

Análisis numérico de la influencia de una construcción sobre propiedades vecinas

María A. Daziano¹, Gustavo A. Pérez² & Abel C. Jacinto³

(1) Instituto de Estructuras Ing. Arturo M. Guzmán, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán.
adaziano@facet.unt.edu.ar

(2) Instituto de Estructuras Ing. Arturo M. Guzmán, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán.
gperez@herrera.unt.edu.ar

(3) Instituto de Estructuras Ing. Arturo M. Guzmán, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán.
ajacinto@herrera.unt.edu.ar

RESUMEN: Este trabajo se enfoca en la modelación numérica del comportamiento de un predio vecino a la construcción de un edificio. Un problema frecuente en la ciudad de San Miguel de Tucumán es la estimación incorrecta de los posibles asentamientos en las inmediaciones de un predio donde se ejecuta una excavación y luego la construcción de un edificio en altura. El modelo fue desarrollado en PLAXIS 2D y para la representación del suelo se emplearon dos modelos constitutivos, Mohr Coulomb y Hardening Soil. Adicionalmente se presenta un análisis paramétrico, donde se estudió la influencia sobre los resultados de tres variables características del suelo: módulo de deformación, fricción interna y cohesión.

1 INTRODUCCIÓN

Desde hace algunas décadas se observa un desarrollo inmobiliario creciente en la ciudad de San Miguel de Tucumán, con la construcción de numerosos edificios en altura en una zona que se extiende rápidamente desde el centro hacia la periferia. Es de destacar que la altura promedio de dichos edificios se encuentra en marcado ascenso (ver Fotografía 1).



Fotografía 1. Edificios céntricos en San Miguel de Tucumán.

Sin embargo, este auge de la construcción de edificios en altura se encuentra acompañado por el aumento de efectos secundarios no deseados, uno de ellos es el número creciente de daños a propiedades vecinas debido a problemas de asentamientos diferenciales de suelos. Entre las causas de esto se pueden destacar:

- Los primeros 20 m del subsuelo de fundación de San Miguel de Tucumán están formados por partículas finas con predominio de limos y arcillas poco consolidadas (Mon, 1998). Su comportamiento, sobre todo en lo referido a deformaciones, no está suficientemente estudiado.
- El grado de humedad del suelo en correspondencia con los niveles típicos de fundación puede experimentar variaciones importantes en el tiempo, llegando incluso a la saturación, ya que la napa freática se encuentra generalmente entre 3 y 5 m de profundidad, según la zona y la estación anual.
- A pesar de este complicado panorama, la mayoría de las fundaciones de edificios son directas o superficiales, pues el uso de pilotes de fundación está muy poco difundido ya sea por cuestiones económicas, falta de costumbre o desconocimiento.

Entonces, al momento de diseñar las fundaciones superficiales sobre este tipo de suelos, muchas veces no se realiza una estimación acertada de los asentamientos produciéndose daños importantes en las propiedades vecinas.

El propósito de este trabajo fue estudiar numéricamente cuáles serían los posibles asentamientos que se originan en las inmediaciones de un predio donde se ejecuta una excavación y la construcción parcial de un edificio en altura. El trabajo forma parte de una investigación para determinar si la aparición de fisuras en una casa, en la que funcionan dependencias de la Universidad Nacional de Tucumán, se debe a la construcción de un edificio en un terreno adyacente.

2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La Fotografía 2 muestra el frente de la casa mencionada y el edificio en construcción a la derecha. Durante una inspección realizada en la casa se observaron fisuras, asentamientos y otros daños en diferentes sectores del inmueble. La casa se desarrolla en dos plantas, su estructura principal original está constituida por mamposterías portantes y losas de hormigón, mientras que en algunas zonas, en que se han realizado ampliaciones, la estructura está formada por pórticos de hormigón armado.



Fotografía 2. Motivación del trabajo: Daños producidos en una casa adyacente a la construcción de un edificio en altura.

Al momento de la observación, el edificio en construcción constaba de la estructura de hormigón armado correspondiente a dos subsuelos, planta baja y dos pisos superiores.

3 ANÁLISIS NUMÉRICO

3.1 Geometría

Con el objetivo de estudiar el comportamiento del suelo en la zona de influencia de la excavación y construcción del nuevo edificio, se elaboró un modelo de elementos finitos en el programa PLAXIS 2D, desarrollado en Delft University of Technology (Países Bajos). Este modelo bidimensional utilizó elementos de 15 nodos y permitió evaluar cada una de las etapas del proceso constructivo de la cimentación del edificio. Se adoptó una profundidad del recinto de la excavación de 6.0 m y se procedió a retirar el material en dos etapas de 3.0 m, con depresión de la napa freática y ejecución de los muros de submuración. En la Fig. 1 se muestra el esquema del problema y la malla utilizada.

En este análisis, se consideró solamente la parte instantánea de los asentamientos. Hay que tener en cuenta que para el tipo de suelo de esta ciudad, los asentamientos diferidos en el tiempo suelen tener un orden de magnitud similar al correspondiente a los valores instantáneos. El modelo permitió estimar los desplazamientos en diferentes puntos del predio lindero a la excavación para diferentes etapas del proceso constructivo.

Para simular el comportamiento mecánico del suelo se utilizaron dos modelos constitutivos ampliamente difundidos en el ámbito de la geotecnia: Mohr Coulomb y Hardening Soil. El primero es un modelo elástico, perfectamente plástico (ver Fig. 2). La ventaja de este modelo es su facilidad de uso, ya que requiere de pocos parámetros. Su desventaja es que no considera la variación del módulo de deformación para un proceso de descarga, como es en este caso la excavación del terreno.

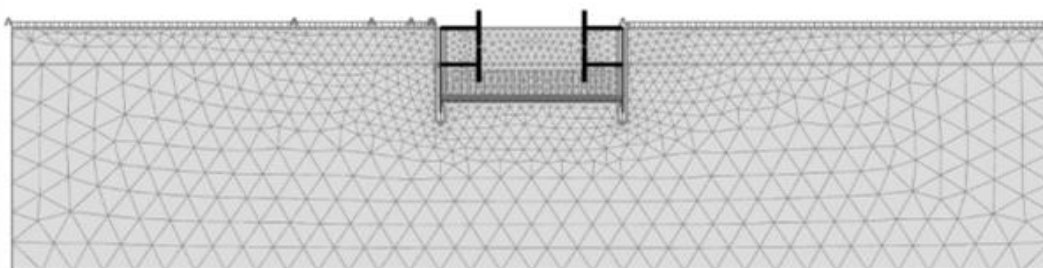


Figura 1. Malla de Elementos Finitos.

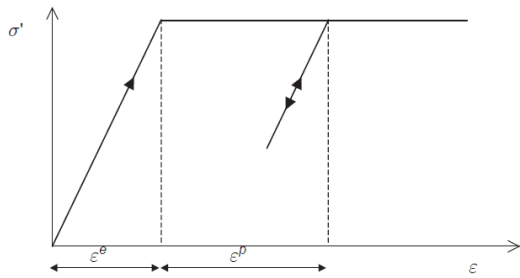


Figura 2. Modelo Mohr Coulomb: Elastoplástico perfecto (PLAXIS 2D, 2012)

El Hardening Soil es un modelo elastoplástico con endurecimiento isótropo, que se basa en el modelo hiperbólico. Este modelo supera al modelo hiperbólico pues utiliza la teoría de la plasticidad en vez de la teoría de la elasticidad, incluye la dilatancia del suelo e introduce un cierre de la superficie de fluencia (ver Fig. 3). Para su definición se requieren tres módulos de deformación: E_{50} , determinado al alcanzar el 50% de la tensión de rotura; E_{oed} , módulo edométrico y E_{ur} , módulo elástico para trayectorias de descarga y recarga. Una descripción más detallada de estos modelos se puede encontrar en PLAXIS (2012).

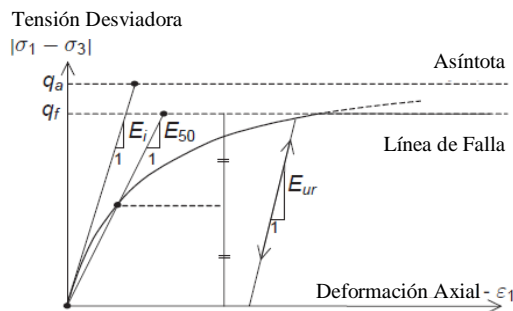


Figura 3. Modelo Hardening Soil: Elastoplástico con endurecimiento isótropo (PLAXIS 2D, 2012)

3.2 Parámetros

Como valores orientativos en diferentes suelos se tienen las siguientes relaciones entre E_{50} , E_{ur} y E_{oed} , aunque suelos muy rígidos o muy blandos pueden presentar otras relaciones (PLAXIS, 2012):

$$E_{50} = E_{oed} \quad (1)$$

$$E_{ur} = 3 E_{50} \quad (2)$$

Para el modelo se adoptaron parámetros típicos correspondientes al subsuelo de la ciudad de San Miguel de Tucumán, compuesto principalmente por limos arcillosos, limos y arcillas de baja

plasticidad, de consistencia medianamente firme (ver Tablas 1 y 2).

Para el tabique de submuración, se consideró un espesor de 0.20 m y una resistencia característica a la compresión del hormigón de 25 MPa (H25).

Tabla 1: Parámetros adoptados: Modelo Mohr Coulomb

γ_{SAT}	kN/m ³	18.8
γ_{UNSAT}	kN/m ³	14.7
E'	MPa	-
ν		0.333
G	MPa	-
E_{oed}	MPa	13
c'_{REF}	kN/m ²	11
φ'	°	18
ψ	°	0

Tabla 2: Parámetros adoptados: Modelo Hardening Soil

γ_{SAT}	kN/m ³	18.8
γ_{UNSAT}	kN/m ³	14.7
E_{50}^{ref}	MPa	13
E_{oed}^{ref}	MPa	13
E_{ur}^{ref}	MPa	52
Potencia (m)	-	0.5
c'_{REF}	kN/m ²	11
φ'	°	18
ψ	°	0

3.3 Casos de Estudio

3.3.1 Presencia de napa freática

Para evaluar el efecto de la depresión de la napa freática, se tuvieron en cuenta las situaciones que se describen a continuación:

1) Se supone que el nivel freático está originalmente ubicado por debajo del nivel de fundación, por lo que en este caso no es necesario deprimir la napa. Esta situación es muy poco probable, pues resultados de estudios de suelo realizados en predios cercanos indican que el nivel freático en la zona varía entre -3.0 m y -4.5 m respecto al nivel del cordón de vereda.

2) Se supone que el nivel freático original está ubicado a -4.5 m y por lo tanto es necesario deprimir la napa freática en la zona de la excavación 1.5 m.

3) Se supone que el nivel freático inicial está ubicado a -3.0 m y por lo tanto será necesario deprimir la napa freática 3.0 m en la zona de la excavación.

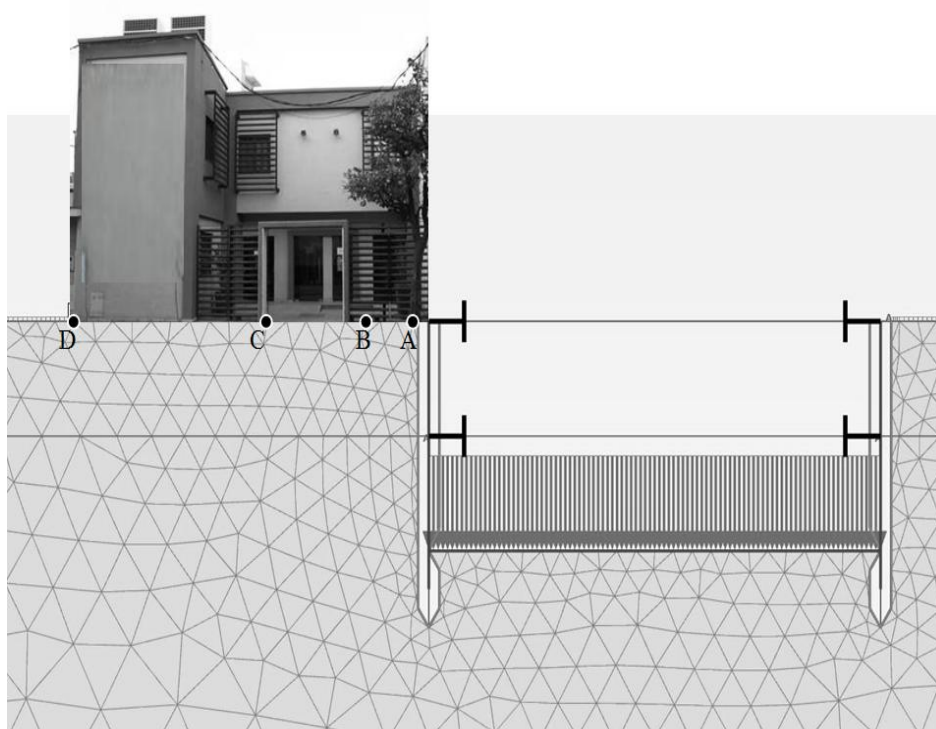


Figura 4. Modelo de análisis y ubicación de los puntos de referencia para comparación de asentamientos.

3.3.2 Etapas constructivas

Se definieron un total de 5 etapas constructivas, comenzando por la ejecución de la submuración, una primera excavación hasta una profundidad de 3.0 m, una segunda excavación hasta los 6.0 m con depresión de la napa freática según el caso analizado, y las últimas dos etapas correspondientes a la construcción del edificio: cimentación, dos subsuelos y dos niveles superiores, que representaría la situación al momento del estudio. Como situación adicional se consideró como solicitación la carga completa del edificio terminado.

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con el propósito de evaluar y comparar los resultados que se obtienen para cada uno de los casos considerados en este trabajo, se comparan los asentamientos instantáneos de cuatro puntos ubicados a 0.5, 2.0, 5.0 y 11.0 m del eje medianero, según se muestra en Fig. 4.

La Fig. 5 muestra los asentamientos de los puntos de control cuando se utiliza el modelo Hardening Soil, para las distintas hipótesis efectuadas sobre el nivel de la napa freática. Se observan incrementos considerables de los asentamientos para nivel freático a 3.0 y 4.5 m de profundidad con respecto a la situación donde no se tiene en

cuenta su influencia. Los valores aumentan entre un 43% y 67% cuando la napa freática está ubicada inicialmente a 4.5 m de profundidad, y entre 91% y 139% si la misma está localizada a 3.0 m.

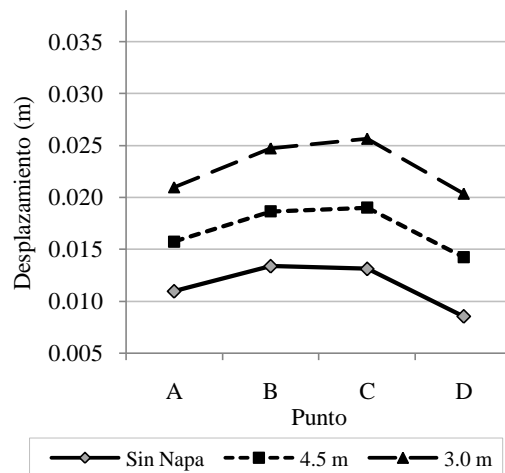


Figura 5. Asentamientos para distintas hipótesis de ubicación de napa freática, según modelo Hardening Soil.

En los análisis que siguen se considera solamente una profundidad de napa inicial de 3.0 m.

Las Fig. 6 y 7 muestran los asentamientos en los puntos de referencia, según ambos modelos, para las distintas etapas de construcción consideradas.

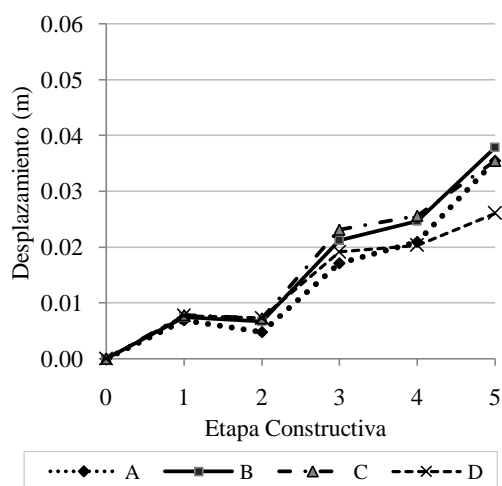


Figura 6. Asentamientos en coincidencia con los puntos de referencia para las distintas etapas constructivas, según modelo Hardening Soil.

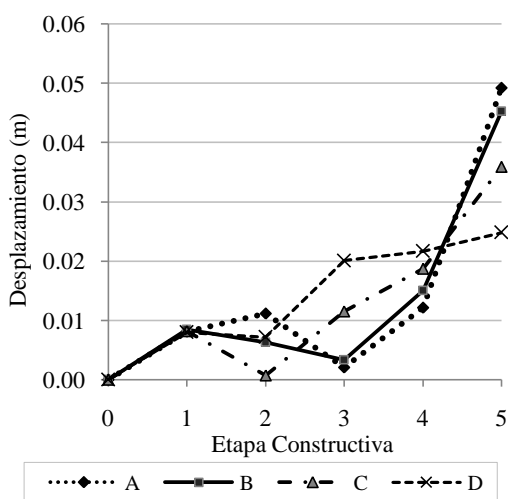


Figura 7. Asentamientos en coincidencia con los puntos de referencia para las distintas etapas constructivas, según Modelo Mohr Coulomb.

Para las etapas 1 y 2 los desplazamientos en ambos modelos tienen valores similares, e inferiores a 0.01 m. A partir de la etapa 3, donde se produce la depresión de la napa freática, y en la etapa 4, el análisis utilizando el modelo Hardening Soil presenta mayores desplazamientos. Esto se debe a que el modelo Mohr Coulomb adopta la misma rigidez para el proceso de carga-descarga. Sin embargo, para la situación final, los puntos A y B presentan mayores valores cuando se usa el modelo Mohr Coulomb, alcanzando los 0.05 m en el punto más cercano al edificio, mientras que los puntos C y D presentan los mismos valores de desplazamientos para ambos modelos. Por otra parte, el modelo

Mohr Coulomb presenta mayores desplazamientos diferenciales entre los extremos del predio en análisis,

Las Fig. 8 y 9 facilitan la comparación de las predicciones de ambos modelos para las etapas 4 y 5.

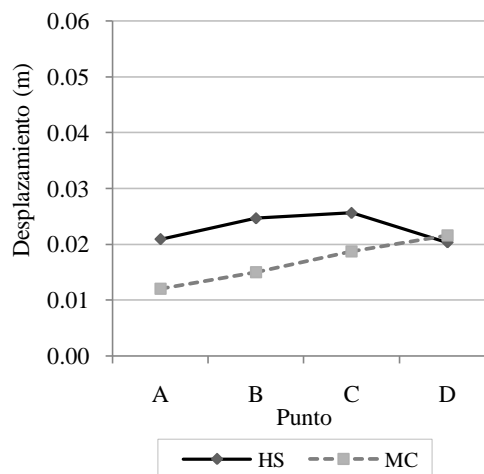


Figura 8. Comparación de los asentamientos de ambos modelos en la etapa 4 (Construcción incompleta).

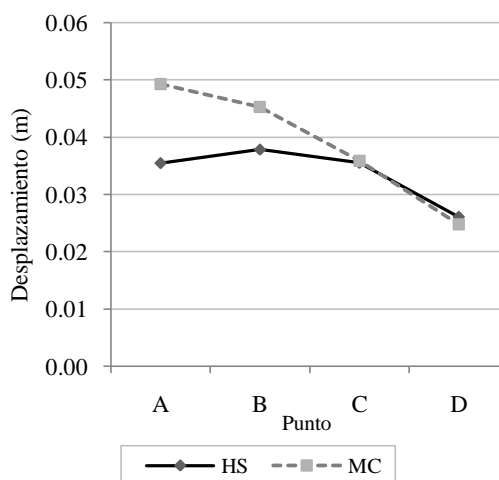


Figura 9. Comparación de los asentamientos de ambos modelos en la etapa 5 (Construcción completa).

La Fig. 10 muestra la distribución de los desplazamientos totales observada en las inmediaciones del recinto de excavación para cada uno de los modelos en la etapa 4, es decir construcción incompleta. Las gráficas permiten apreciar las diferencias que se obtienen para el campo de desplazamientos cuando se adopta uno u otro modelo de comportamiento para el suelo.

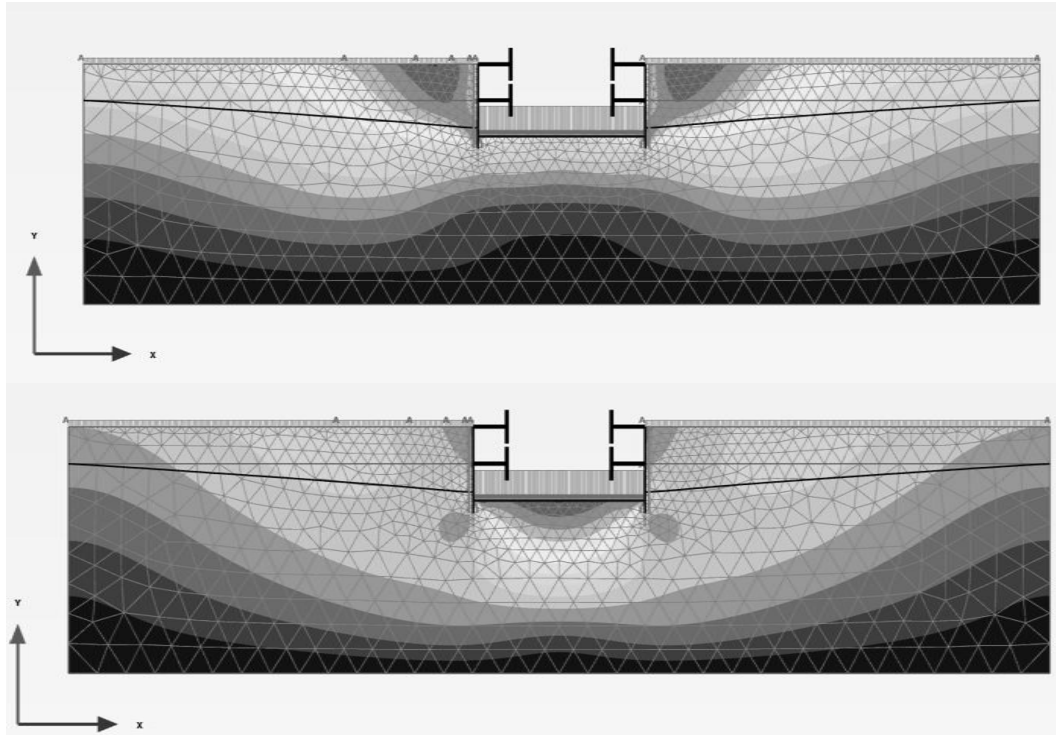


Figura 10. Configuraciones de desplazamientos totales para la etapa 4. a) Modelo Hardening Soil, b) Modelo Mohr Coulomb.

5 ANÁLISIS PARAMÉTRICO

La correcta caracterización del suelo junto con la modelización mediante elementos finitos es una poderosa herramienta para evaluar el comportamiento de estructuras y posibles daños que las mismas pueden sufrir. Si bien existen en la actualidad modelos constitutivos que permiten describir con mejor grado de aproximación el comportamiento de los materiales estudiados, éstos requieren la consideración de un mayor número de parámetros. Generalmente, la información proveniente de los ensayos es limitada y se recurre a un gran número de estimaciones. Se consideran a continuación posibles variaciones en algunos de los parámetros introducidos al modelo Hardening Soil para determinar cuál es el grado de incidencia en los resultados, considerando la etapa constructiva 4 (construcción incompleta). Estas variaciones contemplan valores que podrían obtenerse en muestras de suelo de la zona.

5.1 Módulo de elasticidad edométrico

Se adoptaron valores entre 8 MPa y 25 MPa para el módulo de elasticidad que se deduce a partir de un ensayo edométrico. Los resultados indican que podrían originarse desplazamientos que en promedio serían 90% mayores o 31% menores

que los obtenidos en el análisis precedente. Por ejemplo, el desplazamiento máximo de 0.025 m aumentaría a casi 0.05 m, en la situación más desfavorable. Esto puede apreciarse en la Fig. 11.

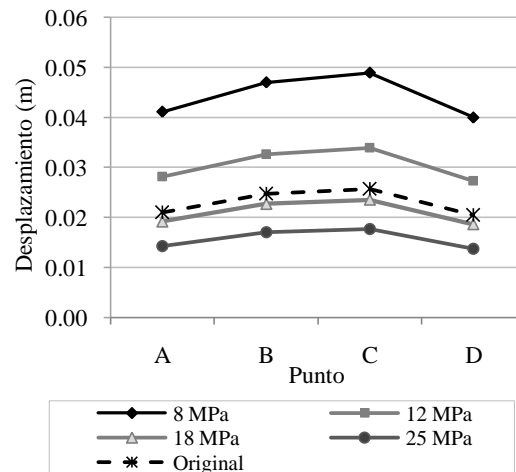


Figura 11. Incidencia del módulo de deformación

5.2 Ángulo de fricción interna

Para este análisis se consideraron valores que varían entre un mínimo de 12° y un máximo de 30°. Los resultados se reflejan en la Fig. 12. Las diferencias con el caso analizado alcanzan el 44% para la situación más desfavorable.

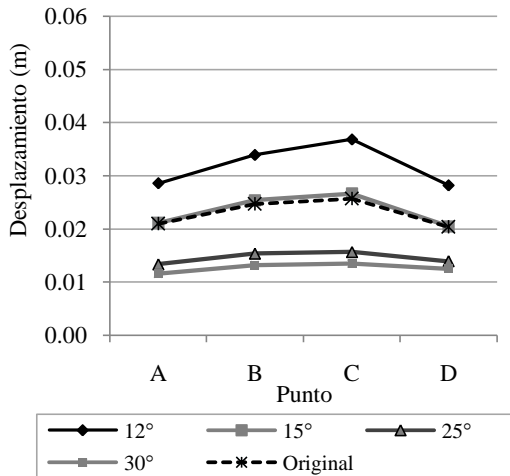


Figura 12. Incidencia del ángulo de fricción interna

5.3 Cohesión

Se considera un valor mínimo de 5 kN/m² y un máximo de 30 kN/m². Los resultados se muestran en Fig. 12.

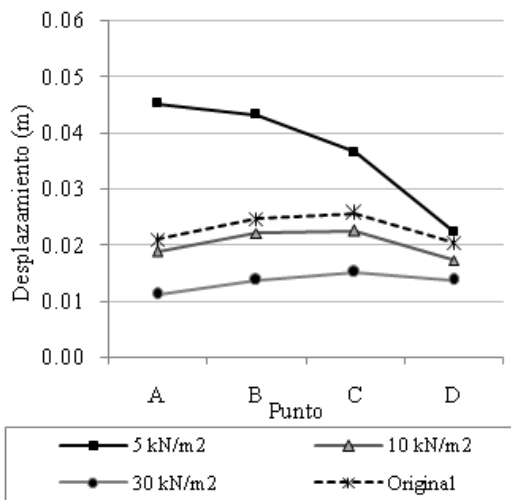


Figura 12. Incidencia de la cohesión.

Para este caso, en el punto A la diferencia con el caso donde se considera una cohesión baja asciende a un 125%, mientras que para el punto D es apenas del 15%. Para el punto A, con un desplazamiento de referencia de 0.020 m, se tendría un valor de 0.045 m y en el punto D el cambio sería de 0.020 m a 0.022 m. Por el contrario, en caso de incrementar la cohesión hasta el valor máximo, dichos puntos tendrían un desplazamiento aproximado de 0.011 m y 0.014 m respectivamente.

6 CONCLUSIONES

Se desarrolló un análisis en estado plano de deformaciones con el programa PLAXIS-2D, con el propósito de establecer los efectos que distintas etapas de la construcción de un edificio pueden tener sobre a una propiedad de dos niveles ubicada en el predio vecino y apoyada en un suelo tipo limo arcilloso, con presencia de napa freática a 3.0 m de profundidad. Para representar el comportamiento del suelo se utilizaron los modelos constitutivos Mohr Coulomb y Hardening Soil. Se concluye que para valores típicos de los parámetros del suelo, se obtienen desplazamientos entre 0.020 m y 0.026 m para el modelo Hardening Soil y entre 0.010 m y 0.025 m para el Mohr Coulomb, en la situación actual de la construcción incompleta.

Se analizó la influencia de tres parámetros en el comportamiento del suelo: módulo de deformación, ángulo de fricción interna y cohesión. Este último resulta ser el más significativo, ya que si el suelo tuviera una baja cohesión los desplazamientos se incrementarían hasta valores cercanos a los 0.045m y el desplazamiento relativo de los extremos del predio en estudio sería de 0.025 m.

7 REFERENCIAS

- Mon, R., Características geológicas y geotécnicas del área urbana de Tucumán y poblaciones vecinas. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente* 12, 101-112, 1998.
- PLAXIS 2D, User Manuals, 2012.
- Schanz, T., P.A. Vermeer & P.G. Bonnier, The hardening soil model: Formulation and verification, *Beyond 2000 in Computational Geotechnics – 10 years of PLAXIS*, Balkema, Rotterdam, 1999.