estructural, que contiene los desplazamientos de los nodos debido a las fuerzas ingresadas como condición de

entrada. Los nodos que pertenecen al dominio del problema mantienen sus coordenadas originales.

- Se abre nuevamente el proyecto Gid seleccionado por el usuario al principio del código, se elimina la malla original y se importa la nueva malla deformada.
- Se ejecuta un algoritmo de suavizado sobre la malla completa (dominio del fluido y estructura) con el objetivo de mejorar la calidad de los elementos.
- Luego del suavizado, aparece una ventana gráfica donde se solicita al usuario que ingrese el nuevo número de pasos de tiempo y el nuevo incremento de tiempo (si es que desea modificarlo).
- Se reinicia el cálculo del módulo de análisis de fluidos. Finaliza de esta manera el ciclo de interacción.

## 6 ALGORITMO DE SUAVIZADO

Como se mencionó anteriormente, una vez conocidas las deformaciones generadas por la fuerza del viento, se pretende volver a realizar el cálculo del flujo sobre la malla de elementos finitos, pero ésta vez deformada, y cerrar de esta manera el ciclo de interacción fluido – estructura. .

Se denomina “algoritmo de suavizado” a las técnicas de mejora de calidad de la malla. Genéricamente hablando, se considera la calidad de la malla en relación a la calidad de los elementos que la componen, y la calidad de los elementos en relación a la semejanza que tengan con un elemento regular, sea un triángulo equilátero o un tetraedro regular. Es necesario definir un indicador de calidad que proporcione una medida de que los elementos son mejores que otros y de cuales son aceptables y cuales no lo son.

Para asegurarse que el volumen del elemento no resulta negativo, se calcula su Jacobiano, que debe ser positivo.

El procedimiento que se aplicará será calcular un índice de calidad para todos los elementos de la malla y escoger los peores en un porcentaje prefijado. Seguidamente se aplicará uno de los algoritmos de suavizado y se volverá a rehacer la lista de los peores. Se aplicará nuevamente el algoritmo y se procederá de igual manera. Es conveniente iterar varias veces para obtener una buena relación de mejora de calidad – tiempo de computación.

Para la realización del algoritmo de suavizado se realizaron rutinas en el programa Matlab, ingresando los siguientes datos como entrada:

- Nodos y coordenadas que forman elementos tetraédricos del dominio.
- Nodos pertenecientes a la superficie de entrada del dominio.
- Nodos de la superficie de salida.
- Nodos de las superficies laterales (derecha e izquierda).
- Nodos de la superficie superior del dominio.

Luego de varias iteraciones, se obtiene como dato de salida, un archivo con las nuevas coordenadas de los nodos de la malla.

## 7 RESULTADOS

A continuación se presentarán los resultados obtenidos a través de la utilización de la interfaz, para lo cual se utilizó como ejemplo la geometría de un cubo. Para la confección de la geometría se tomó como guía “Development of large-eddy simulation for vehicle aerodynamics (S. Krajnovic)<sup>1</sup>”.

La geometría del problema elegido consiste de un cubo de arista igual a  $L=1$ , y un dominio de  $10L \times 7L \times 2L$ . Se asignaron como condiciones para el problema un flujo uniforme en la entrada del dominio, condiciones slip en ambos lados, no-slip en la superficie del cuerpo (cubo), velocidad de entrada igual a 1 y presión impuesta en la superficie de salida del dominio.

Para el análisis del fluido se emplearon las ecuaciones de Navier-Stokes para fluidos incompresibles, comenzando con un Reynolds igual a 1, y posteriormente se fue incrementando dicho valor hasta llegar a un valor de  $Re$  igual a  $6.78 \times 10^4$  ( $Re$  real) con el fin de poder capturar los efectos que aparecen con números de Reynolds mayores.

El problema de fluidos se simuló en 12000 pasos de tiempo, con un incremento de 0.01 segundos. Para los primeros 400 pasos se empleó flujo laminar y posteriormente se empleó un modelo turbulento (Smagorinsky).

Una vez que fueron asignadas las condiciones de frontera, materiales y demás, se genera la malla, para lo cual se empleó el mallador propio de GiD. La malla generada fue de 41704 elementos triangulares, 261681 elementos tetraédricos y 53935 nodos. Se definieron varias capas en torno al cuerpo y a lo largo del dominio con diferentes concentraciones de elementos con el fin de poder capturar mejor los efectos obtenidos. En la figura 2 se presenta dos visualizaciones diferentes de la geometría mallada que permiten ver refinamientos internos.

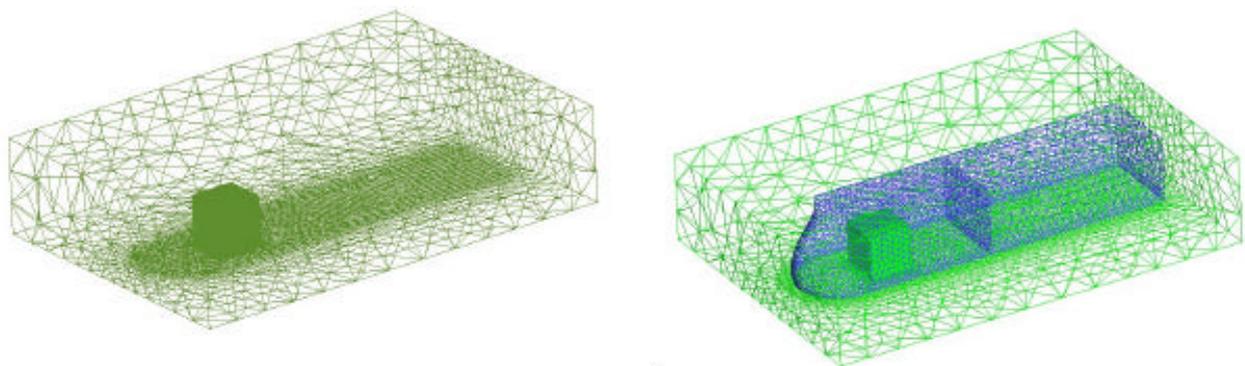


Figura 2: malla de elementos finitos

En las figuras 3 y 4 se observa perfiles de velocidad y presiones respectivamente, obtenidas luego de ejecutar el módulo Tdyn. En la figura 5 se muestra los vectores de velocidad. En dicha figura se observa claramente la formación de vórtices en la parte posterior del cuerpo, un pequeño vórtice delante del cuerpo y por encima del mismo. En la figura 6 se presenta las líneas de corriente sobre la geometría de un cubo obtenidas en el trabajo de Hussein and Martinuzzi<sup>13</sup> y en la figura 7 las líneas de corriente empleando Tdyn. Los resultados son aproximadamente comparables, teniendo en cuenta que si bien se utilizó las mismas dimensiones para la construcción de la geometría, se utilizó una malla diferente.

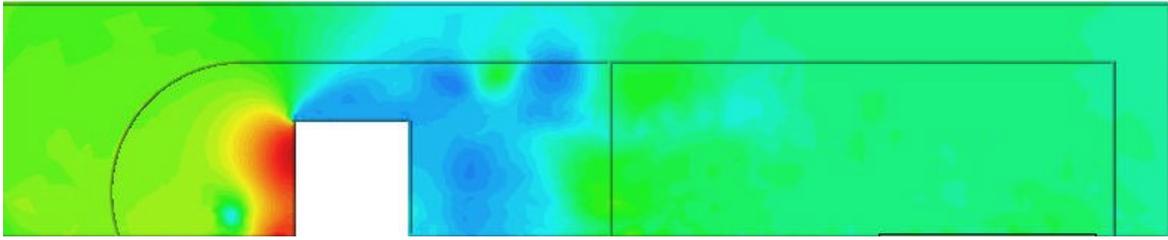


Figura 3: contour fill de presiones.

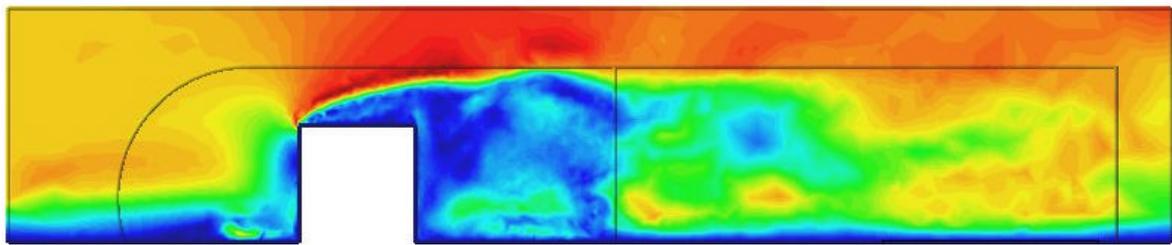


Figura 4: contour fill de velocidades

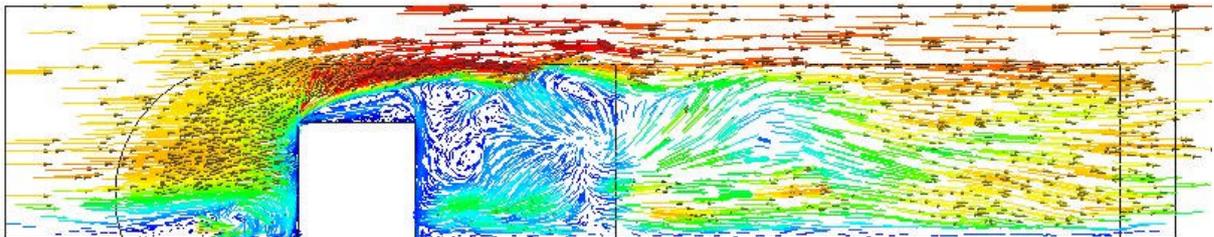


Figura 5: vectores de velocidades

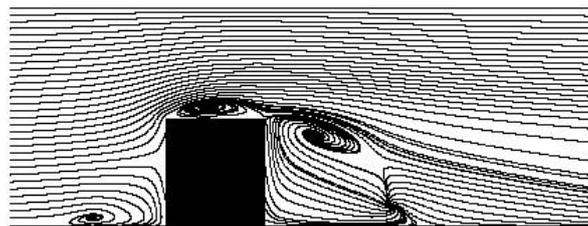


Figura 6: líneas de corriente obtenidas en el trabajo de Hussein and Martinuzzi<sup>13</sup>

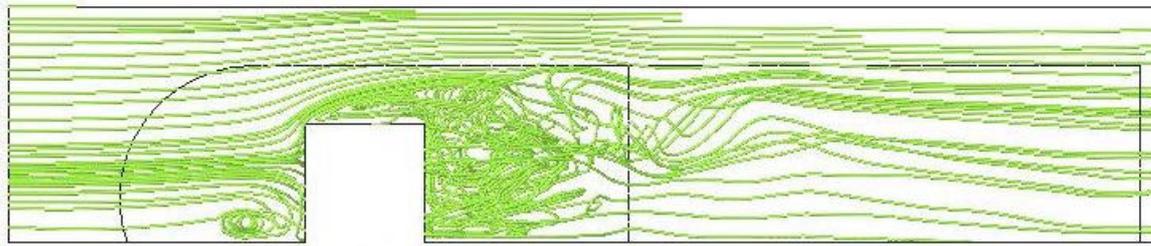


Figura 7: líneas de corriente.

En el módulo de análisis estructural (Rambshell), las condiciones que se asignaron al cuerpo fueron restricciones de desplazamiento y rotación en las cuatro líneas inferiores del cubo y se definieron propiedades generales de material a las superficies del mismo.

Las fuerzas importadas desde Tdyn durante la ejecución del *tipo de problema*, fueron asignadas automáticamente sobre los nodos de la malla del cuerpo.

Una vez conocidas las deformaciones generadas por la fuerza del viento, se pretende volver a realizar el cálculo del flujo sobre la malla de elementos finitos, pero ésta vez deformada, y cerrar de esta manera el ciclo de interacción fluido - estructura. Para ello, es necesario aplicar a la malla deformada, el algoritmo de suavizado mencionado anteriormente, con el fin de mejorar la calidad de los elementos, como así también es necesario tener en cuenta consideraciones numéricas relativas a la estabilidad de las soluciones en ambos medios y a los tamaños de pasos en el tiempo necesarios para acompañar con suficiente precisión la respuesta.

Los resultados de este último procedimiento se plantea como un desarrollo ulterior a presentar en la exposición del trabajo, debido a que los resultados obtenidos mediante el módulo de análisis estructural, aún se encuentran en una etapa de análisis, a fin de garantizar el correcto funcionamiento del código.

## 8 CONCLUSIÓN

Con el avance de la informática, se ha llegado a situaciones en la que es posible realizar análisis de modelos extremadamente complejos. Los programas de cálculos y simulación por métodos numéricos han ido sofisticándose con el tiempo, de manera que cada vez más permiten simular fenómenos reales.

En este trabajo se presentó una interfaz para la simulación de problemas de interacción fluido – estructura. El cálculo de flujo de fluidos acoplado con desplazamientos / deformaciones de la estructura es una disciplina de rápido crecimiento que ha ganado mucha atención en los últimos años. Mediante el empleo de este programa se pretende facilitar el estudio de dichos problemas, los cuales se presentan con gran frecuencia en diversas ramas de ingeniería, tales como civil, aeronáutica, etc.

Se pretende crear un entorno de trabajo que permita a un usuario observar fácilmente la deformación/desplazamiento de una estructura sometida a la acción de un flujo como así también, poder determinar como la estructura deformada afecta al flujo del fluido.

## 9 REFERENCIAS

- [1] S. Krajnovic, L. Davidson, *Development of large-eddy simulation for vehicle aerodynamics*, IMECE/ASME HTD-2 TOC, New Orleans, Louisiana, (2002).
- [2] O. Falcinelli, S. Elaskar, L. Godoy y J. Tamagno, *Efecto de viento sobre tanques y silos mediante CFD*, In MECOM 2002: 1st South-American Congress on Computational Mechanics, III Brazilian Congress on Computational Mechanics, VII Argentine Congress on Computational Mechanics, Santa Fe - Paraná, Argentina, (octubre 2002).
- [3] E. Oñate, *Cálculo de Estructuras por el Método de Elementos Finitos*, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, 2nd edición, (setiembre 1995).
- [4] T. Zienkiewicz, *El Método de los Elementos Finitos*, Ed McGraw Hill, 4th edición, (1994)
- [5] D.C. Wilcox, *Turbulence Modelling for CFD*, DCW industries, Inc. 5354 Palm Drive, La Cañada, California, (1993).
- [6] G. Portela-Gautier, L. Godoy y R. Zapata-López, *Distribución de presiones de vientos huracanados sobre tanques cortos mediante estudios de túnel de viento*, Rev. int. de desastres naturales, accidentes e infraestructura civil.
- [7] GiD website: <http://gid.cimne.upc.es>.
- [8] Compass website: <http://www.compassis.com>
- [9] Tcl-Tk website: <http://tcl.activestate.com>
- [10] Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Oviedo website: <http://www.etsimo.uniovi.es/pub/tcl>
- [11] R. Jaca, L. Godoy, *Análisis de la falla de un tanque metálico bajo la acción del viento*, Mecánica Computacional Vol XXII, M. Rosales, V. Cortinez y D. Bambill Ed., AMCA, (2003).
- [12] R. Ribó Rodríguez, *Desarrollo de un sistema integrado para tratamiento de geometría, generación de malla y datos para el análisis por el método de los elementos finitos*, Tesis Doctoral entregada en el Departamento de resistencia de materiales y estructuras a la ingeniería en febrero 2000. Universidad Politécnica de Catalunya.
- [13] A. Halfmann, E. Rank, M. Glück, M. Breuer and F. Durst, *A geometric model for fluid – structure interaction of wind – exposed*, The Ninth International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, (April 3-5, 2002).