

Simulación Numérica de la Aerodinámica de un Vehículo

Gerardo J. Franck¹, Julián Fredes², Diego Italiani²

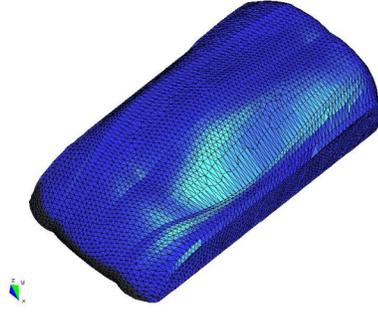
Darío Matijacevich², Norberto M. Nigro³, J. D'Elía³, M.A. Storti³

1: Becario Proyecto FOMEC 1055, Universidad Tecnológica Nacional (UTN)
Facultad Regional Santa Fe (FRSF), Lavaise 610, 3000-Santa Fe, Argentina

2: Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional de Rosario (UNR)
Pellegrini 250, 2000-Rosario, Argentina

3: Centro Internacional de Métodos Computacionales en Ingeniería
CIMEC/INTEC UNL/CONICET, Güemes 3450, 3000-Santa Fe, Argentina
e-mail: cimec@ceride.gov.ar, <http://venus.ceride.gov.ar/cimec>

MECOM 2002, October 28-31, 2002, Santa Fe-Paraná - Argentina



PERFIL DE LA PRESENTACIÓN

Simulación del flujo de viento alrededor de vehículos en dos niveles crecientes de dificultad:

- Flujo potencial incompresible: fuerza atractiva por efecto suelo
- Flujo viscoso incompresible con altos números de Reynolds y posible separación

La resolución numérica en ambos casos, se logra por medio de:

- Método de elementos de borde (BEM), de bajo orden, en régimen estacionario y sin desprendimiento, con un barrido paramétrico en la dirección del viento
- Método de elementos finitos (FEM), de igual orden para la presión y la velocidad, con la estabilización propuesta por Tezduyar *et. al.*

Las simulaciones se realizan por procesamiento distribuido en un "cluster Beowulf", i.e. una máquina paralela construída con PC's interconectadas bajo Linux

- código PETSC-FEM (<http://minerva.arcrde.edu.ar/petscfem>), bajo GPL: por elementos finitos, multifísica, para cálculo distribuido (C++/PETSC/MPI)
- código HPF-BEM: por paneles para flujos potenciales 3D (invíscidos/ hidrodinámica naval/ reptantes) para cálculo distribuido (HPF/MPI)

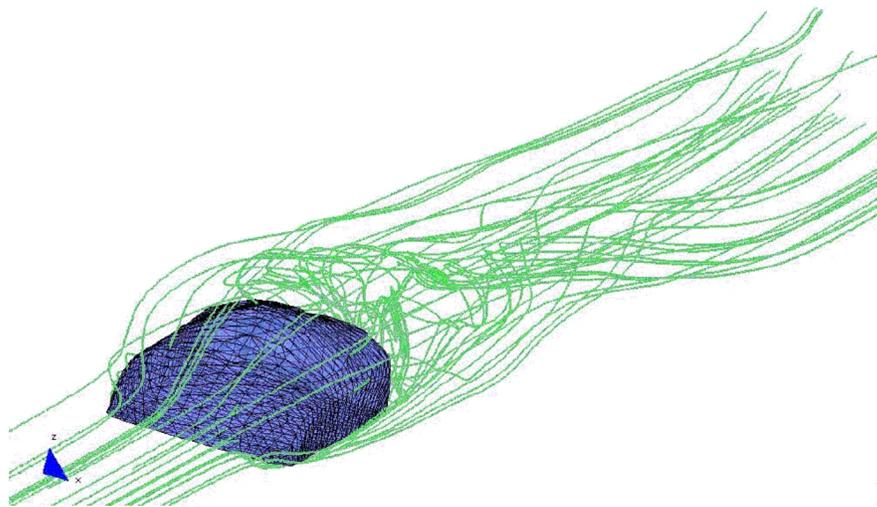


Figura 1: Líneas de corriente alrededor del vehículo obtenidas con PETSC-FEM

FLUJO VISCOSO INCOMPRESIBLE: cálculo PETSC-FEM

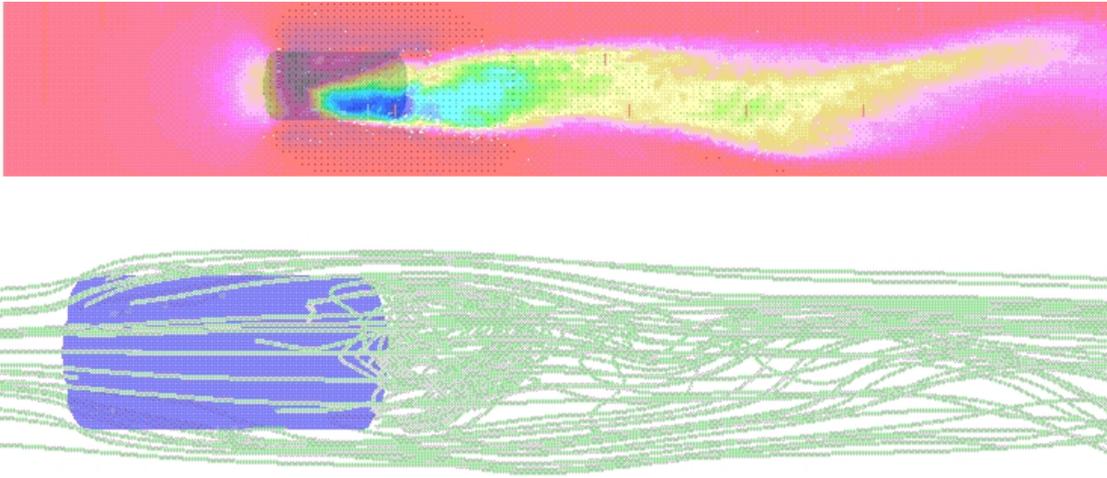


Figura 2: Velocidad y líneas de corriente, vista en planta (plano xy)

FLUJO VISCOSO INCOMPRESIBLE

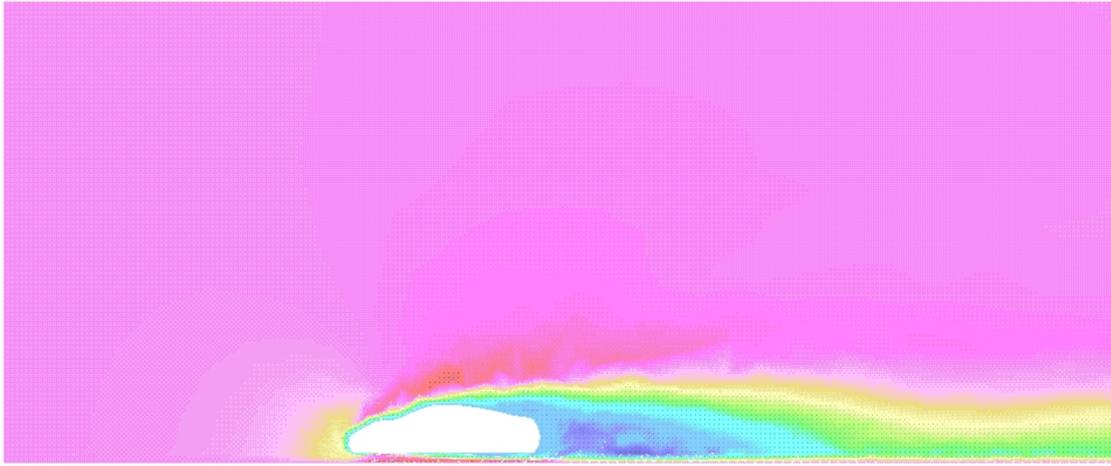


Figura 3: Velocidad, vista lateral (plano yz), cálculo PETSC-FEM

TECNICAS MAS COMUNES DE ENSAYOS AERODINAMICOS

- **Tradicional**

- ▷ Túnel de viento
- ▷ Ensayos en ruta ("road test")

- **No Tradicional**

- ▷ Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)

OBJETIVOS

- Campos de velocidad y de presión; fuerzas y momentos
- Resistencia al avance (drag) y sustentación por efecto suelo (lift)
- Posición del centro de presión que incide en la estabilidad direccional
- Analizar el flujo en la estela
- Líneas de corriente y desprendimientos de vórtices
- Determinar aproximadamente las zonas de separación del flujo

TUNELES DE VIENTO

- Ensayos a escala casi real pero costoso de operar y construir
- Los ensayos a menor escala dan lugar a dudas a bajos números de Reynolds
- Complejidad para simular el movimiento del piso (la mayoría utiliza una cinta)
- Ensayos no convincentes con viento lateral
- Efecto de las capa límite en las paredes del túnel
- Interferencia con los soportes del modelo o las probetas para la medición

ENSAYOS EN RUTA

- Modelos mas fidedignos al interactuar con el medio ambiente exterior
- Dificultades por las cambiantes condiciones del viento
- Costos de operación muy elevados
- Dificultades de implementación en el proceso operativo del ensayo

ASPECTOS RELEVANTES DEL TRABAJO DESARROLLADO

- Investigación y estudio de determinadas situaciones de proyecto que de una manera fidedigna no son inmediatas de realizar en un túnel de viento
- Modelización numérica con menor costo que con un túnel de viento
- Tareas:
 - ▷ Generación del modelo geométrico de la carrocería
 - ▷ Discretización del dominio poniendo énfasis en la generación de la malla
 - ▷ Elección de un esquema de cálculo, e.g. paneles / elementos finitos
 - ▷ Pos-procesamiento, visualización y análisis de los resultados
 - ▷ Se omite la presencia de accesorios externos, canalizadores de ventilación y refrigeración, tomas de aire o ruedas

FLUJO POTENCIAL INCOMPRESIBLE

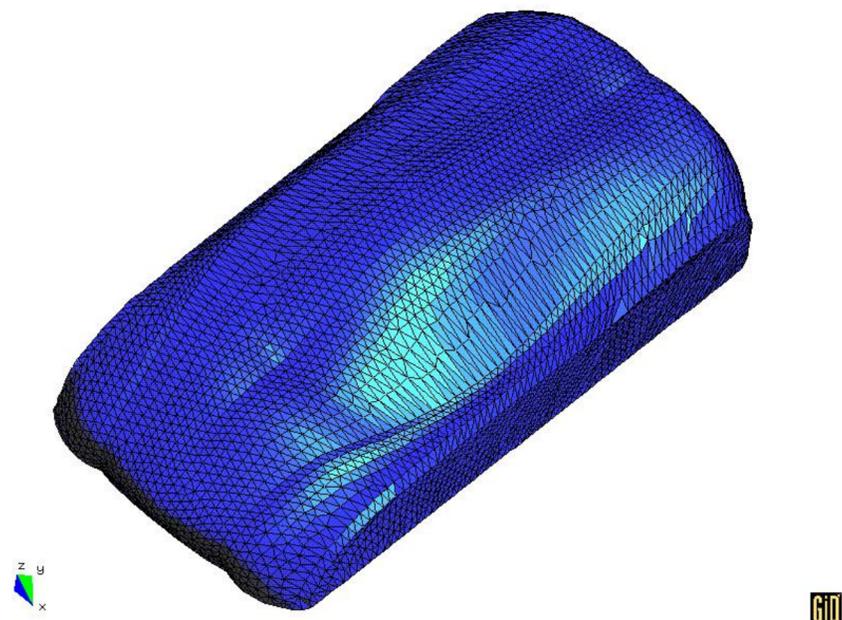


Figura 4: Malla BEM sobre la carrocería del vehículo, 13.000 paneles. Por simetría especular con respecto al suelo se evita mallar una porción finita del piso. Cálculo HPF-BEM

FLUJO POTENCIAL INCOMPRESIBLE

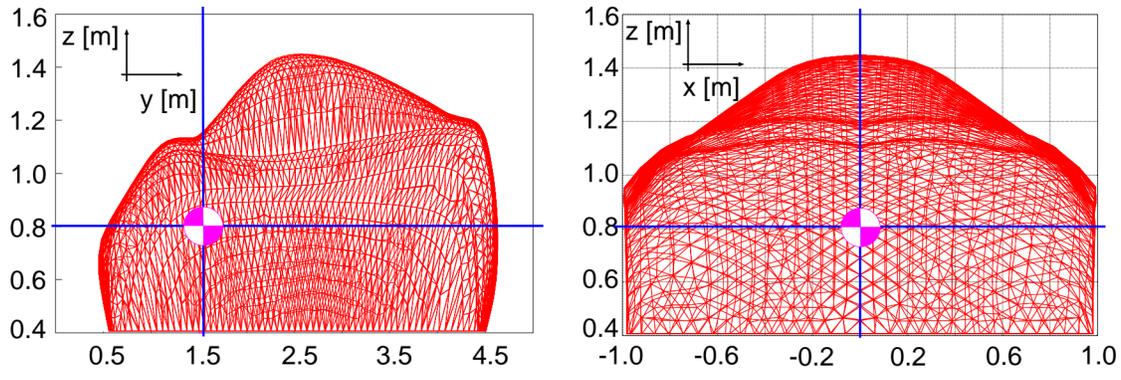


Figura 5: Posición del centro de presión por efecto suelo para viento frontal ($\alpha = 0$) en los planos: lateral yz (izq.) y frontal yz (der.)

FLUJO VISCOSO INCOMPRESIBLE**Resolución numérica en el código PETSC-FEM**

- Mediante FEM + derivada en contracorriente en las variantes:
 - ▷ SUPG (Streamline Upwind Petrov Galerkin): estabiliza el término advectivo al incrementarse el número de Reynolds
 - ▷ PSPG (Pressure Stabilized Petrov Galerkin): estabiliza la restricción impuesta por la condición de incompresibilidad
- Las ecuaciones modificadas se discretizan en el espacio y resulta un sistema de Ecuaciones Diferenciales Ordinarias (ODE) en el tiempo t
- Discretizamos en el tiempo t por un esquema Retro-Euler estándar
- En cada paso de tiempo, el sistema de ecuaciones no lineales se resuelve con un Newton-Raphson e iterativamente mediante Residuos Generalizados (GMRES) con preconditionamiento a la derecha de Jacobi

METODO DE DESCOMPOSICION DE DOMINIOS

Porque lo usamos ?

- De la discretización temporal y espacial tenemos un sistema de ecuaciones algebraicas no lineales a resolver en cada paso de tiempo
- No podemos recurrir a métodos directos debido a la gran cantidad de elementos que tiene la malla
- Problemas al resolver con sistemas iterativos no simétricos e indefinidos
- Utilizamos GMRES como método iterativo
- Para lograr una buena convergencia necesitamos incrementar el subespacio de Krylov a medida que refinamos la malla
- Gran consumo de memoria RAM con baja tasa de convergencia, es decir mayor tiempo de cómputo

Método de Descomposición de Dominios Híbrido

- Método *híbrido*: parte del problema se resuelve en forma directa y parte en forma iterativa, con mejor relación memoria/tasa de convergencia
- ver “An interface strip preconditioner for domain decomposition methods”, por Storti M., Dalcin L., Paz R., Yommi A. y V. Sonzogni, MECOM 2002

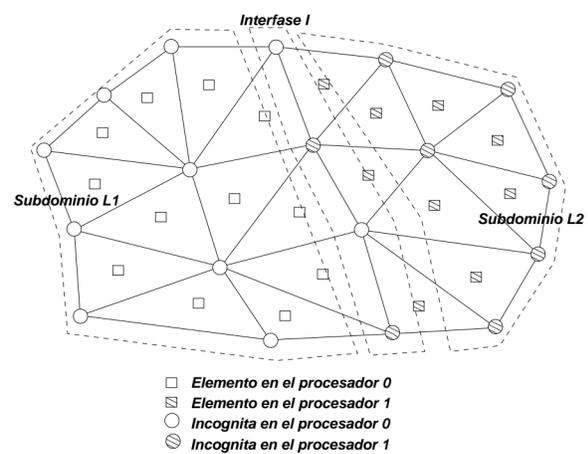


Figura 6: Descomposición de un dominio en subdominios

GENERACION DE MALLAS TRIDIMENSIONALES

- Se usan elementos tetraédricos en el volumen 3D y triangulares para la superficie de la carrocería y las fronteras
- El tamaño de los elementos debería ser acorde a los detalles a observar
- Un aspecto delicado a resolver es el *despeje* reducido del piso, lo cual involucra una gran cantidad de elementos en dicha zona
- El refinamiento debe concentrarse sobre la superficie del vehículo y en la estela: es deseable un mayor control del usuario
- La cantidad de elementos depende de la potencia de cómputo disponible
- Mallado 1: incremental por movimiento del piso hasta el despeje prescripto
- Mallado 2: automático por el método "Extended Delaunay Tessellation"

Mallado 1: por movimiento del piso hasta el despeje prescrito

- Se ubica el vehículo cerca del centro del túnel
- Generamos una malla de referencia (e.g. con GiD)
- Movemos el piso hasta llevarlo a la distancia de despeje preestablecida
- Buscamos una densidad aceptable de elementos
- El algoritmo se basa en minimizar la máxima distorsión por elemento
- Incógnitas: los desplazamiento de los nodos

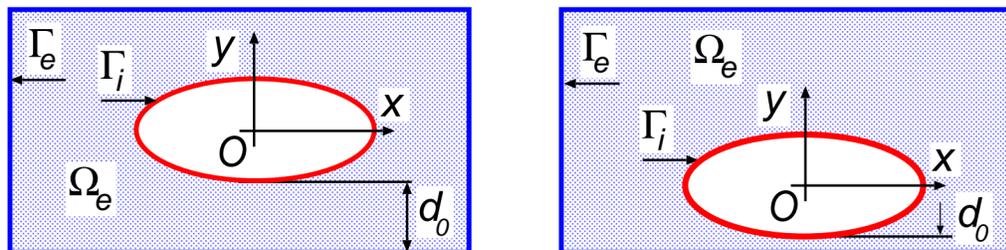


Figura 7: Generación de la malla en la zona del despeje: inicial (izq.) y deformada (der.).

Mallado 1: por movimiento del piso hasta el despeje descrito

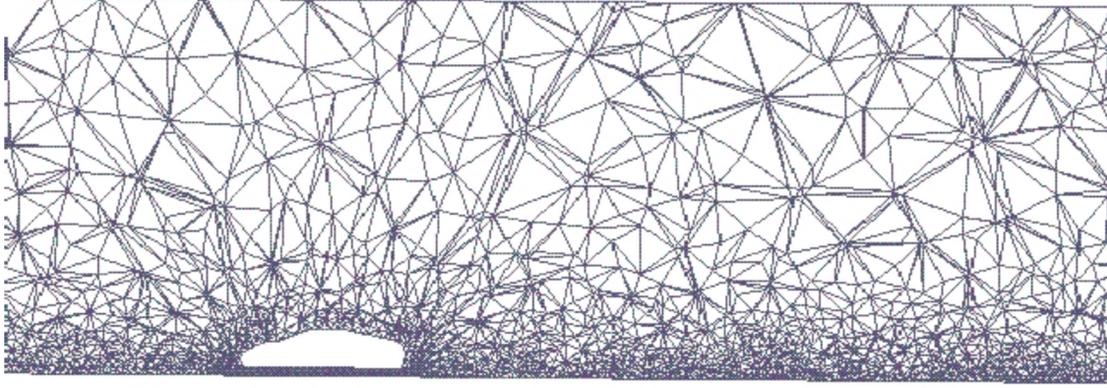


Figura 8: Mallado con un despeje muy reducido del piso: corte según plano de simetría vertical, 170.000 elementos y 34.000 nodos

Mallado 1: por movimiento del piso hasta el despeje prescripto

- Se define un funcional $F(\mathbf{x})$, siendo \mathbf{x} los desplazamientos nodales
- $F(\mathbf{x})$ se calcula como una combinación lineal de dos efectos:
Cambio de volumen del elemento con respecto a un valor de referencia
Distorsión del elemento (medido por los autovalores del tensor métrico)
- Tensor métrico $\mathbf{G} = \mathbf{J}^T \mathbf{J}$ siendo \mathbf{J} el jacobiano de la transformación que mapea el elemento "master"
- Luego resolvemos el problema de autovalores para obtener $\mathbf{G} = \mathbf{S} \mathbf{\Lambda} \mathbf{S}^{-1}$, donde $\mathbf{\Lambda}$ es la matriz diagonal de autovalores y \mathbf{S} la matriz de autovectores
- El volumen se estima con la traza $V = \text{tr}(\mathbf{G}) = \sum_i \lambda_i$ y la distorsión con

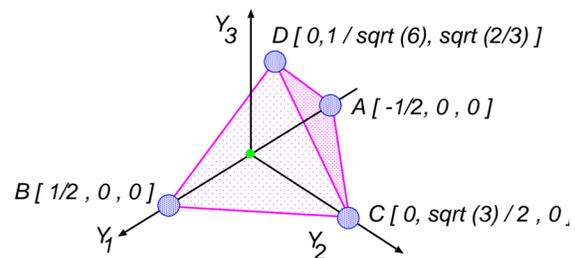
$$\Delta = (\lambda_1 - \lambda_2)^2 + (\lambda_2 - \lambda_3)^2 + (\lambda_3 - \lambda_1)^2 \quad (1)$$

Mallado 1: por movimiento del piso hasta el despeje prescripto

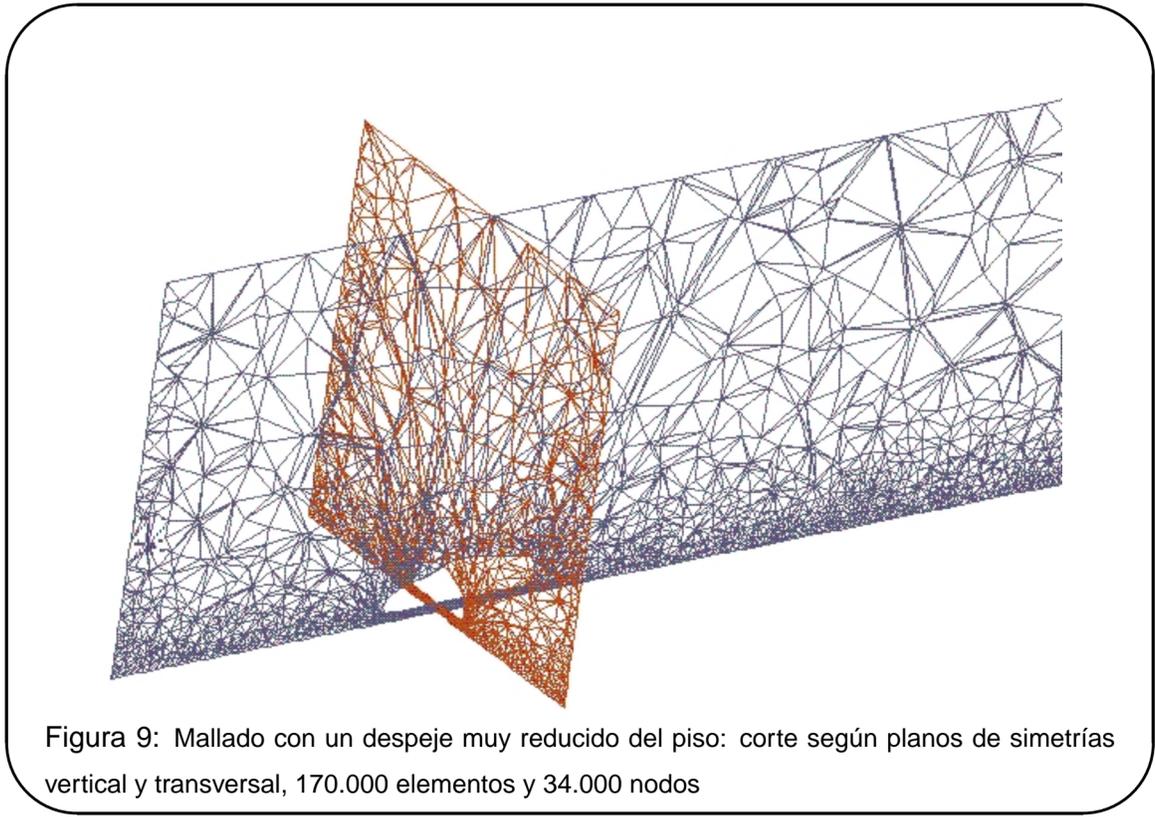
- El funcional lo construimos mediante la combinación lineal

$$F = C_V(V - V_r)^2 + C_\Delta \left[\frac{\Delta}{V^{2/3}} \right]^\alpha ; \quad (2)$$

- donde C_V mide el peso que se le dá al cambio de volumen, C_Δ es el peso a la distorsión, V_r es el volumen de referencia, α es el tipo de norma empleada, e.g. $\alpha = 2$ (euclídea), $\alpha \rightarrow \infty$ (supremo)
- El sistema de ecuaciones no lineales resultante se resuelve por Newton-Raphson, iterando sobre el residuo $\mathbf{R}(\mathbf{x})$



definición del tetraedro master:



Mallado 2: método "Extended Delaunay Tessellation"

- ver "Generación de mallas tridimensionales en tiempo lineal", por Calvo N.A., Idelsohn S.R., MECOM 2002

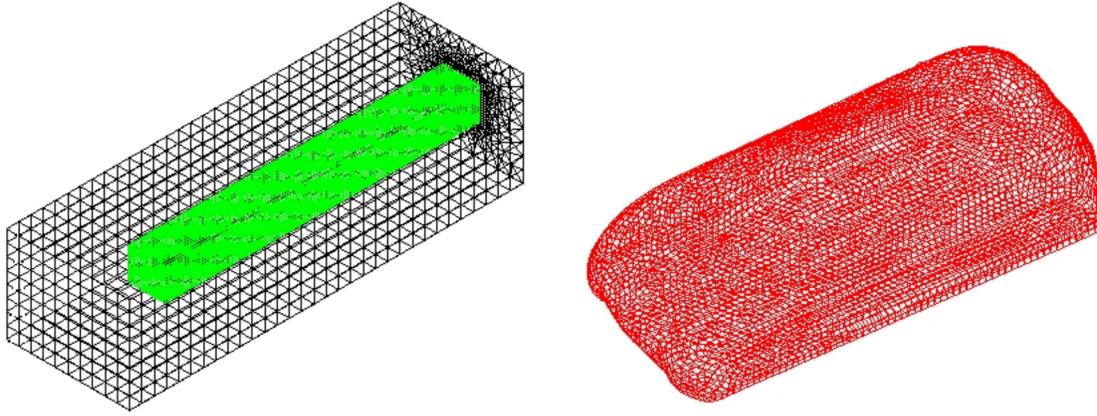


Figura 10: Mallado con dos subdominios: Izq.: malla de cuadrángulos en las fronteras del dominio global e interior, ésta última comprende una zona cercana al vehículo y una estela hipotética. Der.: vista de los triángulos resultantes sobre la superficie del vehículo

Mallado 2: método "Extended Delaunay Tessellation"

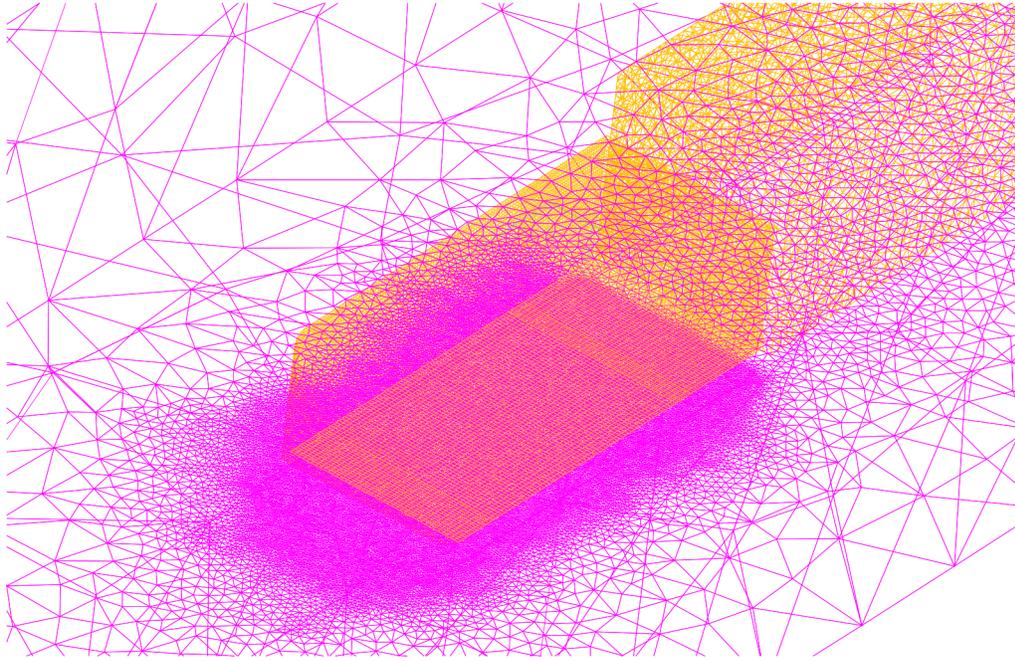


Figura 11: Método EDT (tetraedros): 1.200.000 elementos y 200.000 nodos

Mallado 2: método "Extended Delaunay Tessellation"

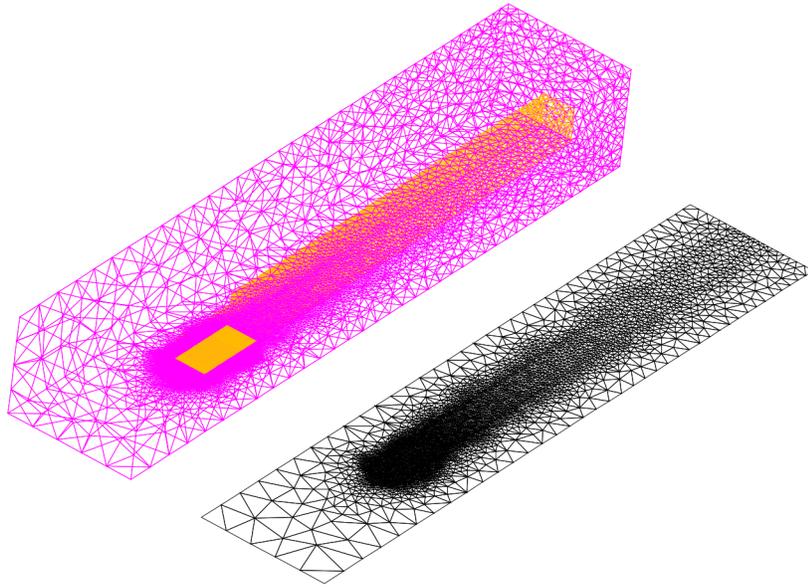


Figura 12: Método EDT (tetraedros): 1.200.000 elementos y 200.000 nodos

Conclusiones

- Cálculo potencial:
 - ▷ relativamente mucho más rápido de hacer, tanto en pre y pos-procesamiento
 - ▷ útil para diseño preliminar o para extensivos cálculos paramétricos
 - ▷ su campo de presión sería un buen dato inicial para Navier Stokes
 - ▷ bajo nivel de detalle en el mapa del flujo
- Cálculo viscoso:
 - ▷ exige mayor esfuerzo de cálculo, memoria RAM y tiempo de CPU
 - ▷ mayor nivel de detalle del flujo, e.g. vórtices desprendidos, fuerza de arrastre
 - ▷ un "cluster Beowulf" da una solución con muy buena relación costo/beneficio

Agradecimientos

- CONICET PIP 198/98 *Germen-CFD*, SECyT-FONCyT-PICT 6973 *PROA*, SECyT-PID 99/74 *FLAGS* y CAI+D UNL-PIP 02552-2000
- *SO GNU/Linux, Octave, Xfig, Tgif*. Procesador *GiD* (CIMNE, Barcelona)