

SIMULACION COMPUTACIONAL DEL PROCESO DE HINCA DE UN PILOTE

María H. Peralta⁽¹⁾; Norma L. Ercoli⁽¹⁾; Leonel O. Pico⁽²⁾

(1) Profesor Asociado Area Estructuras. Departamento de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. Av. Del Valle 5737,
B7400JWI-Olavarría, Provincia de Buenos Aires, Argentina. Tel.-Fax (0054-02284)451055/56.
Email:mperalta@fio.unicen.edu.ar

(2) Alumno Becario, Area de Estructuras, Departamento de Ingeniería Civil- Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires.

Palabras claves: análisis estructural, fundaciones, impacto

Resumen. *El constante avance tecnológico provee herramientas, que permiten al ingeniero la optimización del diseño. De esas nuevas herramientas, las que ofrecen algunos softwares a través de la posibilidad de disponer de un Laboratorio Virtual al servicio del diseñador, constituyen un gran aporte al desarrollo ingenieril del nuevo siglo. Estos Laboratorios Virtuales permiten simular eventos a partir del ensayo de prototipos usando modelos tridimensionales. Mediante el empleo de esta metodología de simulación, el factor tiempo es incluido dentro de la solución, tal lo que ocurre en el proceso de análisis experimental de un prototipo. Dado que un porcentaje importante de las fallas que presentan elementos constituyentes de sistemas estructurales es originado por el movimiento, resulta importante el análisis de los mismos a partir de esta condición. Ello se fundamenta en los principios de la Física en cuanto a que el movimiento involucra velocidad, y la variación de la velocidad con respecto al tiempo aceleración. Asimismo, de acuerdo a la Segunda Ley de Newton, la interacción entre la masa y la aceleración es fuerza, siendo ésta la que origina el estado tensional que finalmente puede causar la falla.*

En el presente trabajo se realiza el análisis del proceso de hinca de un pilote a través de la simulación computacional. Para ello se consideran diferentes alternativas de modelización considerando la inclusión del tiempo y del movimiento a fin de predecir el comportamiento a través de simulaciones más realistas. El análisis se centra en la determinación de la máxima tensión de compresión originada por el golpe en la cabeza del pilote y en la propagación de la onda de impacto en el mismo. La validación de los resultados se realiza a través de la comparación con los derivados del análisis clásico de la Resistencia de Materiales.

1 INTRODUCCION

La Simulación de Eventos, como una metodología de uso en ingeniería, se diferencia ampliamente de las técnicas conocidas por los ingenieros de la formación tradicional desde la época del físico y matemático griego Arquímedes alrededor del año 250 A.C. La Simulación de Eventos es la *ingeniería con simulación de un evento físico en un laboratorio virtual*. Para el desarrollo de un análisis de ingeniería usando la simulación de eventos se requieren diferentes puntos de vista que para un análisis clásico de tensiones. Con aquél no sólo se puede realizar la simulación del evento, sino que se puede contrastar con el análisis clásico de tensiones.

De la ingeniería clásica se sabe que la tensión es una función de la fuerza aplicada, es decir $\sigma=f(\text{fuerza})$, y que la deformación o desplazamiento, es otra función de la fuerza, $d=g(\text{fuerza})$. En la ingeniería virtual, asimismo, se supone que la fuerza de diseño normalmente está indeterminada y los resultados dependen de algunos tipos de acciones y movimientos. De esta manera, la fuerza y la tensión son funciones del desplazamiento o de la deformación, es decir $\text{fuerza}=f(d)$ y $\sigma=g(d)$. La deformación o desplazamiento se calcula directamente de las ecuaciones que gobiernan la física.

En la práctica de la ingeniería mecánica, los casos estáticos no siempre dictaminan el diseño. El mismo debe considerar el escenario más desfavorable, que ocurre cuando el elemento se encuentra en movimiento.

En esta situación se tiene que las fuerzas, y por consiguiente las tensiones, son mayores que bajo condiciones estáticas.

Aquí es donde la *ingeniería virtual* entra en el proceso de diseño, la cual permite no sólo obtener una solución estática, sino simular íntegramente el evento mecánico. Así resulta de mucha utilidad simular el evento de las fuerzas originadas por el movimiento. De este modo, se plantea la discusión de cómo el movimiento genera a las fuerzas. De acuerdo con la *Segunda Ley de Newton*:

$$F = m \cdot a \quad (1)$$

donde la fuerza es igual a la masa por la aceleración. La masa es una propiedad inherente de la materia, y la aceleración es la tasa de variación de la velocidad respecto al tiempo. Esta ley cuantifica el hecho de que la masa es la propiedad de la materia que se opone o que causa resistencia a los cambios de movimiento. Debe notarse que bajo la influencia de la gravedad, un cuerpo en reposo de masa m genera una fuerza mg , donde g es la aceleración de la gravedad. En los casos especiales de aceleración constante, como el del campo gravitatorio en la superficie terrestre y en eventos de corta duración Δt , la Ec. 1 puede reescribirse como:

$$F = m \cdot \frac{\Delta v}{\Delta t} \Rightarrow F \cdot \Delta t = m \cdot \Delta v \quad (2)$$

donde Δv es la variación de velocidad durante el intervalo de tiempo Δt . En la Ec.2, el término a la izquierda de la igualdad representa el impulso, mientras que el término de la derecha indica la cantidad de movimiento o momentum lineal. De esta manera, una fuerza de 1000 N

actuando durante $0,001$ s produce el mismo impulso o cambio de la cantidad de movimiento que una fuerza de 1 N actuando durante 1 s.

La simulación de un evento requiere la combinación de la segunda ley de Newton y de la ley de Hooke:

$$\text{➤ Newton: } F = m \cdot a \quad (3)$$

$$\text{➤ Hooke: } F = -k \cdot d \quad (4)$$

$$F = m \cdot a = -k \cdot d \quad \text{ó} \quad m \cdot a + k \cdot d = 0 \quad (5)$$

El signo negativo de k indica que la fuerza es opuesta al sentido del desplazamiento. También debe destacarse que la cantidad de fuerza desconocida puede eliminarse, y que se ha introducido el concepto del tiempo a través de la aceleración. Pero para simular problemas del mundo real debe tomarse además el amortiguamiento o la fricción. Estas fuerzas de disipación pueden escribirse como:

$$F = -c \cdot v \quad (6)$$

donde v es la velocidad y c es una constante; del mismo modo, el signo negativo indica que la disipación se opone al movimiento. Combinando las ecuaciones 5 y 6 se obtiene:

$$m \cdot a + c \cdot v + k \cdot d = 0 \quad (7)$$

o expresando en forma matricial:

$$[M] \cdot \{a\} + [C] \cdot \{v\} + [K] \cdot \{d\} = 0 \quad (8)$$

Esta es la **ecuación básica de la ingeniería virtual** [1]. Es de destacar cómo la ecuación modela la combinación del movimiento, del amortiguamiento y de la deformación mecánica. La ingeniería virtual provee un medio adecuado para el diseño en las condiciones más desfavorables. Aun para los casos más sencillos, está más allá del alcance de los cálculos manuales. De esta manera, con la tecnología de las computadoras actuales, la solución de problemas significativamente más complejos se redujo a niveles prácticos.

Los ingenieros a menudo necesitan chequear un diseño mientras está en movimiento, como ser los eventos dinámicos de oscilación de péndulos, rotación o vibración. El módulo *Accupack/VE*, del software utilizado en el presente trabajo, combina la cinemática, la dinámica del cuerpo rígido, la dinámica del cuerpo flexible y las capacidades de análisis de tensiones no lineales. Así *Accupack/VE* puede analizar simultáneamente eventos mecánicos que involucran grandes deformaciones, propiedades no lineales del material, movimiento, fuerzas originadas por dicho movimiento y predecir luego las tensiones resultantes.

Algunas de las principales ventajas de la simulación de eventos es la necesidad de tomar pocas suposiciones. Con la simulación de eventos no es necesario usar cálculos manuales para la interpretación de los resultados o experimentos para determinar la carga equivalente. Dado que son pocas las suposiciones que se necesitan, esto reduce las posibilidades de error.

La simulación de eventos permite:

- 1) Describir las influencias externas que controlan el evento

- 2) Mostrar la imagen del elemento sin la carga
- 3) Ver la imagen de la parte que reacciona realmente
- 4) Crear representaciones realistas que pueden ser entendidas aun por una persona no técnica o lega en la materia.

En el presente trabajo se utiliza la simulación de eventos para analizar el proceso de hincado de un pilote que se describe a continuación.

2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En el caso de fundaciones profundas, la fundación consta de un pilote o grupo de pilotes, que son columnas que pueden estar realizadas en metal o en hormigón armado y que penetran suficientemente hasta el manto resistente del suelo. Por este motivo es usual su utilización en aquellos casos de estructuras que deben cimentarse sobre terrenos poco resistentes. La resistencia del pilote está garantizada por la fricción del mismo con el suelo (resistencia por fuste o fricción) y por la punta del pilote (resistencia de punta).

En este trabajo se considerará la modelización de un pilote construido en hormigón sin la consideración de armaduras de acero. Si bien los pilotes siempre poseen en la realidad armaduras longitudinales y transversales, para los efectos del análisis que se explicará no son de importancia. Atendiendo a esta simplificación, se puede decir que un pilote es, como ya se ha dicho, una columna o cilindro que para que penetre en un determinado suelo debe ser hincado, es decir, golpeado en su parte superior por medio de una maza o martinete que generalmente está construido de acero.

El problema propuesto consiste en determinar cuál es la máxima tensión de compresión que se produce en la cabeza del pilote cuando cae libremente una maza o martinete de acero desde una altura $h=0,90\text{ m}$. El pilote tiene un diámetro $d=0,30\text{ m}$ y una longitud de $L=7,00\text{ m}$. El módulo de elasticidad del pilote es $E=105000\text{ kg/cm}^2$ ($E=1,0305 \times 10^{10}\text{ N/m}^2$). El peso del martinete de acero es de $W=450\text{ kg}$, cuyo peso específico es $\gamma=7850\text{ kg/m}^3$.

3 METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS

El problema descrito será abordado de acuerdo a las siguientes metodologías:

- Análisis clásico de Resistencia de Materiales
- Análisis cinemático
- Análisis del mecanismo general de la hincado del pilote
- Análisis mediante Simulación de Eventos

El primer análisis permitirá determinar la máxima tensión de compresión que se produce en el momento del impacto; con el segundo análisis se hallará el tiempo empleado por el martinete para impactar sobre el pilote; con el tercer tipo de análisis se encontrará la máxima tensión de compresión que se origina por la propagación de la onda de impacto en el pilote determinada sobre la base de métodos semiempíricos; mientras que con el último análisis se hallarán los resultados de acuerdo a diferentes alternativas de modelización utilizando una técnica de solución más realista.

3.1 Análisis Clásico de Resistencia de Materiales

A continuación se realiza un análisis tradicional de la Resistencia de Materiales despreciando las pérdidas de energía debidas al impacto [2].

El área de la sección transversal del pilote es:

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot (30 \text{ cm})^2}{4} \Rightarrow A = 706,86 \text{ cm}^2 \quad (9)$$

La tensión estática que se origina por efecto del peso propio es:

$$\sigma_{pp} = \frac{P_p}{A} = \frac{\gamma_{H^*} \cdot V_p}{A} = \frac{\gamma_{H^*} \cdot A \cdot L}{A} = \gamma_{H^*} \cdot L = 2400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 7,00 \text{ m} \quad (10)$$

$$\sigma_{pp} = 16800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} = 1,68 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

es decir:

$$\sigma_{pp} = 1,648 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

La tensión estática debida a un peso W actuando sobre una superficie A es:

$$\sigma = \frac{W}{A} = \frac{450 \text{ kg}}{706,86 \text{ cm}^2} \Rightarrow \sigma = 0,6366 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad (11)$$

Sabiendo que el desplazamiento que se origina como consecuencia de la acción de un esfuerzo axil es:

$$\delta_{est} = \frac{P \cdot L}{E \cdot A} = \frac{450 \text{ kg} \cdot 700 \text{ cm}}{105000 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \cdot 706,86 \text{ cm}^2} \Rightarrow \delta_{est} = 4,24 \cdot 10^{-3} \text{ cm} \quad (12)$$

Para convertir el análisis dinámico en análisis estático equivalente, se recurre a una deducción que surge de un planteo de balance energético que considera que la energía potencial de un cuerpo que cae se transforma enteramente en energía de deformación, despreciándose otros tipos de energía. De esta manera queda determinado un coeficiente φ que se denomina *coeficiente de impacto*:

$$\varphi = 1 + \sqrt{1 + \frac{2h}{\delta_{est}}} = 1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot 90 \text{ cm}}{4,24 \cdot 10^{-3} \text{ cm}}} \Rightarrow \varphi = 208 \quad (13)$$

Afectando a la tensión estática por el coeficiente de impacto se obtiene la tensión dinámica σ_d :

$$\sigma_d = \varphi \cdot \sigma = 208 \cdot 0,6366 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \Rightarrow \sigma_d = 132,42 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad (14)$$

3.2 Análisis cinemático

En este análisis se hallará el tiempo en que se produce el impacto que será la mínima duración del evento que deberá asignarse en la posterior simulación computacional, ya que para una duración de evento menor que el tiempo de caída del martinete no se obtendrán resultados tensionales debido a que, lógicamente, el martinete aun no ha impactado. Seguidamente se explica cómo se realiza la determinación del tiempo que tarda en caer el martinete o hincapilotes.

El martinete o maza que golpea parte desde una posición inicial con velocidad cero, que comienza a aumentar por la existencia de la acción gravitatoria. La ley de variación de la velocidad está dada por las conocidas expresiones de la cinemática del cuerpo libre. La posición de un cuerpo está dada por la Ec. 15:

$$x = x_0 + v_0 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 \quad (15)$$

donde:

- x_0 : posición inicial de la partícula o cuerpo
- v_0 : velocidad inicial de la partícula o cuerpo
- a : aceleración del cuerpo o partícula
- t : tiempo

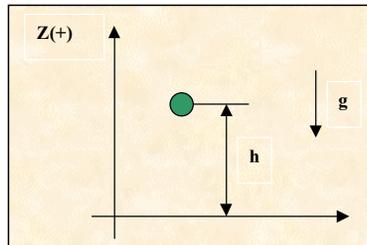


Figura 1: Posición inicial del cuerpo

Debido a que se considera, según la Figura 1, que el cuerpo parte desde la posición inicial $x_0=h$ y que por acción de la gravedad llega a la posición final $x=0$, la ecuación queda expresada como:

$$0 = h + v_0 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 \quad (16)$$

Admitiendo que la velocidad inicial es cero y que el cuerpo se dirige por acción de la aceleración de la gravedad g en sentido contrario al eje z positivo:

$$0 = h - \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 \quad (17)$$

Reordenando la Ec. 17 y despejando de ella se tiene el tiempo que tarda la partícula o cuerpo en recorrer la distancia h :

$$t = \sqrt{\frac{2 \cdot h}{g}} \quad (18)$$

De esta manera, el tiempo que tarda en caer la maza de golpeo o martinete puede determinarse a partir de la expresión anterior. Es de notar que con este análisis la caída del martinete se independiza totalmente de la masa, y el tiempo será una función de la altura de caída, ya que se considera que la gravedad es constante. Para el caso del pilote en cuestión, el tiempo de caída es:

$$t = \sqrt{\frac{2 \cdot h}{g}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,90 \text{ m}}{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}} \Rightarrow t = 0,4284 \text{ s}$$

Si fuera necesario conocer la velocidad con la cual impacta el martinete sobre la cabeza del pilote, la expresión de la cinemática a aplicar es la derivada con respecto al tiempo de la posición:

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{d}{dt} \left(x_0 + v_0 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 \right) = v_0 + a \cdot t \quad (19)$$

y como la aceleración es la de la gravedad y la velocidad inicial es cero, entonces se llega a:

$$v = g \cdot t \quad (20)$$

que para el caso del pilote valdrá:

$$v = g \cdot t = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,4284 \text{ s} \Rightarrow v = 4,20 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (21)$$

3.3 Análisis del mecanismo general de la hincada del pilote

Se supone que el pilote se encuentra libre en su extremo y empotrado en su punta. La maza o martinete golpea la cabeza del pilote y esto origina una perturbación que se propaga a lo largo de toda la longitud del mismo. En la realidad, existen una serie de dispositivos que protegen la cabeza del pilote, como ser el sombrerete y la almohadilla amortiguadora, que a los fines de la simulación no se tendrán en cuenta.

El fenómeno de choque, sin embargo, es complejo y se ha estudiado analítica y experimentalmente [3]. El choque produce sobre la cabeza del pilote una presión variable con el tiempo, según una función que tiene el aspecto que se indica en la Figura 2:

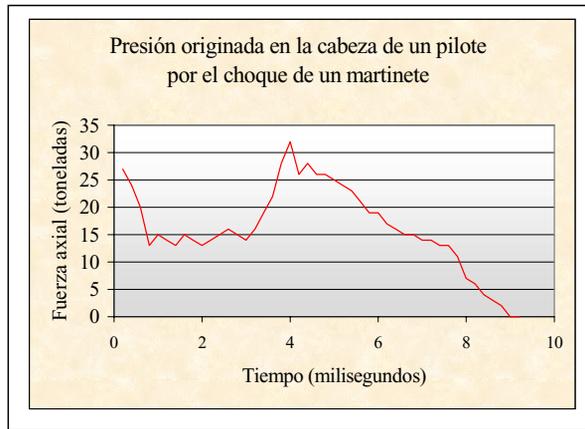


Figura 2– Presión originada en la cabeza de un pilote por el choque de un martinete

Esta presión se transforma en una onda de compresión que se traslada a lo largo de toda la longitud del pilote con una celeridad que normalmente es la del sonido en el material de que esté constituido el mismo. Para el acero es de 5140 m/s y en el caso del hormigón ronda los 4000 m/s . Al paso de la onda, las partículas del material del pilote oscilan alrededor de una posición media, y en cada momento éstas tienen una velocidad que depende de la celeridad de la onda perturbadora. A esta oscilación puede superponerse una traslación conjunta del pilote, que se manifiesta en forma de hundimiento en el suelo, δ , originado por el golpe de la maza, que se denomina *rechazo*.

Para explicar cómo se produce la propagación de la onda se recurre a la teoría de *Saint Venant*. [3]. Se supone una longitud elemental del pilote, Figura 3, por la que pasa la onda. De la *ley de Hooke* se sabe que la relación entre la tensión y la deformación es lineal, esto es:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (22)$$

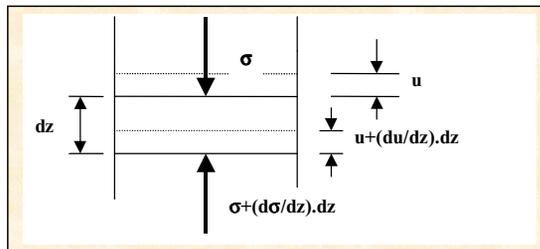


Figura 3 – Elemento diferencial de pilote

El concepto de deformación específica establece que el alargamiento o acortamiento está referido a la longitud inicial, es decir:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta u}{\Delta z} \quad (23)$$

De manera que reemplazando la Ec. 23 en la Ec. 22 se tiene:

$$\sigma = E \cdot \frac{\Delta u}{\Delta z} \quad (24)$$

En el elemento diferencial, para que se establezca el equilibrio entre las fuerzas externas y los esfuerzos internos, la sumatoria deberá ser nula, de manera tal que la fuerza por unidad de área o tensión resultante será:

$$\left(\sigma + \frac{\Delta \sigma}{\Delta z} \cdot dz \right) - \sigma = \Delta \sigma = E \cdot \frac{\Delta u}{\Delta z} \quad (25)$$

Si se deriva con respecto a z , se obtiene:

$$\frac{d\sigma}{dz} = E \frac{d^2 u}{dz^2} \quad (26)$$

que es la fuerza por unidad de volumen que actúa y resulta ser la diferencia entre las fuerzas que actúan sobre sus dos caras transversales.

Por otra parte, de la *Segunda Ley de Newton* se tiene que la fuerza es la masa por la aceleración: Si se refiere a la unidad de volumen, la masa resultará ser la masa específica o densidad que está dada por la expresión:

$$\rho = \frac{\gamma}{g} \quad (27)$$

Donde:

γ : peso específico del material del pilote

g : gravedad

Asimismo, la aceleración de las partículas del pilote está dada por la variación en el tiempo de la velocidad de estas partículas, o lo que es lo mismo decir, la derivada parcial segunda del corrimiento u respecto al tiempo t :

$$a = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (28)$$

De tal forma, se tiene que la fuerza por unidad de volumen es:

$$\frac{d\sigma}{dz} = \rho \cdot a = \frac{\gamma}{g} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (29)$$

Igualando la Ec. 29 a la Ec. 26 queda:

$$\frac{\gamma}{g} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = E \cdot \frac{d^2 u}{dz^2} \quad (30)$$

Denominando

$$c = \sqrt{\frac{E \cdot g}{\gamma}} \quad (31)$$

reemplazando en Ec. 30 y despejando se obtiene

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \cdot \frac{d^2 u}{dz^2} \quad (32)$$

que es la *ecuación diferencial de traslación de la onda perturbadora* [5], que se produce por el impacto del martinete sobre la cabeza del pilote, donde c es la celeridad o velocidad de propagación de la onda. Para hallarla, se debe utilizar el valor de E a esfuerzos dinámicos de muy corta duración. Una expresión usual es:

$$E = 21000 \cdot \sqrt{f_j} \quad \left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) \quad (33)$$

donde f_j es la resistencia característica del hormigón en j días.

Se puede demostrar que toda función $f_1(z + ct)$, e igualmente $f_2(z + ct)$ es solución. De esta manera, la solución general será de la forma:

$$u = f_1(z + ct) + f_2(z - ct) \quad (34)$$

Físicamente, esta ecuación solución puede explicarse de la siguiente manera: para un tiempo determinado, el corrimiento u es función únicamente de la posición z . Se trata de la onda de compresión, que es a su vez la superposición de dos ondas. Considerándose que para uno de los sumandos, como por ejemplo f_2 , luego de un cierto tiempo Δt , el argumento de f_2 es el mismo en un punto $z_{\Delta t}$ tal que:

$$z_{\Delta t} - c(t + \Delta t) = z_{inicial} - ct \quad (35)$$

Por lo tanto, la onda correspondiente a f_2 conserva su forma, pero se ha trasladado:

$$\Delta z = z_{\Delta t} - z_{inicial} = c \cdot \Delta t \quad (36)$$

que permite comprobar además que la velocidad de la onda es:

$$c = \frac{\Delta z}{\Delta t} \quad (37)$$

Nota: las funciones f_1 y f_2 son denominadas *funciones de onda estacionaria*, y deberán determinarse en cada caso según las condiciones de contorno.

En cuanto a la velocidad de las partículas, ésta puede determinarse haciendo el siguiente análisis. Se supone que si la onda se traslada y que conserva su forma, la variación de tensión que se produce en el tiempo está dada por la derivada de la Ec. 25 respecto al tiempo:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = E \cdot \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{du}{dz} \right) \quad (38)$$

Pero como la variación de la tensión respecto al tiempo es una función continua, es posible considerar que las derivadas del corrimiento respecto a la posición y al tiempo son permutables, por lo que se tendrá:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = E \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{du}{dt} \right) = E \frac{\partial}{\partial z} (v) \quad (39)$$

Si a la variación de la tensión en el tiempo se la multiplica y divide por dz , se obtiene:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \frac{\partial \sigma}{\partial z} \cdot \frac{\partial z}{\partial t} \quad (40)$$

Y como

$$c = \frac{dz}{dt} \quad (41)$$

reemplazando y combinando con la ecuación 39 resulta:

$$\frac{\partial v}{\partial z} \cdot E = \frac{\partial \sigma}{\partial t} = \frac{\partial \sigma}{\partial z} \cdot c \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial v}{\partial z} \cdot E = \frac{\partial \sigma}{\partial z} \cdot c \quad (42)$$

Si a esta última ecuación la integramos respecto a z , se logra tener:

$$v \cdot E = \sigma \cdot c \quad (43)$$

Despejando, se halla la expresión de la velocidad de las partículas, que es directamente proporcional a la tensión y a la celeridad de la onda.

Una consideración importante que debe ser destacada es que la precisión de los resultados dependerá en gran medida de que las secciones del pilote se mantengan planas durante el movimiento.

Experimentalmente, se ha comprobado que esto es prácticamente así, siempre y cuando la longitud del pilote sea muy superior a alguna de sus dimensiones transversales. De no ser así, debería ser necesario tener en cuenta la inercia de las partículas en su movimiento lateral, es decir la consideración del *módulo de Poisson* μ . En la mayoría de los pilotes, la esbeltez es grande por lo que es posible despreciar la deformación transversal. Esta teoría, sin embargo, no puede aplicarse a las mazas o martinets porque no tienen esbelteces grandes.

La onda que se produce por la compresión de la cabeza lleva almacenada una parte de la energía de que disponía la maza en el instante anterior al impacto. Para una dada cantidad de energía transferida, la presión máxima habrá de ser mayor cuanto menor sea el tiempo del impacto. Asimismo, otra parte de la energía ha sido almacenada durante el choque pero se ha

disipado o irradiado en forma de vibraciones de todo tipo que se amortiguan sin ningún efecto sobre el pilote. Finalmente, queda otra parte de la energía almacenada como energía elástica en la propia onda, que puede considerarse que está constituida de dos partes: la energía elástica de deformación y la energía cinética. De esta manera, en el elemento diferencial del pilote se tiene, por unidad de área de la sección transversal:

$$E_{elástica} = \frac{1}{2} \cdot \sigma_{final} \cdot deformación = \frac{1}{2} \cdot \sigma \left(\frac{\sigma \cdot dl}{E} \right) \quad (44)$$

$$E_{cinética} = \frac{1}{2} \cdot \tilde{n} \cdot dl \cdot v^2 = \frac{\sigma^2 dl}{2E} \quad (45)$$

Debido a que ambas expresiones son iguales, la energía total de la onda será entonces:

$$T = E_{elástica} + E_{cinética} \quad \Rightarrow \quad T = \int_{l_1}^{l_2} \frac{\sigma^2}{E} \cdot dl \quad (46)$$

3.4 Análisis mediante Simulación de Eventos

Para el análisis a través de la Simulación del Evento se utilizó el Software de Elementos Finitos [6]. La geometría del pilote de 7 m de longitud se discretizó cada 0,35 m, por lo que queda dividido en 20 partes iguales. Esto se ha realizado así por cuestiones de practicidad, para mostrar de manera eficiente los distintos estados tensionales. Una mayor división en más tramos sería mejor, pero esto presenta la desventaja de que los tiempos de operación de procesamiento se ven incrementados notablemente.

En cuanto a la sección transversal se ha optado por mallarla en 16 partes, dado que representa para una sección circular una discretización bastante aceptable desde los puntos de vista de los costos operacionales del programa y de la precisión deseada.

Para el análisis se han considerado las siguientes características de las partes involucradas en el problema:

Características del pilote	
Diámetro (m)	0,30
Longitud (m)	7,00
Material	Hormigón
Densidad ρ (kg/m ³)	2400
Módulo de elasticidad E (N/m ²)	1,0305 . 10 ¹⁰
Módulo de Poisson μ	0,15
Módulo de corte G (N/m ²)	4,4785 . 10 ⁹

Tabla 1 - Características del pilote

Características del martinete	
Diámetro (m)	0,30
Altura (m)	0,81
Material	Acero A36
Densidad ρ (kg/m ³)	7850
Módulo de elasticidad E (N/m ²)	1,9995 . 10 ¹¹
Módulo de Poisson μ	0,29
Módulo de corte G (N/m ²)	7,7221 . 10 ¹⁰

Tabla 2 – Características del martinete

Es de destacar que las dimensiones del martinete están dadas de tal manera que su peso sea exactamente 450 kg, (4410 N) pues:

$$\gamma_m = \rho_m \cdot g = 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \Rightarrow \gamma_m = \rho_m \cdot g = 77009 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}$$

$$W = \gamma_m \cdot V_m = \gamma_m \cdot A_m \cdot H_m = 77009 \frac{\text{N}}{\text{m}^3} \cdot \frac{\pi \cdot (0,30\text{m})^2}{4} \cdot 0,81\text{m} \Rightarrow W = 4410 \text{ N}$$

3.4.1 Modelos Analizados

Los modelos se adoptaron de acuerdo a las siguientes consideraciones:

- ✓ Tipo de elemento: dadas las características espaciales del modelo se utilizó el elemento sólido (brick).
- ✓ Modelo Material: se adoptó análisis elástico lineal.
- ✓ Impacto: este es un punto relevante en la simulación del evento. El mismo involucra el uso de elementos de contacto entre el martinete y el pilote que determinarán las superficies de choque. Los resultados se ven fuertemente influenciados por la cantidad de estos elementos y por las características de los mismos (módulo de elasticidad, sección transversal, distancia de contacto).
- ✓ Duración del evento: el tiempo mínimo a asignar al evento surge del análisis cinemático anteriormente desarrollado. De acuerdo a ello la duración adoptada fue de 0,6 s.

Atendiendo a las consideraciones indicadas se analizaron diversos modelos en los cuales se adoptó a priori empotramiento en la base del pilote. En los mismos se varió el módulo elástico y cantidad de los elementos de contacto hasta lograr que la tensión originada por el impacto del martinete sobre la cabeza del pilote fuera del mismo orden de magnitud a la predicha por la teoría clásica de resistencia de materiales.

La calibración indicada se muestra en el modelo denominado a continuación Pilote 1. Luego, a fin de optimizar el análisis en lo referido a la influencia del apoyo se procedió a analizar otro modelo, Pilote 2, en el cual se consideró una vinculación con el suelo a través de un apoyo simple. De acuerdo a lo indicado los modelos analizados en el presente trabajo son:

- ✓ Pilote 1: Vinculado con el suelo a través de un empotramiento.
- ✓ Pilote 2: Vinculado con el suelo a través de un apoyo simple.

3.4.2 Resultados Obtenidos

Los resultados obtenidos se presentan en las Figuras 4 y 5 donde se indican la distribución de tensiones mínimas principales un instante después de iniciado el evento, y en el momento del impacto respectivamente. Cualitativamente, lo indicado permite visualizar la propagación de la onda en la longitud del pilote con la consecuente variación del estado tensional del mismo. En Figura 6 se muestra la evolución de las máximas tensiones de compresión en el tiempo para el Pilote 2. En la Tabla 3 se muestran las características de la simulación realizada y las tensiones máximas y de peso propio para los Pilotes 1 y 2.

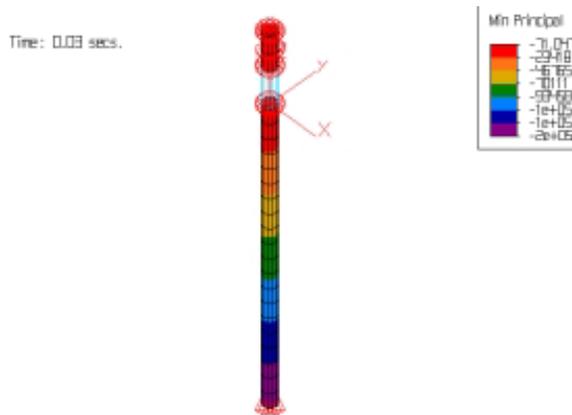


Figura 4 – Tensiones de compresión para $t=0.03$ s

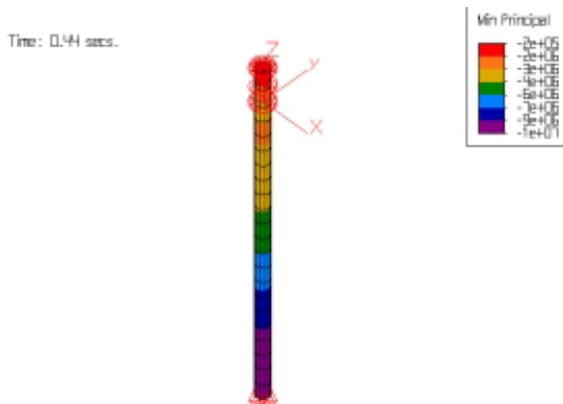


Figura 5 – Tensiones de compresión para $t=0.44$ s

	Pilote 1	Pilote 2
Duración de evento	0.6	0.6
Cantidad de pasos (steps)	200	200
Vinculación	Empotrada	Apoyada
Cantidad de contactos	En todo el borde	En todo el borde
Módulo de contacto (N/m^2)	1.03×10^9	1.03×10^9
Área transversal de contacto	0.0002	0.0002
Tiempo de cálculo	00:22:28	00:12:51
Tipo de material	Elástico Isot.	Elástico Isot.
Tensión máxima (N/m^2)	3.78×10^7	1.03×10^7
Tensión de peso propio (N/m^2)	1.63×10^5	1.69×10^5

Tabla 3: Características y tensiones obtenidas para los modelos descritos

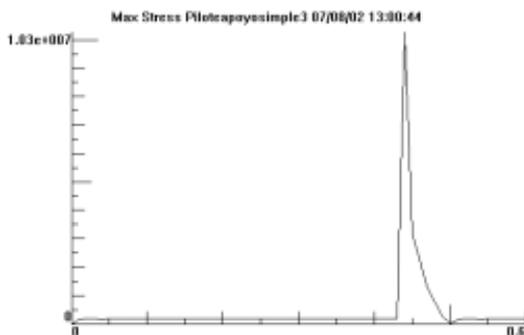


Figura 6 – Evolución de las máximas tensiones de compresión en el tiempo.

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Es de notar que para los dos modelos analizados, de acuerdo a lo indicado en Tabla 3, la tensión debida al peso propio del pilote antes y después del impacto tiene un valor muy aproximado a la deducida con la aplicación del análisis clásico de la Resistencia de Materiales indicada en Ec. 10 ($1.648 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$)

La tensión máxima producida por el impacto en el caso del Pilote 1, indicada en Tabla 3, difiere notablemente de la obtenida con el análisis clásico de Resistencia de Materiales indicada en Ec. 14 ($1.299 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$). Esta diferencia se reduce en el caso del Pilote 2 demostrando la influencia de la condición de apoyo del modelo.

La evolución de las máximas tensiones de compresión indicadas en Figura 6 muestran el comportamiento impulsivo del evento.

5 CONCLUSIONES

El fenómeno de hinca de un pilote se ha analizado a través de los modelos presentados. De acuerdo al análisis de los resultados realizado previamente se puede indicar que:

- 1) Se debe prestar especial atención a la elección del módulo elástico y a la cantidad de los elementos de contacto del modelo porque la influencia de los mismos en los resultados es de suma importancia.
- 2) La vinculación adoptada entre el pilote y el suelo tienen mucha incidencia en los resultados en lo que se refiere a tensiones máximas principales.
- 3) La simulación de eventos, a través del uso de software adecuado, es una poderosa herramienta de ayuda para el diseñador.
- 4) De acuerdo a los resultados obtenidos queda demostrada la importancia de la validación de los modelos a efectos de obtener resultados fiables.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Spyrakos, Constantine, *Finite Element Modeling In Engineering Practice*, West Virginia University Press –(1994).
- [2] Spyrakos, Constantine, *Linear And Nonlinear Finite Element Analysis*, Publishing Division, Pittsburgh, PA (1997).
- [3] Gere y Timoshenko, *Mecánica De Materiales*, Cuarta edición (1998).
- [4] Jiménez Salas, *Geotecnia y Cimientos III: Cimentaciones, Excavaciones Y Aplicaciones De La Geotecnia*, Editorial Rueda – Tomo III. Primera Parte.
- [5] Edwards, C.H. and Penney, D. E, *Ecuaciones Diferenciales Elementales y Problemas Con Condiciones En La Frontera*, University of Georgia-Prentice-Hall, Hispanoamericana S.A.
- [6] ALGOR Software Package y sus manuales.
- [7] Bathe, K. J., *Finite Element Procedures In Engineering Analysis*, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey (1982).
- [8] Oñate Ibáñez de Navarra, E., *Cálculo De Estructuras Por El Método De Los Elementos Finitos: Análisis Elástico Lineal*, Barcelona, CIMNE (1992)