

# **ESTUDIO DE EROSIÓN LOCAL EN PILAS DE PUENTE DE GEOMETRÍA COMPLEJA A NIVEL MESOMECÁNICO**

**R. H. Lorefice<sup>(1)</sup>, M.T. Pilan<sup>(2)</sup>, L.A. Olmos<sup>(2)</sup>, H. D. Farias<sup>(2)</sup>, J.S. Trejo Chazarreta<sup>(2)</sup>**

CMAE – CENTRO DE MECANICA APLICADA Y ESTRUCTURAS - UNSE  
IRHI – INSTITUTO DE RECURSOS HIDRICOS – UNSE Av Gral Savio s/n (4300)  
E-mail: lorefice@unse.edu.ar - Web: <http://www.unse.edu.ar/>

## **RESUMEN**

Se presenta un modelo computacional a nivel mesomecánico con el fin de analizar numéricamente el proceso de erosión local alrededor de pilas de puentes de geometría compleja. El planteo se realiza en el marco del Método de los Elementos Finitos aplicado a problemas de contorno acoplados, considerándose aquí como tal a la interacción entre el proceso de arrastre de material de fondo del lecho y las características del flujo que lo produce. En particular, se propone una metodología para la modelación de este fenómeno mediante un cálculo computacional por etapas, en las que el desprendimiento de material de fondo se evalúa mediante la introducción de un sistema de cargas normales y tangenciales equivalentes sobre una malla compuesta por elementos finitos de medio continuo y elementos de interfase (juntas de espesor nulo). Las condiciones de contorno para el problema mecánico se obtienen a partir de las variables que caracterizan el flujo. Esta herramienta numérica, adecuadamente calibrada con resultados experimentales, puede resultar aplicable para la predicción de la forma y profundidad de la hoya de socavación en torno a diferentes tipos de pilas y para distintas características del material de lecho.

## **ABSTRACT**

A new computational model to analyze the local scour phenomena is presented. The proposal is presented at mesomechanic level in the framework of the finite element method applied to boundary couple problems, focusing the analysis in the interaction process between the fluid forces and sediment transportation. Particularly, we propose a computational strategy based on a staged approach to accurately model the transportation phenomena considering the fluid action by introducing a system of normal/tangential equivalent forces acting on a finite element mesh composed by both, standard and interface elements (zero-thickness interface elements). The boundary conditions are obtained starting from the variables that define the flow regime. This numerical tool, properly calibrated using in-field experimental measures could be used to predict the shape and the deep of the local scour around different piles and for several types of soil.

## **INTRODUCCIÓN**

Para estudiar el fenómeno de socavación local el cual surge de la interacción fluido estructura, y más precisamente para el caso de pilas de puente, investigadores tales como Melville & Coleman (2000), Sheppard (2003), Coleman (2005) entre otros; han incursionado desde la parte experimental. La principal desventaja de esta metodología es que no representa con precisión la geometría particular del lecho en cada caso, ni tampoco incluye la gran variedad de suelos que componen los diferentes tipos de material de fondo de los ríos que pueden encontrarse en la practica. Además, varios autores han resaltado las falencias de las expresiones derivadas de esta metodología, ver Farias et al (2003), dado que en general, la misma tiende a sobreestimar la profundidad de socavación del cauce, generando de este modo soluciones ingenieriles más caras para las fundaciones.

En los últimos años, se han realizado grandes avances en el desarrollo de métodos numéricos, los cuales a la par del crecimiento en la capacidad de cálculo de las computadoras han permitido la aplicación exitosa de técnicas computacionales para este tipo de estudio. Estas técnicas derivan del Método de los Elementos Finitos aplicado a fluidos en dominios multi-

conexos, posibilitando la generación de mallas complejas que involucran millones de grados de libertad y cuya principal ventaja es la de incluir expresamente las características propias del fluido, el lecho y del obstáculo (pila, estribo, etc.).

El problema se resuelve planteando las ecuaciones de Navier Stokes en el dominio en cada uno de los puntos de la malla, la cual puede ser unidimensional, bi o tridimensional, transformando el sistema de ecuaciones diferenciales original en un sistema algebraico que permite alcanzar la solución mediante algún método iterativo no lineal tal como el de Newton Raphson. Una vez resuelto el sistema, se obtiene el campo de velocidades alrededor del obstáculo y a partir de éste último se infiere la magnitud de la socavación que se produciría en esas condiciones. La diferencia de esta técnica sobre la experimental es que permite introducir la geometría particular de cada caso mediante la definición de los dominios múltiples, y considera explícitamente el movimiento del fluido. Asimismo, la principal desventaja de este método es el enorme costo computacional que implica, dado que para obtener una precisión aceptable es necesario trabajar con sistemas de millones de grados de libertad y con múltiples niveles de iteración, ya que en las diferentes etapas del cálculo no siempre es conveniente el mismo método iterativo de solución, lo que añade mayor complejidad al análisis numérico.

### **MODELACIÓN COMPUTACIONAL DEL PROCESO DE SOCAVACIÓN EN PILAS COMPLEJAS**

La Mecánica de Fluidos Computacional (MFC) se emplea en problemas que involucran números de Reynolds altos, tales como los que caracterizan el flujo en ríos. Los principales desafíos que enfrenta esta técnica de análisis surgen de la complejidad de la física del flujo, la cual en rigor, varía con la geometría de cada caso particular. En general, los procesos de flujo reales tienen lugar en dominios arbitrariamente complejos y multi-conexos, involucrando condiciones de contorno variables, como los que caracterizan los flujos en los cauces de ríos en los cuales existen estructuras hidráulicas o viales, tales como las fundaciones de puentes. En este tipo de problemas, el número de Reynolds oscila entre  $10^6$  y  $10^7$ , por lo que para alcanzar resultados de precisión aceptable mediante la MFC es indispensable el empleo de modelos de simulación que reúnan las siguientes características:

- a) Un método versátil para generar geometrías complejas con alta calidad y precisión (CAD/CAM)
- b) Como mínimo, precisión de segundo-orden en la discretización espacial y temporal.
- c) Modelos de predicción de turbulencia con los que se alcancen valores cuantitativamente precisos a un costo computacional razonable.
- d) Esquemas iterativos eficaces para aprovechar al máximo la plataforma de cálculo computacional con el fin de obtener resultados en un tiempo razonable.
- e) Incluir explícitamente el material que compone el lecho
- f) Modelos constitutivos con algoritmos eficientes para predecir el comportamiento de falla del material de fondo bajo las distintas condiciones del flujo.

En la actualidad, y pese a los grandes avances logrados en los últimos años, no existen aún algoritmos o modelos integrales basados en la MFC que combinen todos los atributos mencionados, dada la enorme complejidad del problema en cuestión. En este contexto, se propone una metodología numérico-computacional diferente para la representación del proceso de socavación y para la predicción de la profundidad de equilibrio que caracteriza al fenómeno mediante un modelo numérico planteado a nivel meso-mecánico de observación.

Esta nueva propuesta de análisis computacional se basa en el hecho de que el desprendimiento del material de fondo (suelo o sedimento) se debe principalmente a la acción de fuerzas tractivas, las cuales bajo determinadas condiciones del flujo, generan un estado combinado de tensiones que eventualmente supera a la resistencia cohesiva/friccional del suelo. Desde el punto de vista de la física que gobierna el problema, el desprendimiento del material del fondo ocurre debido a que las fuerzas tractivas originadas por la dinámica del flujo vencen la resistencia intrínseca del material en estado saturado.

Ahora bien, en este contexto, y dado que el fenómeno de la socavación encuentra un estado de equilibrio al cabo de cierto tiempo (Melville & Coleman, 2000), no es suficiente la consideración de un modelo de falla material tradicional para el suelo, como lo sería una formulación de tipo Coulomb o tipo Mohr. Es indispensable aquí la consideración de modelos constitutivos más sofisticados, capaces de contemplar estados tensionales combinados de tracción/corte y la subsiguiente degradación de la resistencia cohesiva-friccional del material que compone el lecho conjuntamente con el efecto del paso del tiempo en un marco teórico consistente e integrado en una formulación matemática unificada.

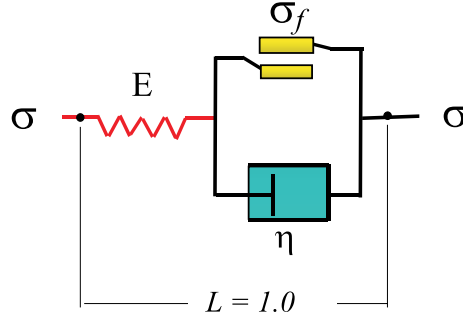
En este sentido, uno de los modelos ampliamente empleados en el estudio de procesos de falla tiempo-dependientes para materiales cohesivo-friccionales es el propuesto por Perzyna (1963, 1966). El modelo de Perzyna representa una generalización del modelo reológico de Bingham (ver Figura 1) y permite la modelación a nivel material de procesos dependientes de la tasa de velocidad y del paso del tiempo mediante una única formulación constitutiva. En esta teoría, se admite la descomposición de la deformación total del sólido en dos partes, una elástica y otra viscosa que depende del tiempo en la forma  $\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_{vp}$ . La parte elástica de la deformación ( $\varepsilon_e$ ) obedece a la ley de Hooke, mientras que la evolución de la componente viscosa ( $\varepsilon_{vp}$ ) depende de una función de la forma:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{vp} = G(\psi, F, \boldsymbol{\sigma}) = \frac{1}{\eta} \langle \psi(F) \rangle \mathbf{m} \quad (1)$$

$$\mathbf{m} = \frac{\partial G}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \quad (2)$$

$$\psi(F) = \left[ \frac{F(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{q})}{F_0} \right]^N \quad (3)$$

$$\dot{\lambda} = \frac{1}{\eta} \langle \psi(F) \rangle \quad (4)$$



**Figura 1:** Dispositivo reológico elasto-viscoplástico unidimensional

En las ecuaciones (1) a (4),  $\epsilon_{vp}$  representa la parte tiempo-dependiente del tensor de deformación  $\epsilon$ ,  $\eta$  representa la viscosidad aparente del sólido,  $\mathbf{m}$  es el gradiente a la superficie de potencial visco-plástico  $G$  y  $\dot{\mathbf{q}} = \dot{\lambda}\mathbf{H}$  es un conjunto de variables que dependen de la historia del material, que en el caso general conforma un vector de historia o de variables de estado.

Las ecuaciones (2) y (4) describen una regla de flujo general, no asociada en términos de la función de potencial viscoplástico  $G$ . La magnitud del flujo viscoplástico lo define el multiplicador escalar  $\dot{\lambda}$  el cual depende de la función de sobretensión adoptada y de la viscosidad. La función de sobretensión  $\psi(F)$  es adimensional y monótonicamente creciente, mientras que  $F_0$  representa un factor de normalización, que se escoge en general igual al límite inicial de fluencia del material. El exponente  $N$  en la ecuación (3) define el orden de la formulación de Perzyna. Cuanto mayor es el valor de  $N$ , más sensible a la tasa de deformación resulta la formulación viscoplástica. El operador de McCauley en la ecuación (4) define las características de la función de sobretensión:

$$\langle \psi(F) \rangle = \begin{cases} \psi(F) & \text{si } F > 0 \\ 0 & \text{si } F \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

Para un modelo de Perzyna lineal ( $N = 1$ ), la formulación elasto-viscoplástica continua se define entonces planteando la condición de restricción:

$$\bar{F} = F - \psi^{-1}(\lambda\eta) = 0 \quad (6)$$

La ecuación (6) representa una generalización del planteo elastoplástico clásico en el cual se cumple la condición de consistencia  $F = 0$ . El término *formulación continua* se debe a que para la condición  $\eta = 0$  (sin efecto viscoso), la formulación se reduce a la elastoplasticidad clásica y es  $F = 0$ . El otro caso extremo, cuando  $\eta \rightarrow \infty$  conduce a la desigualdad  $\bar{F} < 0$  para cualquier estado de tensión posible, y por lo tanto, sólo se activa la respuesta elástica, ver Figura 2.

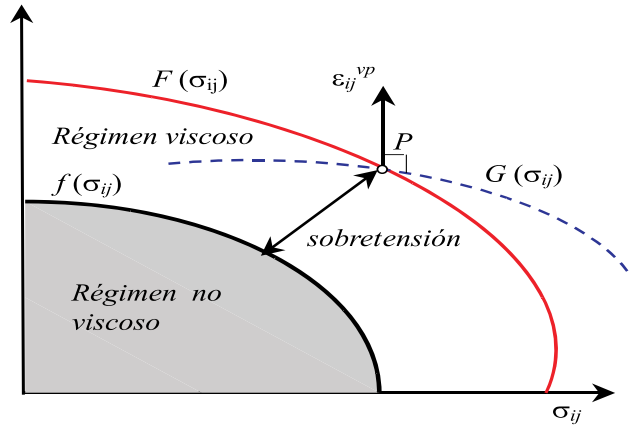


Figura 2: Función de sobretensión en el espacio de tensiones

### MODELO CONSTITUTIVO DE INTERFASE

Los modelos de junta o interfase han sido usados por diversos autores para representar el comportamiento de falla de anclajes en rocas, tierra armada (Gens et al, 1989), comportamiento de rocas con diaclasas (Carol y Alonso, 1983), problemas de fractura en hormigones (Lorefice, 2006), etc. Estas clases de modelos constituyen una aproximación discreta al problema de la rotura de materiales, y empleados en forma conjunta con los elementos finitos de espesor nulo permiten representar explícitamente la discontinuidad física que se produce cuando ocurre una grieta o fisura.

Teniendo en cuenta la teoría de Perzyna, la extensión del modelo elastoplástico original formulado por Carol et al. (1997) para una interfase genérica toma la forma

$$F = \sigma^2 - (c - \tau \text{tg} \phi)^2 + (c + \chi \text{tg} \phi)^2 - (\lambda \eta)^{1/N} \quad (7)$$

con  $\sigma$  y  $\tau$  las componentes de tensión normal y tangencial del vector tensión  $\vec{t} = [\sigma, \tau]^T$  que actúa sobre el plano de la junta, ver Figura 4. En la Figura 4, la variable  $\chi$  representa la resistencia a la tracción (vértice de la hipérbola),  $c$  la cohesión aparente (resistencia al corte) y  $\phi$  el ángulo de fricción interna. Una vez que se alcanza el límite de resistencia definido por la ecuación (7), ver Figura 4 d).

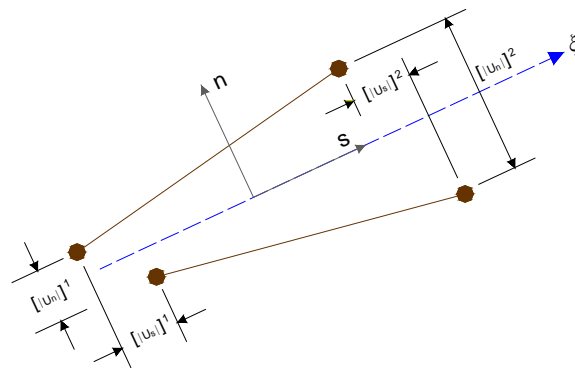


Figura 3: Esquema de la junta

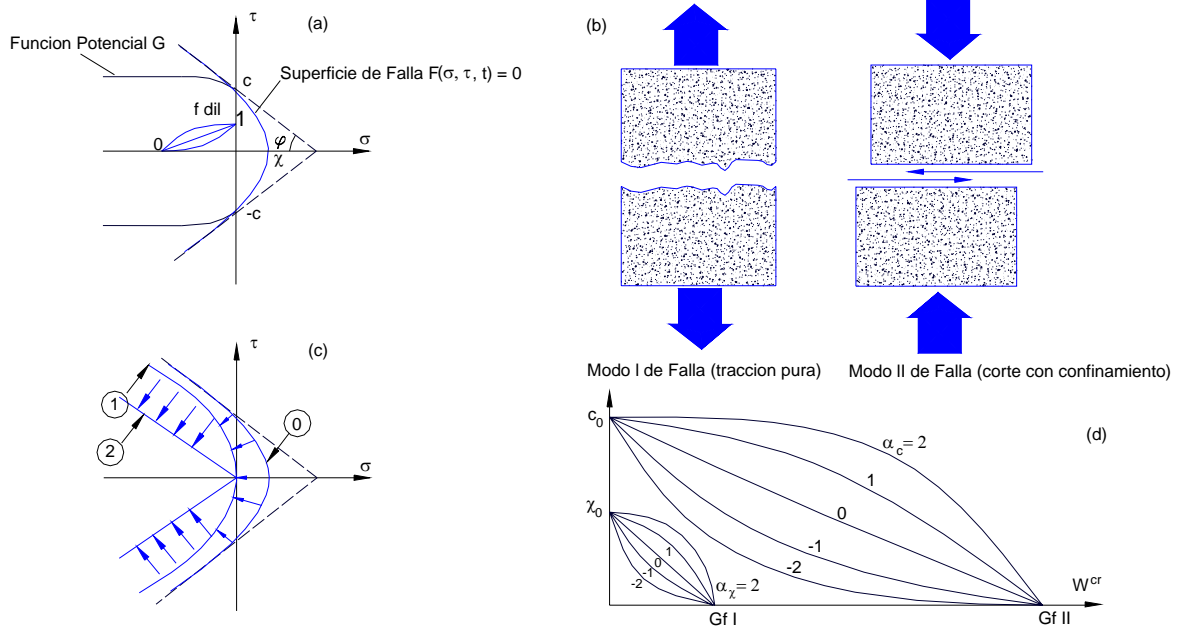


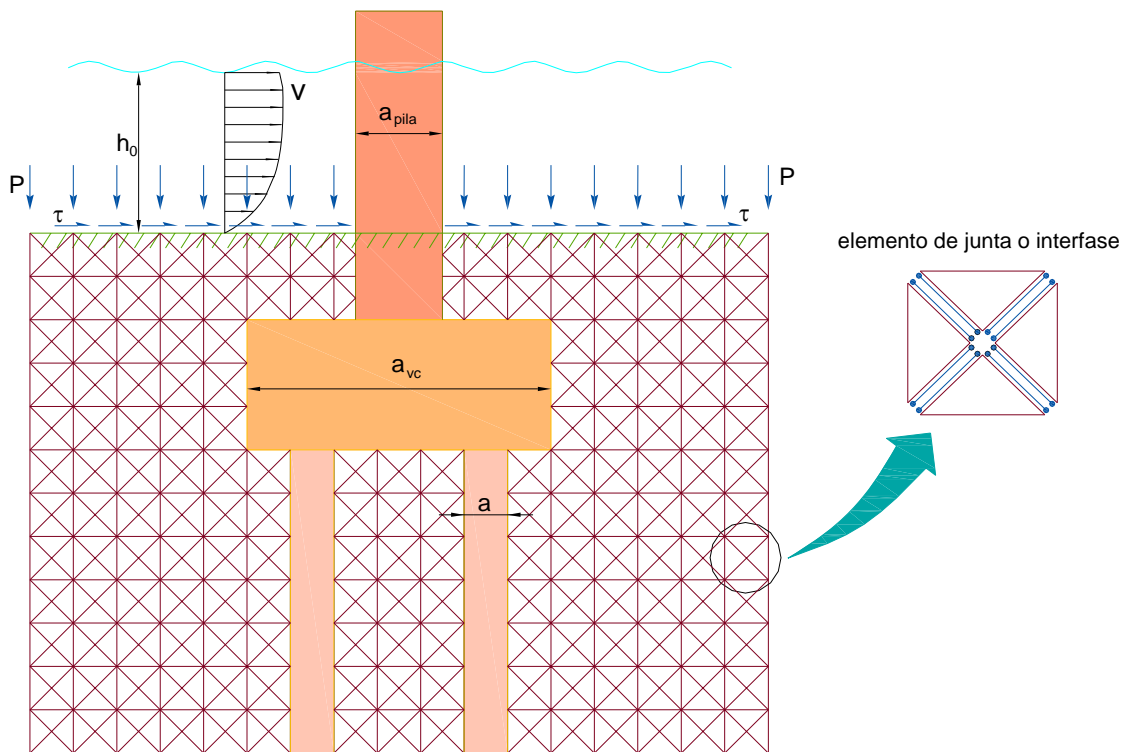
Figura 4: Superficie de falla hiperbólica – modelo invíscido

## MODELO DE SOCAVACIÓN A NIVEL MESOMECÁNICO

Dado que el proceso de socavación consiste esencialmente en el desprendimiento o arrastre del material del lecho, desde el punto de vista mesomecánico es necesario introducir en el planteo del modelo numérico las características mecánicas del suelo que compone el lecho. En este sentido, la ley de interfase presentada anteriormente es apta para modelar el comportamiento en rotura de materiales cohesivo-friccionales como los suelos, a la vez que con una adecuada selección de parámetros puede representar suelos cohesivos puros como las arcillas o friccionales puros como las arenas.

En una primera aproximación, se plantea el modelo para un caso de flujo bidimensional alrededor de una pila compleja (ver Figura 5). El suelo circundante a la pila compleja se idealiza como un material no homogéneo, caracterizado por planos de rotura potenciales representados mediante elementos finitos de junta, a los que se asigna el comportamiento constitutivo dado por la ecuación (7). Entre estas juntas, se asume que el material es un continuo para el cual en principio, se puede aceptar un comportamiento elástico lineal (elementos finitos triangulares). Con este esquema de análisis, el proceso de socavación se representa a través de la exclusión de la malla de elementos finitos de aquellos elementos de junta y de continuo involucrados por el plano de rotura activado en el instante genérico “ $t$ ” del proceso de cálculo. El esquema de cálculo que se propone se sintetiza en el diagrama de flujo de la Figura 6.

El cálculo numérico requiere como datos de entrada los parámetros mecánicos del suelo, fuerza tractiva en el lecho, las condiciones locales del flujo en las cercanías de la pila, la geometría de la misma y las condiciones de borde que caracterizan el conjunto.



**Figura 5:** Esquema de modelación de la erosión alrededor de una pila compleja

## Descripción de las características de las etapas de cálculo

Para lograr un análisis computacional eficiente, el problema se subdivide en una serie de lazos de etapas, pasos e incrementos. Los lazos de etapas involucran uno o varios pasos, mientras que a su vez, los pasos pueden contener uno o varios incrementos, ver Figura 6.

Desde el punto de vista computacional, la definición de las etapas implica el uso de un algoritmo general de extracción/generación de elementos con el fin de permitir la simulación numérica de procesos evolutivos, por ejemplo la construcción de una presa, o la realización de una excavación, los cuales se caracterizan por la variabilidad de la cantidad de material presente en las diferentes etapas del proceso.

En el caso del problema que nos ocupa, el algoritmo de extracción /generación de elementos es indispensable para una representación del proceso físico de socavación, el cual se hará extrayendo de la malla inicial aquellos elementos finitos de junta (y los elementos de medio continuo involucrados) para los cuales se cumpla la condición de falla definida por la ecuación (7). De este modo, al detectarse que uno o más elementos de interfase han fallado, en la etapa subsiguiente del cálculo se eliminan de la malla dichos elementos, por lo que las condiciones de contorno, es decir las fuerzas producidas por el flujo se deben aplicar ahora sobre los elementos de la nueva frontera del problema (ver Figuras 7 a 9).

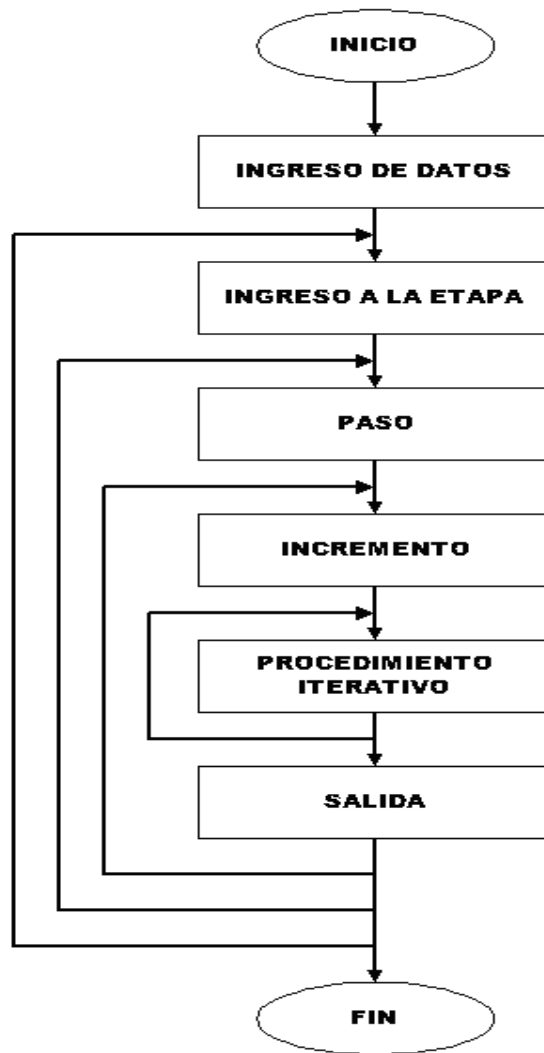


Figura 6: Diagrama de flujo - Procedimiento de cálculo mediante el MFC

### Descripción de las características de los pasos de cálculo que conforman la etapa

Como se mencionó anteriormente, las etapas de cálculo pueden contener uno o varios pasos. La subdivisión en pasos permite elegir la magnitud y dirección de los incrementos de fuerzas tractivas y de presión, y la estrategia de análisis a seguir que sea más conveniente para cumplir con la tolerancia numérica previamente establecida. Por otro lado, en cada paso es posible el empleo de métodos especiales para la mejora de la convergencia tales como estrategias de “line-search” (Crissfield, 1980, 1981), o “arc-length” (Wempner, 1971; Riks, 1972, 1979).

Para el tiempo inicial, el esquema de cálculo es el presentado en la Figura 6. En el tiempo  $t_n$  las fuerzas tractivas generadas por el flujo superan la resistencia del material y se da inicio al proceso de socavación mediante el desprendimiento de los primeros elementos de suelo (ver Figura 8). El cálculo se detiene, se modifica la configuración de la malla y se reinicia el análisis con un nuevo paso. En un tiempo  $t_{n+1}$ , el desprendimiento será mayor, tal como se muestra en la Figura 9. Finalmente, cuando las fuerzas tractivas sean inferiores a las críticas,



el proceso terminará, presentando una configuración tal como se esquematiza en la Figura 10 para el tiempo de equilibrio  $t_e$ .

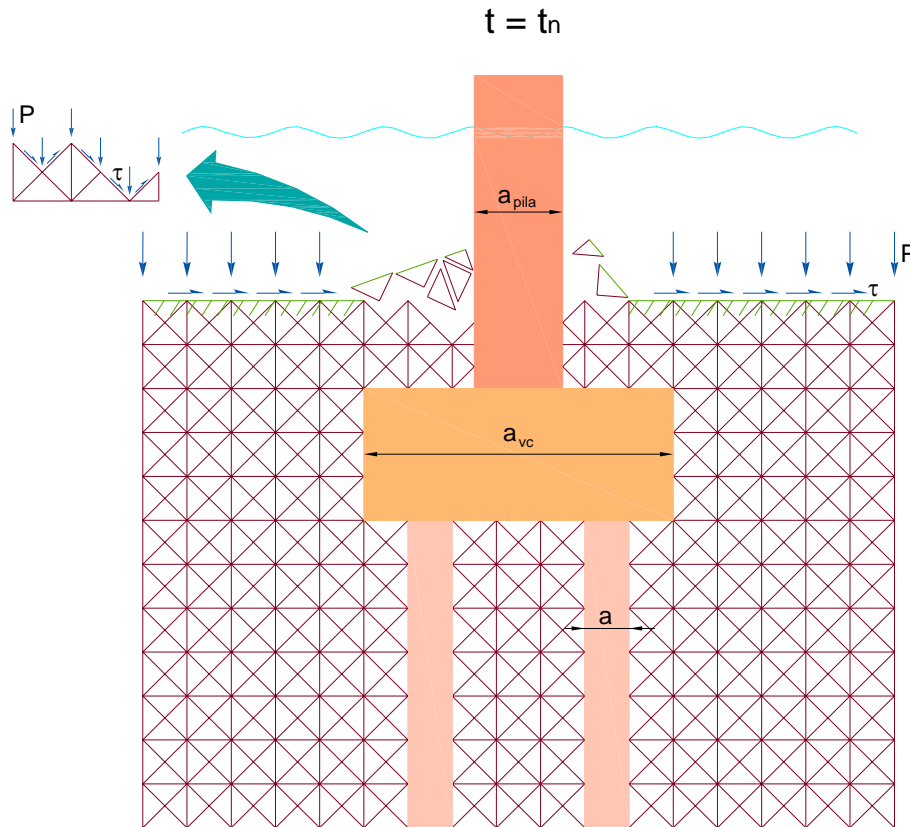
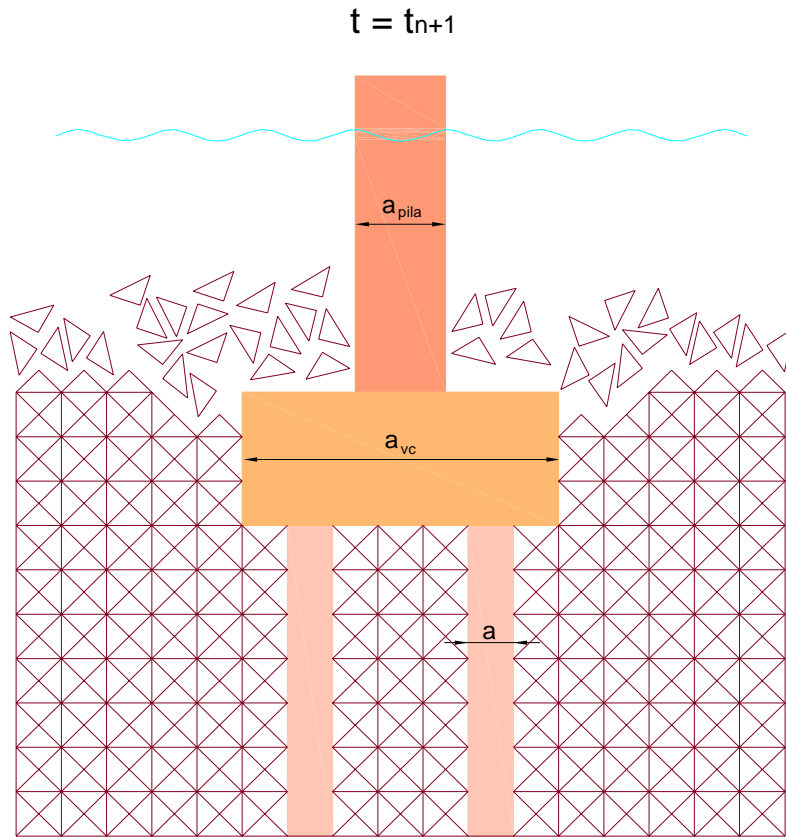


Figura 7: Inicio del proceso de socavación

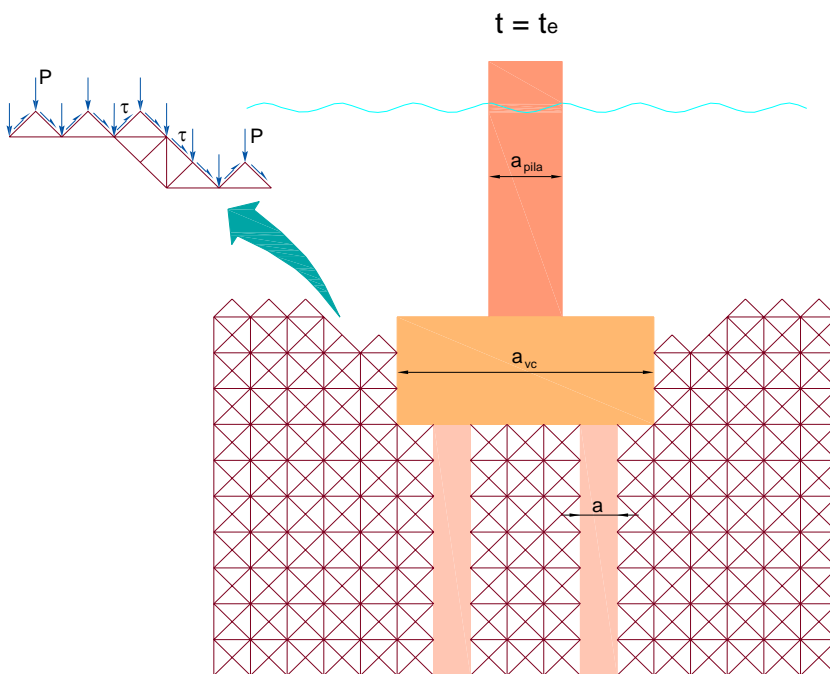
### Descripción de las características de los incrementos de cálculo que conforman el paso

Cada paso puede subdividirse en una serie de incrementos, los cuales pueden ser a su vez de diferentes tamaños, a los fines de alcanzar el valor total correspondiente a un paso determinado. Dado que el proceso de socavación evoluciona en el tiempo, el tiempo total de análisis y el paso de tiempo considerado durante la simulación numérica deben ser consistentes con el tiempo físico real que caracteriza al problema.

En este sentido, el tiempo estimado de equilibrio  $t_e$  de un problema en particular se establecerá con las ecuaciones disponibles en la bibliografía (Melville & Coleman, 2000) y a partir de este se definirá la duración de la simulación y el paso del tiempo.



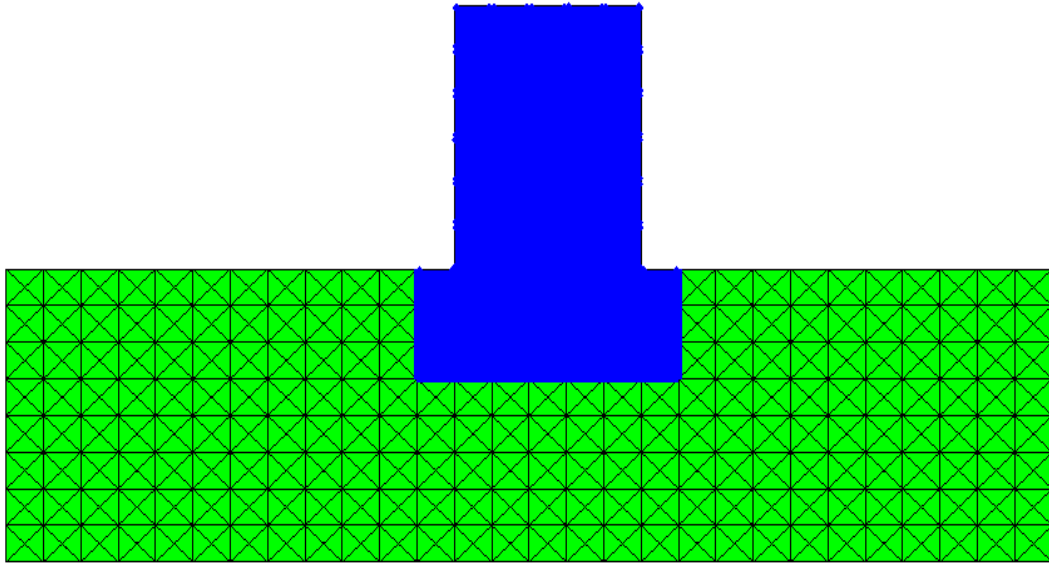
**Figura 8:** Remoción de los elementos



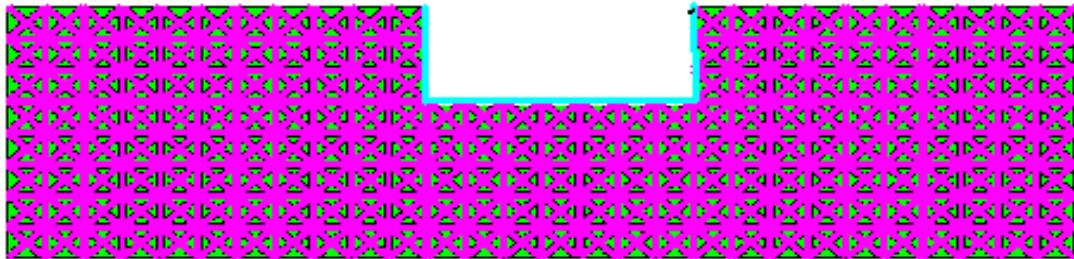
**Figura 9:** Configuración de la fosa de socavación en el equilibrio

## ANÁLISIS NUMÉRICO

Se presenta en esta sección una aplicación de la metodología descrita previamente mediante el análisis numérico del proceso de socavación en una pila genérica del Puente Francisco Solano ubicado sobre el Río Dulce en la Provincia de Santiago del Estero. El análisis numérico se realiza en dos dimensiones, con la malla de elementos finitos mostrada en Figuras 10 y 11. En la Figura 10 se observa los sectores de suelo y pila considerados, mientras que en la Figura 11, el plano de contacto entre ambos materiales y las interfases en el suelo.



**Figura 10:** Malla mesomecánica de elementos finitos



**Figura 11:** Disposición de las interfases suelo-suelo y suelo-hormigón

La malla está integrada por dos tipos de elementos finitos: elementos de medio continuo y elementos de interfase. En total posee 3048 nodos, con 1016 elementos del continuo y 1482 elementos de interfase. El análisis se realiza en estado plano de tensiones (bidimensional) tiempo-dependiente con el fin de representar la discretización tanto espacial como temporal. Para los elementos de medio continuo (triangulares), se considera una regla de integración gaussiana con un único punto de integración, mientras que las interfases se integran con una

regla de Newton-Coates de dos puntos. La tolerancia para la convergencia del análisis es  $Tol = 0.001$ .

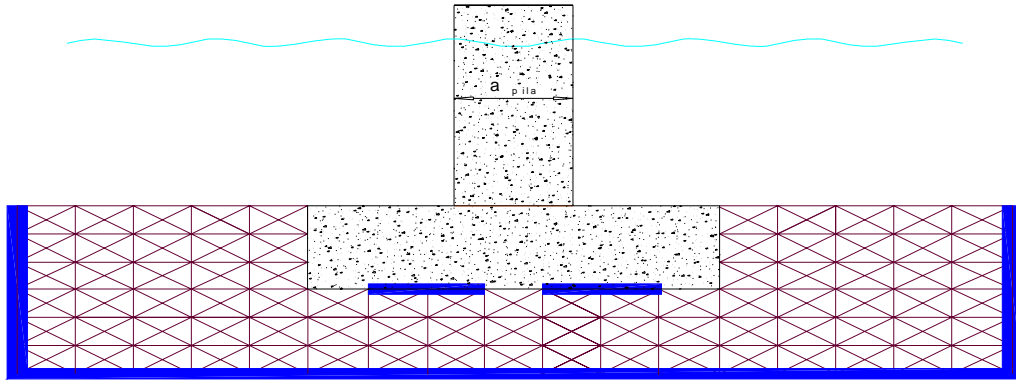
Dado que el interés del estudio es el de ilustrar la modelación del proceso de socavación del material de fondo, a los elementos finitos triangulares de medio continuo que representan a la pila y al suelo se les asigna un comportamiento constitutivo elástico lineal. Los parámetros del suelo fueron obtenidos a partir de ensayos realizados sobre muestras tomadas de los márgenes del río:  $E_s = 150 \text{ Kg/cm}^2$ , y coeficiente de Poisson  $\nu = 0.20$ . Para el hormigón de la pila se adoptaron los siguientes parámetros elásticos:  $E_s = 250000 \text{ Kg/cm}^2$ , y coeficiente de Poisson  $\nu = 0.20$ . Todo el comportamiento no-lineal se asigna a las interfases del suelo y del plano de contacto suelo-hormigón, equipando a los elementos de junta con la ley constitutiva no-lineal elasto-viscoplastica descrita anteriormente. Los valores de las constantes materiales de las interfase de suelo adoptados fueron los siguientes: ángulo de fricción interna  $\phi = 0.60$ , una resistencia a la tracción de  $\chi = 0.02 \text{ Kg/cm}^2$ , una cohesión  $c = 0.5 \text{ Kg/cm}^2$ . Los valores materiales de las constantes del suelo se consideran en estado saturado, tomando dos tercios de los valores especificados en los ensayos. Para las interfases suelo – hormigón se toman los mismos parámetros pero reducidos en un 60 % para considerar el plano de debilidad entre ambos materiales.

### **Condiciones de borde**

Las condiciones de borde del problema implican tanto las condiciones en los límites de la malla como la acción del fluido sobre el fondo. La acción del fluido se introduce por medio de un sistema de fuerzas tangenciales y normales actuando sobre los elementos finitos del contorno en el plano de contacto con el agua.

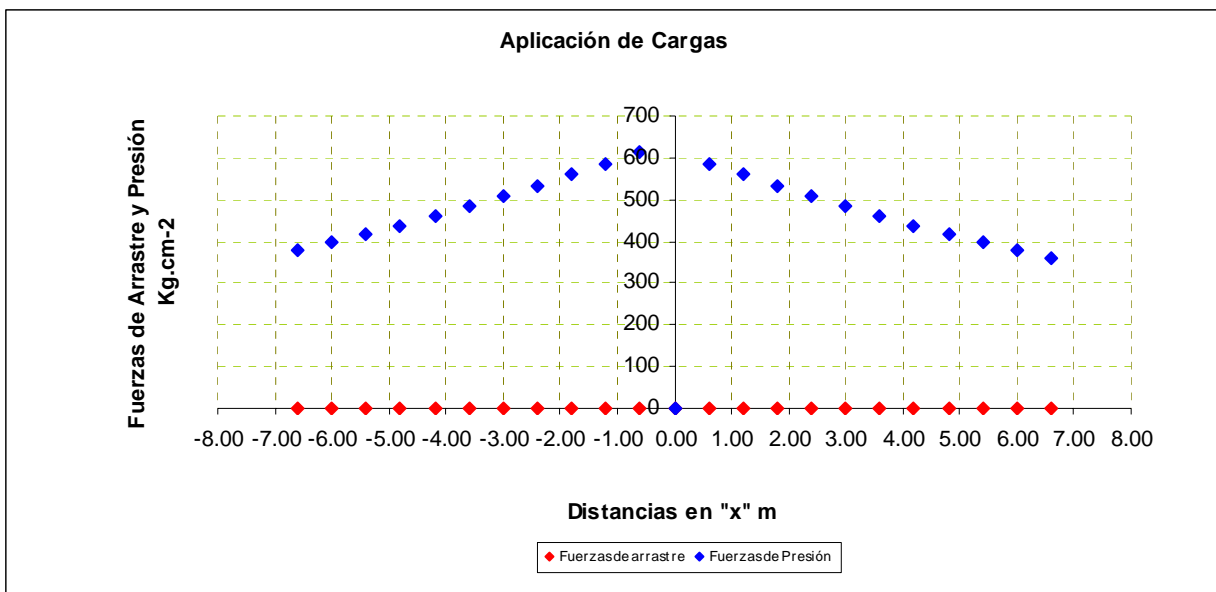
Los valores de las fuerzas se calculan a partir del conocimiento de los parámetros hidráulicos del problema (tirantes, radios hidráulicos, peso específico del fluido, etc.), los cuales se obtuvieron a partir de mediciones de campo. Las mismas se realizaron en el marco de una campaña denominada Aforo del Río Dulce Aguas Arriba del Puente San Francisco Solano, Provincia de Santiago del Estero, con fecha 20 de Marzo del 2007, con los siguientes resultados: Caudal  $Q = 335.320 \text{ m}^3/\text{s}$ , peso específico del material del lecho  $\gamma = 2650 \text{ N/m}^3$ ,  $D_{50} = 0.9 \text{ mm}$ , pendiente  $S = 0.0001$ , tirante de inicio:  $h = 0.8 \text{ m}$ .

En los límites de la malla ( $\pm 5.0$  metros antes y después de la pila) se asume que los nodos se encuentran fijos, ver Figura 12. Respecto a la condición de borde de la pila misma, dado que esta se encuentra fundada sobre pilotes a  $-10.00$  metros de profundidad, se considera a la pila firmemente apoyada sobre los pilotes asignando apoyos fijos a los nodos de la malla involucrados.



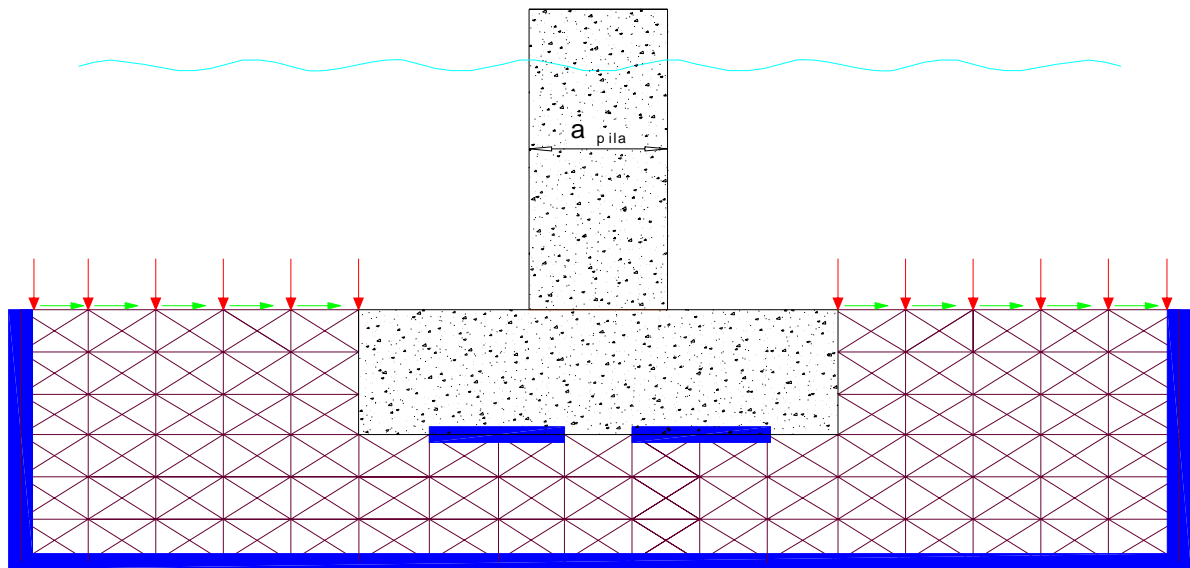
**Figura 12:** Condiciones de Borde consideradas

La variación del perfil de velocidades por aumento del tirante se considera mediante una corrección en los valores del sistema de cargas aplicadas sobre le lecho. En nuestro caso se tomo una variación del 5% más con respecto al punto medido, ver Figura 13.-



**Figura 13 –** Fuerza de arrastre y presión en función de la distancia a la pila

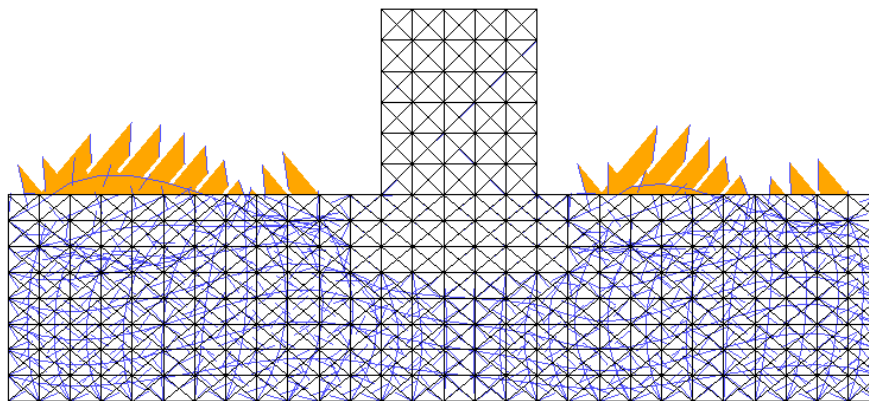
En la Figura 14 se ilustra la aplicación del sistema de cargas equivalentes sobre la malla conjuntamente son las condiciones de borde consideradas.



**Figura 14 – Sistema equivalente de Cargas**

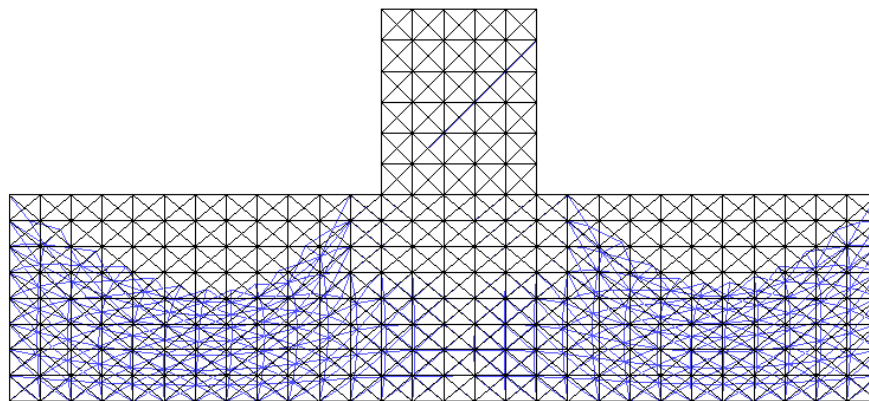
### ANÁLISIS COMPUTACIONAL

El análisis numérico se realiza con el programa DRAC 2D, Programa de Elementos Finitos con capacidad 2D/3D originalmente desarrollado en la UPC (Universidad Politécnica de Catalunya), y que fuera modificado para incluir modelos materiales visco-plásticos en el CMAE – UNSE (Centro de Mecánica Aplicada y Estructuras de la Universidad Nacional de Santiago del Estero). En las Figuras 15, 16 y 17 se ilustra el estado final de socavación obtenido en términos del campo de desplazamientos de los nodos de la malla. En estas figuras, se aprecia el efecto del sistema de cargas equivalentes representativo del fluido.



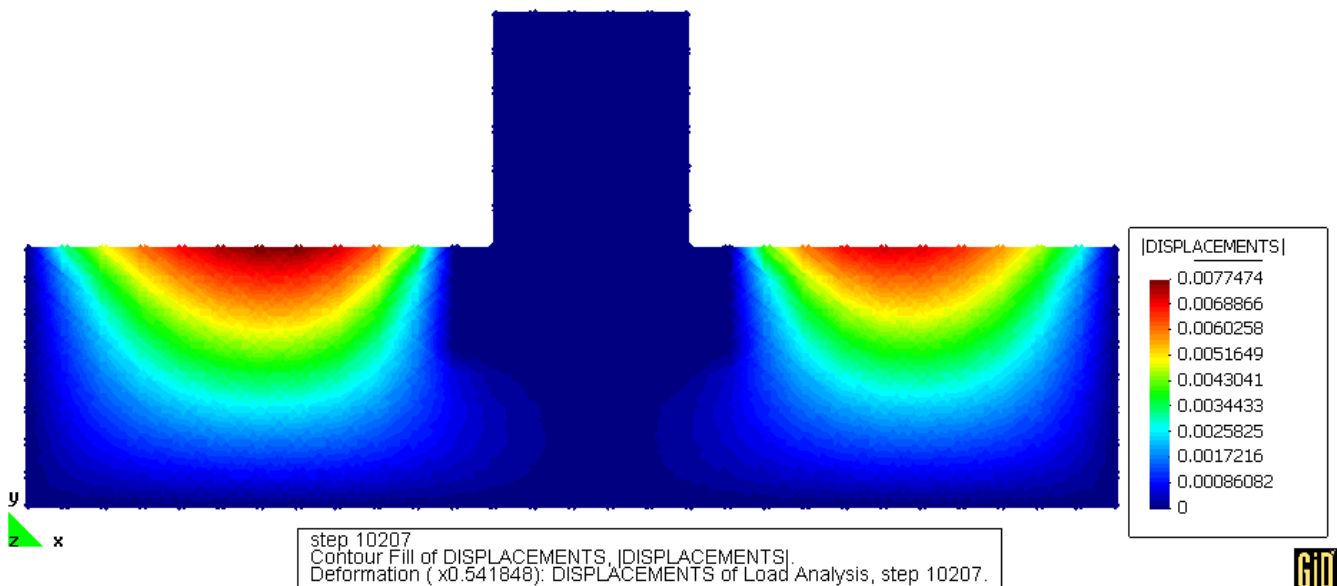
step 10207  
Scalar Line Diagram of DISPLACEMENTS, X-DISPL factor 936.56.

**Figura 15: Desplazamientos tangenciales (representación escalar) - Paso 10207**



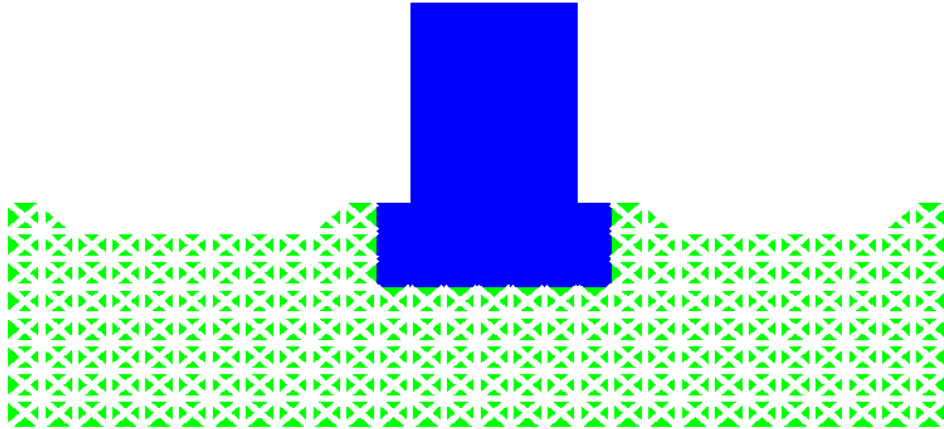
step 10207  
Vector Line Diagram of DISPLACEMENTS, |DISPLACEMENTS| factor 238.003.

**Figura 16:** desplazamientos tangenciales (Diagrama Vectorial) - Paso 10207



**Figura 17:** Mapeo de Desplazamientos tangenciales –Paso 10207

En la Figura 17 se aprecia un mapeo de desplazamientos tangenciales, los cuales son el resultado de las fuerzas de arrastre sobre el lecho. La magnitud alcanzada por estos desplazamientos indica que las zonas de mayor intensidad, situadas en las capas de elementos superiores de la malla, inmediatamente por debajo del fondo del lecho son las que corresponden a la zona de socavación involucrada. A partir de estos resultados, puede evaluarse la profundidad máxima de la hoya de socavación así como su extensión aguas arriba y aguas abajo de la pila, ver Figura 18.



**Figura 18:** Estado final de socavación –Paso 10207

## CONCLUSIONES

Se ha realizado un análisis a nivel mesomecánico para el estudio computacional de problemas de socavación del suelo alrededor de pilas de geometría compleja. El método propuesto es general, y puede ser aplicado tanto a problemas bidimensionales como tridimensionales ya que para ello solo es necesario introducir en la formulación de la superficie de falla a nivel de las interfases el efecto de una nueva componente de tensión tangencial, sin necesidad de modificar el resto de la formulación tiempo-dependiente. Desde el punto de vista numérico, esta propuesta implica que, una vez calibrado el modelo constitutivo sobre la base de las características del flujo y del suelo saturado que compone el lecho, el mismo puede ser empleado para el estudio y predicción del fenómeno de socavación local en pilas complejas y bajo cualquier régimen de flujo, dado que las variaciones del régimen del mismo se traducen en un efecto mecánico sobre el suelo que compone el fondo. Dada la generalidad del modelo de interfase considerado, es posible analizar problemas de socavación con cualquier material de fondo, ya que siempre es posible representar el comportamiento cohesivo-friccional general de los suelos con una elección adecuada de las constantes materiales y ensayos de laboratorio específicos.

*Agradecimiento.* Los autores agradecen a la Universidad Nacional de Santiago del Estero quien a través de la Secretaría de Ciencia y Técnica financia el Proyecto 23/C067 "Estudio de la Socavación Producida por Pilas Complejas en Ríos Aluviales"

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\varepsilon$ : Deformación

$\varepsilon_e$ : Deformación elástica

$\varepsilon_{vp}$ : Deformación viscoplástica

$\eta$ : viscosidad aparente del sólido

$m$ : gradiente a la superficie de potencial visco-plástico  $G$

$G$ : Potencial visco – plástico

$\lambda$ : Multiplicador escalar

$\dot{q}$ : Conjunto de variables que dependen de la historia del materia



$\psi(F)$  : Función de sobretensión  
 $F_0$ : Factor de normalización  
 $N$  : Orden de la formulación de Perzyna  
 $\sigma$  : Componente normal de la tensión  
 $\tau$ : Componente tangencial de la tensión  
 $\bar{t}$  : Vector tensión  
 $a_{pila}$ : diámetro de la pila o dimensión paralela al flujo  
 $a_{vc}$  : dimensión paralela al flujo de la viga cabezal de pilotes  
 $a$ : diámetro del pilote  
 $E_s$  : Módulo de Elasticidad del suelo.-  
 $\nu$  : Coeficiente de Poisson.-  
 $\phi$  : Ángulo de fricción interna.-  
 $\chi$  : Resistencia a la tracción.-  
 $c$  : Cohesión.-  
 $Q$  : Caudal.-  
 $\gamma$  : Peso Específico del material.-  
 $D_{50}$  : Diámetro equivalente al 50%.-  
 $S$  : Pendiente.-  
 $h$  : Tirante

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Perzyna, P. (1963):** “*The Constitutive Equations for Rate Sensitive Materials*”. Quarter of Applied Mathematics, Vol. 20, pp. 321-332.

**Perzyna, P.(1966):** “*Fundamental Problems in Viscoplasticity*”. Advances in Applied Mechanics, Academic Press, New York, (9), pp. 244-368.

**Carol, I, & Alonso E. (1983):**”A new joint element for the analysis of fractures rock”.5th Int. Congress on Rock Mechanics Vol F, Melbourne, Australia, pp. 147-151.

**Melville & Coleman (2000):** Bridge Scour. Water Resources Publications, Littleton, Colorado, USA.

**Sheppard, M. (2003):** “Scour at Complex Piers”, Report FDOT: BC354 RPWO 35, UF: 4910 45-04-799.

**Farias, H.D., Pilán, M.T., Pece, F.J., Mattar, M.T. (2003).** “Socavación Local en Pilas de Puentes: Formulación General y Análisis Crítico de Metodologías Existentes”. Nuevas Tendencias en Hidráulica de Ríos. Memorias del Primer Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos. Buenos Aires, Argentina

**Farias, H.D., Pilán, M.T., Pece, F.J., Olmos, L.A. (2004):** “*Socavación Local en Pilas de Puentes: de la Abrumadora Complejidad a la Excesiva Simplificación*”, Memorias XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Sao Pedro, Estado de Sao Paulo, Brasil.[ISBN CD 85-904853-2-3

**Coleman, S.E. (2005):** “*Clearwater Local Scour at Complex Piers*”, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 131, No. 4, pp 330-334.

**Pilán, M.T., Trejo, J.S., Pece, F.J., Mattar, M.T., Olmos, L.A. (2005):** “*Análisis de Metodologías para Predecir la Socavación en Pilas Complejas*”. RIOS 2005: Principios y Aplicaciones en Hidráulica de Ríos. Memorias Segundo Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, Neuquén, Argentina, 2-4 nov. 2005. [ISBN 987-20109-4-3 (CD-ROM) & 987-20109-5-1 (libro)].

**Lorefice, R., Etse, G., Lopez, C.M., Carol, I. (2006):** “*Mesomechanic Analysis of Time Dependent Concrete Behavior*”. EURO-C 2006, Balkema eds., pp. 548-557.

**R. Lorefice, y M. Rizo Patrón (2006):** “*Modelacion de procesos de falla en hormigon mediante los criterios meso y macromecanicos*”, capítulo del libro MODELIZACIÓN APLICADA A LA INGENIERÍA, Editores: *Walter E. Legnani , Pablo Jacovkis, Ricardo L. Armentano y Marcelo R. Risk*.

**R. Lorefice (2007):** *Modelación de la respuesta dinámica del Hormigón mediante los criterios meso y macro mecánicos*. Tesis Doctoral. CEMNCI – UNT. Agosto de 2007.