

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES PROFUNDAS PARA
TANQUES DE ALMACENAMIENTO USANDO UN PROGRAMA DE
ELEMENTOS FINITOS**

**YASDEILY PÉREZ SUÁREZ
ANDRÉS FELIPE GARCÍA SOLÓRZANO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2012

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES PROFUNDAS PARA
TANQUES DE ALMACENAMIENTO USANDO UN PROGRAMA DE
ELEMENTOS FINITOS.**

**YASDEILY PÉREZ SUÁREZ
ANDRÉS FELIPE GARCÍA SOLÓRZANO**

**Trabajo de grado modalidad investigación para optar al título de Ingeniero
Civil**

**Director:
WILFREDO DEL TORO RODRÍGUEZ
Ingeniero Civil. M.Sc.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2012

Agradezco a DIOS por llevarme a este momento para alcanzar una meta en la vida.

A Rubén y Margarita por estar en la jugada.

Y demás familiares, amistades que tuvieron o no algún aporte para ser la persona que he llegado a ser hoy.

Andrés Felipe García Solórzano

A Dios, por darme la fe y la fortaleza para llegar hasta este momento tan importante de mi vida.

A mis padres, Francisco Pérez y Neldy Suárez, por su incondicional apoyo, por los valores que me han inculcado y el esfuerzo que han hecho para ayudarme a alcanzar mi sueño.

A mi hermana, Yineth Lucia Pérez, por ser uno de los motivos que me ha llevado a seguir superándome día a día.

A mis abuelitas, a mis tías, a mis tíos y a mis primos; por su apoyo, confianza y cariño.

Yasdeily Pérez Suárez.

AGRADECIMIENTOS

Al profesor WILFREDO DEL TORO RODRIGUÉZ, nuestro director de proyecto, por su orientación y disposición en la realización del proyecto.

A HECTOR TORRES ORTIZ, por su colaboración.

A nuestros amigos y compañeros, que nos acompañaron en el transcurso de la carrera, con los cuales compartimos momentos inolvidables llenos de alegría.

A mi compañero de proyecto, ANDRES FELIPE GARCÍA SOLÓRZANO, por su apoyo y dedicación para la realización de esta investigación, mis más sinceros agradecimientos y éxitos profesionales.

A la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, por habernos formado como profesionales íntegros.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	19
OBJETIVOS	21
OBJETIVO GENERAL	21
OBJETIVOS ESPECIFICOS	21
1. CIMENTACIONES PROFUNDAS.	22
1.1 PILOTES	22
1.1.1 Clasificación de pilotes	23
1.1.2 Tipos de Pilotes según el material.	23
1.1.3 Funciones de los pilotes.	25
1.2 CAPACIDAD PORTANTE DE UN PILOTE.	27
1.2.1 Indicadores de importancia	27
1.2.2 Reacción de un pilote cuando es cargado	28
1.2.3 Distribución de la carga en el fuste y la base del pilote.	28
1.3. MÉTODOS PARA ESTIMAR LA CAPACIDAD DE CARGA DE UN PILOTE.	29
1.3.1 Capacidad de carga de la punta (Q_p)	30
1.3.2 Método de Meyerhof; estimación de Q_p .	30
1.3.3 Método de Vesic: estimación de Q_p .	34
1.3.4 Método de Janbu; estimación de Q_p .	35
1.3.5 Método de Coyle y Castello: estimación de Q_p en arena.	36
1.3.6 Resistencia por fricción en arena (Q_s)	37
1.3.7 Resistencia por fricción en arcilla (Q_s)	40
1.4 ASENTAMIENTO DE PILOTES.	41
1.4.1 Método de Vesic.	42
2. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.	43
2.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.	43

2.1.1 Componentes de la malla de elementos finitos usada por el software	43
2.2 APLICACIONES DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS EN LA INGENIERÍA.	45
3. PROPIEDADES DE LOS PERFILES DE INTERES Y MONTAJE DE MODELOS A ESTUDIAR.	46
3.1 PROPIEDADES DE LOS SUELOS.	46
3.1.1 Módulo de elasticidad	46
3.1.2 Peso específico	47
3.1.3 Resistencia efectiva, fricción (ϕ) y cohesión (C)	50
3.2 PERFILES DE SUELOS	52
3.2.1 Perfil arenoso	52
3.2.2 Perfil areno-arcilloso	53
3.2.3 Perfil arcilloso	54
3.3. MONTAJE DE MODELOS	54
3.3.1 Datos y soporte del tanque de almacenamiento	54
3.3.2 Perfil arenoso natural	55
3.3.3 Perfil arenoso con relleno	56
3.3.4 Perfil arenoso con relleno y pilotes	57
3.3.5 Perfil areno-arcilloso natural	58
3.3.6 Perfil areno-arcillos con relleno	59
3.3.7 Perfil areno-arcilloso con pilotes	60
3.3.8 Perfil arcilloso natural	61
3.3.9 Perfil arcilloso con relleno	62
3.3.10 Perfil arcilloso con pilotes	63
3.3.11 Perfil arcilloso con placa y pilotes	64
3.3.12 Perfil arcilloso con placa superior y pilotes	65
4. ANALISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS EN PLAXIS 2D	67
4.1 PERFIL ARENOSO	67
4.1.1 Resultados del perfil arenoso natural	67
4.1.2. Resultados del perfil arenoso con relleno.	68

4.1.3 Resultados del perfil arenoso con pilotes	70
4.1.4 Comparación de resultados.	72
4.2 PERFIL ARENO-ARCILLOSO	72
4.2.1 Resultados del perfil areno-arcilloso natural.	73
4.2.2 Resultados del perfil areno-arcilloso con relleno	74
4.2.3. Resultados del perfil areno-arcilloso con pilotes.	75
4.2.4 Comparación de resultados	75
4.3 PERFIL ARCILLOSO	76
4.3.1 Resultados del perfil arcilloso natural	77
4.3.2 Resultados del perfil arcilloso con relleno	78
4.3.3 Resultados del perfil arcilloso con pilotes	79
4.3.4 Resultados del perfil arcilloso con placa y pilotes	79
4.3.5 Resultados del perfil arcilloso con placa superior y pilotes	80
4.3.6 Comparación de resultados	82
CONCLUSIONES	83
BIBLIOGRAFÍA	85
ANEXOS	86

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Pilotes Prefabricados en Concreto.	24
Figura 2: Pilotes de concreto ademados y no ademados.	24
Figura 3: Pilote de Punta	25
Figura 4: Pilote de fricción flotante.	25
Figura 5: Pilote de Fricción Compactación.	26
Figura 6: Pilotes a tensión.	27
Figura 7: Pilotes de Anclaje.	27
Figura 8: Pilote de punta. (a) $L = LB$; (b) $Lb < L$	31
Figura 9: Variación de la resistencia unitaria de punta en una área homogénea.	31
Figura 10: Variación de $(Lb/D)cr$ con el ángulo de fricción del suelo (según Meyerhof 1976).	32
Figura 11: Variación de los valores máximos de Nc^* y Nq^* con el ángulo de fricción del suelo ϕ (según Meyerhof 1976).	33
Figura 12: Factores de capacidad de apoyo de Janbu.	36
Figura 13: Variación de Nq^* con L/D (según Coyle y Castellano 1981)	37
Figura 14: Compactación de arena cercana a pilotes hincados (según Meyerhof 1961)	37
Figura 15: Resistencia por fricción unitaria para pilotes en arena.	38
Figura 16: Variación de λ con la longitud de empotramiento de un pilote.	40
Figura 17: Aplicación del metodo λ en suelo estratificado.	41
Figura 18: Posición de los nodos en un elemento.	44
Figura 19-a y Figura 19-b: Puntos de tensión.	44
Figura 20. Relaciones peso-volumen.	48
Figura 21: Relaciones peso- volumen (Suelo saturado).	49
Figura 22: Calculo del esfuerzo efectivo.	50

Figura 23: Regresión de τ vs σ' .	52
Figura 24: Tanque de almacenamiento con soporte.	55
Figura 25: Perfil arenoso+natural.	56
Figura 26: Perfil arenoso+base.	57
Figura 27: Perfil arenoso+base+pilotes.	58
Figura 28: Perfil areno-arcilloso+ natural.	59
Figura 29: Perfil areno-arcilloso+base.	60
Figura 30: Perfil areno-arcilloso+base+pilotes	61
Figura 31: Perfil arcilloso+natural.	62
Figura 32: Perfil arcilloso+base.	63
Figura 33: Perfil arcilloso+base+pilotes.	64
Figura 34: Perfil arcilloso+placa+pilotes.	65
Figura 35: Perfil arcilloso+placa sup+pilotes.	66
Figura 36: Resultado del perfil arenoso+natural	67
Figura 37: Resultados del perfil arenoso+base.	68
Figura 38: Resultados de los perfiles arenoso modificados.	69
Figura 39: Resultados del perfil arenoso con pilotes.	71
Figura 40: Comparación de Resultados perfil arenoso	72
Figura 41: Resultados del perfil areno-arcilloso natural	73
Figura 42: Resultados del perfil areno-arcilloso con relleno.	74
Figura 43: Resultados del perfil areno-arcilloso con pilotes.	75
Figura 44: Comparación de resultados del perfil areno-arcilloso	76
Figura 45: Resultados del perfil arcilloso natural.	77
Figura 46: Resultados del perfil arcilloso con relleno.	78
Figura 47: Resultados del perfil arcilloso con pilotes.	79
Figura 48: Resultados del perfil arcilloso con placa y pilotes.	80
Figura 49: Resultados del perfil arcilloso con placa superior y pilotes.	81
Figura 50: Comparación de resultados perfil arcilloso	82

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Índice de rigidez	35
Tabla 2: Coeficiente efectivo del suelo.	39
Tabla 3: Valores de C_p	42
Tabla 4. Parámetros elásticos para diferentes suelos.	47
Tabla 5: Peso específico relativo de los sólidos para algunos tipos de suelo.	49
Tabla 6: Propiedades de los materiales (perfil arenoso).	49
Tabla 7: Propiedades de los materiales (perfil areno-arcilloso).	49
Tabla 8: Propiedades de los materiales (perfil arcilloso)	54

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A: Tipos de pilotes según su material.	86
ANEXO B. Aplicaciones del método de elementos finitos en la solución de problemas de frontera.	89
ANEXO C. Modelos modificados del perfil arenoso	91
ANEXO D. Resultado del perfil arenoso natural.	93
ANEXO E. Resultados del perfil arenoso+base.	95
ANEXO F. Resultados de los perfiles arenosos modificados.	97
ANEXO G. Resultados del perfil arenoso con pilotes.	102
ANEXO H. Resultados del perfil areno-arcilloso natural.	106
ANEXO I. Resultados del perfil areno-arcilloso con relleno.	108
ANEXO J. Resultados del perfil areno-arcilloso con pilotes.	110
ANEXO K. Resultados del perfil arcilloso natural.	114
ANEXO L. Resultados del perfil arcilloso con relleno.	116
ANEXO M. Resultados del perfil arcilloso con pilotes.	118
ANEXO N. Resultados del perfil arcilloso con placa y pilotes.	122
ANEXO Ñ. Resultados del perfil arcilloso con placa superior y pilotes.	126

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES PROFUNDAS PARA TANQUES DE ALMACENAMIENTO USANDO UN PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS.*

AUTORES: GARCÍA SOLÓRZANO, Andrés Felipe**
PÉREZ SUÁREZ, Yasdeily

PALABRAS CLAVES: Pilotes, métodos, elementos finitos, modelamientos, asentamientos, suelo, esfuerzos.

CONTENIDO:

Los suelos con capacidades de carga bajas no son aptos para resistir esfuerzos a los cuales son sometidos por ello requieren una restructuración en la cual es necesaria la implementación de cimentaciones para transmitir las cargas mencionadas a estratos más profundos con mejor capacidad de resistencia.

En situaciones donde el estrato competente se encuentra a profundidades altas se necesita la inclusión de pilotes los cuales permiten la transmisión de la carga y garantiza la seguridad estructural. Para casos con mayor dificultad se implementa una cimentación de mayor complejidad que consta de una placa de concreto reforzada en la cual estará embebidos los pilotes.

Los pilotes son técnicas estructurales usadas para tanques, edificios altos, puentes, etc, debido a que limita las deformaciones del suelo; ante movimientos sísmicos tiene gran comportamiento favorable y también en situaciones donde el suelo tiene características expansivas y colapsables por la presencia de humedad, los pilotes han tenido un gran éxito ya que logran llegar a capas con mayor capacidad de carga.

Para lograr los alcances esperados por este estudio se utilizó un software basado en la teoría de elementos finitos, realizando modelamientos cercanos a la realidad y de ese modo disminuir el tiempo de desarrollo de soluciones sustentadas en métodos matemáticos de la ingeniería geotécnica.

En este documento se plantea posibles soluciones estructurales y de alto valor económico en algunos casos pero indispensables para soportar tanques de almacenamiento, el software brindara resultados de los que podemos deducir dependiendo de la calidad del suelo valores de esfuerzos, asentamientos, el factor de seguridad de cada modelo estudiado, fuerza y deformación en el pilote crítico.

* Proyecto de Grado:

** Facultad de Ingeniería Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Ing. M. Sc. Wilfredo del Toro.

ABSTRACT

TITLE: STUDY OF THE BEHAVIOR OF DEEP FOUNDATIONS FOR STORAGE TANKS USING A FINITE ELEMENT PROGRAM^{*}

AUTHORS: GARCÍA SOLÓRZANO, Andrés Felipe^{**}
PÉREZ SUÁREZ, Yasdeily

KEYWORDS: Piles, methods, finite element, modeling, settlements, soil, stress.

CONTENT:

The soils with low capacity of load are not suitable to resist stresses which are submitted therefore require a restructuring which is necessary in the implementation of foundations to transmit the charges mentioned in deeper strata with better endurance.

In situations where the competent layer is located high depths requires the inclusion of piles which permit the transmission of the load and ensure the structural safety. For cases with difficulty implementing a more complex foundation consisting of a reinforced concrete slab in which is embedded the piles.

The piles are used for tanks structural techniques, tall buildings, bridges, etc., by limiting the deformation of soil before earthquakes have large and also favorable performance in situations where the soil has expansive characteristics and collapsible by the presence of moisture, piles have been very successful and who make it to layers with higher load capacity.

To achieve the expected outcomes for this study used software based on finite element theory, making modelamientos close to reality and so reduce the development time solutions supported on mathematical methods of geotechnical engineering.

This paper proposes structural solutions and high economic value in some cases but crucial to support storage tanks, the software would provide results that can be deduced depending on soil quality values of stress, settlements, the safety factor each model studied, strength and deformations in the pile critical.

^{*}Degree project

^{**} Faculty of Physical-Mechanical Engineering, Civil Engineering School, Director: Ing. M. Sc. Wilfredo del Toro.

INTRODUCCIÓN

La cimentación para un tanque de almacenamiento de alta capacidad comprende un estudio geotécnico que nos puedan dar a conocer las propiedades del subsuelo, conociendo los estratos competentes y aplicar soluciones prácticas con las que se pueda asegurar la estabilidad estructural. Para tener una mayor amplitud en este trabajo se usara perfiles arenosos, perfil areno-arcilloso y perfil arcilloso.

Los perfiles con buena capacidad portante como los arenosos se espera que con proponer un cimiento flexible pueda ser capaz de soportar el tanque. En suelos con media capacidad de carga que es el areno-arcilloso se utilizara cimentaciones profundas como son pilotes de concreto reforzado llevando los esfuerzos a capas que puedan resistir el peso del tanque y controlar la deformación del terreno. Sin embargo en suelos con capacidad de carga mala es decir el arcilloso se implementara cimentaciones de mayor dificultad estructural y económica que constan de la adición de una placa de concreto maciza reforzada conectada a una serie de pilotes dando un aporte significativo al momento de ser aplicada la carga del tanque sobre el cimiento mencionado.

En la actualidad hay diversos software que usan el método de elementos finitos para implementar de manera ágil los resultados de modelos geotécnicos que en la teoría tienen grandes dificultades y mayor prolongación de tiempo para conocer datos de importancia como esfuerzos, deformaciones, entre otros. El software a utilizar es el PLAXIS 2D de fácil manejo en ingeniería de cimentaciones y funciones afines. La recepción de datos por parte del programa está ligada a generar un gráfico del modelo que contenga todos los parámetros de importancia y que puedan ser relevantes para el estudio, en la obtención de resultados ofrece

una gran gama de posibilidades que van desde valores en puntos de referencia, graficas, diagramas entre otras.

El documento se divide en tres partes de importancia, la primera es la recopilación de teoría del tema en cimentaciones que puedan ser de utilidad para el estudio y descripción del método de elementos finitos a usar. La segunda parte refiere a la obtención de propiedades de los perfiles y modelos a analizar. Y finalmente en el oficio tendremos los resultados obtenidos del software y buscar conclusiones definitivas.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Estudiar el comportamiento de cimentaciones profundas para tanques de almacenamiento.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Realizar un análisis teórico del comportamiento de cimentaciones rígidas.
- Modelar cimentaciones rígidas para tanques de almacenamiento mediante un programa computacional de elementos finitos.
- Analizar la interacción del sistema tanque-cimiento-suelo para diferentes condiciones del subsuelo.

1. CIMENTACIONES PROFUNDAS.

Las cimentaciones profundas se basan en el esfuerzo cortante entre el terreno y la fundación para soportar las cargas de servicio, por tal motivo es necesario llevarlas a altas profundidades donde puedan alcanzar zonas resistentes a los esfuerzos. Esta clase de cimentación se considera especial ya que en construcciones comunes de cargas pequeñas no se usan, su utilización se presenta en casos donde el suelo superficial tiene poca capacidad de carga y se requiere buscar un estrato más profundo con mejores condiciones de carga o la edificación transmita una carga demasiado grande y el efecto de fricción entre la cimentación-suelo debe aumentar. Los métodos de cimentaciones profundas más usadas son:

- Pilas.
- Pilotes.
- Pantallas isostáticas o hiperestáticas.

1.1 PILOTES

Los pilotes son miembros estructurales con una sección transversal pequeña a comparación de su altura haciéndolo un elemento esbelto y a pesar de su costo es necesario para garantizar la seguridad estructural. Este tipo de cimentación se emplea cuando el suelo superficial es altamente compresible y débil para soportar la carga solicitada, realizando la función de transmitir el esfuerzo a capas con mayor capacidad de carga. En el momento que se someten a fuerzas horizontales, estos miembros resisten por flexión y a su vez soportan la carga vertical de la estructura.

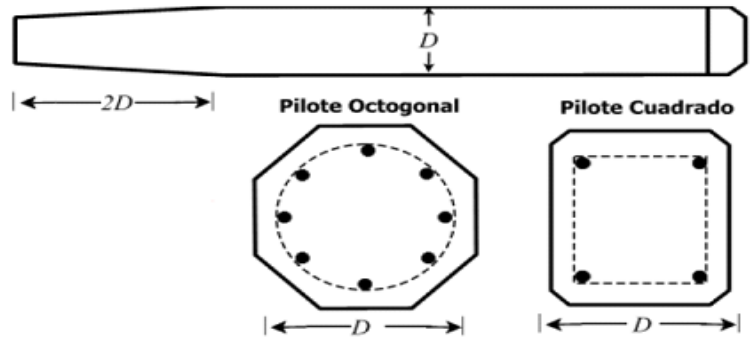
1.1.1 Clasificación de pilotes. Los pilotes se construyen en una gran variedad de materiales, longitud y forma de su sección, función e instalación.

1.1.2 Tipos de Pilotes según el material.

Pilote de concreto: existen dos tipos de pilotes de concreto, pilotes prefabricados y fundidos in situ. Los prefabricados tienen sección en forma cuadrada u octagonal (**Figura 1**) hechos a una longitud deseada con refuerzo en acero típico, el cual añade un refuerzo al pilote para la flexión ocasionada en el proceso de transporte, manipulación del mismo y la carga lateral. En los pilotes prefabricados vemos la posibilidad de ser estructuras presforzadas y poder usar cables de acero de alta resistencia que antes de ser fundido el pilote son sometidos hasta llegar a la resistencia última ($\approx 1800MN/m^2$), en el momento de la fundación del pilote los cables reducen su capacidad ($900 - 1300MN/m^2$), instantáneamente los cables en el curado del concreto generan una fuerza compresiva. Los pilotes fundidos in situ se realizan por medio de una excavación previa y rellenándolo de concreto. Actualmente son usados con gran éxito, se subdividen en dos clases de pilotes fundidos in situ los cuales son: ademados y no ademados. Los pilotes ademados son muy parecidos a los pilotes en tubo de acero los cuales luego de ser hincado le vierten concreto en su interior, en ocasiones se les deja un bulbo de concreto al final del pilote de acero. Por otro lado el pilote no ademado tiene la misma tendencia en la elaboración sin embargo al rellenar con concreto y antes del curado total de la mezcla se retira cuidadosamente la camisa de acero que conforma el pilote de tal manera de no causar daños a la estructura de concreto, igualmente se encuentran situaciones en la que se requiere bulbo al final (**Figura 2**)¹.

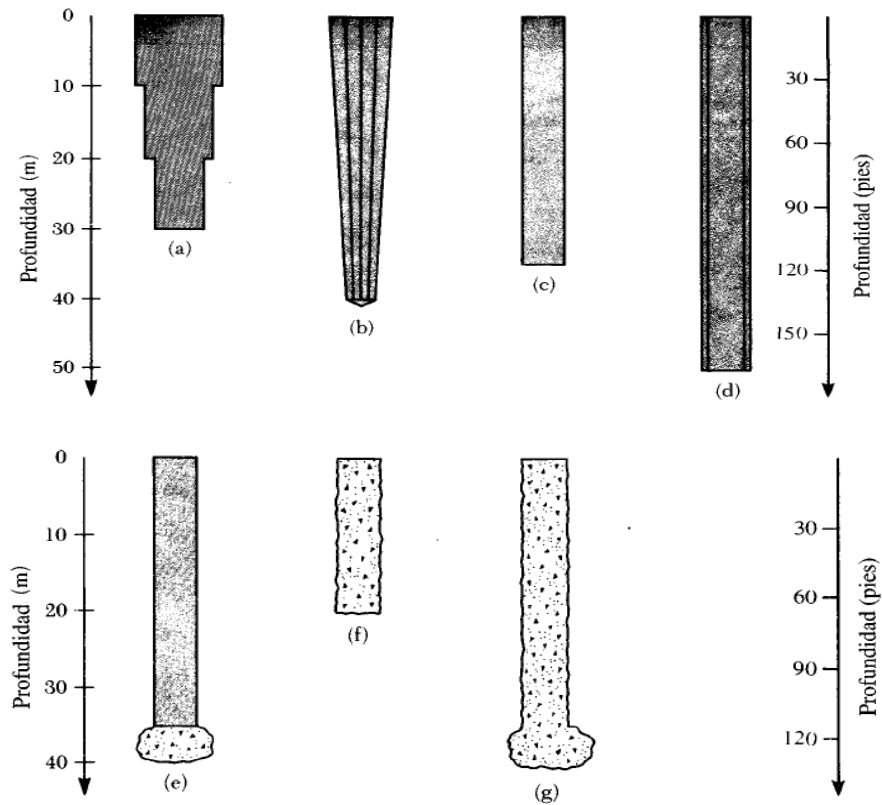
¹Braja M. Das, Principios de ingeniería de cimentaciones, 5ª edición

Figura 1: Pilotes Prefabricados en Concreto.



Fuente: Braja M. Das

Figura 2: Pilotes de concreto ademados y no ademados.

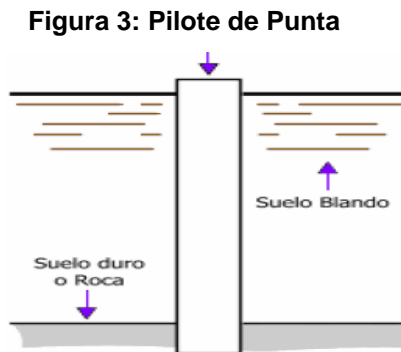


Fuente: Braja M. Das

La información pertinente a otros tipos de pilotes según su material se ven el **Anexo A**.

1.1.3 Funciones de los pilotes.

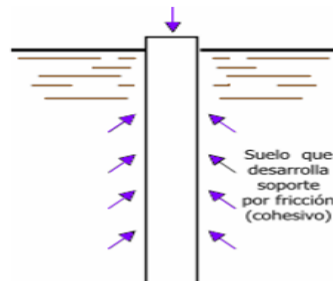
1.1.3.1 Pilotes de punta: Transmiten la carga a estratos con mayor capacidad portante; a través del soporte en la punta del pilote. Los pilotes se extienden hasta la superficie de la roca o se prolongan a estratos de suelo compacto y duro sin importar que haya presencia de agua (**Figura 3**)².



Fuente: Estado del arte en análisis y proceso constructivos en cimentaciones profundas.

1.1.3.2 Pilotes de fricción flotante: Un pilote que trabaja a fricción flotante lo que hace es transmitir una carga a un suelo blando a través de sus partes laterales en toda su longitud generando en esas zonas una fuerza de rozamiento, se emplea en sitios donde no haya estratos de suelos duros a profundidades significativas (**Figura 4**)³.

Figura 4: Pilote de fricción flotante.



Fuente: Estado del arte en análisis y procesos constructivos en cimentaciones profundas.

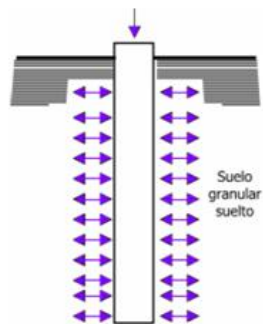
² Estado del arte en el análisis y procesos constructivos de cimentaciones profundas.

³ *Ibíd.*

1.1.3.3 Pilotes de contra socavación: Estos pilotes trabajan de forma que superan la profundidad de excavación llegando a zonas de aguas subterráneas donde proveerán de protección al soporte en el suelo modificado por la instalación del pilote⁴.

1.1.3.4 Pilotes de Fricción compactación: Son utilizados en suelos granulares, para lograr una compactación apropiada incrementando su compacidad, dando como resultado una mayor capacidad de carga por fricción⁵.

Figura 5: Pilote de Fricción Compactación.



Fuente: Estado del arte en análisis y proceso constructivos en cimentaciones profundas.

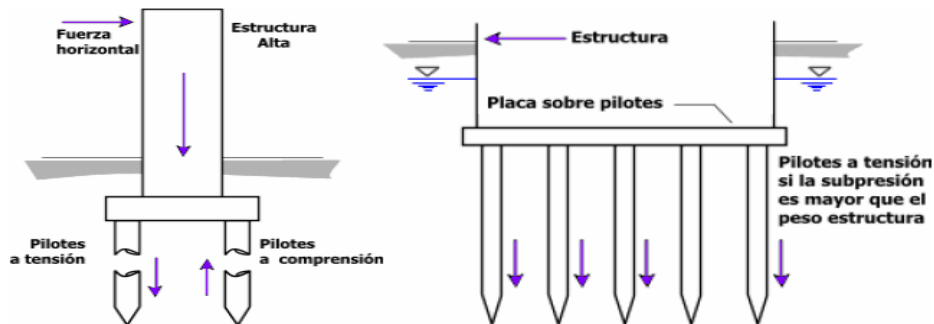
1.1.3.5 Pilotes a tensión: Actúan en compañía de una placa de concreto y seguidamente encontramos los pilotes (se instalan varios pilotes en la placa), su buen comportamiento frente a fuerzas de arranque no permite desplazamientos en estructuras que puedan sufrir algún tipo de maltrato por efectos de elevación. En casos donde se instalen varios pilotes a la placa de concreto que trabajen en compresión podrán generar una reacción muy significativa a esfuerzos por momentos de volcamientos en estructuras de gran altura, debido a fuerzas actuantes en su cabecera (**Figura 6**)⁶.

⁴ Ibid.

⁵ Ibid.

⁶ Ibid.

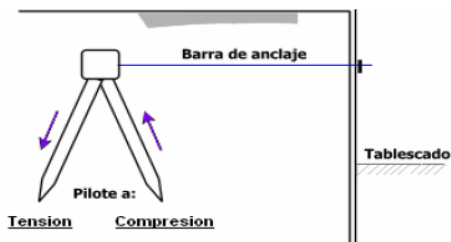
Figura 6: Pilotes a tensión.



Fuente: Estado del arte en análisis y procesos construcción de cimentaciones profundas.

1.1.3.7 Pilotes de Anclaje: Configuran mecanismos de anclaje resistentes a empujes horizontales de tablestacados u otras estructuras. Usualmente se combinan pilotes a tensión con pilotes a compresión (**Figura 7**)⁷.

Figura 7: Pilotes de Anclaje.



Fuente: Estado del arte en análisis y proceso constructivos en cimentaciones profundas.

1.2 CAPACIDAD PORTANTE DE UN PILOTE.

1.2.1 Indicadores de importancia. Para un pilote poder transmitir una carga a la cual es sometido hasta el suelo competente depende de muchas variables como lo son las condiciones del subsuelo, sección geométrica y forma estructural del pilote, proceso constructivo y el tiempo antes de ser aplicada la carga luego de su elaboración, los siguientes indicadores explicaran estas variables⁸:

⁷ Ibid.

⁸ Ibid.

- Resistencia por fricción en el fuste y resistencia portante en la base. En función de los desplazamientos.
- Relación entre la resistencia última en el fuste y la resistencia al corte inicial no drenado de los suelos en contacto con el mismo.
- Rigidez de pilote, sección en base e instalación.
- Dimensiones del pilote, sección en base e instalación.
- Consecuencias producto de la instalación, como alteraciones y cambios en las características de esfuerzos del suelo vecino.

1.2.2 Reacción de un pilote cuando es cargado. Un pilote bajo carga axial en compresión inicialmente se comporta de forma elástica (sistema suelo-pilote). En el rango elástico la relación es rectilínea hasta cierto punto de la curva, en el momento que se retira la carga sin llegar al punto mencionado, la cabeza del pilote prácticamente rebota hasta su nivel original. Si la carga se incrementa superando el punto elástico aparece una interface con cierto grado de deslizamiento llegando al punto más alto, donde el fuste alcanza su máxima resistencia friccionante (sistema pilote-suelo). Al suspender la carga en esta etapa, la cabeza del pilote rebotara a un punto mayor, la resistencia en la base del pilote necesita un movimiento hacia abajo mayor y varía según el diámetro del pilote. En el instante en que se alcanza la etapa total de movilización de la resistencia en la base, el pilote se desplaza hacia abajo sin incremento de la carga o alzas pequeñas de la carga pueden producir asentamientos progresivos grandes⁹.

1.2.3 Distribución de la carga en el fuste y la base del pilote. Debido al desarrollo total de la fricción en el fuste ocurre en movimientos axiales mucho menores que los requeridos para el soporte en la punta, puede movilizarse una buena parte de la resistencia en el fuste, antes de que una parte sustancial de la carga pueda trasladarse a la base, usualmente en la situación de pilotes largos y esbeltos. Por ello, cuando la resistencia del fuste es totalmente movilizadada, todo

⁹Ibid.

incremento de la carga es llevada hasta de la punta a los materiales de soporte de la base, siendo sobre esforzada e inducida la falla.

A partir de ensayos de laboratorio que buscan conocer cómo se reparte la carga en el pilote, se descubrió que la máxima resistencia de rozamiento en el tramo del fuste se moviliza completamente cuando el desplazamiento relativo entre el suelo y el pilote llega a un rango de 5 a 10 mm.

La magnitud del desplazamiento necesario para movilizar la totalidad de la resistencia en la base depende del tipo y confinamiento de los materiales de soporte, pero para unas condiciones dadas de los mismos resulta ser la función del diámetro de la base. Ensayos de carga han mostrado que la magnitud del movimiento de la base, requerido para desarrollar la capacidad última de punta, cambia hasta un 25% del diámetro en la base, para suelos cohesivos hasta un 10% para materiales sin cohesión. Ensayos de carga en arcillas firmes muestran desplazamientos de base en la falla del orden del 10% del diámetro de la base¹⁰.

1.3. MÉTODOS PARA ESTIMAR LA CAPACIDAD DE CARGA DE UN PILOTE.

Para estimar la capacidad de carga última de un pilote, se tiene una ecuación general que considera una resistencia por fricción (fricción superficial) generada en la interfaz suelo-pilote, y una componente de resistencia por la reacción de la punta del pilote contra el suelo¹¹.

$Q_u = Q_p + Q_s - W_p$, donde Q_u = capacidad última del pilote, Q_s = resistencia por fricción, Q_p = Capacidad de carga de la punta del pilote, W_p = peso del pilote.

¹⁰ WOODWARD et al, 1972.

¹¹ Óp. Cit. BRAJA

1.3.1 Capacidad de carga de la punta (Q_p)

La capacidad de carga de la punta del pilote está definida como:

$$Q_p = A_p q_p = A_p (c N_c^* + q' N_q^*)$$

Dónde: A_p = Área de la punta del pilote.

c = Cohesión del suelo que soporta el pilote.

q_p = Resistencia unitaria de punta.

N_c^*, N_q^* = Factores de capacidad de carga.

q' = Esfuerzo vertical efectivo al nivel de la punta del pilote

Resistencia por fricción (Q_s)

La resistencia por fricción de un pilote se expresa como:

$$Q_s = P \Delta L f$$

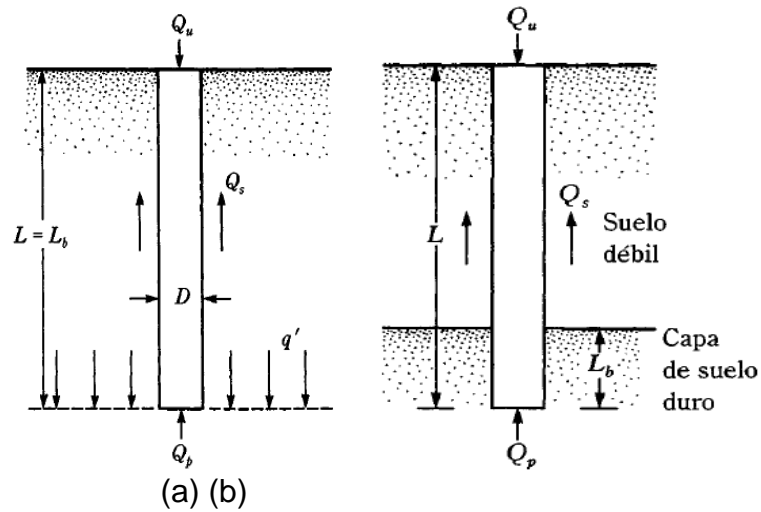
Dónde: p = perímetro de la sección del pilote, ΔL = longitud incremental del pilote sobre la cual p y f se consideran constantes y f = resistencia unitaria por fricción a cualquier profundidad z .

1.3.2 Método de Meyerhof; estimación de Q_p .

1.3.2.1 Arena: La capacidad de carga de punta q_p de un pilote en arena generalmente crece con la profundidad de empotramiento en el estrato de apoyo

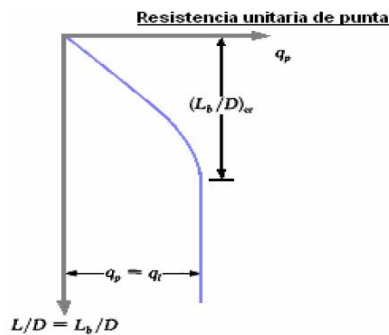
alcanzando un valor máximo para una relación de empotramiento de $(L_b/D) = (L_b/D)_{cr}$. En un suelo homogéneo L_b es igual a la longitud real L de empotramiento del pilote (**Figura 8-a**). Sin embargo, si el pilote penetra en un estrato de apoyo, $L_b < L$ (**Figura 8-b**). Más allá de la relación de empotramiento crítico $(L_b/D)_{cr}$, el valor de q_p permanece constante ($q_p = q_t$) (**Figura 9**)¹².

Figura 8: Pilote de punta. (a) $L = L_b$; (b) $L_b < L$



L : Longitud de empotramiento.
 L_b : Longitud de empotramiento en estrato de apoyo.
 Fuente: Braja M. Das.

Figura 9: Variación de la resistencia unitaria de punta en una área homogénea.



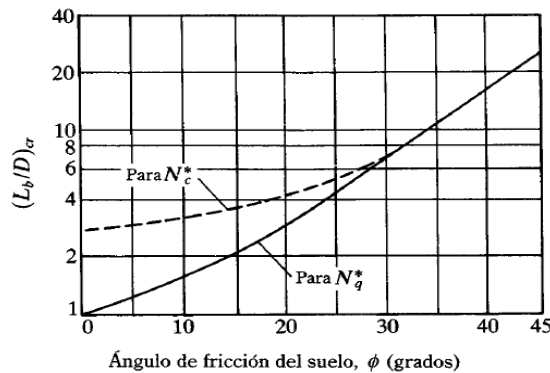
Fuente: Braja M. Das.

¹²Ibíd.

De acuerdo con Meyerhof (1976), los factores de capacidad de carga crecen con L_b/D y alcanzan un valor máximo en $(L_b/D) \approx 0.5(L_b/D)_{cr}$.

En la mayoría de los casos, la magnitud de L_b/D para pilotes es mayor que $0.5(L_b/D)_{cr}$, por lo tanto los valores máximos de N_c^* y N_q^* serán aplicables para el cálculo de q_p en todos los pilotes. Se puede apreciar la variación de los factores N_c^* y N_q^* respecto a la relación $(L_b/D)_{cr}$ y el ángulo de fricción ϕ (**Figura 10**)¹³.

Figura 10: Variación de $(L_b/D)_{cr}$ con el ángulo de fricción del suelo (según Meyerhof 1976).



Fuente: Braja M Das.

Para pilotes en arena, $c = 0$:

$$Q_p = A_p q_p = A_p q' N_q^*$$

Siendo N_q^* el tomado de la **Figura 11**.

Sin embargo, Q_p no debe exceder el valor límite $A_p q_l$, es decir.

$$Q_p = A_p q' N_q^* \leq A_p q_l$$

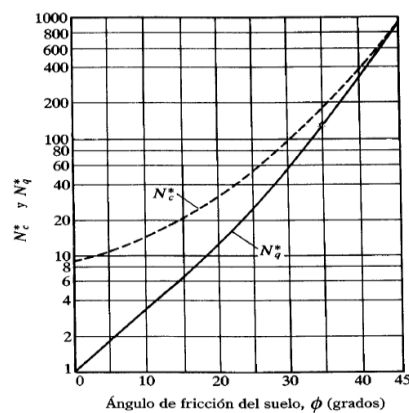
¹³ Ibíd.

La resistencia de punta límite es.

$$q_l(kN/m^2) = 50N_q^* \tan \phi$$

Donde ϕ = es el ángulo de fricción del suelo en el estrato de apoyo.

Figura 11: Variación de los valores máximos de N_c^* y N_q^* con el ángulo de fricción del suelo ϕ (según Meyerhof 1976).



Fuente: Braja M Das.

Con base en observaciones de campo, Meyerhof sugirió también que la resistencia de punta última q_p en un suelo granular homogéneo ($L = L_b$) se obtenga de los números de penetración estándar como:

$$q_p(KN/m^2) = 40N_{cor}L/D \leq 400N_{cor}$$

Donde N_{cor} : numero de penetración estándar corregido promedio cerca de la punta del pilote (aproximadamente 10D arriba y 4D debajo de la punta del pilote)¹⁴.

1.3.2.2 Arcilla: Para pilotes en arcillas saturadas en condiciones no drenadas $\phi = 0$.

¹⁴Ibid.

$$Q_p = N_c^* c_u A_p = 9 c_u A_p$$

Dónde: c_u = Cohesión no drenada del suelo debajo de la punta del pilote.

1.3.3 Método de Vesic: estimación de Q_p . Con base en la teoría de expansión de cavidades Vesic en el año 1977 propuso un método para estimar la capacidad de carga de punta de un pilote, basada en parámetros de esfuerzo efectivo¹⁵.

$$Q_p = A_p Q_p = A_p (c N_c^* + \sigma'_0 N_\sigma^*)$$

Dónde: $\sigma'_0 = \left(\frac{1+2K_0}{3}\right)q'$, Esfuerzo efectivo normal medio del terreno al nivel de la punta del pilote.

$K_0 = 1 - \sin \phi$, Coeficiente de presión de tierra en reposo.

$$N_\sigma^* = \frac{3N_q^*}{(1+2K_0)}, N_c^* = (N_q^* - 1) \cot \phi, \text{ Factores de capacidad de carga.}$$

De acuerdo con la teoría de Vesic: $N_\sigma^* = f(I_{rr})$

$$I_{rr} = \frac{I_r}{1+I_r \Delta}, \text{ Índice de rigidez reducida para el suelo.}$$

$$\text{Dónde: } I_r = \frac{E_s}{2(1+\mu_s)(c+q' \tan \phi)} = \frac{G_s}{c+q' \tan \phi}, \text{ Índice de rigidez.}$$

E_s = Modulo de elasticidad del suelo.

μ_s = Relación de Poisson del suelo.

G_s = Modulo cortante del suelo.

¹⁵ Estado del arte en el análisis y procesos constructivos de cimentaciones profundas.

Δ = Deformación unitaria promedio en la zona plástica debajo de la punta del pilote. Para condiciones sin cambio de volumen (arena densa), $\Delta= 0$, por lo que:

$$I_r = I_{rr}.$$

Los valores de I_r se obtienen de pruebas en laboratorio de consolidación y triaxiales correspondientes a los niveles apropiados de esfuerzo.

Si no se cuenta con las pruebas de laboratorio se recomienda trabajar con los siguientes valores obtenidos de estudios previos:

Tabla 1. Índice de rigidez

TIPO DE SUELO	I_r
Arena	70-150
Limos y arcillas (condición drenada)	50-100
Arcillas (condición no drenada)	100-200

Fuente: Braja M Das.

1.3.4 Método de Janbu; estimación de Q_p .

Janbu (1976) propuso calcular Q_p con la expresión: $Q_p = A_p(cN_c^* + q'N_q^*)$

Los factores de capacidad de carga N_c^* y N_q^* se calculan suponiendo una superficie de falla en el suelo en la punta del pilote (**Figura 12**)¹⁶.

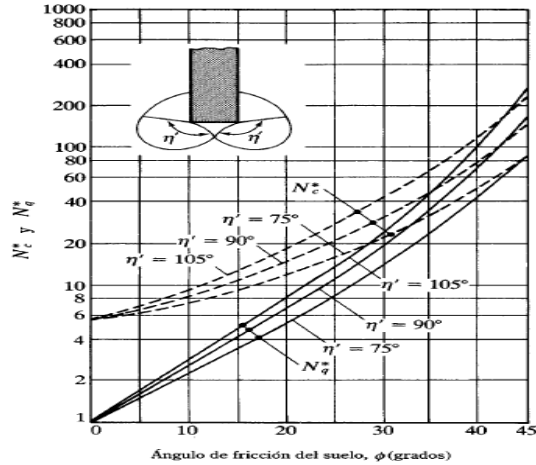
Por tanto las relaciones de carga son:

$$N_q^* = \tan \phi + \frac{1}{1 + \tan^2 \phi} (e^{2n \tan \phi})^2$$

¹⁶Op. CitBRAJA.

$$N_c^* = (N_q^* - 1) \cot \phi$$

Figura 12: Factores de capacidad de apoyo de Janbu.



Fuente: Braja M Das.

En la figura se puede apreciar que el ángulo n' varía aproximadamente desde 70° en arcillas blandas hasta aproximadamente 105° en suelos arenosos densos. Independientemente del procedimiento teórico usado para calcular Q_p , su magnitud plena se obtiene después de que el pilote penetre por lo menos entre 10% y 25% de su ancho. Para la arena esta es la profundidad crítica¹⁷.

1.3.5 Método de Coyle y Castello: estimación de Q_p en arena.

Coyle y Castello (1981) analizaron 24 pruebas de carga a gran escala en campo de pilotes hincados en arena, del cual se estimó Q_p ¹⁸ como: $Q_p = q' N_q^* A_p$

Dónde: q' = Esfuerzo vertical efectivo en la punta del pilote.

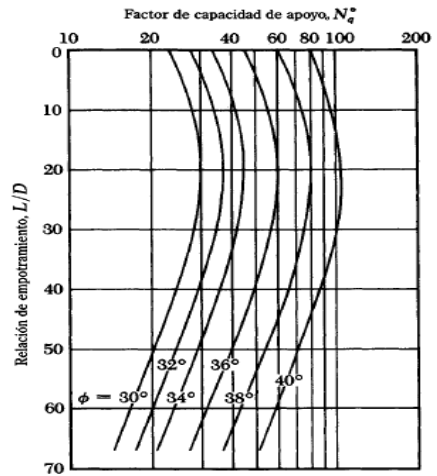
N_q^* = Factor de capacidad de carga.

¹⁷ Ibid.

¹⁸ Ibid.

De estos estudios se estableció la variación de N_q^* con L/D y el ángulo de fricción del suelo.

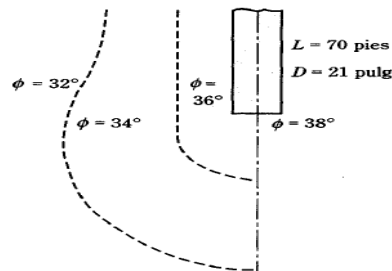
Figura 13: Variación de N_q^* con L/D (según Coyle y Castellano 1981)



Fuente: Braja M Das.

1.3.6 Resistencia por fricción en arena (Q_s). Para estimar la resistencia unitaria por fricción f , se debe tener en cuenta la instalación del pilote, ya que en los hincados en arena, la vibración durante el hincado ayuda a densificar el suelo a su alrededor. La zona de densificación que rodea al pilote es aproximadamente 2.5 veces el diámetro del mismo¹⁹.

Figura 14: Compactación de arena cercana a pilotes hincados (según Meyerhof 1961)

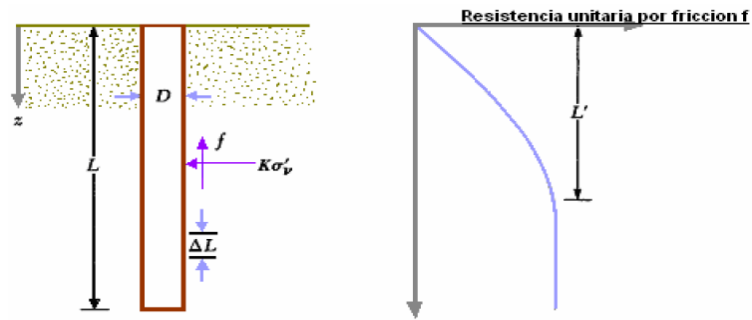


Fuente: Braja M Das.

¹⁹ Estado del arte en el análisis y procesos constructivos de cimentaciones profundas.

La fricción unitaria superficial crece con la profundidad más o menos linealmente hasta una profundidad L' y permanece luego constante (**Figura 15**). La magnitud de la profundidad crítica L' es de entre 15 y 20 diámetros del pilote²⁰.

Figura 15: Resistencia por fricción unitaria para pilotes en arena.



Fuente: Braja M Das.

A profundidades similares, la fricción unitaria superficial en arena suelta es mayor para un pilote de alto desplazamiento que para un pilote de bajo desplazamiento. Considerando los factores anteriores, se plantea una relación aproximada para f :

$$\text{Para } z = 0 \text{ a } z = L' \rightarrow f = K\sigma'_v \tan \delta$$

$$\text{Para } z = L' \text{ a } z = L \rightarrow f = f_{z=L'}$$

Dónde: K = Coeficiente efectivo de la tierra.

σ'_v = Esfuerzo vertical efectivo a la profundidad bajo consideración.

δ = Angulo de fricción entre suelo y pilote.

La magnitud de K varía con la profundidad. Los siguientes son los valores promedio recomendados para el cálculo de K .

²⁰Op. Cit. BRAJA

Tabla 2: Coeficiente efectivo del suelo.

TIPO DE PILOTE	K
Perforado	$K_0 = 1 - \sin \phi$
Hincado, de bajo desplazamiento	$K_0 = 1 - \sin \phi$ a $1.4K_0 = 1.4(1 - \sin \phi)$
Hincado, de alto desplazamiento	$K_0 = 1 - \sin \phi$ a $1.8K_0 = 1.8(1 - \sin \phi)$

Fuente: Autores

Los valores de δ dados por varios investigadores están en el rango de 0.5ϕ a 0.8ϕ .

Para pilotes hincados de gran desplazamiento, Bhusan (1982) recomendó:

$$K \tan \delta = 0.18 + 0.0065C_r \text{ y } K = 0.5 + 0.008C_r$$

C_r = Compacidad relativa (%)

Meyerhof (1976) también indicó que la resistencia por fricción unitaria promedio f_{prom} , para pilotes hincados de gran desplazamiento se obtiene con los valores de la resistencia a la penetración estándar corregida promedio como: $f_{prom}(\frac{kN}{m^2}) = 2N_{cor}$

N_{cor} = Valor corregido promedio de la resistencia a la penetración estándar.

Para pilotes hincados de desplazamiento pequeño: $f_{prom}(kN/m^2) = N_{cor}$

Finalmente: $Q_s = pL f_{prom}$

1.3.7 Resistencia por fricción en arcilla (Q_s)

1.3.7.1 Método λ : Propuesto por Vijayvergiya y Focht (1972). Se basa en la hipótesis de que el desplazamiento del suelo causado por el hincado del pilote conduce a una presión lateral pasiva a cualquier profundidad y que la resistencia unitaria superficial promedio es²¹:

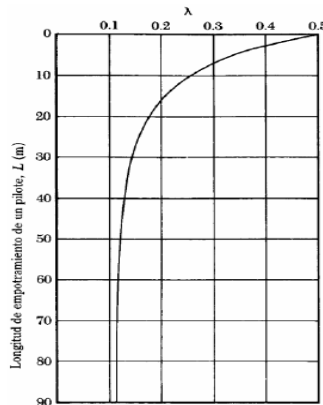
$$f_{prom} = \lambda(\sigma'_v = 2c_u)$$

Dónde: $\sigma'_v = \frac{A_1 + A_2 + \dots + A_n}{L}$, esfuerzo vertical efectivo en toda la longitud de empotramiento.

$$c_u = \frac{c_{u1}L_1 + c_{u2}L_2 + \dots + c_{un}L_n}{L}, \text{ Resistencia media no drenada } (\phi = 0).$$

$\lambda =$ Varía con la profundidad de la penetración del pilote (**Figura 16**).

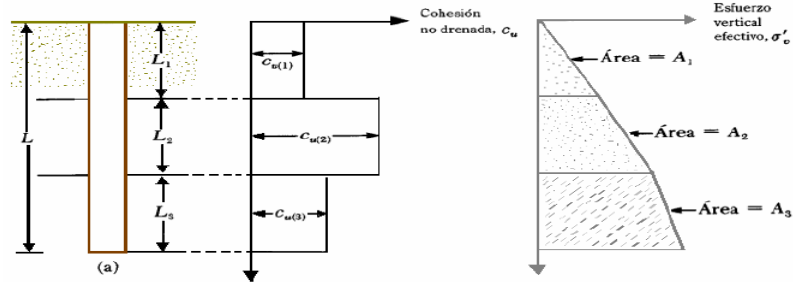
Figura 16: Variación de λ con la longitud de empotramiento de un pilote.



Fuente: Braja M Das.

²¹Op. Cit. BRAJA

Figura 17: Aplicación del método λ en suelo estratificado.



Fuente: Braja M Das.

La resistencia total por fricción se calcula como: $Q_s = pL f_{prom}$

1.4 ASENTAMIENTO DE PILOTES.

El asentamiento de un pilote por una carga vertical Q_w se da:

$S = s_1 + s_2 + s_3$, donde S = asentamiento total, s_1 = asentamiento elástico, s_2 = asentamiento debido a la carga en punta y s_3 = asentamiento debido a la carga transmitida al fuste. Suponiendo el material del pilote elástico, la deformación del fuste se halla así:

$s_1 = \frac{L(Q_{up} + \xi Q_{ws})}{A_p E_p}$, donde: Q_{up} = carga en la punta del pilote bajo carga de trabajo, Q_{ws} = carga resistente de fricción debido a la carga de servicio, A_p = área del pilote, E_p = modulo elástico del material del pilote y L = longitud del pilote.

1.4.1 Método de Vesic.

1.4.1.1 Calculo del asentamiento de un pilote.

Arenas, arcillas y limos.

Vesic (1977) propuso magnitud $\xi = 0.67$, donde ξ depende de la resistencia por fricción que para el caso se estima de forma triangular, entonces $s_1 : s_1 = \frac{L(Q_{up} + 0.67Q_{ws})}{A_p E_p}$

Para $s_2 = \frac{Q_{up} C_p}{D q_p}$, donde Q_{up} = carga por resistencia de fricción bajo carga de servicio, D = diametro del pilote, q_p = reistencia ultima en la punta del pilote y C_p =coef. Empírico, dado por la **Tabla 3**²².

Tabla 3: Valores de C_p

TIPO DE SUELO	PILOTES HINCADOS	PILOTES PERFORADO
Arena (densa o suelta)	0.02 - 0.04	0.09 - 0.18
Arcilla (firme a blanda)	0.02 - 0.03	0.03 - 0.06
Limo (denso a suelto)	0.03 - 0.05	0.09 - 0.12

Fuente: Estado del arte en análisis y procesos constructivos en cimentaciones profundas.

Para el valor de $s_3 = \frac{Q_{up} C_s}{L q_p}$, donde L = longitud del pilote y $C_s = 0.93 + 0.16 \frac{L}{D}$ =cte impírica²³.

²²Estado del arte en el análisis y procesos constructivos de cimentaciones profundas.

²³Ibíd.

2. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.

2.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.

La función básica del método de elementos finitos es encontrar una solución a un problema complejo, donde las herramientas matemáticas no son suficientes para hallar dicha respuesta, se aclara que el objetivo alcanzado por el método es aproximado y no exacto. El método trabaja por medio de ecuaciones diferenciales parciales las cuales tienen gran aplicación en el mundo ingenieril. Sub dividiendo el dominio geométrico del problema a un número finito de elementos diminutos, en lugar de la idea de continuidad del cálculo diferencial. Los elementos mencionados tienen un número de nodos y estos a su vez poseen ciertos grados de libertad que adjudican valores discretos de las variables del problema en cuestión. En la situación donde las soluciones señalen deformaciones, los grados de libertad representan las componentes del desplazamiento de cada nodo²⁴.

2.1.1 Componentes de la malla de elementos finitos usada por el software. La malla de elementos finitos se diferencia en tres clases:

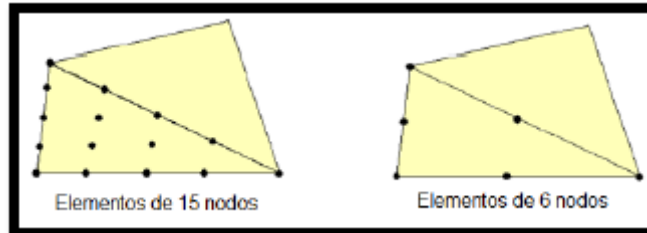
- **Elementos:** En la creación de la malla de materiales con propiedades idénticas son divididos en elementos de forma triangular. Se elige elementos entre quince (15) a seis (6) nodos, siendo el primero el de mayor exactitud pero con mayor tiempo de resolución del problema²⁵.
- **Nodos:** En la **Figura 18** se observa la repartición de los nodos de quince (15) y seis (6) nodos. Los elementos próximos se unen por medio de sus nodos comunes, en los nodos se calculan los desplazamientos (u_x y u_y), para la

²⁴ Modelamiento de problemas de estructuras de contención lateral mediante programa de elementos finitos.

²⁵Ibíd.

generación de una curva carga-desplazamiento se preseleccionan algunos nodos de interés antes del procesamiento de datos²⁶.

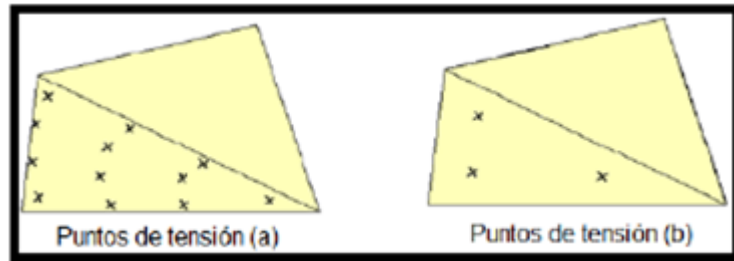
Figura 18: Posición de los nodos en un elemento.



Fuente: Modelamiento de problemas de estructuras de contención lateral mediante programa de elementos finitos.

- **Puntos de tensión:** Los elementos triangulares de quince (15) nodos posee doce (12) puntos de tensión y los de seis (6) contienen tres (3) puntos como se señala en la **Figura 19-a** y **Figura 19-b**. Al seleccionar estos puntos antecediendo al procesamiento de datos podemos realizar graficas de esfuerzos o diagramas de esfuerzos-deformación.

Figura 19-a y Figura 19-b: Puntos de tensión.



Fuente: Modelamiento de problemas de estructuras de contención lateral mediante programa de elementos finitos.

²⁶ Ibíd.

2.2 APLICACIONES DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS EN LA INGENIERÍA.

Inicialmente el método de elementos finitos se desarrolló para el análisis de problemas aeronáuticos. Al conocer de mejor manera la teoría del método se vio la posibilidad de aplicarla en una gran variedad de problemas que giran en torno de la ingeniería. Un problema de valores de frontera requiere buscar una solución en el dominio (o región) de un cuerpo sujetos a la satisfacción de los límites propuestos (bordes de frontera), las condiciones de las variables dependientes o sus derivados. En el **Anexo B** se señala algunas aplicaciones del método de elementos finitos en la solución de problemas de frontera, problemas de equilibrio y de valor inicial. Los problemas de equilibrio se deben encontrar el desplazamiento en estado estacionario o la repartición de esfuerzos en el caso de un problema de mecánica de sólidos, la distribución de la temperatura o la del flujo de calor si se trata de un problema de transferencia de calor, y la presión o la velocidad en problemas de mecánica de fluidos.

En casos de problemas de valor inicial, el tiempo no aparece explícitamente. Se toman como extensiones de problemas de equilibrio en los cuales, los valores críticos de algunos parámetros que adicionan las configuraciones de estado estacionarios correspondientes. En situaciones de complejidad en problemas de circuitos eléctricos se pueden hallar características de resonancia, estabilidad del flujo laminar en mecánica de fluidos entre otras aéreas de ingeniería. En los problemas transitorios o de propagación los cuales dependen del tiempo. Un interés común para este tipo de problemas es el interés de conocer una respuesta de un cuerpo en contacto de una fuerza variable en el tiempo, como ocurre en problemas de mecánica de sólidos²⁷.

²⁷ Análisis de sistemas de cimentación de acuerdo a la NSR-10 usando elementos finitos en 3D, caso aplicado al edificio Majestic.

3. PROPIEDADES DE LOS PERFILES DE INTERES Y MONTAJE DE MODELOS A ESTUDIAR.

3.1 PROPIEDADES DE LOS SUELOS.

Mencionando información antes suministrada en este documento se decidió realizar el estudio competente en diferentes tipos de suelos. Los distintos perfiles de suelos son los siguientes: perfil arenoso (terreno bueno), perfil areno-arcilloso (terreno regular) y perfil arcilloso (terreno malo). Por medio del ensayo de penetración estándar (SPT) se obtuvieron los datos necesarios de los perfiles y de ese modo ser ajustados para su utilización adecuada.

3.1.1 Módulo de elasticidad. La teoría de elasticidad puede usarse para calcular el asentamiento elástico de cimentaciones, que contienen los parámetros elásticos, tales como la relación de Poisson μ_s y el módulo de elasticidad E. Debido a que la obtención de los valores de laboratorio para el módulo de elasticidad E son costosos y generalmente no son muy buenos por la perturbación del muestreo, el ensayo de penetración estándar (SPT) ha sido utilizado ampliamente para obtener el módulo de elasticidad E resultante de las ecuaciones y/o correlaciones empíricas²⁸.

Varios investigadores correlacionan los valores de módulo de elasticidad E, con el número de penetración estándar en campo N. Schmertmann (1970) indico que el módulo de elasticidad de la arena se da por:

$$E_s = 8Np_a$$

Dónde:

²⁸DAY, Robert W. Foundation Engineering Hand book. New York: McGraw-Hill, 2006.

N= resistencia a la penetración estándar.

p_a = presión atmosférica $\approx 100 \text{ KN/m}^2$

El módulo de elasticidad de arcillas normalmente consolidada, se estima como:

$$E_s = 250C \text{ a } 500C$$

Donde C= cohesión de suelo de arcilla.

La **Tabla 4** muestra el rango aproximado de los parámetros elásticos para diferentes suelos.

Tabla 4. Parámetros elásticos para diferentes suelos.

Tipo de suelo	Módulo de elasticidad E		Relación de Poisson, μ_s
	MN/m ²	lb/pulg ²	
Arena suelta	10,5-24,0	1500-3500	0,20-0,40
Arena densa media	17,25-27,60	2500-4000	0,25-0,40
Arena densa	34,50-55,20	5000-8000	0,3-0,45
Arena limosa	10,35-17,25	1500-2500	0,20-0,40
Arena y grava	69,00-172,50	10000-25000	0,15-0,35
Arcilla suave	4,1-20,7	600-3000	0,15-0,20
Arcilla media	20,7-41,4	3000-6000	0,20-0,50
Arcilla firme	41,4-96,6	6000-14000	

Fuente: Braja M Das.

3.1.2 Peso específico. Los suelos en la naturaleza son sistemas de tres fases que consisten en partículas sólidas de suelo, agua y aire (**Figura 20**).

Con base a estas fases se pueden definir las relaciones gravimétricas y volumétricas de un suelo y de esta manera obtener el peso específico seco y el peso específico saturado.

Figura 20. Relaciones peso-volumen.



Fuente: Autores.

Las relaciones por peso son:

$$\text{Contenido de agua} = w \% = \frac{W_w}{W_s} * 100$$

Dónde:

W_s = peso de sólidos del suelo.

W_w = peso del agua.

$$\text{Peso específico seco} = \gamma_d = \frac{W_s}{V}$$

$V = V_a + V_w + V_s$ = volumen total del suelo.

Para una masa de suelo completamente saturada (es decir, todo el volumen de vacíos está lleno de agua), se considera una muestra representativa del suelo en el que el volumen de los sólidos es igual a la unidad. **(Figura 21)**²⁹

²⁹ Op. Cit. BRAJA

Figura 21: Relaciones peso- volumen (Suelo saturado).



Fuente: Autores.

Entonces el peso de los sólidos del suelo y el peso del agua se pueden definir como:

$$W_s = G_s \gamma_w W_w = w G_s \gamma_w$$

Dónde:

G_s = peso específico relativo de los sólidos del suelo o densidad.

γ_w = peso específico del agua ($9,81 \text{ KN/m}^3$), la relación general para el peso específico saturado del suelo es:

$$\text{Peso específico saturado} = \gamma_{sat} = \frac{W_s + W_w}{V_s + V_w} = \frac{G_s \gamma_w (1 + w)}{V_s + V_w}$$

La **Tabla 5** proporciona algunos valores representativos del peso específico relativo de los sólidos.

Tabla 5: Peso específico relativo de los sólidos para algunos tipos de suelo.

Tipo de suelo	Gs
Arena	2,64-2,66
Limo	2,67-2,73
Arcilla	2,70-2,9
Yeso	2,60-2,75
Loess	2,65-2,73
Turba	1,30-1,9

Fuente: Braja M Das.

3.1.3 Resistencia efectiva, fricción (ϕ) y cohesión (C). Álvaro J González (profesor de la Universidad Nacional de Bogotá), presento un método aproximado para la evaluación de los parámetros efectivos de resistencia ϕ y C, mediante el empleo de los datos del ensayo de penetración estándar (SPT). Aunque el método provee valores estimados, se obtienen resultados razonables, especialmente para materiales granulares o intermedios, siendo menos aproximado para materiales cohesivos. El procedimiento para obtener los valores de resistencia efectiva ϕ y C, es el siguiente:

- Calcular los esfuerzos efectivos σ' para cada uno de los materiales obtenidos con los sondeos.

$$\sigma' = \sigma - u$$

Dónde:

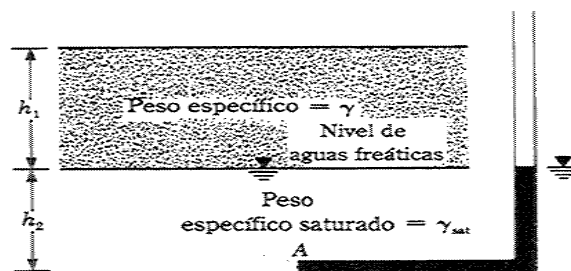
$\sigma = \gamma h$ = esfuerzo vertical.

$u = \gamma_w h$ = presión del agua de poro.

Para el caso de la **Figura 22**, el esfuerzo efectivo en el punto A se calcula de la siguiente manera.

$$\sigma' = h_1\gamma + h_2\gamma_{sat} - h_2\gamma_w$$

Figura 22: Calculo del esfuerzo efectivo.



Fuente: Braja M Das.

- Debido a que el ensayo de penetración estándar (SPT) tiene varios factores que contribuyen a la variación del número de penetración estándar N . Algunos de estos factores son la eficiencia del martillo SPT, el diámetro de la perforación, el método de muestreo y el factor de longitud de la barra perforadora.

Con base a dichas observaciones el valor N de campo debe corregirse de la siguiente manera³⁰:

$$N_{corr} = C_n N$$

Dónde:

C_n = factor de corrección.

Seed-Idriss propuso la siguiente relación para el cálculo de C_n

$$C_n = 1 - K * \log(R_s)$$

$$R_s = \frac{\sigma'}{p_a}$$

$p_a \approx 100 \text{ KN/m}^2$ = presión atmosférica.

σ' = esfuerzo efectivo.

$K = 1,41$ para $R_s < 1$; $K = 0,92$ para $R_s \geq 1$

- Para obtener el ángulo de fricción ϕ , se utiliza la correlación de Kishida

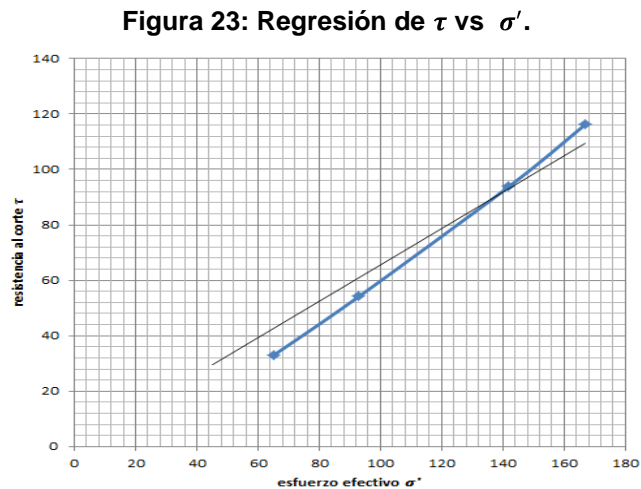
$$\phi = 15 + (12,5 * N_{corr})^{0,5}$$

³⁰GONZÁLEZ, Álvaro J.

- Se calcula la resistencia al corte del suelo.

$$\tau = \sigma' * \tan(\phi)$$

- Finalmente se hace la regresión de τ vs σ' para cada tipo de material y se obtiene la cohesión C **Figura 23**.



Fuente: Autores.

3.2 PERFILES DE SUELOS

Basados en los sondeos del ensayo de penetración estándar (SPT), se obtuvo la estratificación del suelo y la línea del nivel freático. De las ecuaciones y tablas anteriores; se obtuvieron los valores correspondientes a las propiedades de cada suelo.

3.2.1 Perfil arenoso. De acuerdo con los datos arrojados por los sondeos y el proceso de correlación se puede definir al perfil arenoso con un estado húmedo y el nivel freático a aproximadamente 3 metros bajo la superficie del terreno

Tabla 6: Propiedades de los materiales (perfil arenoso).

Profundidad (m)	Descripción del material	Peso específico seco (KN/m ³)	Peso específico saturado(KN/m ³)	Módulo de elasticidad (KN/m ²)	Relación de Poisson, μ_s	Fricción (grados)	Cohesión (KN/m ²)
0.00-5.50	Limo arenoso, de baja plasticidad, de humedad media-alta.	15	18	12000	0,25	24	15
5.50-9.50	Arena limosa, de grano medio-grueso, de humedad alta.	15	17	15000	0,3	26	15
9.50-16.50	Arena mal gradada con limo, de humedad alta.	15	17	24000	0,3	30	5
16.50-30.00	Material aluvial, pobremente gradada, humedad baja.	18	20	120000	0,3	34	1

Fuente: Autores.

3.2.2 Perfil areno-arcilloso. Los materiales del perfil areno-arcilloso, presentan húmeda variada, son poco consistentes y el nivel freático se encuentra a tres metros (3 m) de la superficie del terreno.

Tabla 7: Propiedades de los materiales (perfil areno-arcilloso).

Profundidad (m)	Descripción del material	Peso específico seco (KN/m ³)	Peso específico saturado(KN/m ³)	Módulo de elasticidad (KN/m ²)	Relación de Poisson, μ_s	Fricción (grados)	Cohesión (KN/m ²)
0.00-5.50	Arcilla ligera, humedad alta, poco consistente.	15	18	9000	0,15	20	25
5.50-16.50	Arena arcillosa, humedad media, poco consistente.	16	18	13000	0,25	30	30
16.50-30.00	Aluvial	18	20	120000	0,3	34	1

Fuente: Autores.

3.2.3 Perfil arcilloso. El perfil arcilloso, se considera poco consistente, con humedad alta y un nivel freático localizado a dos punto noventa metros (2.9 m) de la superficie del terreno, en la **Tabla 8** vemos los resultados del ajuste ya mencionado en este capítulo.

Tabla 8: Propiedades de los materiales (perfil arcilloso)

Profundidad (m)	Descripción del material	Peso específico seco (KN/m ³)	Peso específico saturado(KN/m ³)	Módulo de elasticidad (KN/m ²)	Relación de Poisson, μ_s	Fricción (grados)	Cohesión (KN/m ²)
0.00-7.00	Arcilla ligera arenosa, humedad alta, poco consistente	15	18	9000	0,15	20	25
7.00-30.00	Arena mal gradada con limo, de humedad alta.	15	17	24000	0,3	30	5

Fuente: Autores.

3.3. MONTAJE DE MODELOS

3.3.1 Datos y soporte del tanque de almacenamiento. Para desarrollar los modelos inicialmente se debe hablar del objetivo que estos esperan alcanzar, el cual es soportar un tanque de almacenamiento de las siguientes especificaciones (**Figura 23**):

Capacidad: 8200 ton

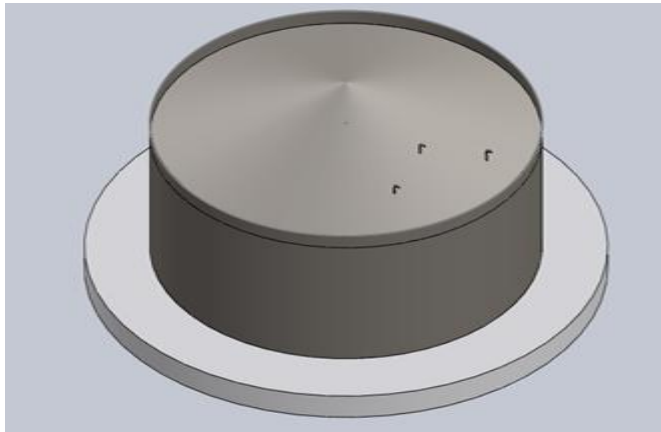
Diámetro: 30 m

Área: 706.86m²

Altura: 11.6 m

Esfuerzo generado: 120 KN/m²

Figura 24: Tanque de almacenamiento con soporte.



Fuente: Autores.

El modelo tendrá un soporte circular que consta de una viga anular de concreto reforzado de $30 \times 90 \text{ cm}^2$ y en su interior lleva una base granular de gran capacidad (usualmente usadas en carreteras), este soporte es el encargado de transmitir las cargas del tanque al terreno y posee las siguientes características:

Módulo de elasticidad: 70000 KN/m^2

Angulo de fricción: 37°

Cohesión: 5 KN/m^2

Peso específico seco: 17 KN/m^3

Peso específico saturado: 20 KN/m^3

En el caso de la viga anular se dispuso de las próximas propiedades a mencionar:

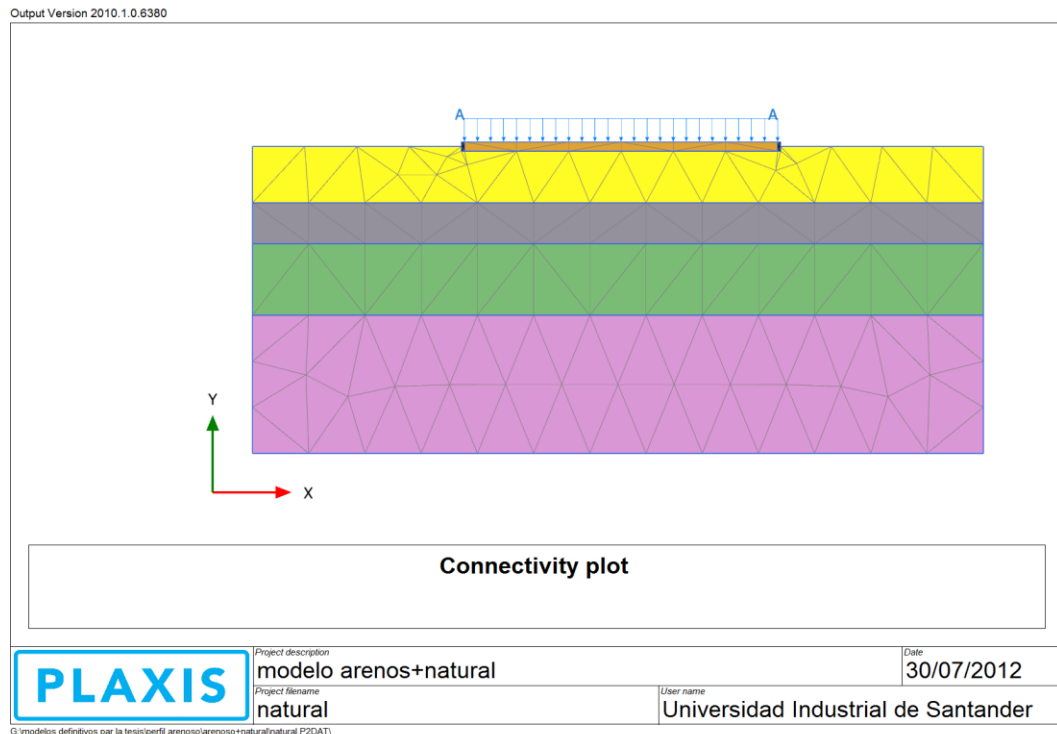
Módulo de elasticidad: 5100000 KN/m^2

Densidad concreto reforzado: 24 KN/m^3

3.3.2 Perfil arenoso natural. Por ello se busca diversas soluciones para cimentaciones de tanques del almacenamiento en terrenos ya mencionados, debido a ese objetivo se va a realizar el estudio desde el punto de vista de un terreno sin algún tipo de cimentación el cual se llamara “arenoso+natural”, para tener un ejemplo de la nomenclatura a emplear. Para esta situación el suelo no

contara con ningún tipo de capa que aporte mayor resistencia para soportar el tanque (**Figura 24**).

Figura 25: Perfil arenoso+natural.



Fuente: Autores.

3.3.3 Perfil arenoso con relleno. Como paso consecutivo en el estudio se añadió un relleno granular el cual tiene unas características importantes muy parecidas a la base granular en la que se apoya el tanque, con una profundidad de tres metros (3 m) con respecto a la superficie y a una distancia “d” igual a diez metros (10 m) del soporte del tanque, este modelo se nombró “arenoso+base” (**Figura 25**). Sobre la información utilizada en el relleno se presenta los de datos de entrada para el software.

Módulo de elasticidad: 65000 KN/m²

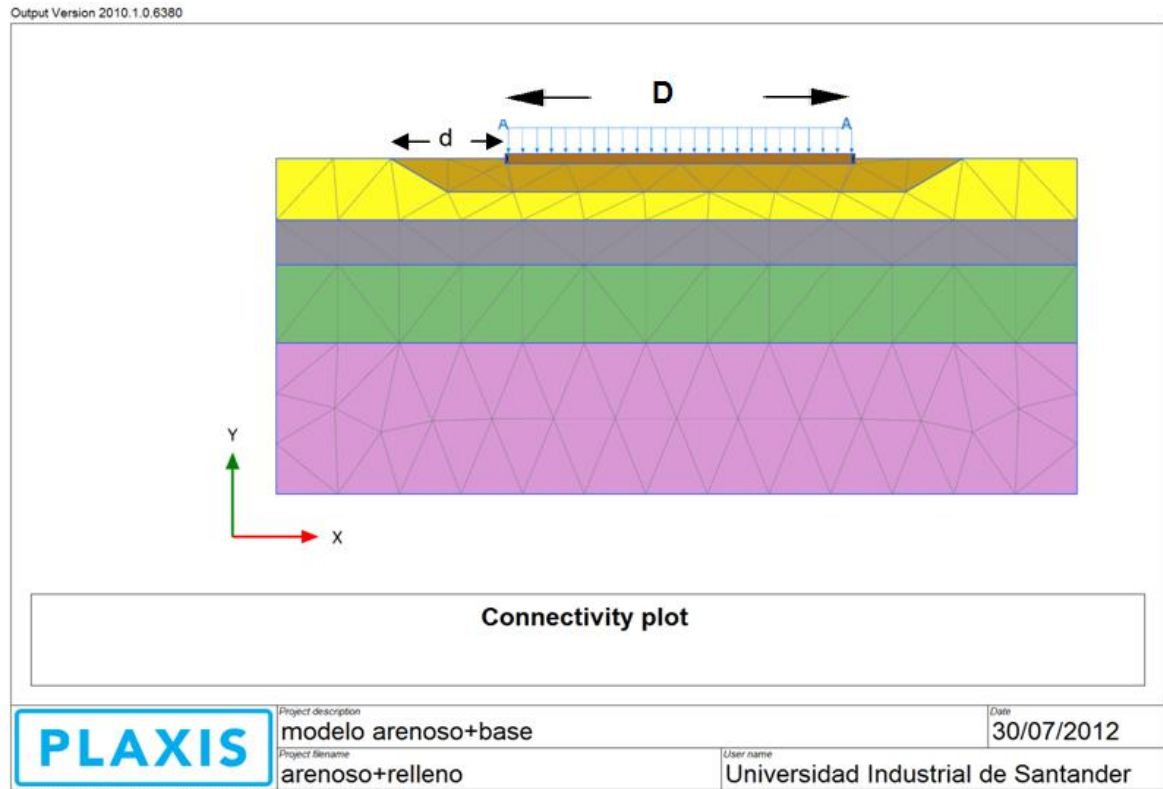
Angulo de fricción: 37°

Cohesión: 5 KN/m²

Peso específico seco: 18 KN/m^3

Peso específico saturado: 20 KN/m^3

Figura 26: Perfil arenoso+base.



Fuente: Autores.

Para efectos de mayor precisión en este estudio se decidió variar la longitud del soporte al relleno usando como parámetro el diámetro del tanque ($D=30 \text{ m}$), se utilizaron distancias de $d=0.1D$, $d=0.2D$ y $d=0.5D$ (**Anexo C**).

3.3.4 Perfil arenoso con relleno y pilotes. En el siguiente modelo se contempla usar cimentaciones rígidas como lo son los pilotes de concreto reforzado, así que mediante la instalación de pilotes en la parte inferior del relleno granular donde los primeros treinta centímetros (30 cm) están embebidos en el relleno. Los pilotes cuentan con las siguientes características:

Módulo de elasticidad: 25 GPa, incluye el acero de refuerzo.

Longitud: 17 m

Diámetro: 0.8 m

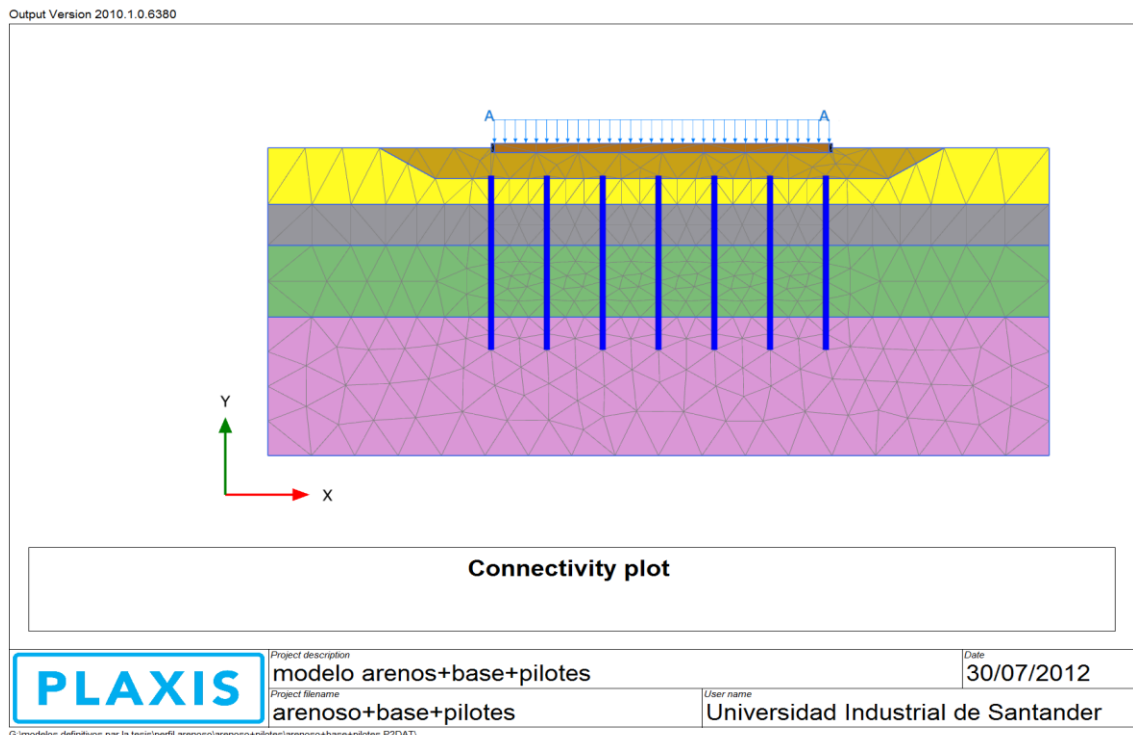
Área: 0.50265482 m²

Inercia: 0.02010619 m⁴

Peso: 12.06 KN/m

Para seguir usando la misma nomenclatura se llamara “arenoso+base+pilotes”
(Figura 26).

Figura 27: Perfil arenoso+base+pilotes.

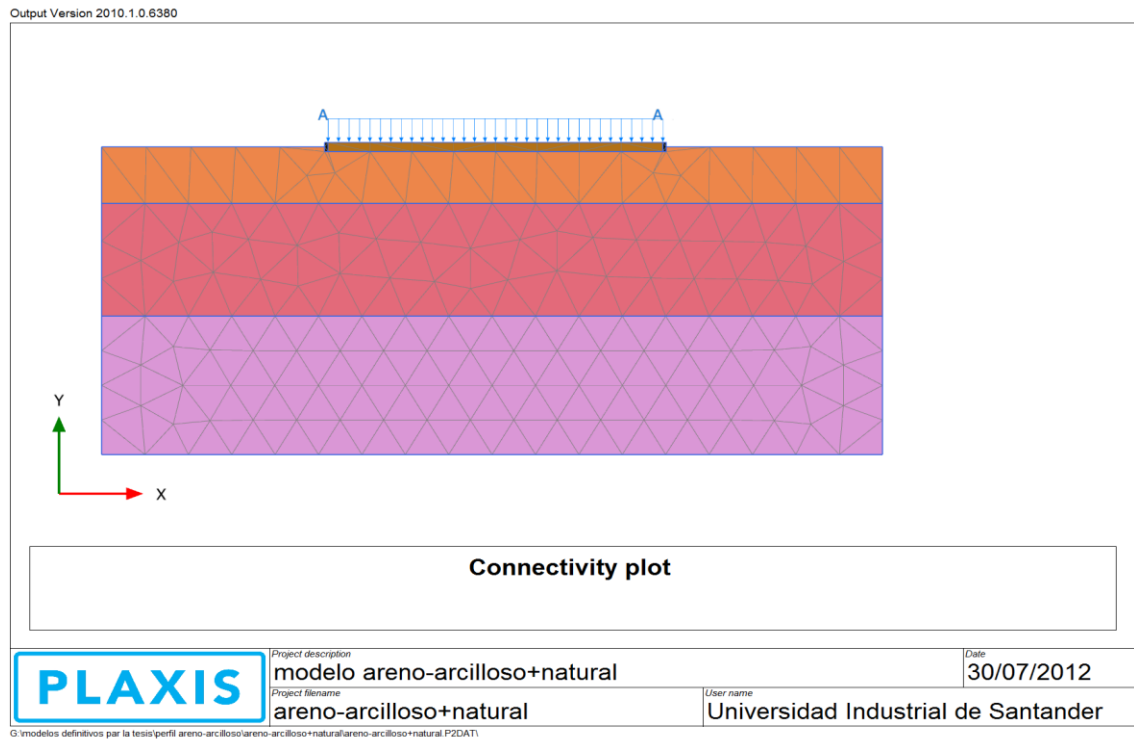


Fuente: Autores.

3.3.5 Perfil areno-arcilloso natural. Seguidamente se plantea un modelo similar al perfil arenoso natural pero con condiciones de un suelo areno-arcilloso, el cual presenta propiedades no tan buenas como en uno arenoso y de ese modo

sustentar lo propuesto en los objetivos de la tesis. Se espera en este perfil la necesidad de incluir soluciones más complejas a causa de su estabilidad. Retomando el título del literal se presenta el “areno-arcilloso+natural” (**Figura 27**).

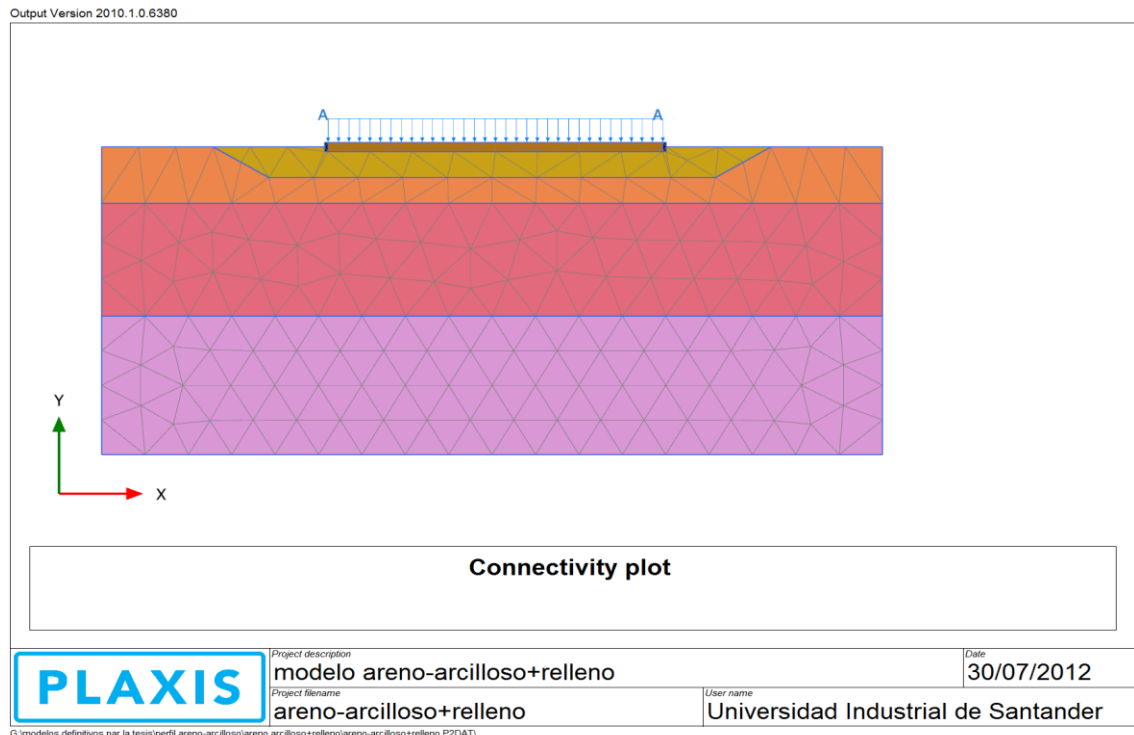
Figura 28: Perfil areno-arcilloso+ natural.



Fuente: Autores.

3.3.6 Perfil areno-arcillos con relleno. Adicionando un relleno anteriormente especificado se da a conocer el siguiente modelo esperando un mejor comportamiento antes las cargas producidas por el tanque, avanzando en el estudio se presenta el “areno-arcilloso+base” (**Figura 28**).

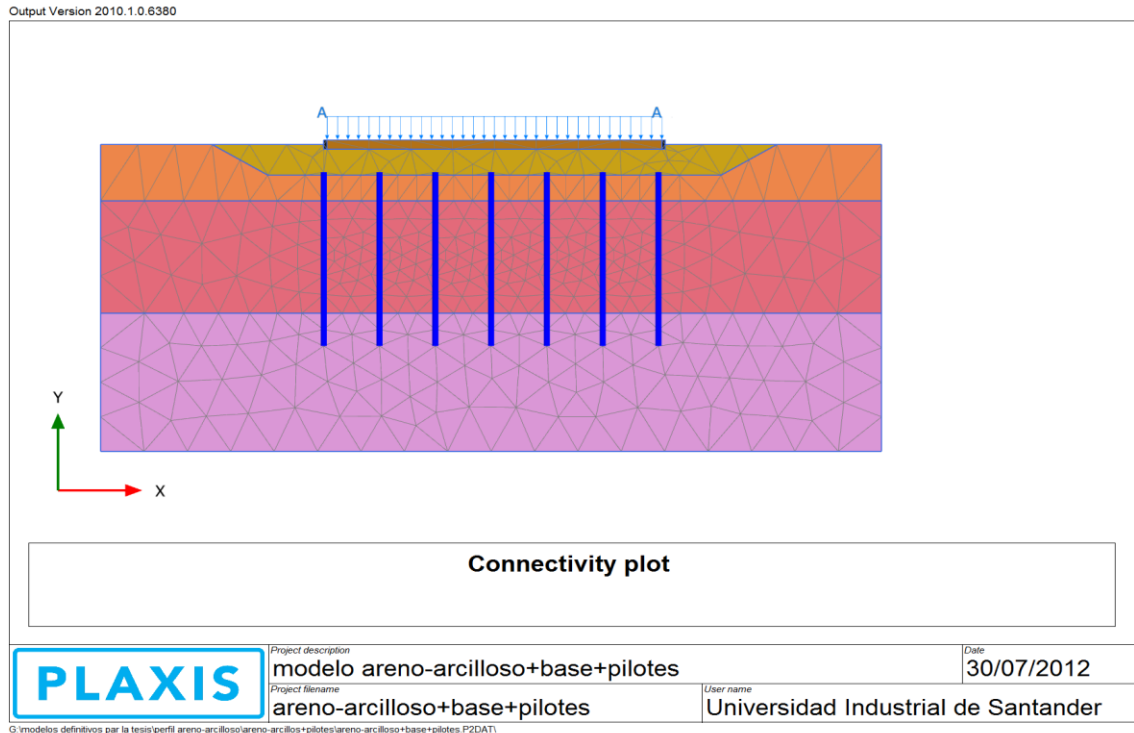
Figura 29: Perfil areno-arcilloso+base.



Fuente: Autores.

3.3.7 Perfil areno-arcilloso con pilotes. Utilizando la misma cimentación para el perfil arenoso+pilotes, se instala en este modelo pilotes para obtener resultados más aptos en la situación expuesta, los pilotes son idénticos a los usados anteriormente, su nombre es “areno-arcilloso+base+pilotes” (**Figura 29**).

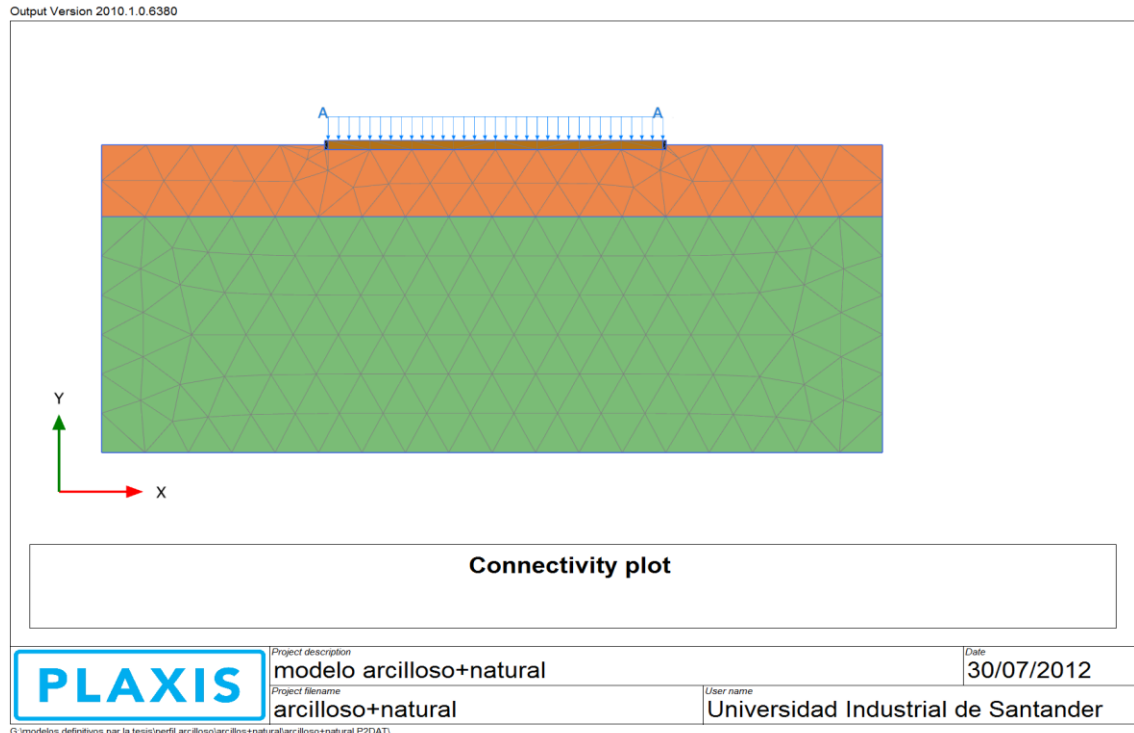
Figura 30: Perfil areno-arcilloso+base+pilotes



Fuente: Autores.

3.3.8 Perfil arcilloso natural. Retomando la investigación con el suelo arcilloso el cual tiene características deficientes antes los anteriores perfiles, se ve a continuación el modelo con nombre “arcillos+natural” (**Figura 30**).

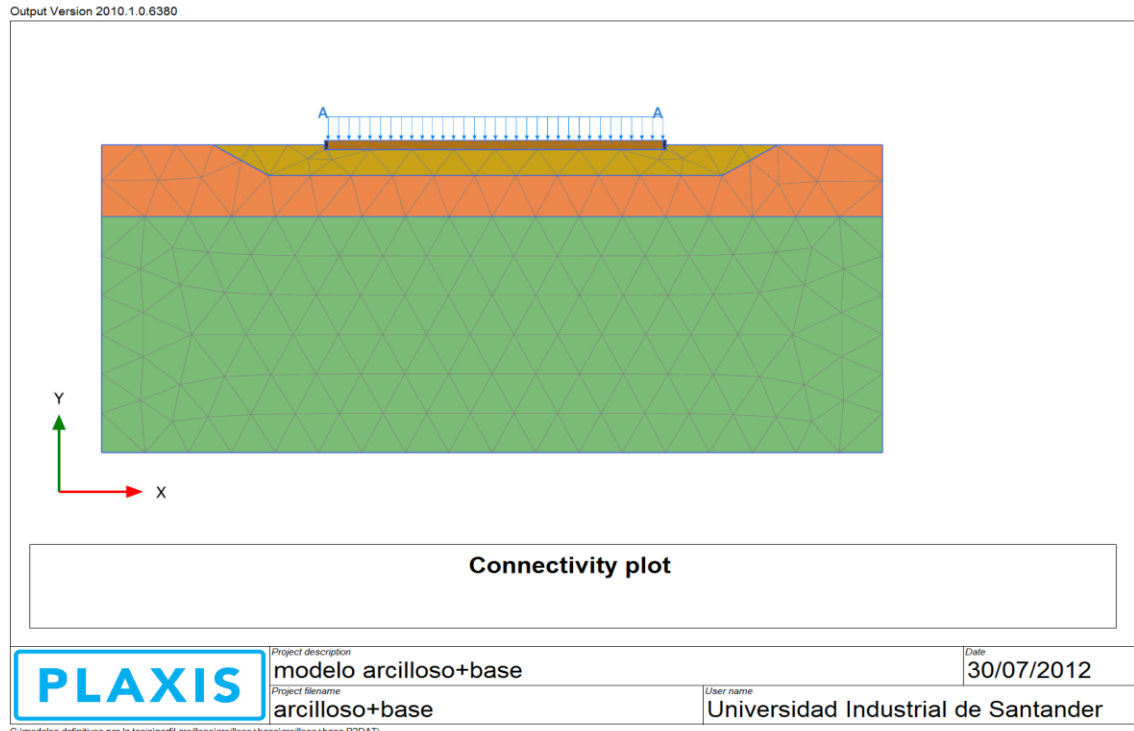
Figura 31: Perfil arcilloso+natural.



Fuente: Autores.

3.3.9 Perfil arcilloso con relleno. Teniendo en cuenta el proceso de los anteriores modelos, el perfil arcilloso tendrá como modificación un relleno granular para ver sus reacciones debido a las solicitaciones previstas, llamado “arcilloso+base” (**Figura 31**).

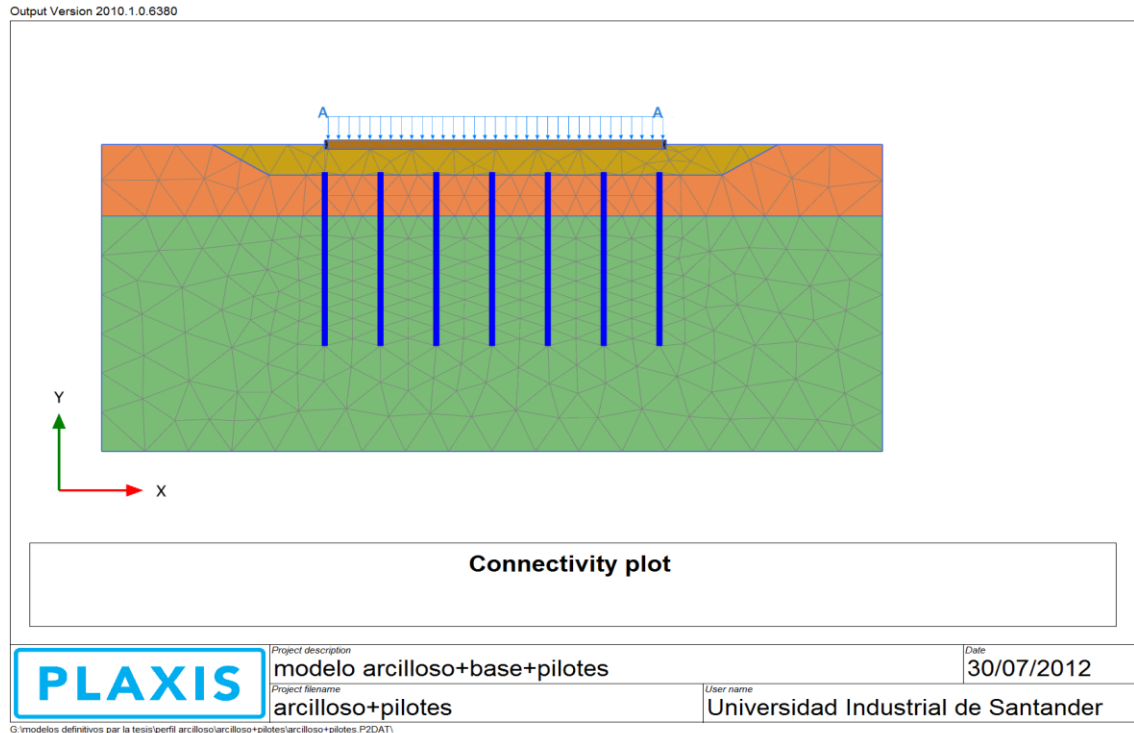
Figura 32: Perfil arcilloso+base.



Fuente: Autores.

3.3.10 Perfil arcilloso con pilotes. Consecutivamente al perfil arcilloso+base se introduce pilotes de concreto reforzado en la parte inferior del relleno y conocer nuevamente su comportamiento cuando es cargado, tendrá como nombre “arcilloso+base+pilotes” (**Figura 32**).

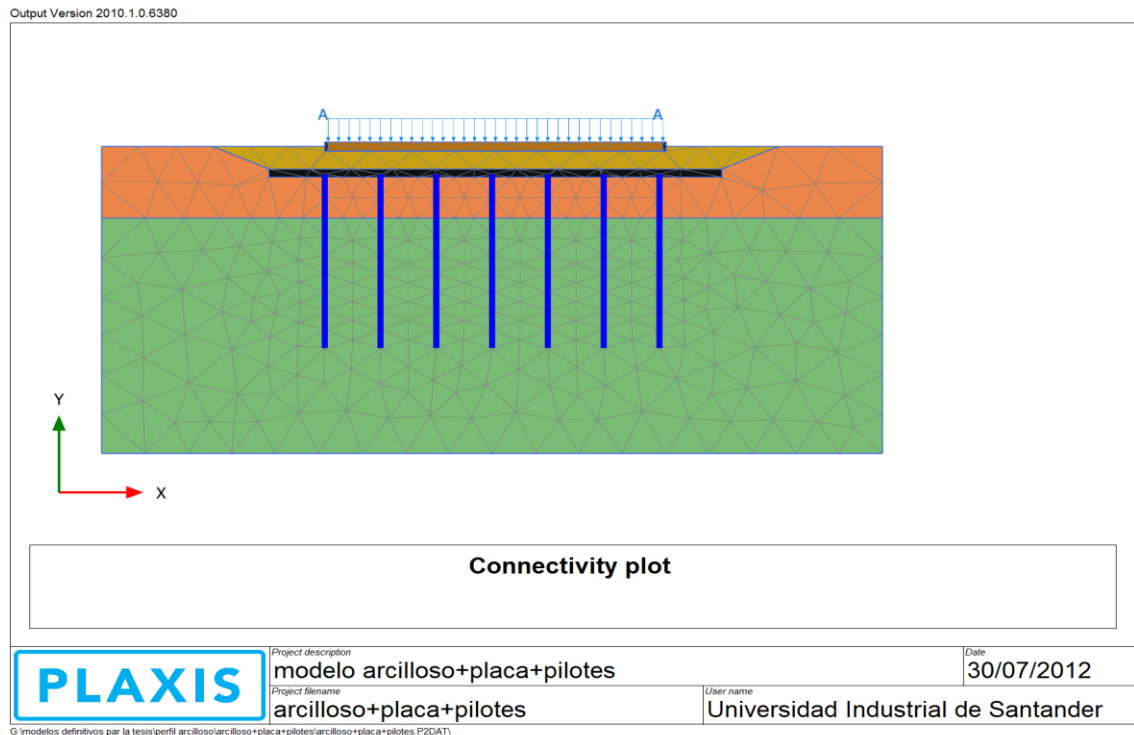
Figura 33: Perfil arcilloso+base+pilotes.



Fuente: Autores.

3.3.11 Perfil arcilloso con placa y pilotes. Ahora se empleara un tipo de cimentación de mayor complejidad la cual consta de un modelo similar al anterior sumádo una placa de concreto reforzado debajo del relleno granular y donde los pilotes estarán embebidos esta vez en los treinta centímetros (30 cm) iniciales para que haya buena conexión en el sistema de apoyo para transmitir los esfuerzos a estratos con mayor resistencia (**Figura 33**).

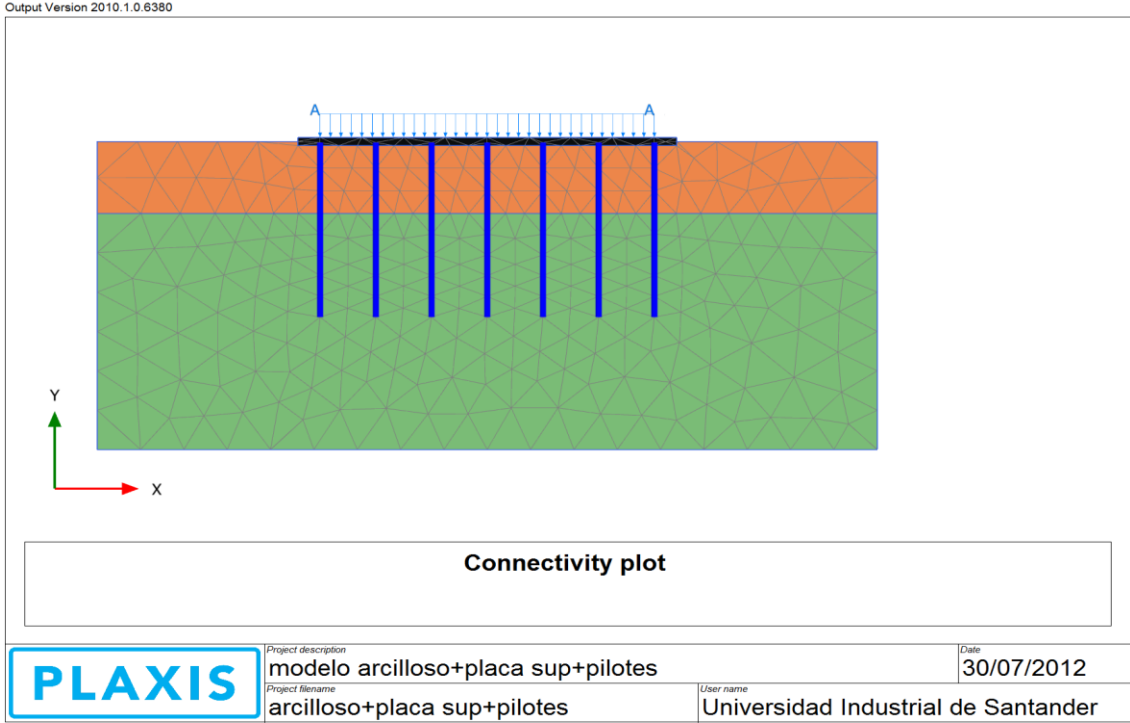
Figura 34: Perfil arcilloso+placa+pilotes.



Fuente: Autores.

3.3.12 Perfil arcilloso con placa superior y pilotes. Ampliando los alcances de la investigación se realizó un nuevo modelo donde se varia la ubicación de un cimiento compuesto de una placa de concreto reforzado y pilotes adheridos en su parte inferior, de tal forma se remueve el relleno granular puesto con la nueva posición del cimiento no dará algún aporte importante. Buscando de esa manera el mejor comportamiento del sistema y poder hacer comparaciones significativas para lograr el objetivo propuesto en este documento, por lo tanto la **Figura 34** se presenta “arcilloso+placasup+pilotes”.

Figura 35: Perfil arcilloso+placasup+pilotes.



Fuente: Autores.

4. ANALISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS EN PLAXIS 2D

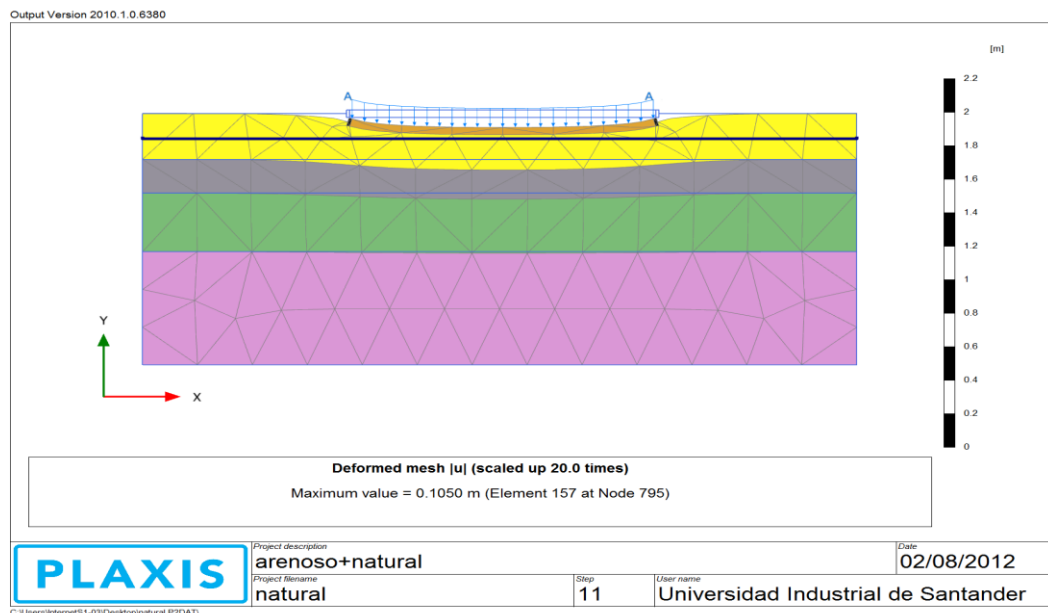
En este capítulo se realizara un análisis de cada modelo simulado en el software y conocer los datos de interés para concluir si las soluciones propuestas satisfacen la investigación.

4.1 PERFIL ARENOSO

En este nuevo ítem se observa que ocurrió con los perfiles tipo arenoso y todas sus variantes con las que se espera obtener resultados coherentes a la experiencia y la tendencia estimada en los objetivos de este oficio.

4.1.1 Resultados del perfil arenoso natural

Figura 36: Resultado del perfil arenoso+natural

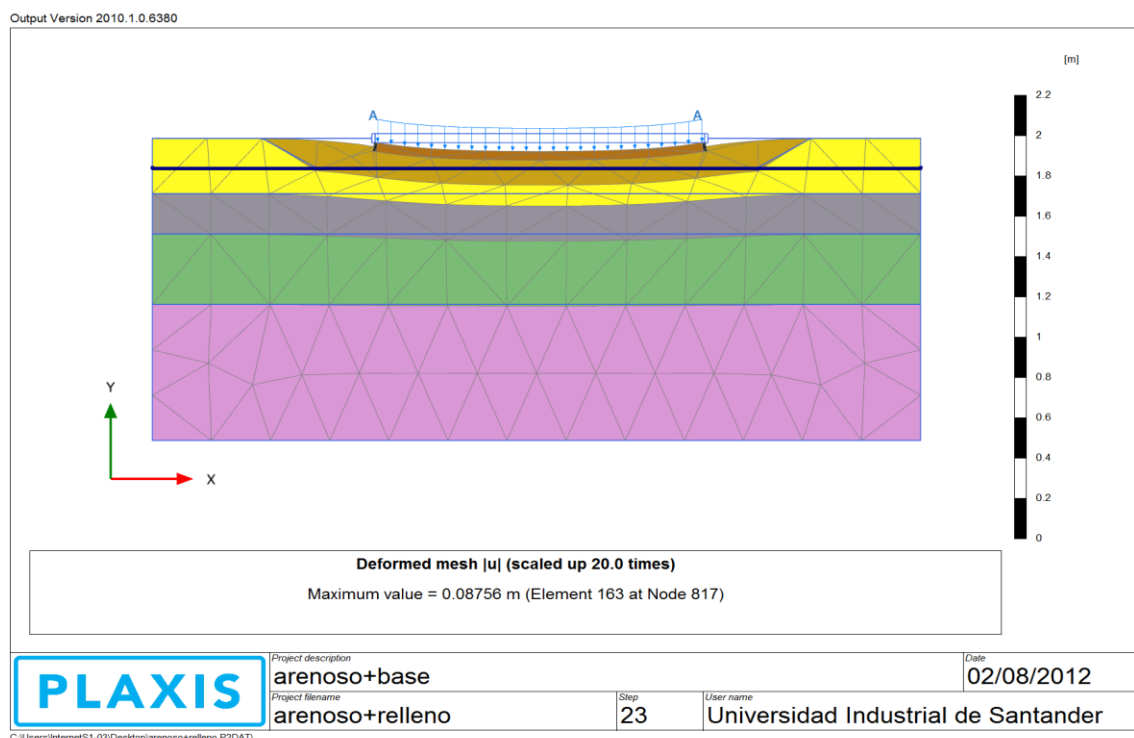


Fuente: Autores.

En la imagen se aprecia una deformación máxima de diez punto cinco centímetros (10.5 cm) que para una estructura de esta magnitud es una deformación alta. El esfuerzo de mayor magnitud está en el estrato aluvial con un valor de ochocientos ochenta y ocho punto cinco (888.5 KN/m²), otros datos importantes ver **Anexo D**.

4.1.2. Resultados del perfil arenoso con relleno.

Figura 37: Resultados del perfil arenoso+base.

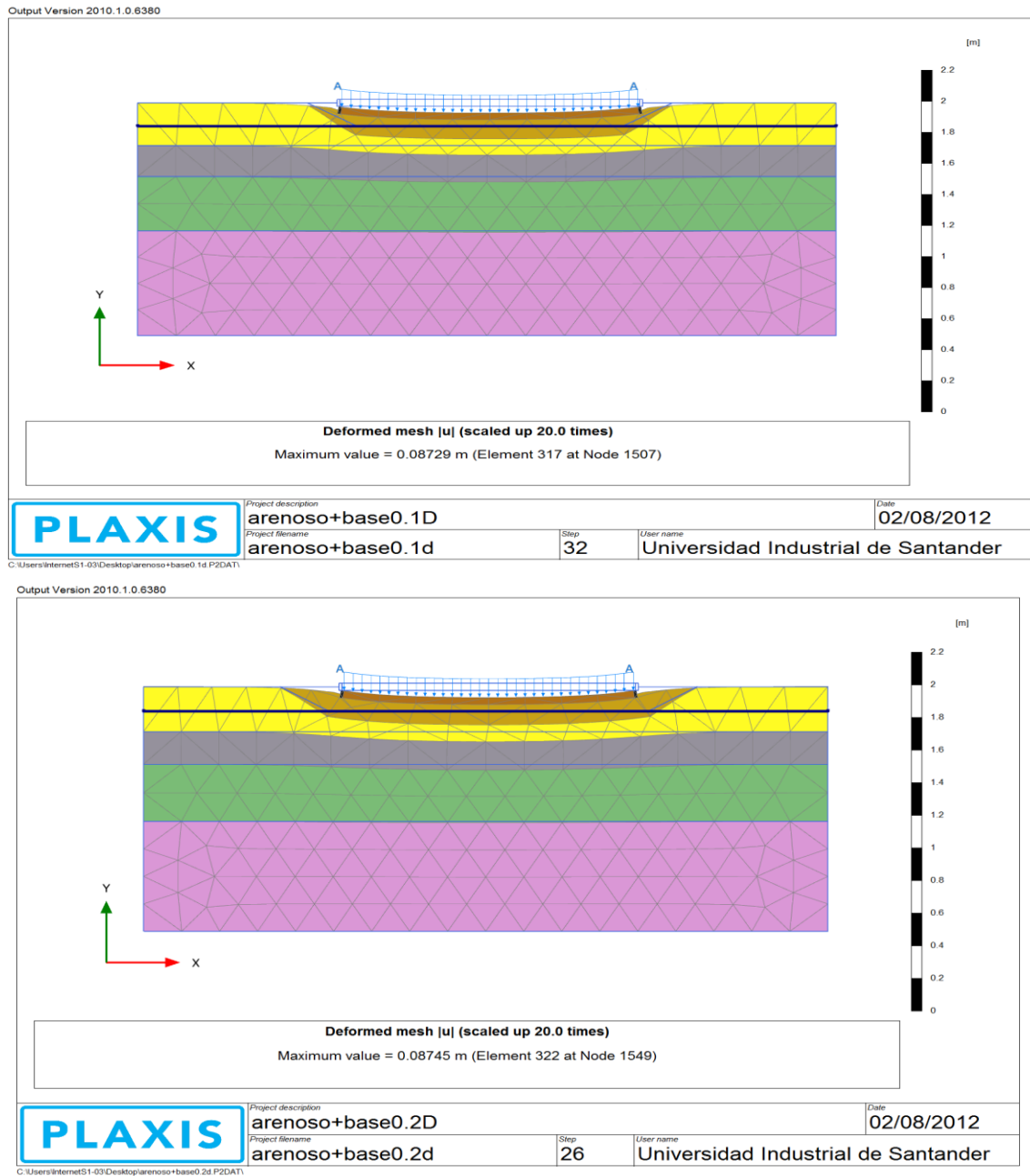


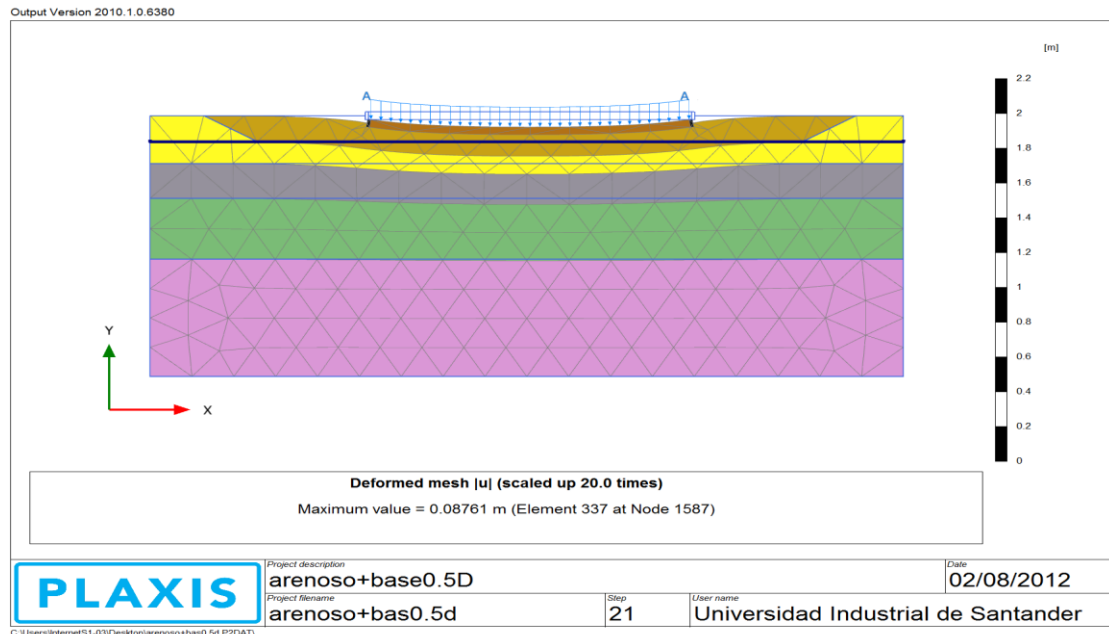
Fuente: Autores.

En esta grafica se puede apreciar como el relleno aporta un efecto a la deformación considerable pero aun así no el esperado puesto su deformación máxima alcanzo ocho punto setenta y cinco centímetros (8.75 cm) siendo aún elevado para esta obra. Con un valor de seiscientos cuarenta y tres punto nueve (643.9 KN/m²) el máximo esfuerzo se ubica en el suelo inferior, siguiendo la tendencia del modelo anterior. Ver más resultados en el **Anexo E**.

Ahora se presenta los resultados obtenidos con las diferentes variantes que se propusieron en el perfil arenoso y aumentar el rango de posibilidades, buscando cambios significativos que den aporte importante al estudio y plantearlos como soluciones posibles ante la solicitud que se desea alcanzar.

Figura 38: Resultados de los perfiles arenoso modificados.



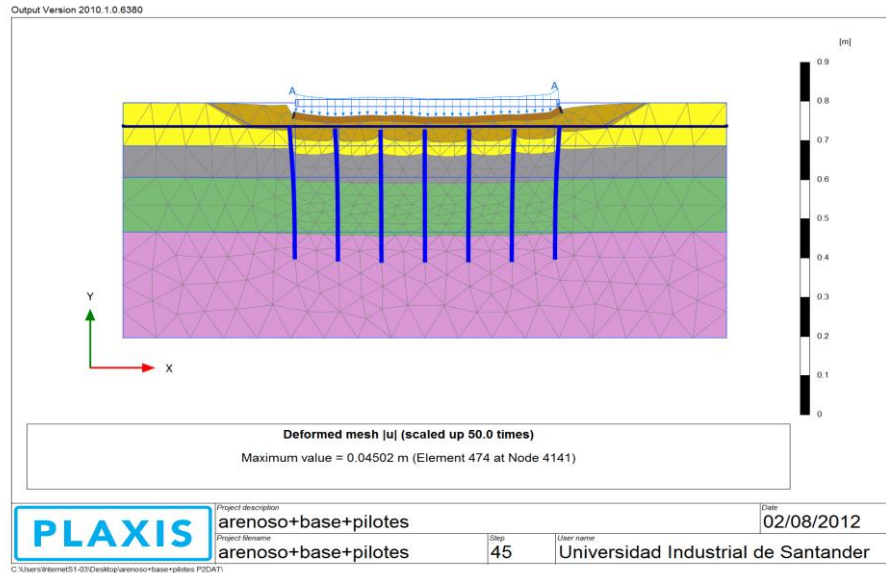


Fuente: Autores.

Esclareciendo las dudas propuestas por las modificaciones en el perfil arenoso son resueltas al conocer los datos que da el software y se ve que la información obtenida en estos casos no es importante ya que tiene valores muy similares en los cuales la diferencia está por milímetros, por lo tanto se desprecia los cambios adaptados y debido a su poca ayuda no serán tenidos en cuenta en los modelos de los demás perfiles. Información adicional en el **Anexo F**.

4.1.3 Resultados del perfil arenoso con pilotes. Inicialmente cuando se plantearon los objetivos de esta investigación se pensó que en este perfil no se haría necesario implementar una cimentación rígida como son los pilotes de concreto reforzado ya que es un suelo con condiciones buenas y a su vez generaría costos muy elevados aunque en el estudio no se tiene en cuenta el valor económico que pueda llegar a representar las soluciones propuestas. Después de haberse conocido los resultados del modelo anterior se decidió adicionar este tipo de cimentación buscando un mejor comportamiento del terreno ante la carga dada por el tanque (**Figura 38**).

Figura 39: Resultados del perfil arenoso con pilotes.

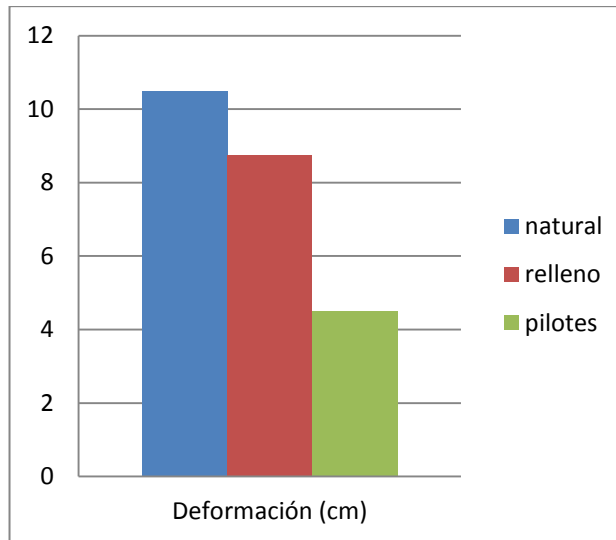


Fuente: Autores.

Aquí se reconoce una reducción bastante significativa en la deformación ya que alcanza un valor de cuatro punto centímetros (4.5 cm) el cual representa aproximadamente el cincuenta y uno por ciento (51%) del valor arrojado en el modelo anterior siendo el menor dato obtenido. En este modelo el esfuerzo máximo está en la punta de los pilotes es de dos mil ciento veinte y seis (2126 KN/m^2), siendo el pilote central que soporta mayor carga axial (892.1 KN/m), desplazamiento (1.37 cm), la fuerza cortante (35.36 KN/m) y el momento flector (117 $\text{KN}\cdot\text{m/m}$) crítico esta en los pilotes extremos. En el **Anexo G** se adjunta información adicional.

4.1.4 Comparación de resultados.

Figura 40: Comparación de Resultados perfil arenoso



Fuente: Autores.

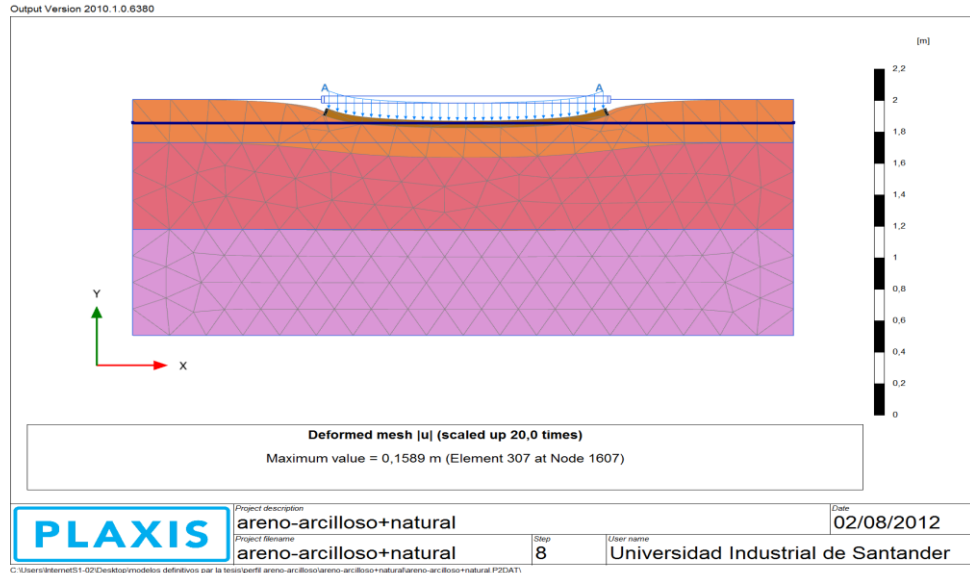
En el grafico comparativo se aprecia la disminuci3n en la deformaci3n al implementar apoyos para esta situaci3n. El modelo con relleno tiene el 83.42% de la deformaci3n del suelo natural, en el caso de los pilotes muestra un valor de 42.85% del caso natural.

4.2 PERFIL ARENO-ARCILLOSO

En esta parte del documento se centrara en el los valores obtenidos por el software del perfil areno-arcilloso con las que se argumentan si las soluciones propuestas en este tipo de terreno con caracteristicas regulares son suficientes para resistir el peso que genera el tanque y los efectos generados por el mismo sobre el suelo.

4.2.1 Resultados del perfil areno-arcilloso natural.

Figura 41: Resultados del perfil areno-arcilloso natural

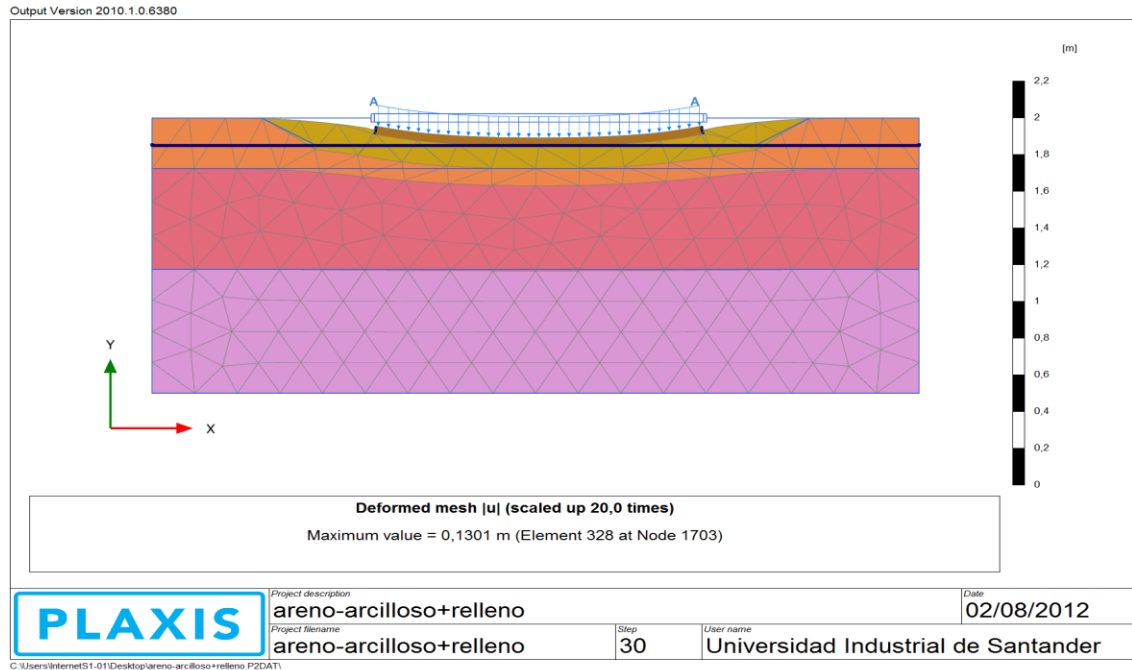


Fuente: Autores.

Así como era esperado en un suelo con propiedades regulares la deformación obtenida por el software es de mayor magnitud que el perfil arenoso con quince punto ocho centímetros (15.8 cm). El estrato inferior es donde está concentrado el máximo esfuerzo (649.9 KN/m²), otros datos sobre esta simulación se encuentran en el **Anexo H**.

4.2.2 Resultados del perfil areno-arcilloso con relleno

Figura 42: Resultados del perfil areno-arcilloso con relleno.

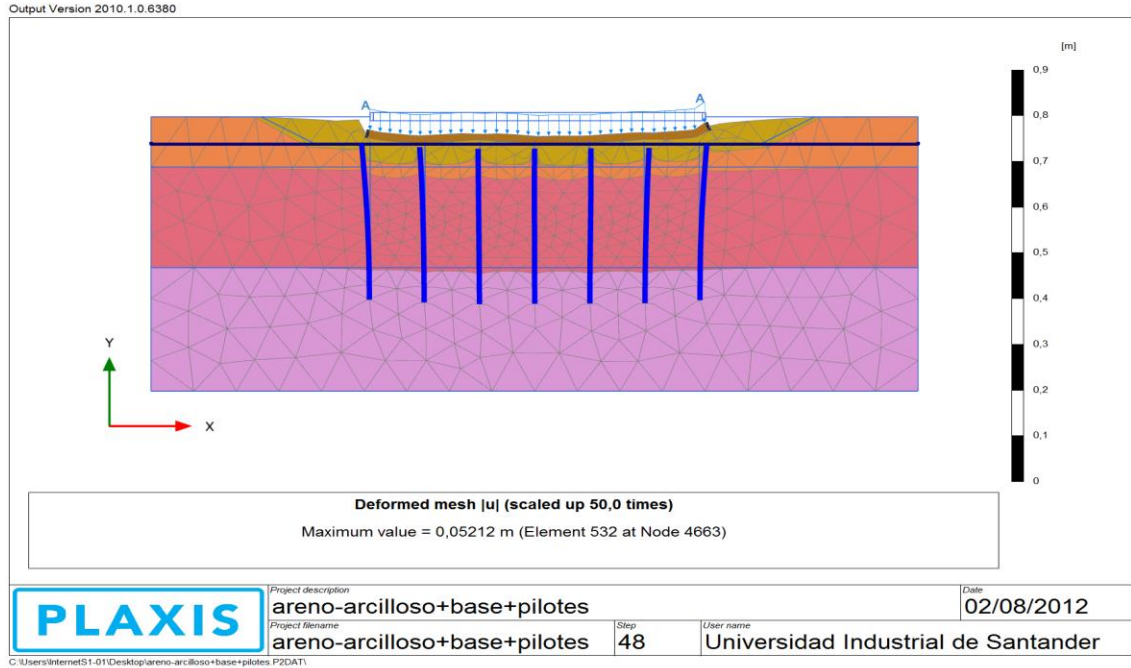


Fuente: Autores.

Se identifica una deformación disminuida a comparación del modelo anterior sin embargo y con la adaptación del relleno la deformación sigue siendo elevada para que pueda usarse para esta obra civil. Con un valor de esfuerzo de 654.9 KN/m^2 ubicado en el suelo aluvial, la información complementaria sobre este caso se halla en el **Anexo I**.

4.2.3. Resultados del perfil areno-arcilloso con pilotes.

Figura 43: Resultados del perfil areno-arcilloso con pilotes.

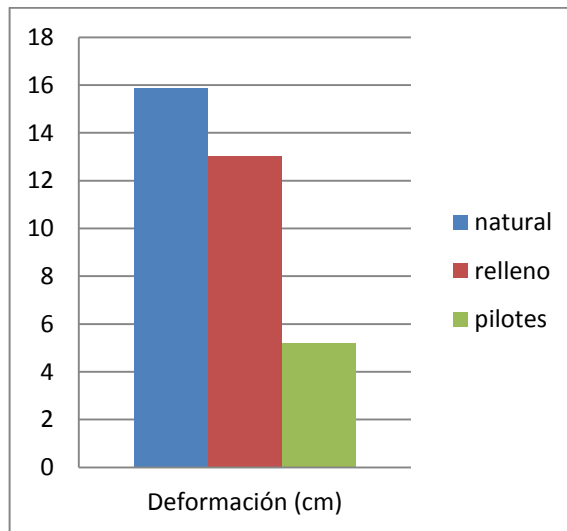


Fuente: Autores.

Para el estudio se considera satisfactorio el poder reducir la deformación de esta situación a un valor de cinco punto dos centímetros (5.2 cm) el cual equivale al cuarenta por ciento (40%) de la deformación calculada en el modelo anterior. El esfuerzo de mayor magnitud es de 2365 KN/m^2 transmitido en la punta de los pilotes, en los cuales los valores críticos de carga axial es de 935 KN/m , desplazamiento 1.55 cm, cortante 48.52 KN/m y flector 103.9 KN*m/m , ver **Anexo J**.

4.2.4 Comparación de resultados. En el gráfico comparativo se ve como la implementación de cimientos más complejos reduce la deformación. El modelo con relleno respecto al natural tiene un valor de 81.87% mientras la aplicación de pilotes lleva este porcentaje a 32.78% a comparación del natural (**Figura 43**).

Figura 44: Comparación de resultados del perfil areno-arcilloso



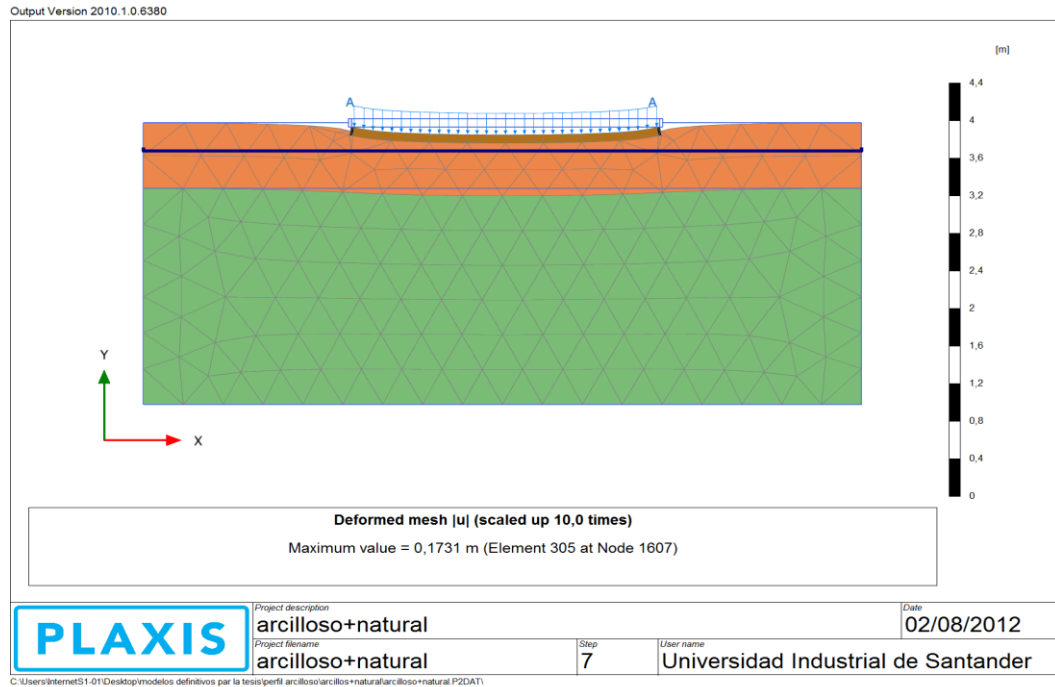
Fuente: Autores

4.3 PERFIL ARCILLOSO

Los resultados del último perfil a estudiar con propiedades deficientes se estima poder llegar a utilizar otros modelos con soluciones de mayor complejidad constructiva pero con aportes realmente importantes para contra restar la acción producida por el tanque.

4.3.1 Resultados del perfil arcilloso natural

Figura 45: Resultados del perfil arcilloso natural.

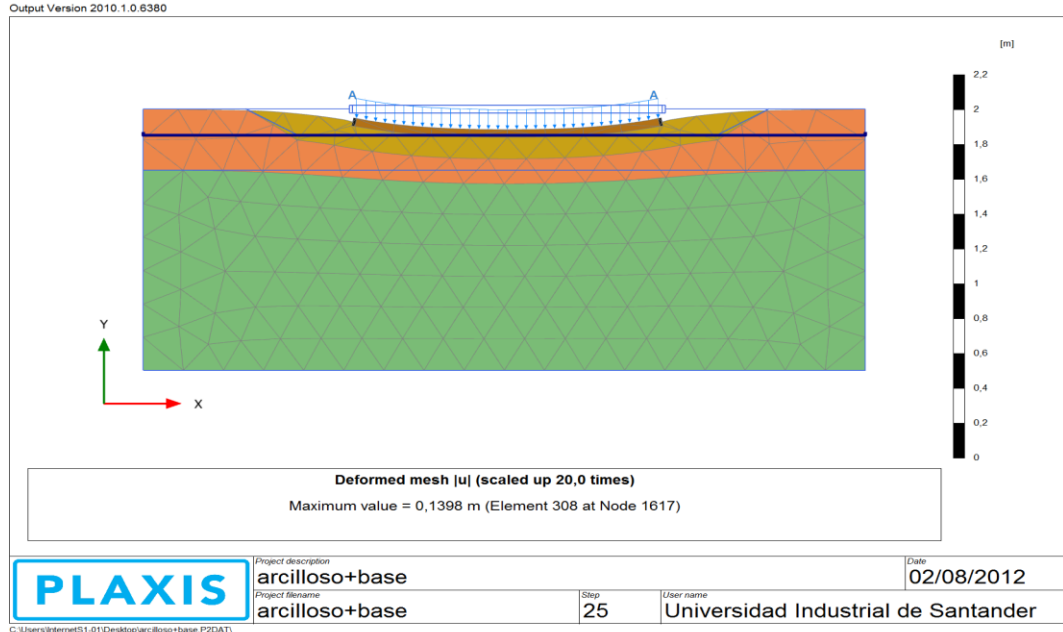


Fuente: Autores.

Como era de esperarse la respuesta del terreno ante las cargas solicitadas fueron bastantes malas e insuficientes para la labor expuesta produciendo una deformación de 17.3 cm y un esfuerzo 598.6 KN/m² concentrado en el estrato de arena mal gradada, para mayor información de este modelo véase el **Anexo K**.

4.3.2 Resultados del perfil arcilloso con relleno

Figura 46: Resultados del perfil arcilloso con relleno.

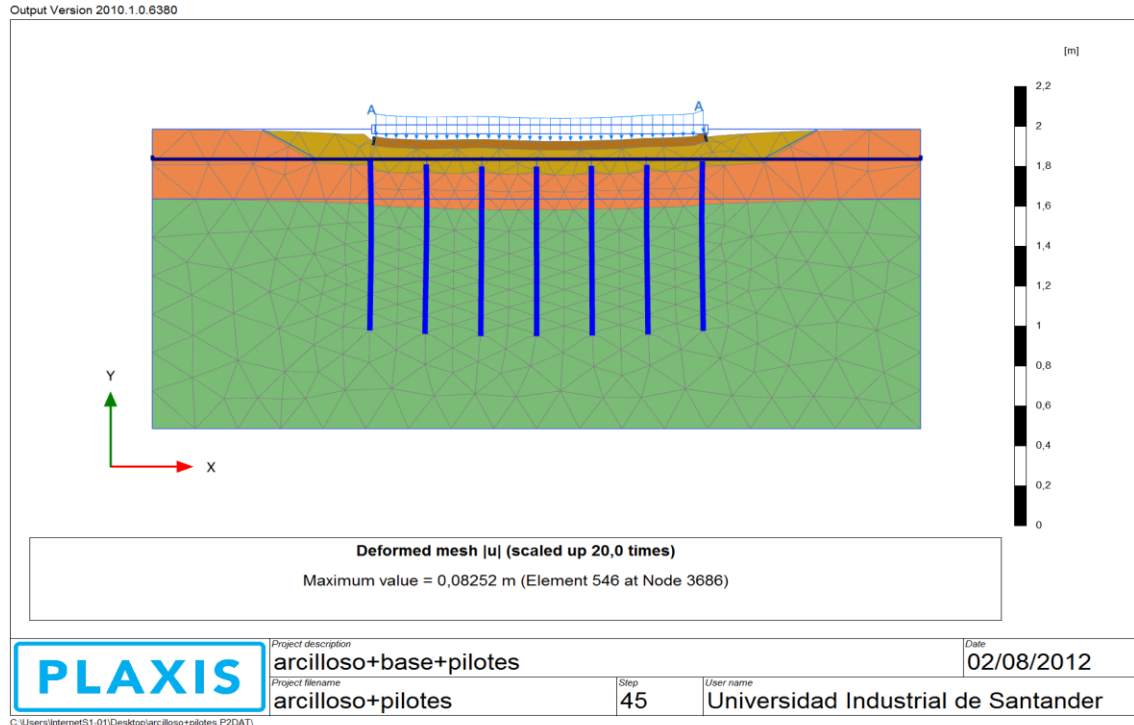


Fuente: Autores.

Utilizando un relleno granular en este suelo como en los otros casos se nota una reducción en el valor de la deformación pero a comparación de los anteriores perfiles con relleno, este alcanza una disminución mayor que los otros, su deformación es de 13.98 cm y con un esfuerzo máximo de 603.2 KN/m^2 . En el **Anexo L** se encuentra más información.

4.3.3 Resultados del perfil arcilloso con pilotes

Figura 47: Resultados del perfil arcilloso con pilotes.



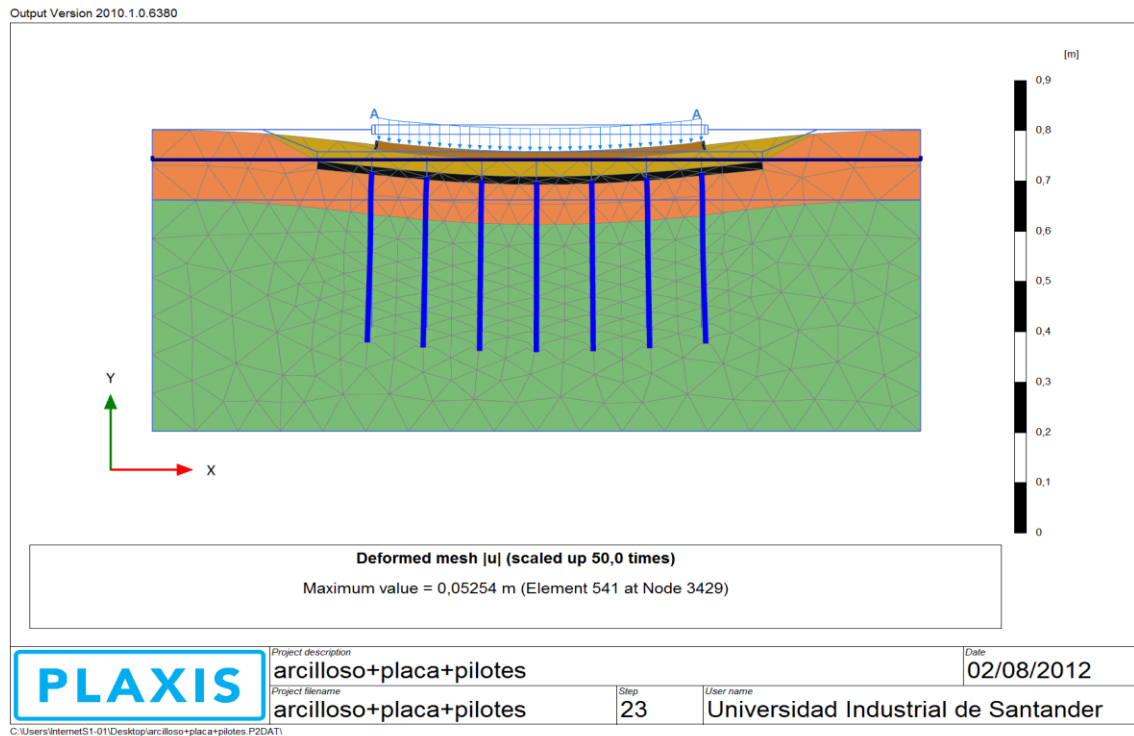
Fuente: Autores.

En este modelo se aprecia una pérdida importante en la deformación gracias al aporte de los pilotes de concreto, reduciendo a 8.25 cm aunque no es suficiente para garantizar la seguridad estructural, generando un esfuerzo máximo 2551 KN/m^2 , las fuerzas internas de los pilotes son las siguientes carga axial de 853.5 KN/m, desplazamiento 5.14 cm, cortante 51.67 KN/m y flector 167.8 KN*m/m. En el **Anexo M** se presentara ampliación de los resultados obtenidos.

4.3.4 Resultados del perfil arcilloso con placa y pilotes. Para este modelo se ha implementado una cimentación rígida especial de mayor capacidad antes las cargas transmitidas por el tanque. El caso ya fue explicado en el capítulo pasado de este oficio y se esperan resultados que satisfagan la necesidad ya identificada

de tal forma que la deformación alcanzada se reduzca, adicionar este tipo de apoyo tiene un gran incremento económico (**Figura 47**).

Figura 48: Resultados del perfil arcilloso con placa y pilotes.

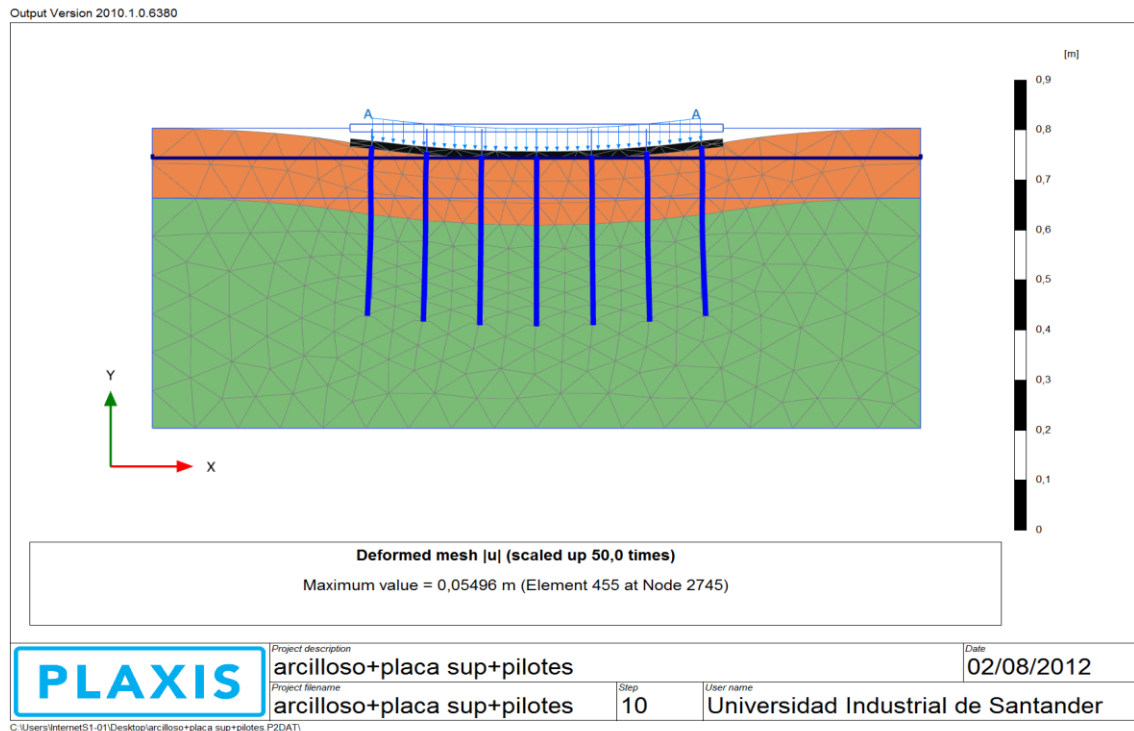


Fuente: Autores.

Con este sistema de cimentación se aprecia una disminución significativa de la deformación calculada, su deformación máxima es de 5.2 cm y con un esfuerzo mayor 3915 KN/m^2 . La carga axial crítica en los pilotes es de 926.4 KN/m , desplazamiento 4.92 cm, cortante 1256 KN/m y flector $320.8 \text{ KN}\cdot\text{m/m}$. En el **Anexo N** se adiciona información del caso.

4.3.5 Resultados del perfil arcilloso con placa superior y pilotes. Aplicando otra alternativa para este perfil arcilloso se requiere saber el comportamiento del suelo en esta ocasión. El modelo ya se especificó con anterioridad por tal motivo a continuación en la **Figura 48** se conoce el resultado.

Figura 49: Resultados del perfil arcilloso con placa superior y pilotes.

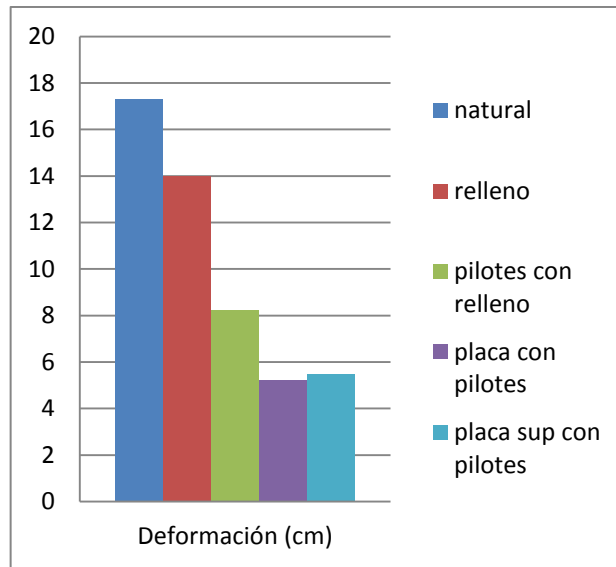


Fuente: Autores.

Al presentar dicho resultado se nota que la deformación es muy cercana al caso pasado con una diferencia 3 mm de más, aunque sin duda el costo se disminuye debido a que ya no hay que realizar las tareas previstas para adaptar el relleno granular y teniendo en cuenta la nueva profundidad para los pilotes la cual disminuyo. Recolectada esta información se ve el desplazamiento calculado por el software se convierte en una solución viable constructivamente y resistente como el planteado en el literal pasado. Con un esfuerzo máximo de 4010 KN/m^2 ubicado en las puntas de los pilotes, la carga axial crítica en los pilotes es de 721.7 KN/m , desplazamiento 5.49 cm, cortante 1695 KN/m y flector 459.5 KN*m/m , en el **Anexo Ñ** están los datos de este modelo.

4.3.6 Comparación de resultados. Observando el grafico comparativo, la deformación disminuyo significativamente teniendo como parámetro el resultado del suelo natural, por lo tanto con relleno presento un 80.76%, con pilotes 47.66%, con placa y pilotes 30.32% y placa superior con pilotes 31.77%. Siendo la cuarta opción la de mejor comportamiento.

Figura 50: Comparación de resultados perfil arcilloso



Fuente: Autores.

CONCLUSIONES

El programa PLAXIS 2D agiliza el análisis de diversos tipos de problemas geotécnicos y proporciona un comportamiento aproximado a la realidad de los modelos debido a la utilización de propiedades del suelo como el módulo de elasticidad, cohesión, ángulo de fricción y pesos específicos; por ello es necesario tener la mayor exactitud en la obtención de estas características del terreno. Además ofrece una gran variedad de resultados dando la posibilidad de analizar esfuerzos, deformaciones, fuerzas cortantes y momentos flectores, etc.

Los resultados obtenidos por el PLAXIS 2D nos ayudan a concluir que suelos como el arenoso no basta un cimiento flexible para soportar la carga transmitida por el tanque y controlar asentamientos, sino que fue necesario usar un apoyo rígido basado en pilotes de concreto reforzado los cuales proporcionaron una mejor condición de soporte.

Para los modelos usados en el perfil areno-arcilloso se plantearon soluciones idénticas que en los suelos arenosos y la tendencia se mantuvo; el relleno granular no dio la suficiente seguridad en los desplazamientos; por ello se hace la prueba con pilotes nuevamente llegando a menores deformaciones constituyendo una mejor solución.

En el perfil arcilloso el relleno granular y los pilotes no controlan de forma significativa los asentamientos siendo necesario la instalación de cimentaciones más complejas para reducir las deformaciones; por tal razón se instaló una placa maciza de concreto conectada a los pilotes la cual aportó una mejor respuesta ante la carga del tanque obteniendo menores deformaciones del suelo.

Los elementos finitos permiten modelar de una manera fácil y en poco tiempo sistemas de alta complejidad como los propuestos en esta investigación; a diferencia de las herramientas matemáticas que conllevan mayor tiempo la obtención de resultados o no son suficientes para encontrar una solución aproximada.

BIBLIOGRAFÍA

AMAYA, Luis Andrés. Análisis de sistemas de cimentación de acuerdo a la NSR-10 utilizando elementos finitos en 3D, caso aplicado al edificio “Majestic”

ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA. Reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10. Bogotá, 2010.

BECERRA Y GÓMEZ. Estado del Arte en el análisis y procesos constructivos de cimentaciones profundas.

BOWLES, Joseph E. Foundation Analysis and design. 5ta edición, USA: McGraw-Hill, 1997.

CAMARGO Y GONZALEZ. Modelamiento de problemas de estructuras de contención latera mediante programa de elementos finitos.

DAS, Braja M. Principios de ingeniería de cimentaciones. 5ta edición.

DAY, Robert W. Foundation Engineering Handbook. New York: McGraw-Hill, 2006.

DELGADO, Manuel. Cimentaciones, Escuela colombiana de ingeniería 1996.

GONZALEZ G, Álvaro J, Estimativos de parámetros efectivos de resistencia con el SPT.

JUÁREZ BADILLO, Mecánica de Suelos Tomo II, Limusa Noriega Editores

MANUAL PLAXIS 2D, Delft University of Technology & PLAXIS b.v., Países Bajos.

WOODWARD et al, 1972.

ANEXOS

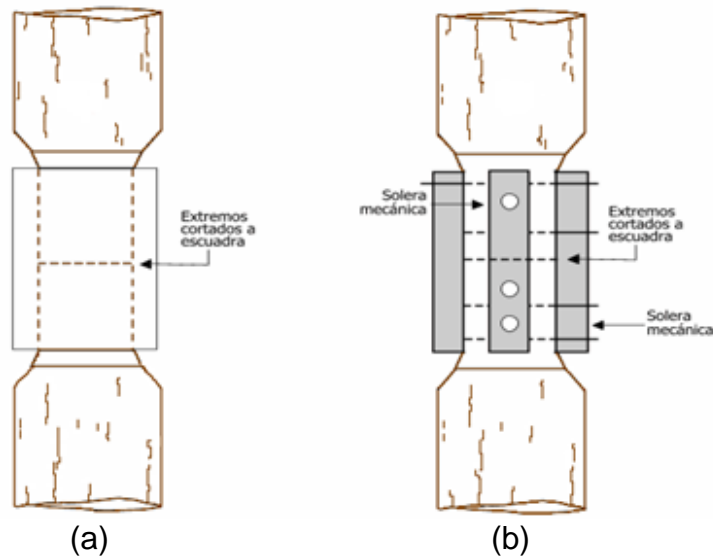
ANEXO A: Tipos de pilotes según su material.

Pilotes de madera: son troncos de árboles cuyas ramas y cortezas fueron cuidadosamente removidos, la longitud máxima de los pilotes de madera está entre 10 y 20 metros. Para ser usado como pilotes, la madera no debe tener ningún defecto. El manual de práctica de la asociación americana de ingenieros civiles los divide en 3 clases:

- 1- Pilotes clase A, que soportan cargas pesadas. El diámetro mínimo del fuste debe ser de 35.6 cm.
- 2- Pilotes clase B, que se usan para tomar cargas medias, el diámetro mínimo del fuste debe estar entre 30.5 y 33 cm.
- 3- Pilotes clase C, que se usan en trabajos provisionales de construcción. Estos se usa permanentemente en estructuras cuando el pilote está en su totalidad bajo el nivel freático. El diámetro mínimo del fuste debe ser 30.5cm.

Bajo toda circunstancia la punta del pilote no debe tener un diámetro inferior a 15 cm. Los pilotes de madera no resisten altos esfuerzos al hincarse; por lo tanto su capacidad se limita entre 25 a 30 toneladas, pero en algunos casos donde se va a hincar el pilote se usa un capuchón metálico que protege la cabeza del mismo evitando el deterioro de su parte superior. Cuando se van a utilizar en cargas de tensión y laterales debe evitarse el empalme, sin embargo si es necesario el empalme este se hace empleando mangos de tubo el cual debe tener una longitud mínima de cinco veces el diámetro del pilote o soleras metálicas con tornillos.

Figura A: Pilotes de Madera. (a) Mangos tubulares. (b) solera metálica y tornillos.



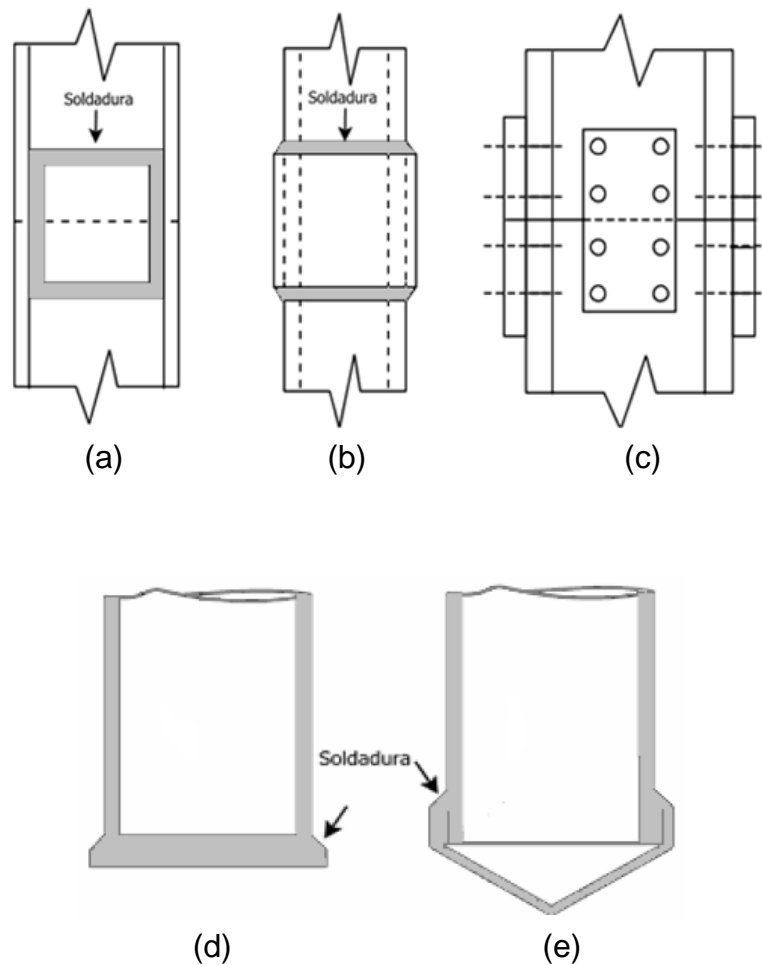
Fuente: Braja M Das.

Pilotes de acero: Generalmente están hechos de tubos huecos o perfiles H laminados, los pilotes tipo tubo son hincados y luego son rellenados por concreto, pueden tener los extremos abiertos o cerrados. En algunos casos donde la capacidad portante de un pilote de acero está por encima de la capacidad admisible requiere un empalme ya sea por soldadura o tornillos. En situaciones donde hincar el pilote tenga más complejidad como son suelos con grava densa, lutitas y roca blanda, se le adapta una punta cónica u plana.

Se conoce que el acero es afectado por la corrosión del sitio donde se encuentra y el suelo no es diferente a este hecho, por ello en terrenos en los cuales haya presencia pantanos, turbas y material orgánico pueden participar en el deterioro corrosivo. Identificar el pH del suelo nos ayuda a saber si necesitamos un revestimiento en pro de su conservación, usualmente debe ser un pH mayor a 7 para que este sea inofensivo a la corrosión. En el momento que se decide aplicar esta protección anti corrosiva se debe tener en cuenta el aumento de la sección transversal, comúnmente se aplican en las fábricas de origen y en el momento de

hincar no dañan el recubrimiento. En ocasiones el concreto es usado como protección anti corrosiva sin tener implicación alguna.

Figura B: Empalme de pilotes, (a) pilote H con soldadura; (b) tubo con soldadura; (c) pilote H con remache y tornillo; (d) punta plana de hincado de pilote de tubo; (e) punta cónica de hincado de pilote de tubo.



Fuente Braja M. Das.

ANEXO B. Aplicaciones del método de elementos finitos en la solución de problemas de frontera.

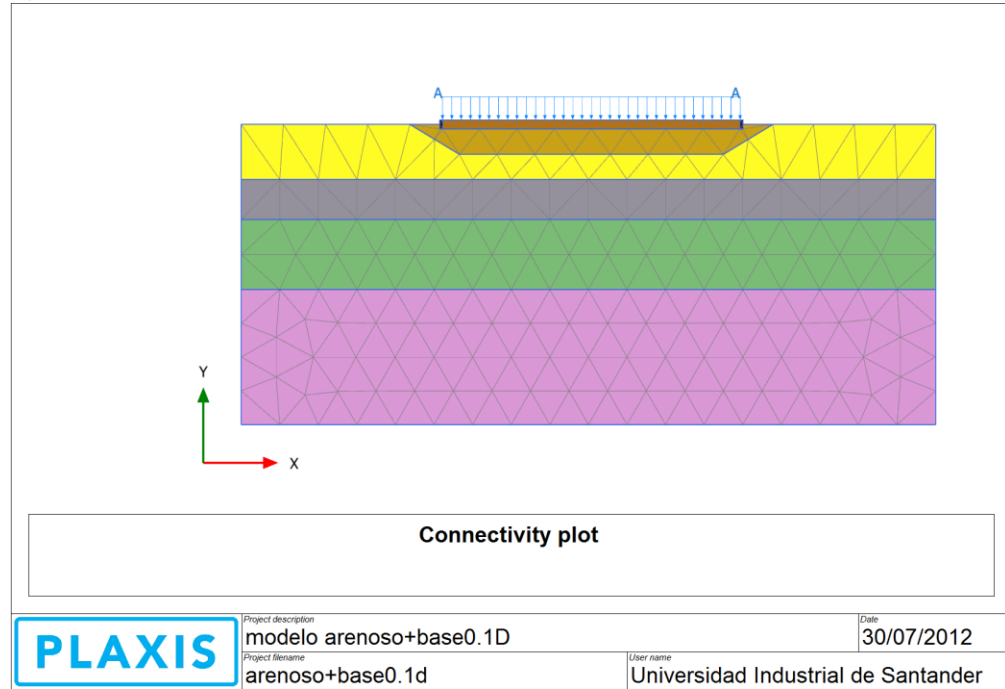
Área de estudio	Problemas de equilibrio	Problemas de valor inicial	Problemas de propagación
1. Ingeniería civil y estructuras	Análisis estáticos de barras, cerchas, placas, cubiertas, muros de cortante, puentes y estructuras de concreto reforzado.	Frecuencias naturales y formas modales de estructuras, estabilidad de estructuras.	Propagación de ondas de tensión, respuesta de estructuras a cargas no periódicas.
2. Aeronáutica	Análisis estáticos de alas de aviones, fuselajes, aletas, cohetes, naves espaciales y estructuras de misiles.	Frecuencias naturales, aleteo y estabilidad de aeronaves, cohetes, naves espaciales y estructuras de misiles.	Respuesta de aeronaves a cargas aleatorias, respuesta dinámica de aeronaves y naves espaciales a cargas no periódicas.
3. Transferencia de calor	Distribución de la temperatura de sólidos y líquidos en estado de equilibrio	—	Flujo de calor transitorio en boquillas de cohetes, motores de combustión interna, alabes de turbinas, aletas y edificios.
4. Geomecánica	Análisis de excavaciones, pantallas arcadas, excavaciones subterráneas, juntas de rocas y problemas de interacción de suelo-estructura; análisis de esfuerzos en suelos, presas, capas de suelos y máquinas de fundaciones.	Frecuencias naturales y formas modales de presas, estructuras de reserva y problemas de interacción suelo-estructura.	Problemas de interacción suelo estructura dependientes del tiempo, filtración transitoria en suelos y rocas, ondas de propagación de esfuerzos en suelos y rocas.
5. Ingeniería de recursos hidráulicos, hidrodinámica	Análisis de flujos potenciales, flujos a superficie libre, flujos de capa límite, flujos viscosos, problemas aerodinámicos; análisis de estructuras hidráulicas y presas.	Frecuencias naturales y formas modales de cuencas superficiales, lagos y puertos; comportamiento de líquidos en recipientes rígidos y flexibles.	Análisis de flujos inestables y problemas de propagación de ondas; infiltración transitoria en acuíferos y medios porosos; dinámica enraizada de gases; flujos magneto hidrodinámicos.

Área de estudio	Problemas de equilibrio	Problemas de valor inicial	Problemas de propagación
1) Ingeniería nuclear	Análisis de los aparatos de presión y estructuras de contención nuclear, análisis estático de la distribución de la temperatura en los componentes de los reactores.	Frecuencias naturales y estabilidad de las estructuras de contención, distribución de flujo de neutrones	Respuesta de las estructuras de contención del reactor a cargas dinámicas; distribución variable de la temperatura en componentes del reactor; análisis térmico y viscoelástico de las estructuras del reactor.
7. Ingeniería biomédica	Análisis de esfuerzos de los globos oculares, huesos, dientes; capacidad de carga de los implantes y prótesis; mecánica de las válvulas del corazón	---	Análisis de impacto en el cráneo; dinámica de las estructuras anatómicas.
8. Diseño mecánico	Problemas de concentración de esfuerzos; análisis de esfuerzos de los recipientes a presión, pistones, materiales compuestos, conexiones y engranajes.	Frecuencias naturales y estabilidad de conexiones, engranajes y componentes de máquinas.	Problemas de grietas y fracturas bajo cargas dinámicas.
9. Máquinas eléctricas y electromagnéticas	Análisis estático de máquinas síncronas y de inducción, pérdidas por corrientes de Foucault y ruido de máquinas eléctricas, magnetostática.	---	Comportamiento transitorio de dispositivos electromecánicos, como motores y actuadores magnetodinámicos.

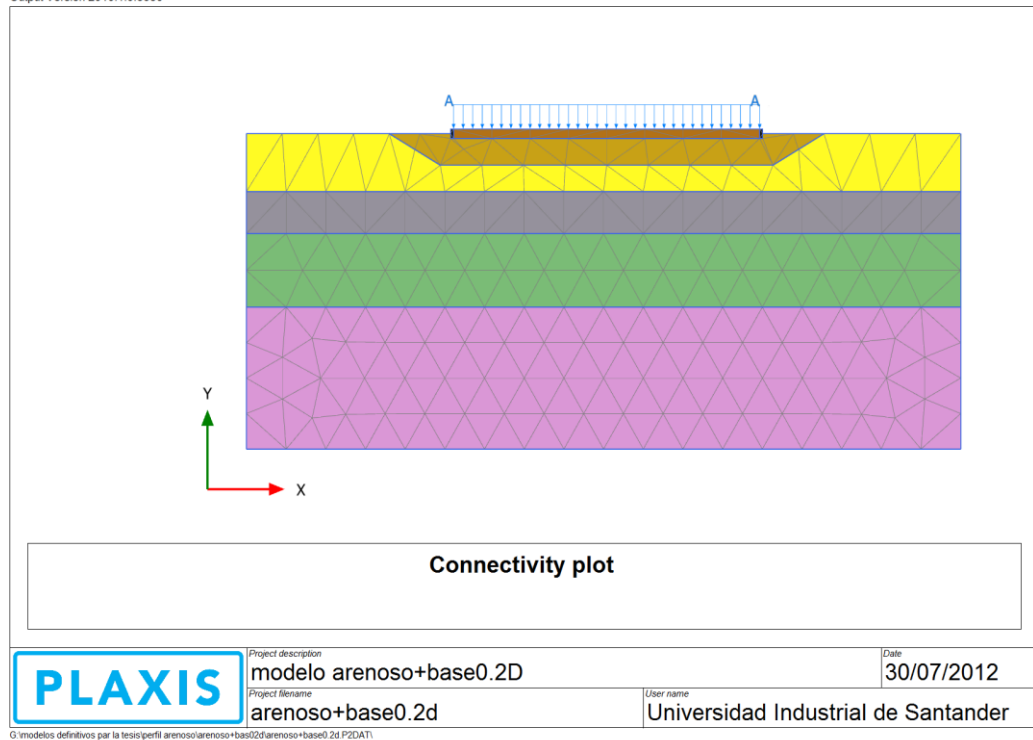
Fuente: Análisis de sistemas de cimentación de acuerdo a la NSR-10 utilizando elementos finitos en 3D, caso aplicado al edificio 'Majestic' (42 niveles).

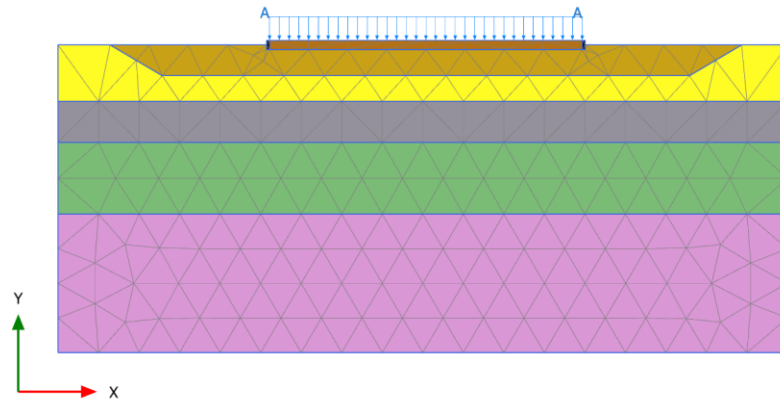
ANEXO C. Modelos modificados del perfil arenoso

Output Version 2010.1.0.6380




Output Version 2010.1.0.6380





Connectivity plot

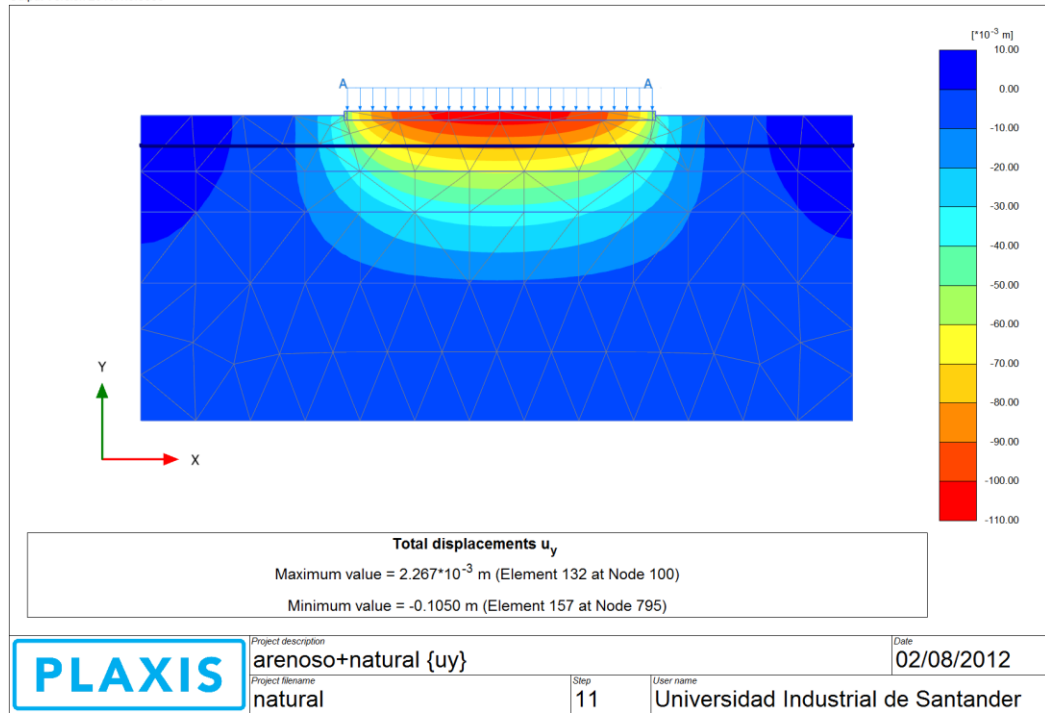
	<small>Project description</small> modelo arenoso+base0.5D	<small>Date</small> 30/07/2012
	<small>Project filename</small> arenoso+bas0.5d	<small>User name</small> Universidad Industrial de Santander

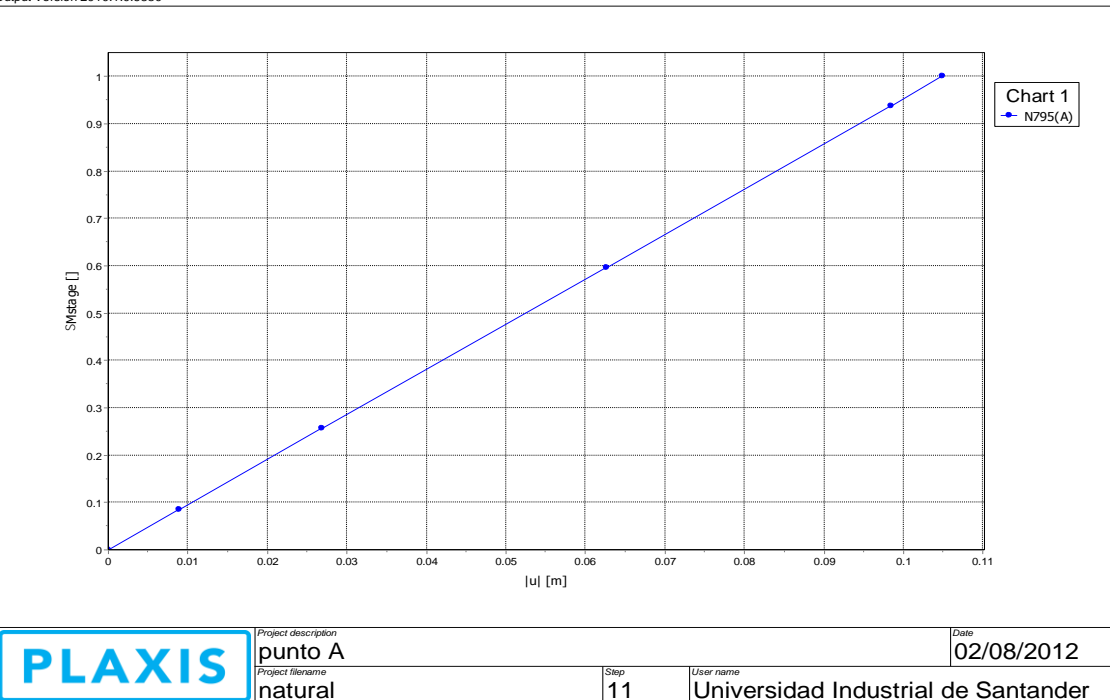
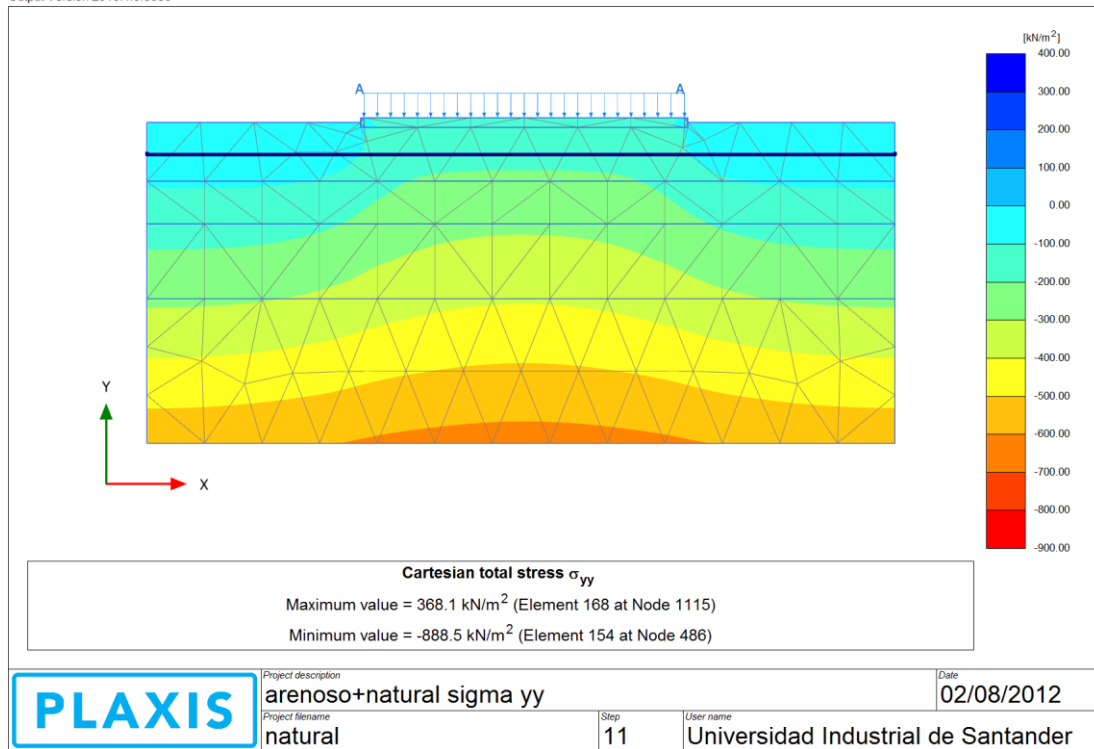
G:\modelos definitivos par la tesis\perfil arenoso\arenoso+bas0.5d\arenoso+bas0.5d P2D.DAT

Fuente: Autores.

ANEXO D. Resultado del perfil arenoso natural.

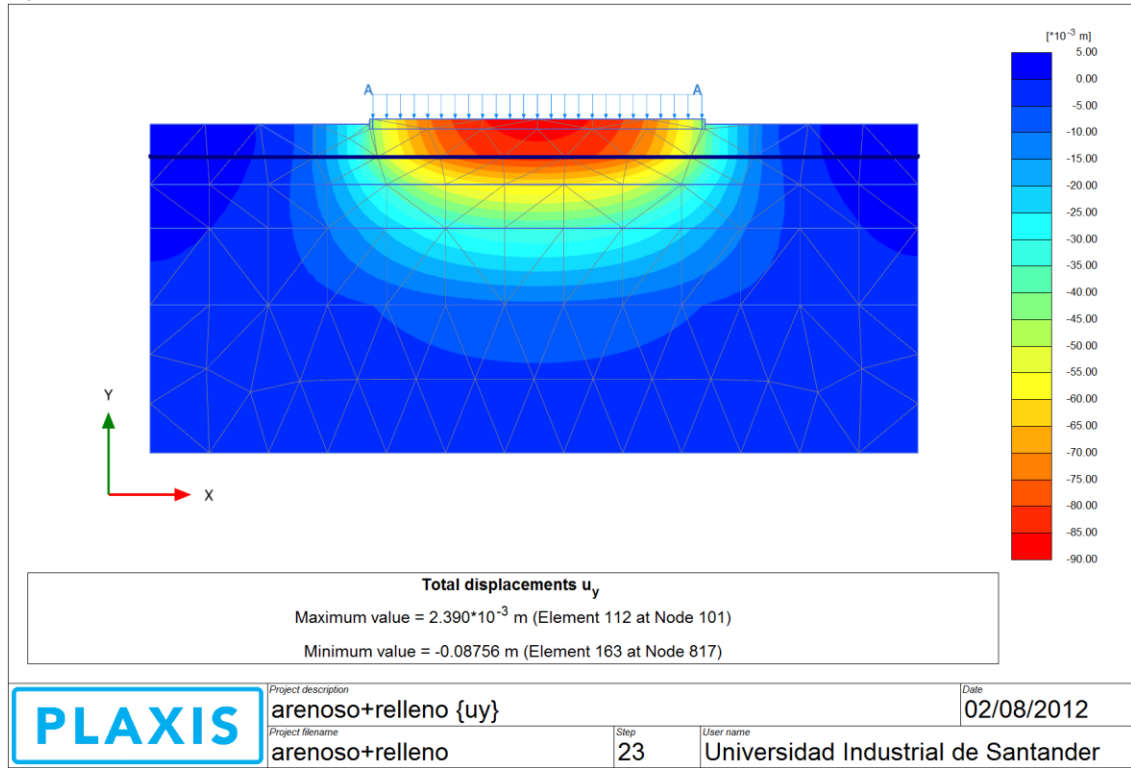
Output Version 2010.1.0.6380

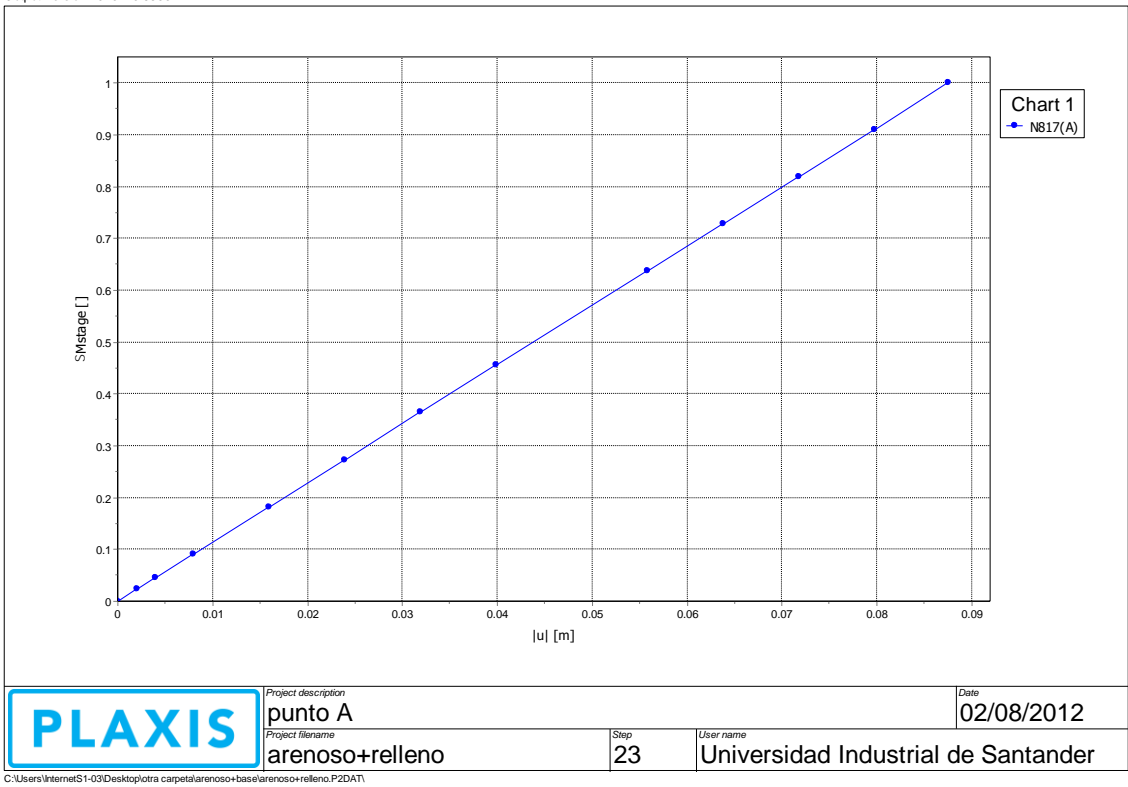
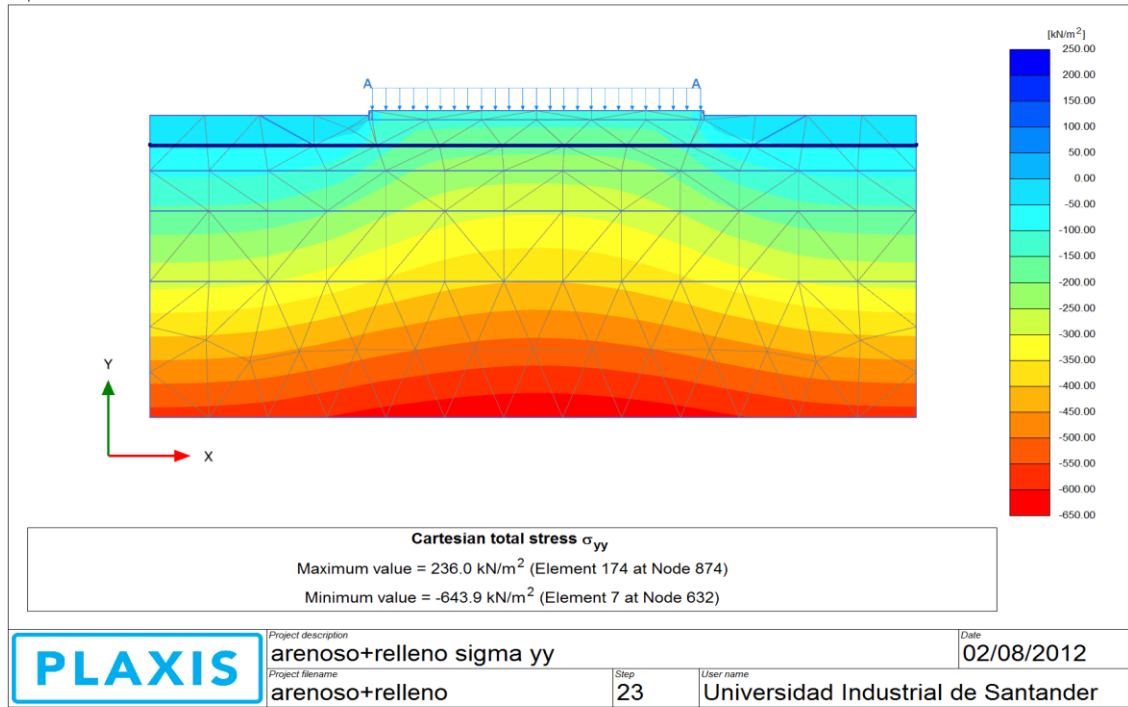




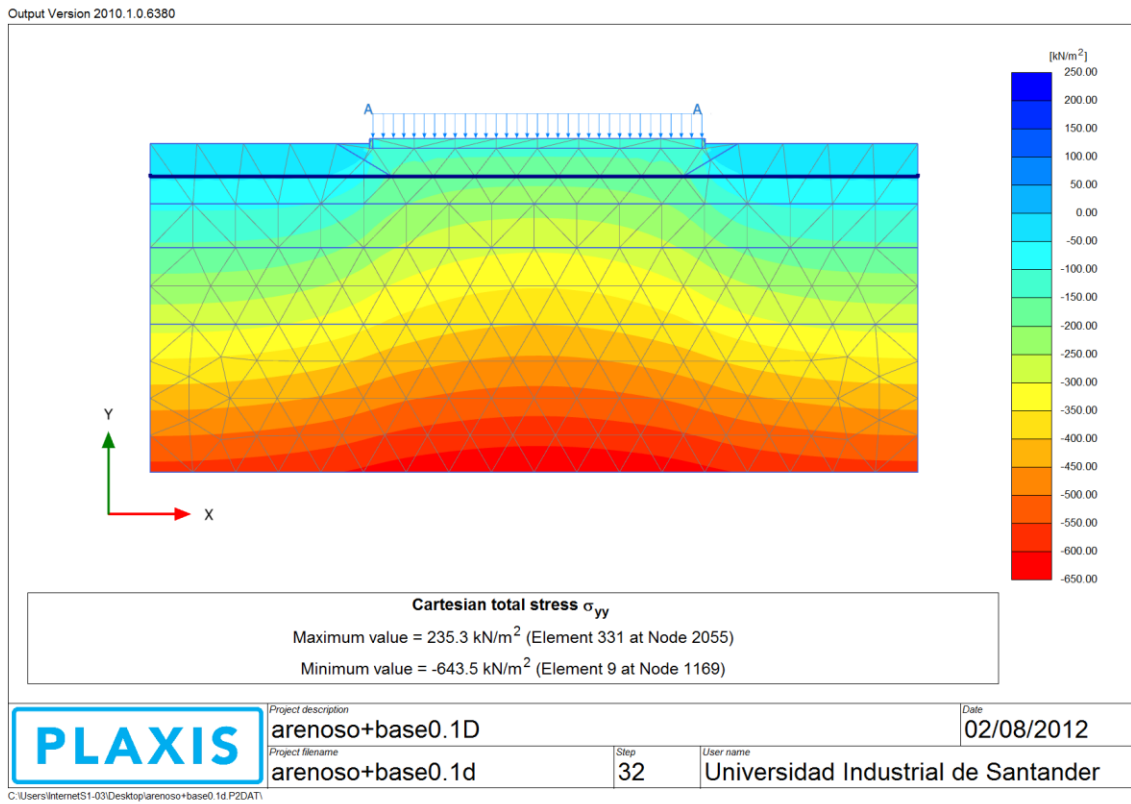
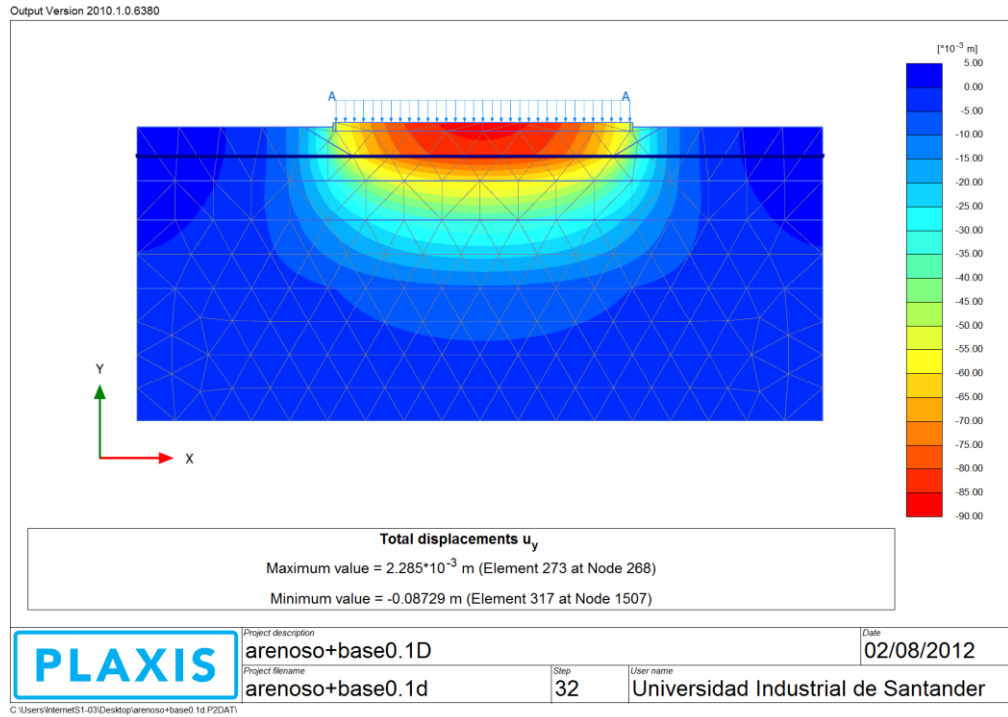
ANEXO E. Resultados del perfil arenoso+base.

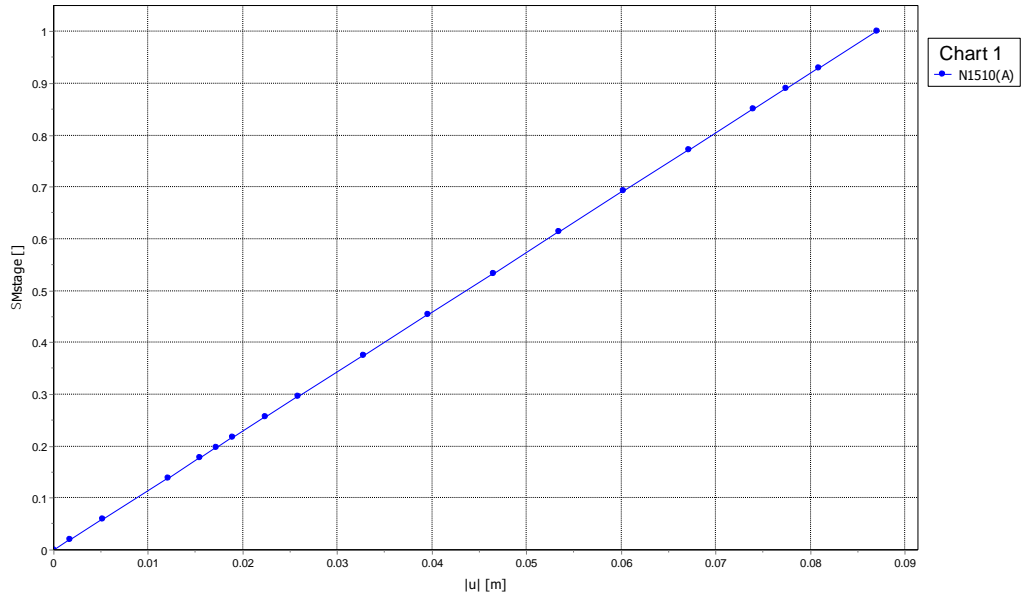
Output Version 2010.1.0.6380





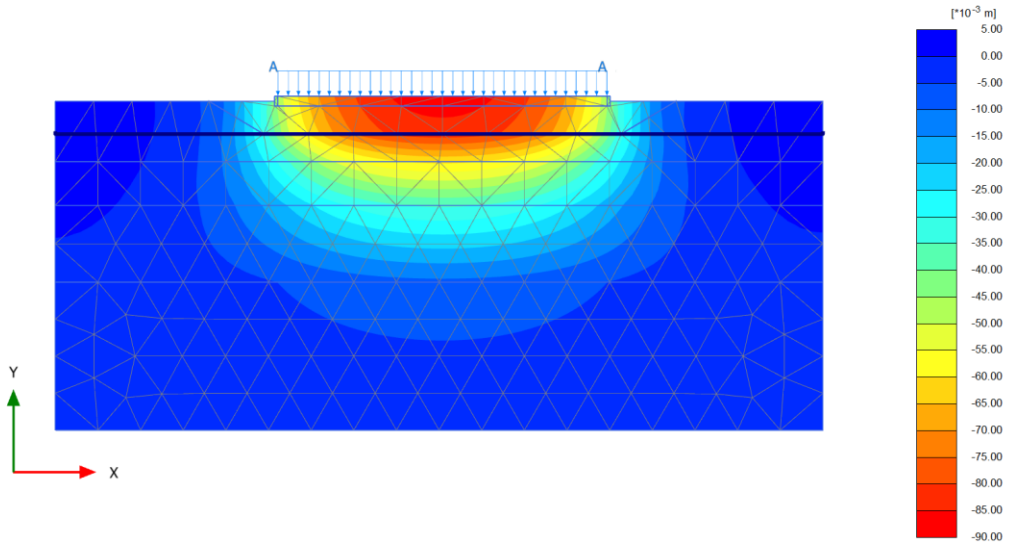
ANEXO F. Resultados de los perfiles arenosos modificados.





PLAXIS	Project description	punto A	Date	02/08/2012
	Project filename	arenoso+base0.1d	Step	32
		User name	Universidad Industrial de Santander	

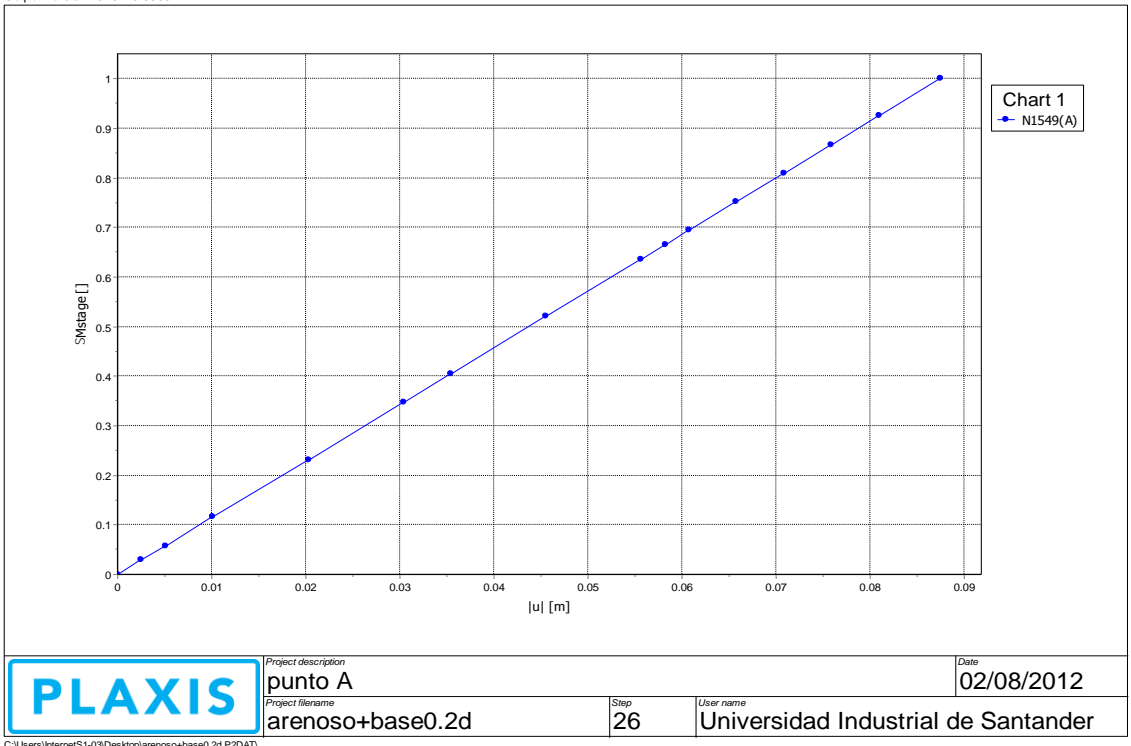
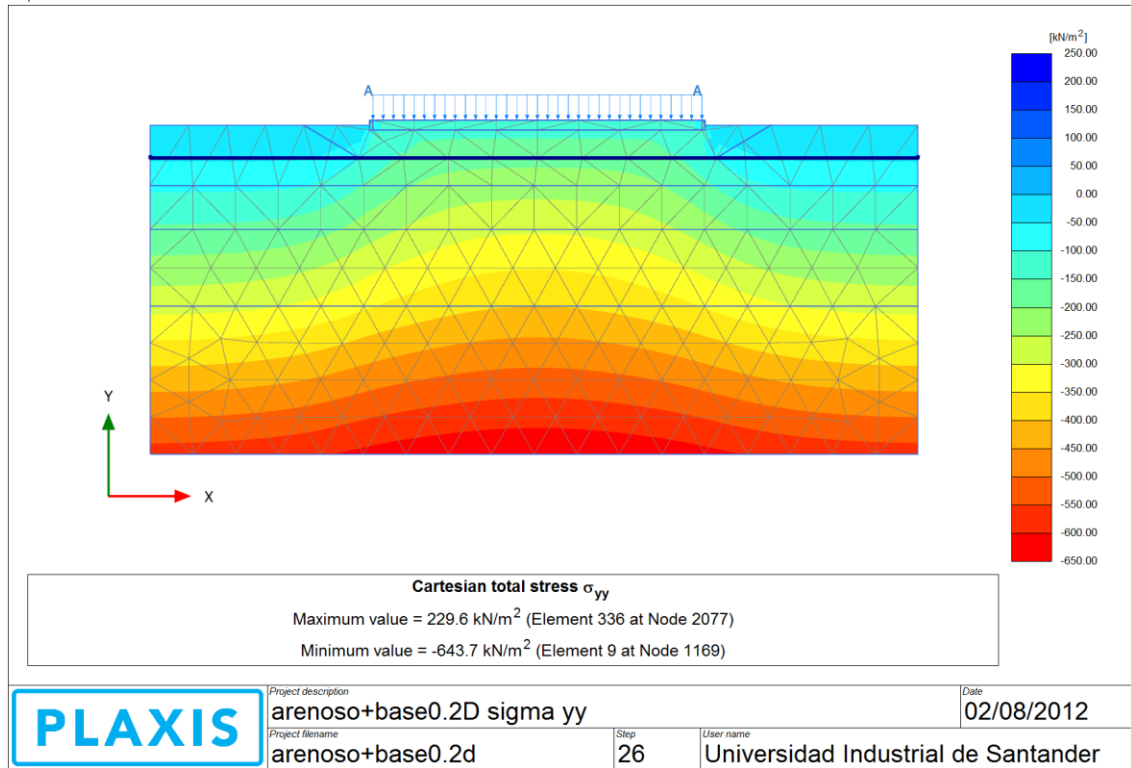
C:\Users\InternetS1-03\Desktop\arenoso+base0.1d.P2DAT1

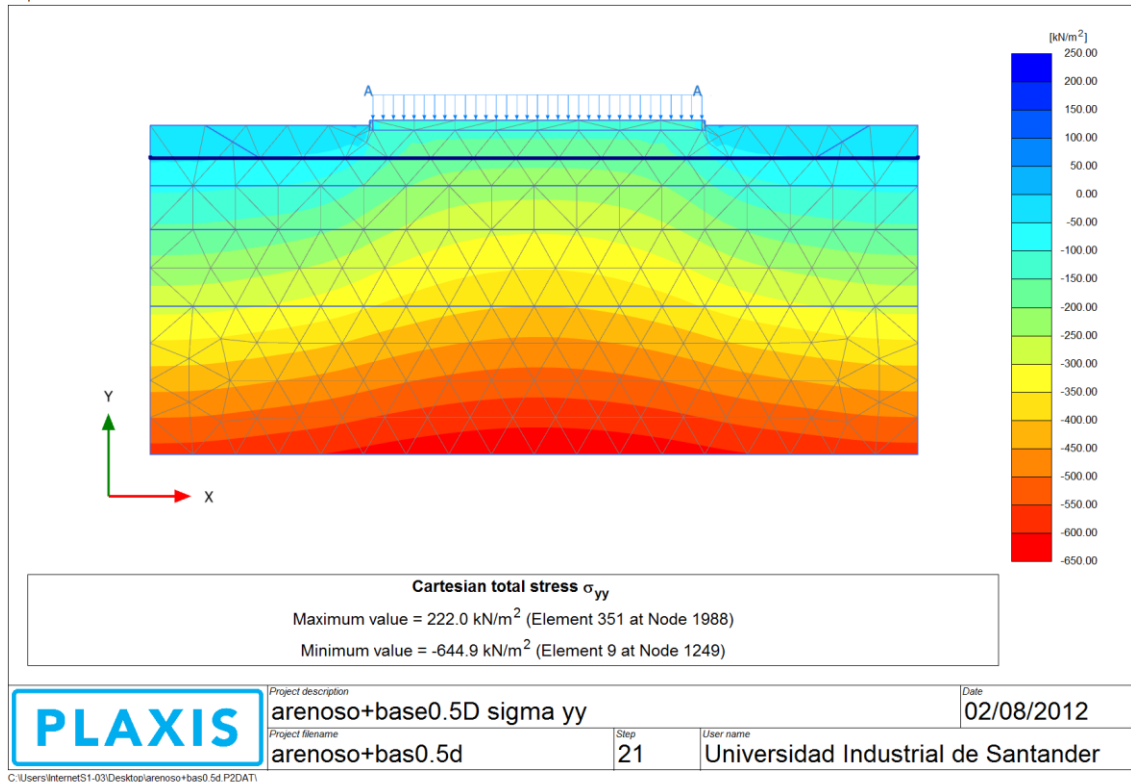
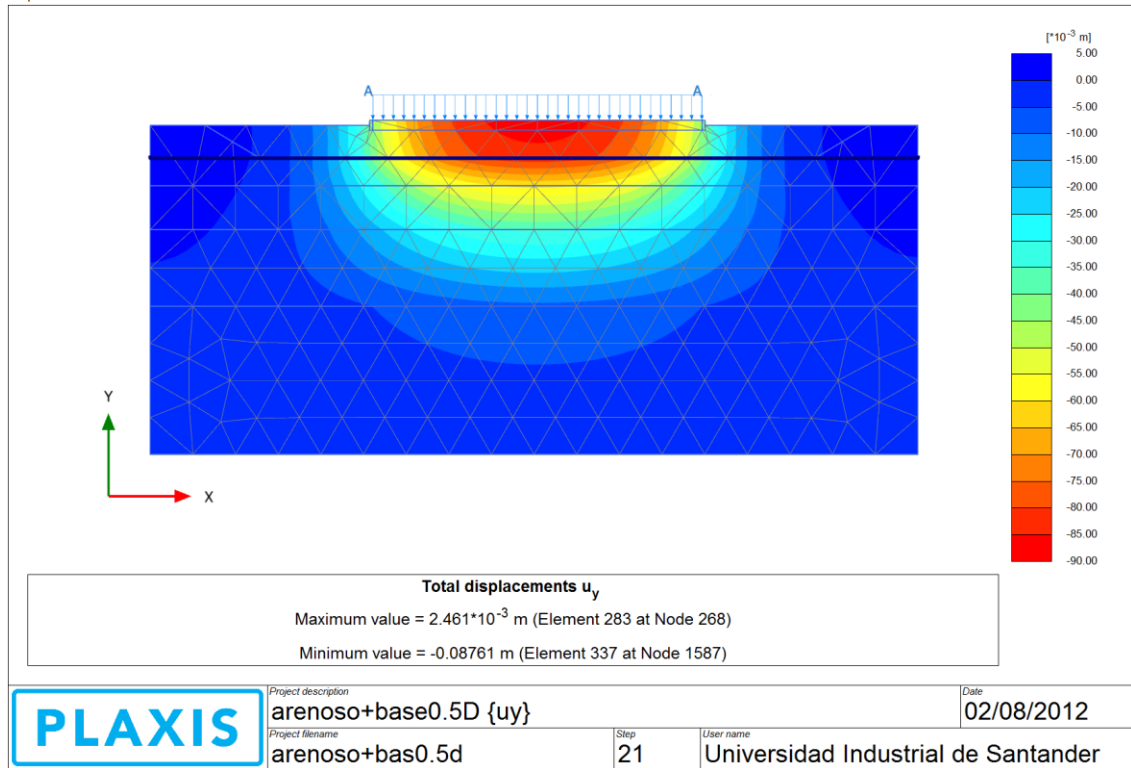


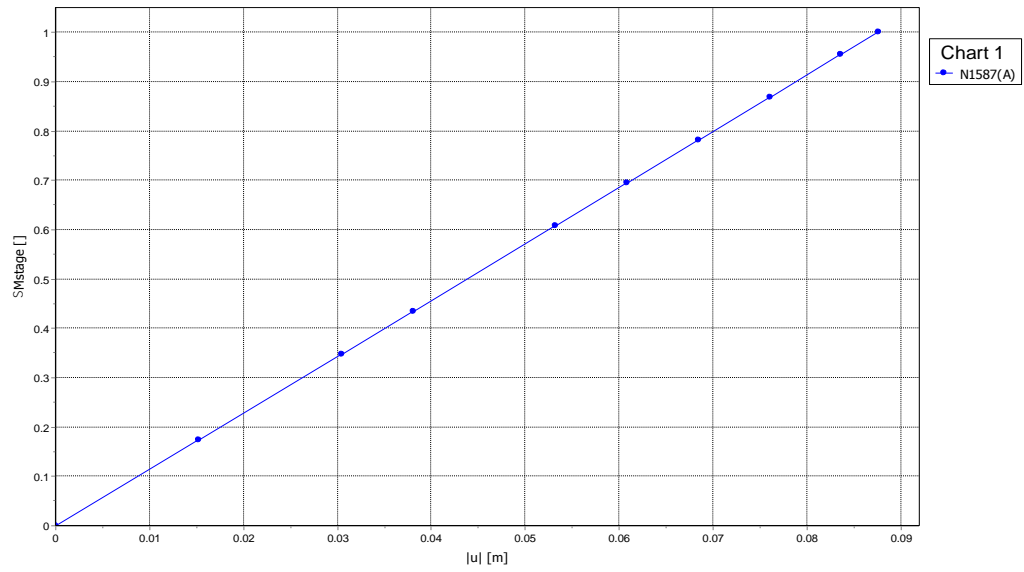
Total displacements u_y
 Maximum value = $2.317 \cdot 10^{-3}$ m (Element 264 at Node 264)
 Minimum value = -0.08745 m (Element 322 at Node 1549)

PLAXIS	Project description	arenoso+base0.2D {uy}	Date	02/08/2012
	Project filename	arenoso+base0.2d	Step	26
		User name	Universidad Industrial de Santander	

C:\Users\InternetS1-03\Desktop\arenoso+base0.2d.P2DAT1







Project description
punto A
Project filename
arenoso+bas0.5d

Date
02/08/2012

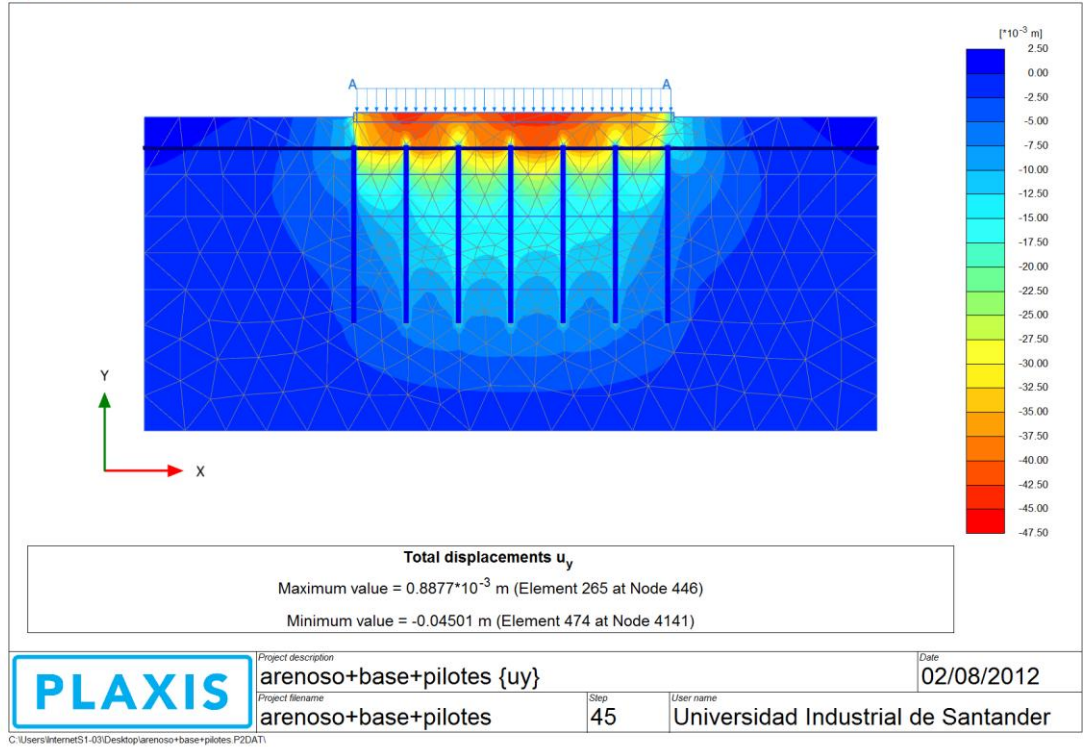
Step
21

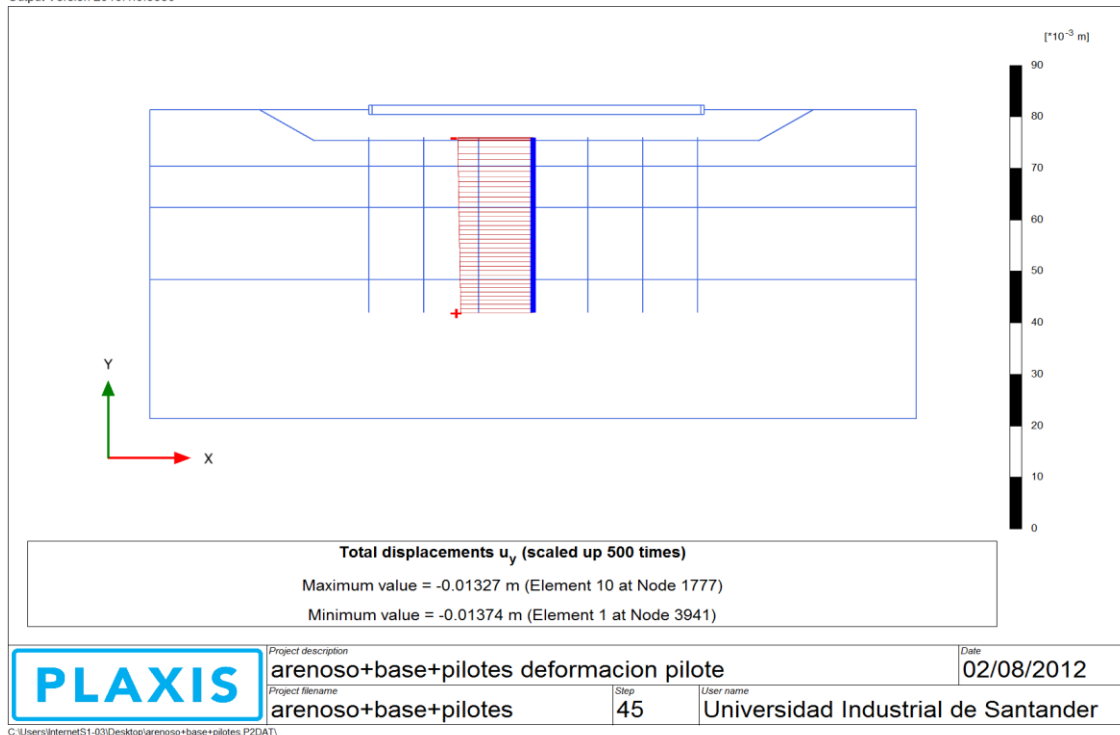
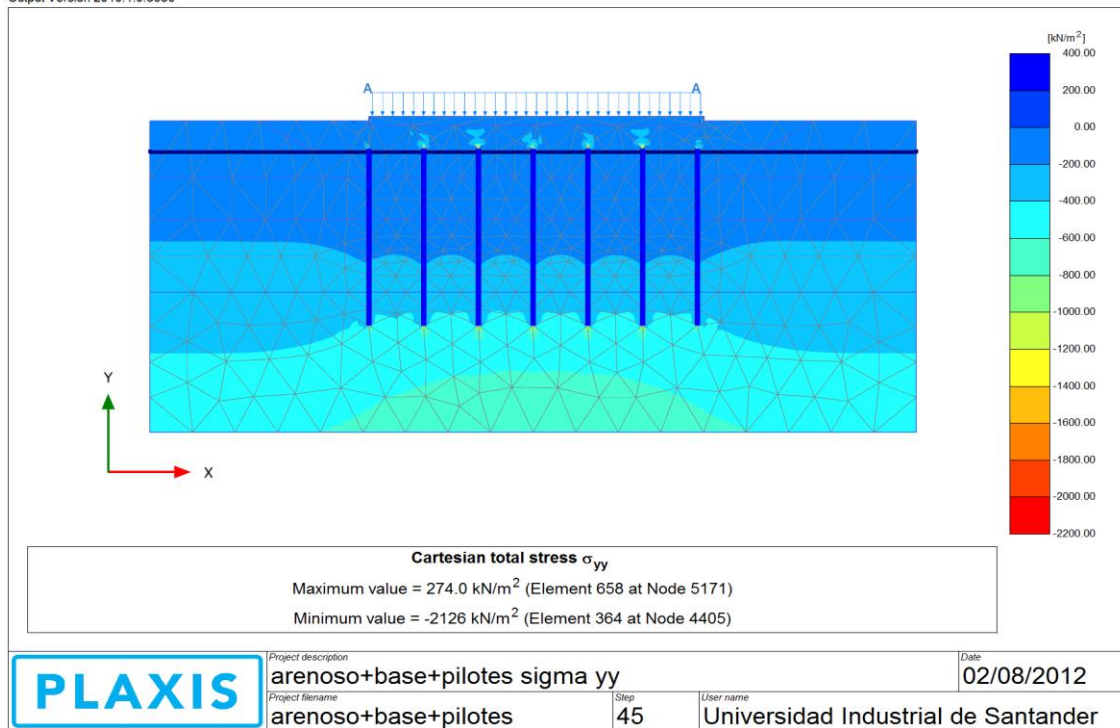
User name
Universidad Industrial de Santander

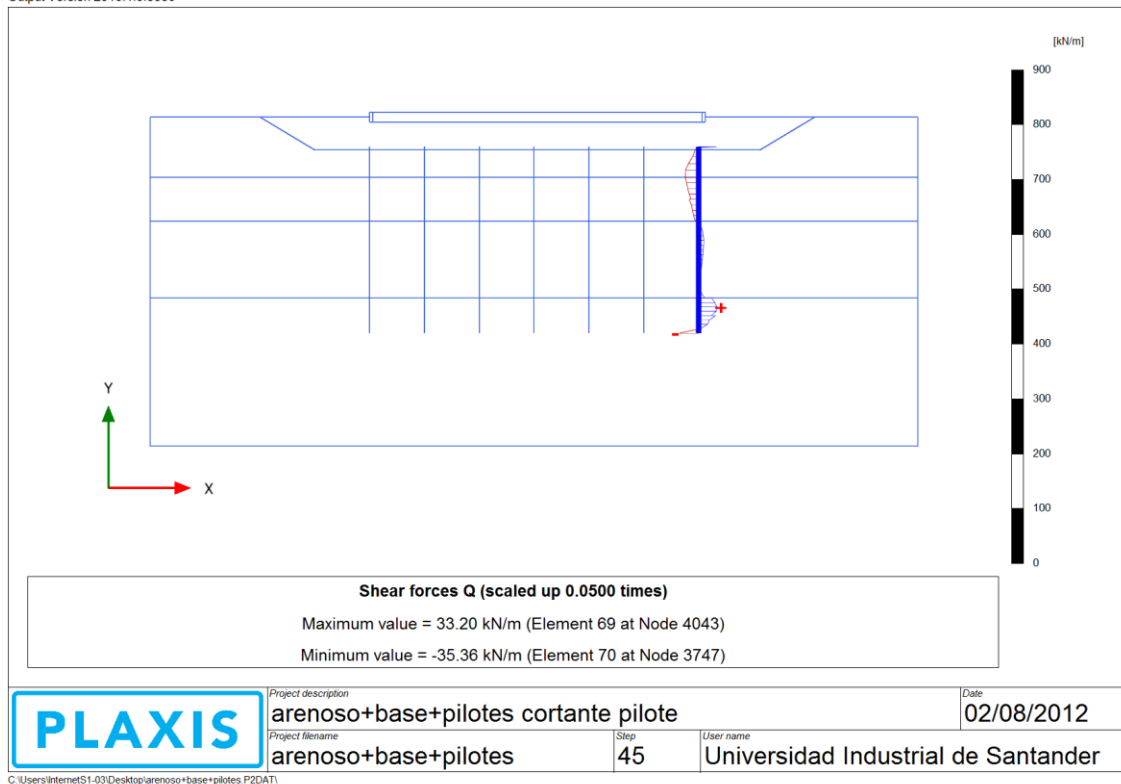
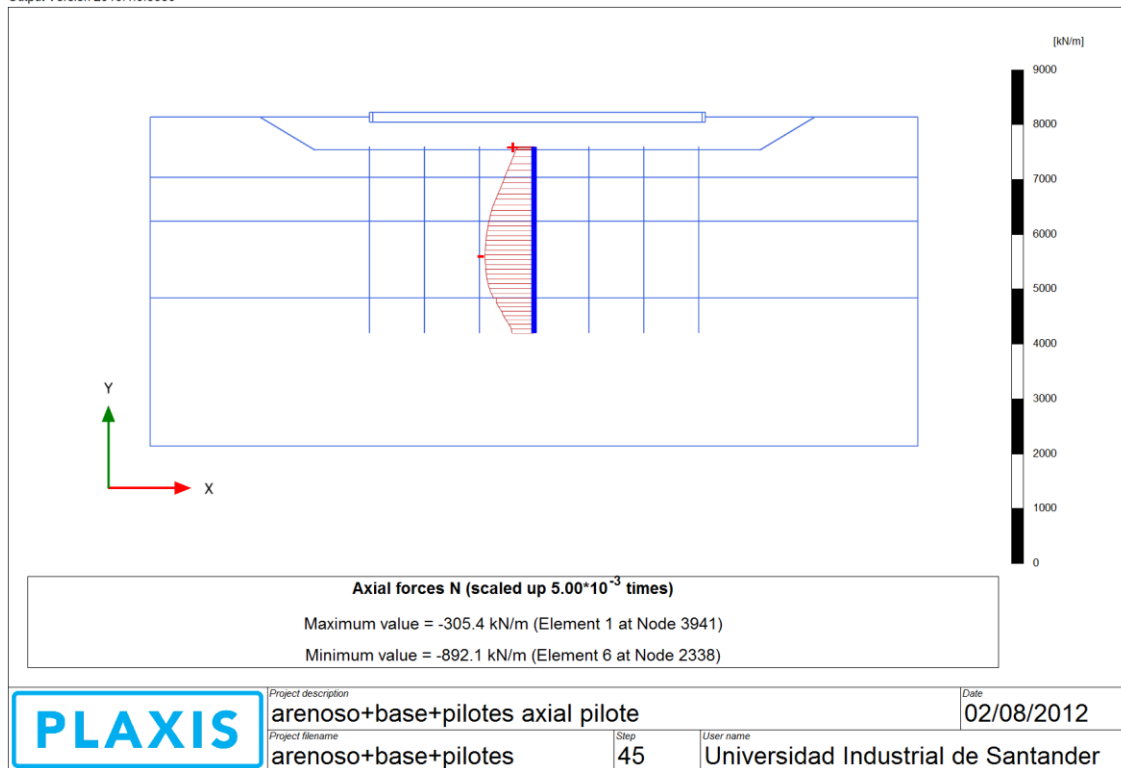
C:\Users\InternetS1-03\Desktop\arenoso+bas0.5d.P2.DAT\

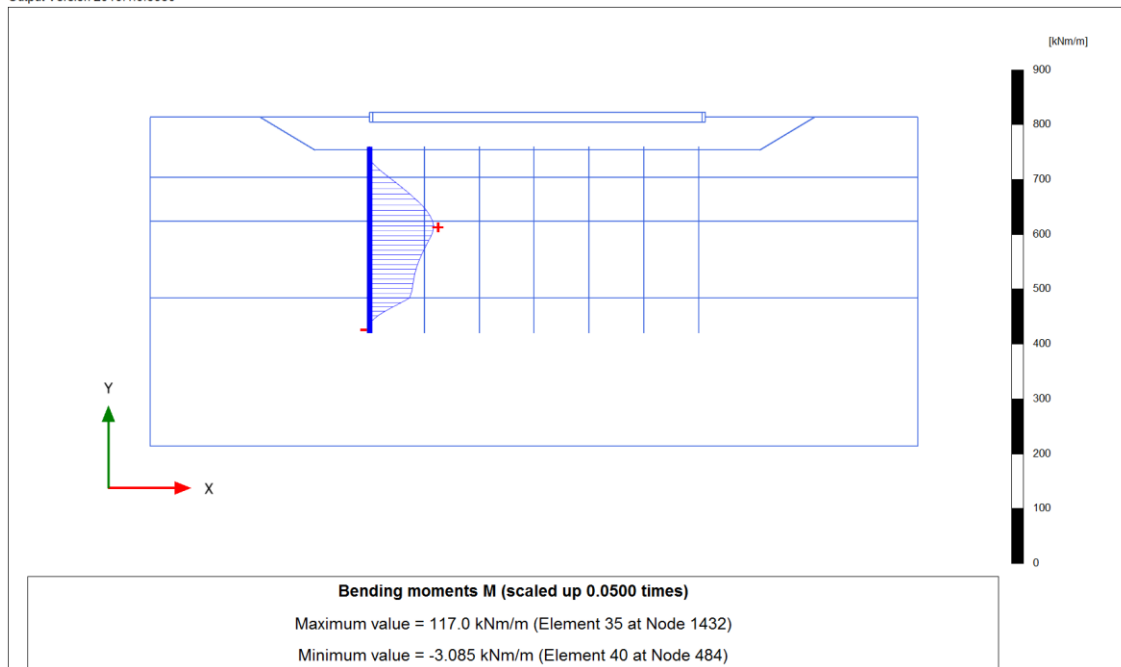
ANEXO G. Resultados del perfil arenoso con pilotes.

Output Version 2010.1.0.6380



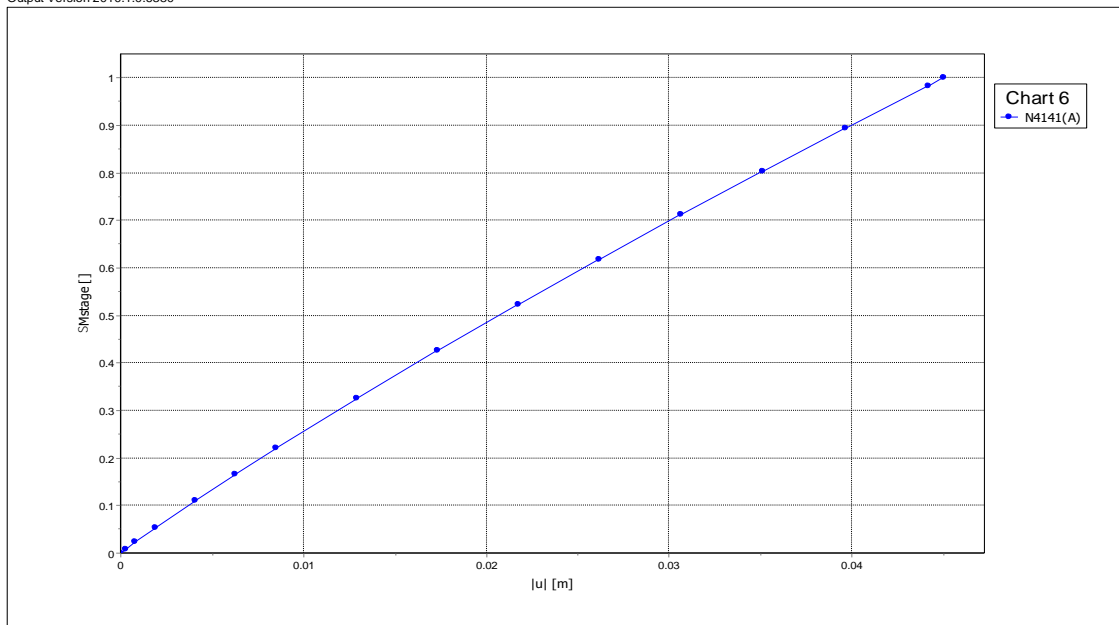






PLAXIS	Project description	arenoso+base+pilotes flector pilote		Date	02/08/2012
	Project filename	arenoso+base+pilotes	Step	45	User name

C:\Users\InternetS1-03\Desktop\arenoso+base+pilotes PZDAT1

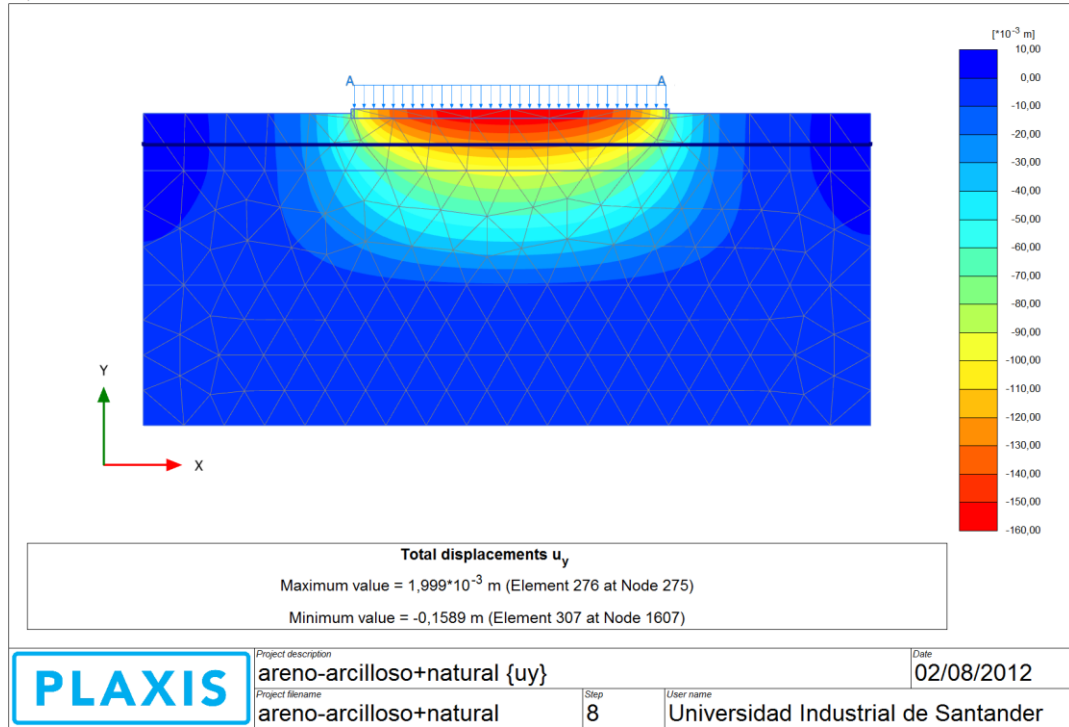


PLAXIS	Project description	punto A		Date	02/08/2012
	Project filename	arenoso+base+pilotes	Step	45	User name

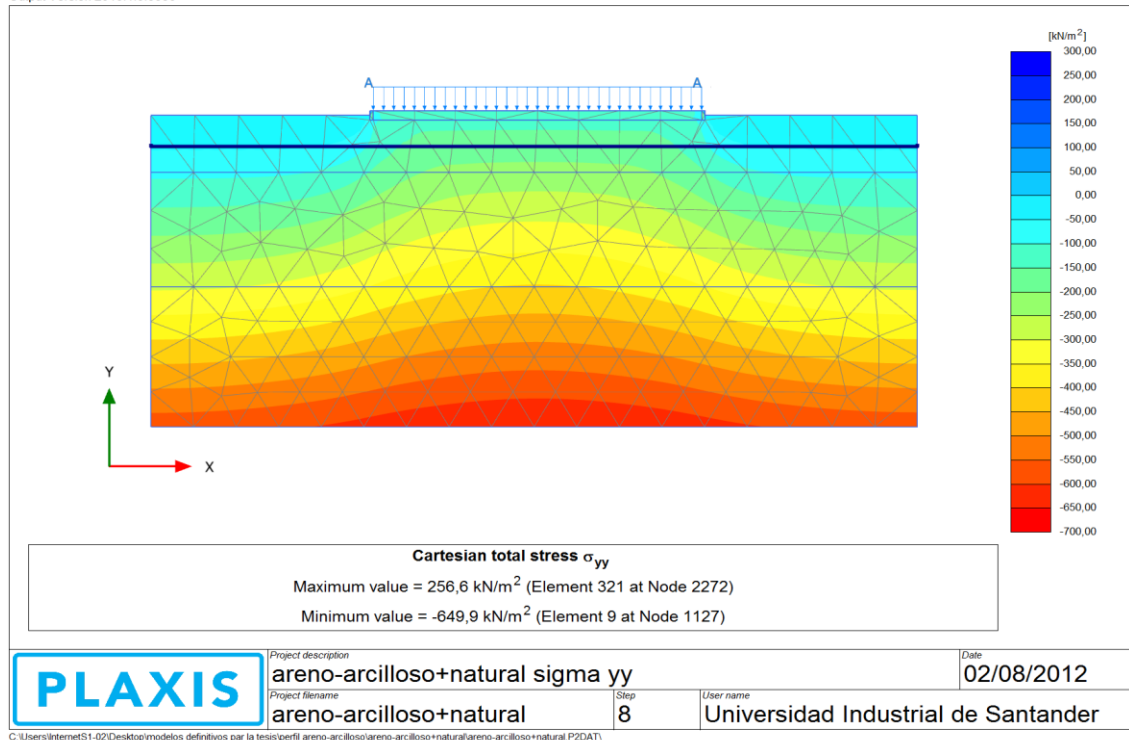
C:\Users\InternetS1-03\Desktop\otra carpeta\arenoso+pilotes\arenoso+base+pilotes PZDAT1

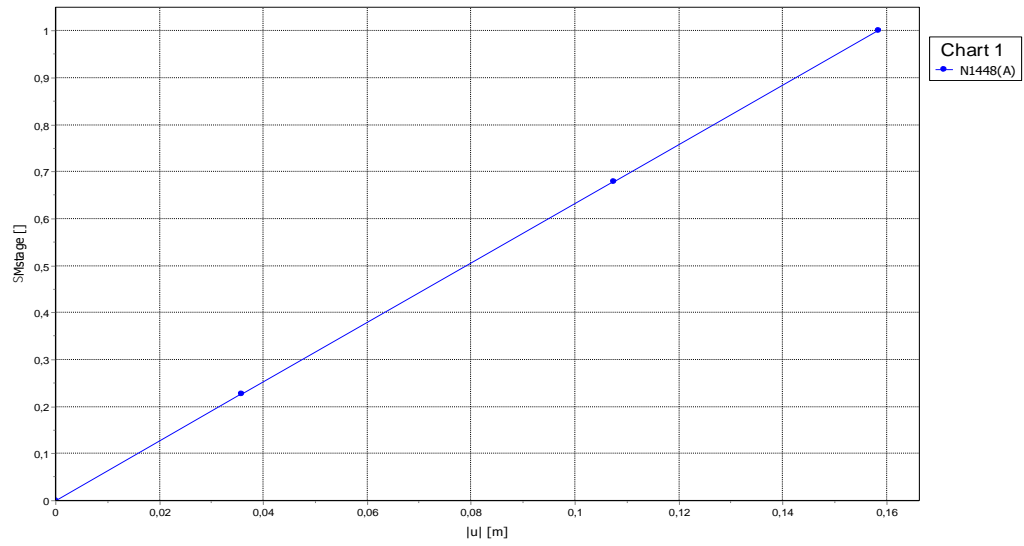
ANEXO H. Resultados del perfil areno-arcilloso natural.


Output Version 2010.1.0.6380



Output Version 2010.1.0.6380



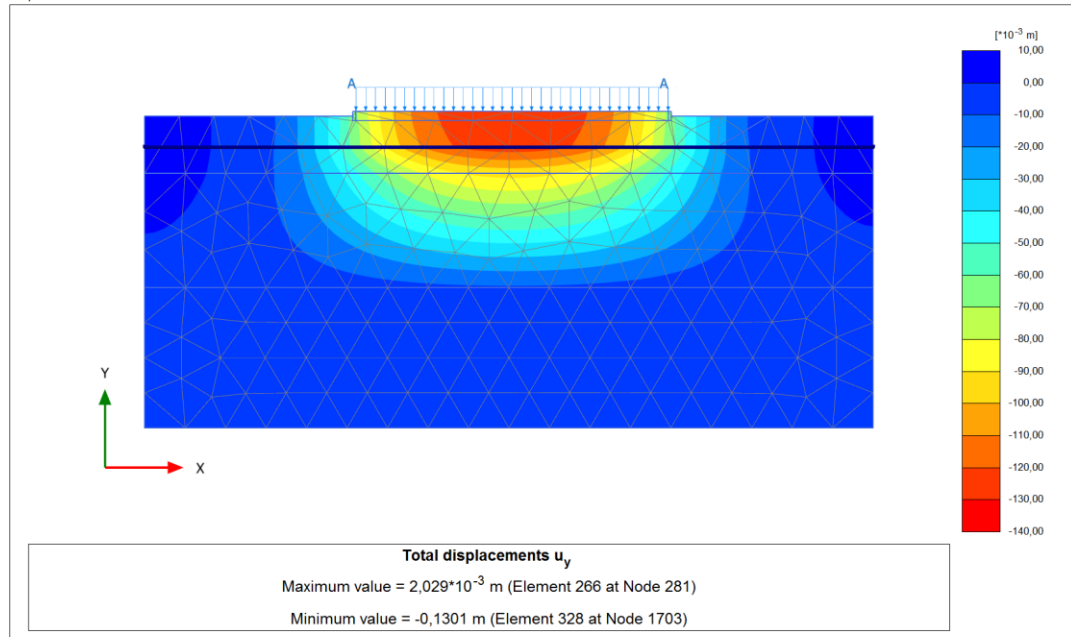


	<small>Project description</small> punto A	<small>Date</small> 02/08/2012
	<small>Project filename</small> areno-arcilloso+natural	<small>Step</small> 8

C:\Users\InternetS1-01\Desktop\otra carpeta\areno-arcilloso+natural\areno-arcilloso+natural.P2DAT\

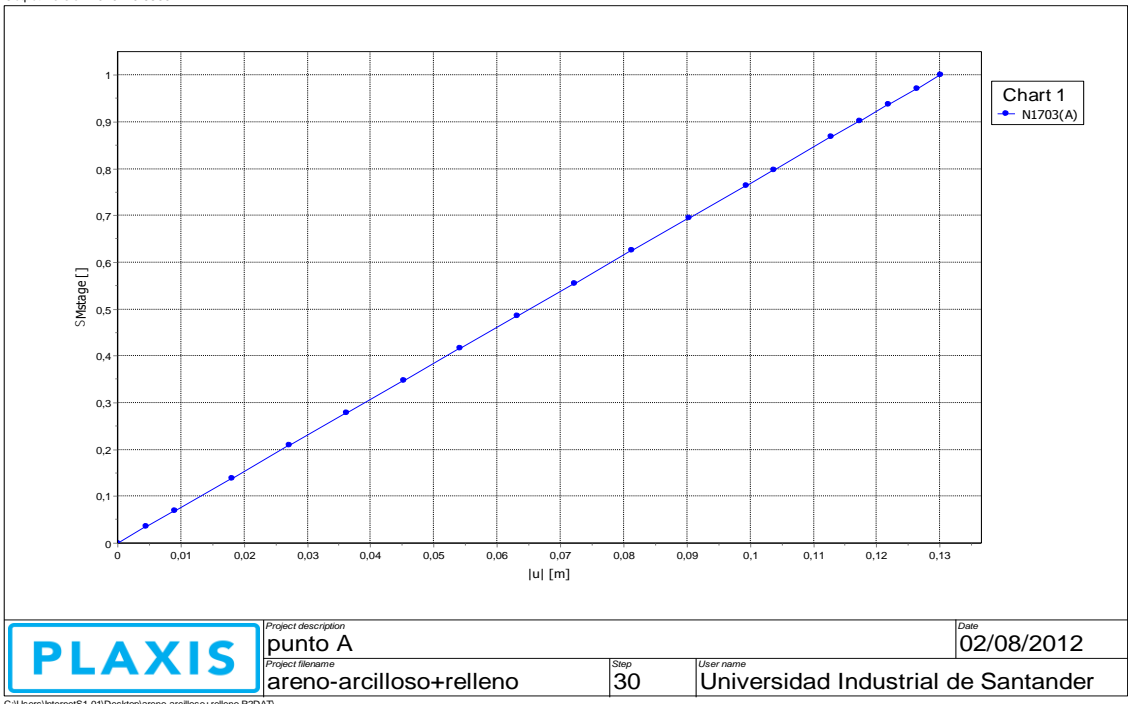
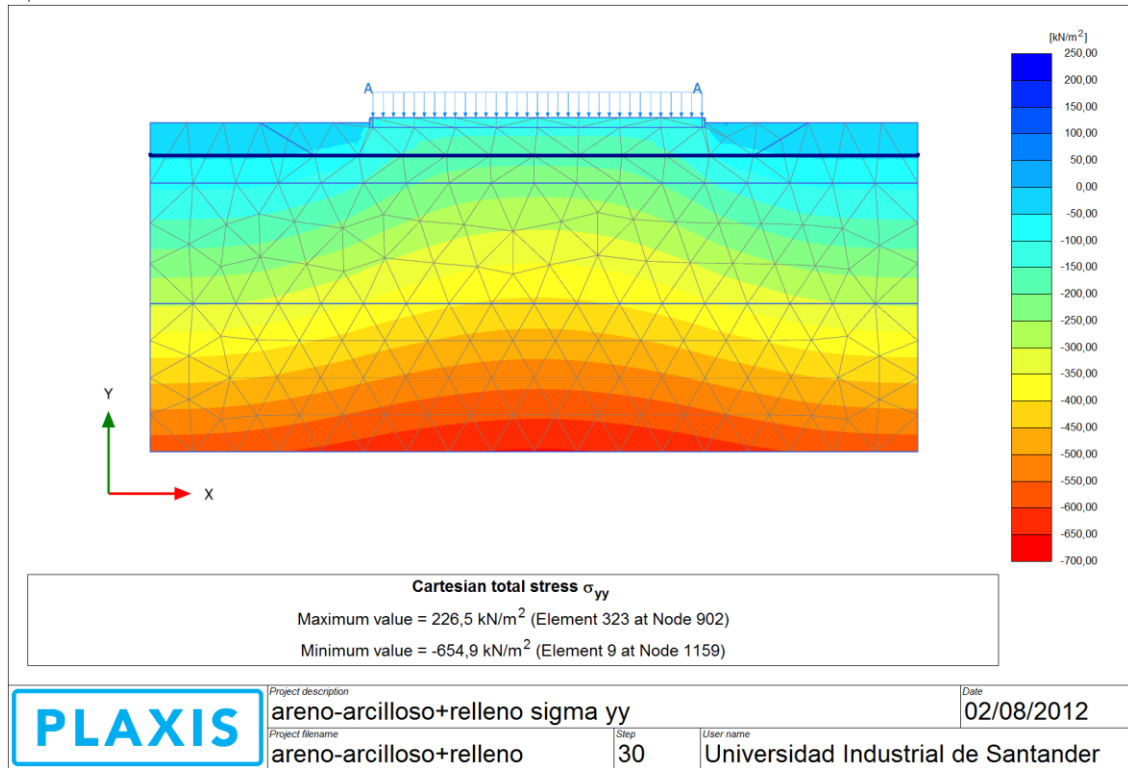
ANEXO I. Resultados del perfil areno-arcilloso con relleno.

Output Version 2010.1.0.6380



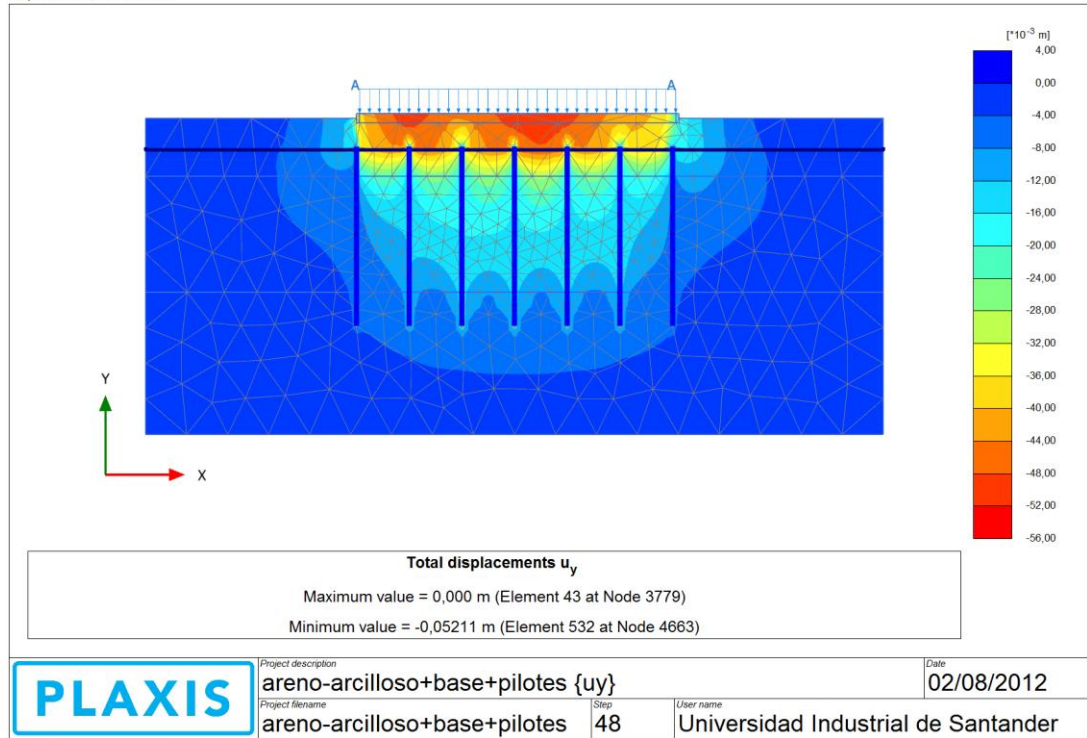
PLAXIS	Project description	areno-arcilloso+relleno {uy}		Date	02/08/2012
	Project filename	areno-arcilloso+relleno	Step	30	User name

C:\Users\InternetS1-01\Desktop\areno-arcilloso+relleno.P2D\AT1

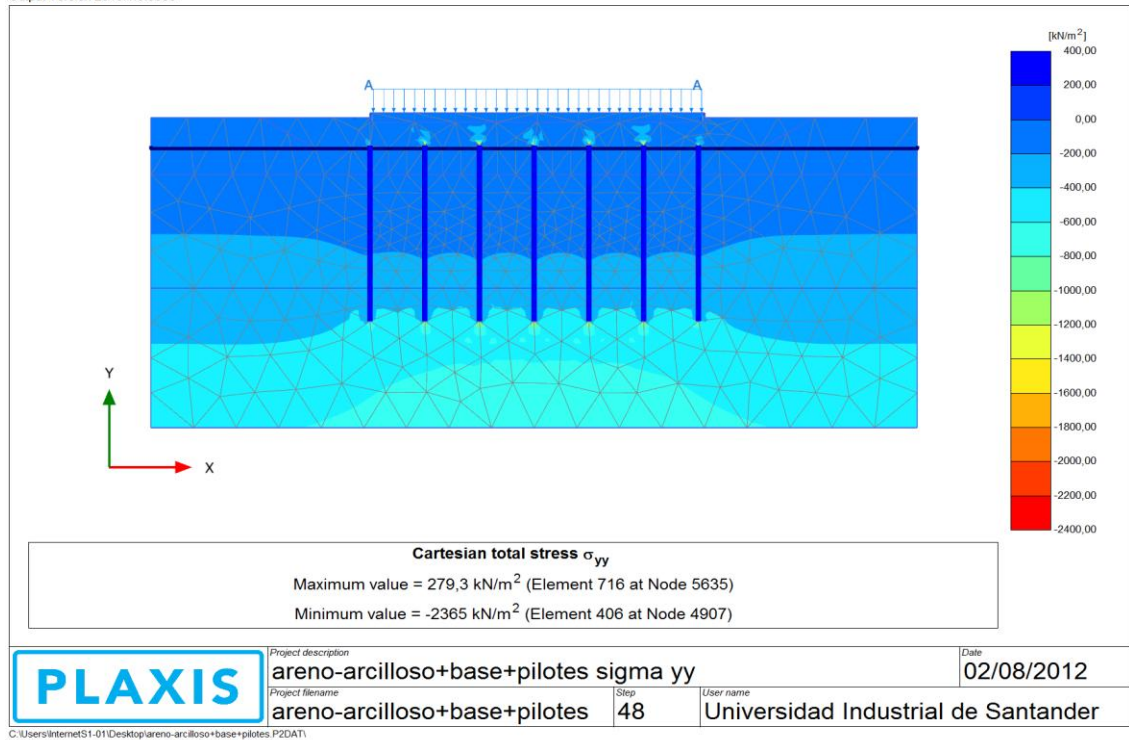


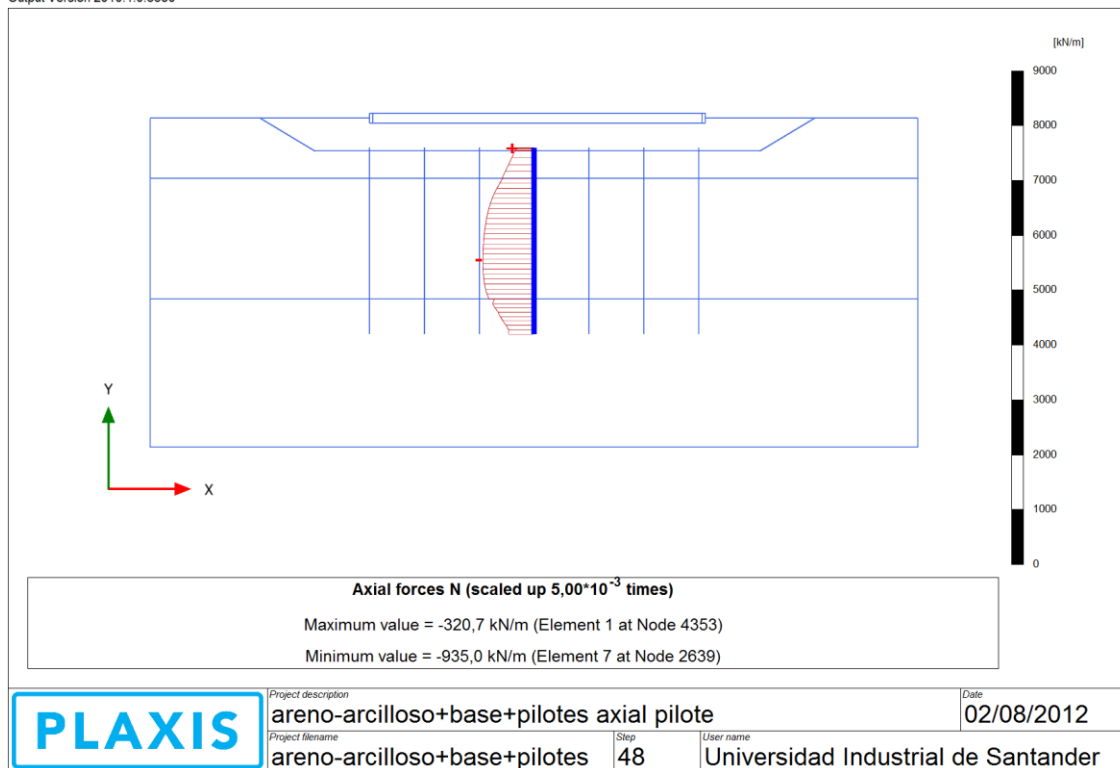
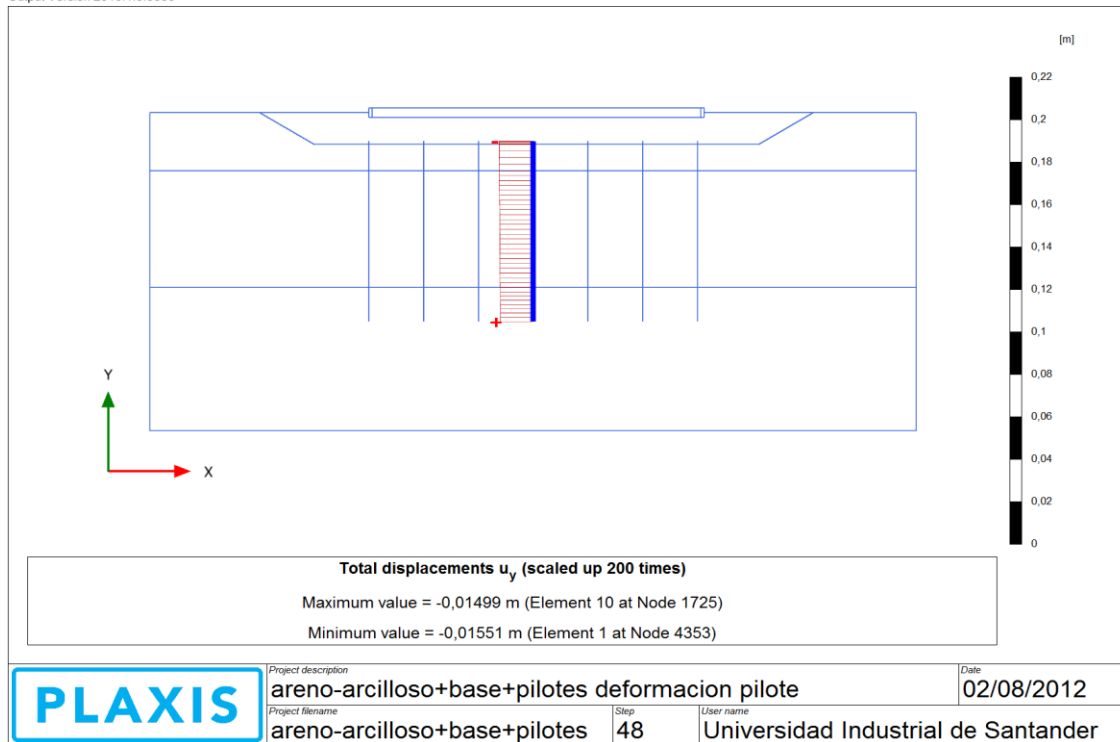
ANEXO J. Resultados del perfil areno-arcilloso con pilotes.

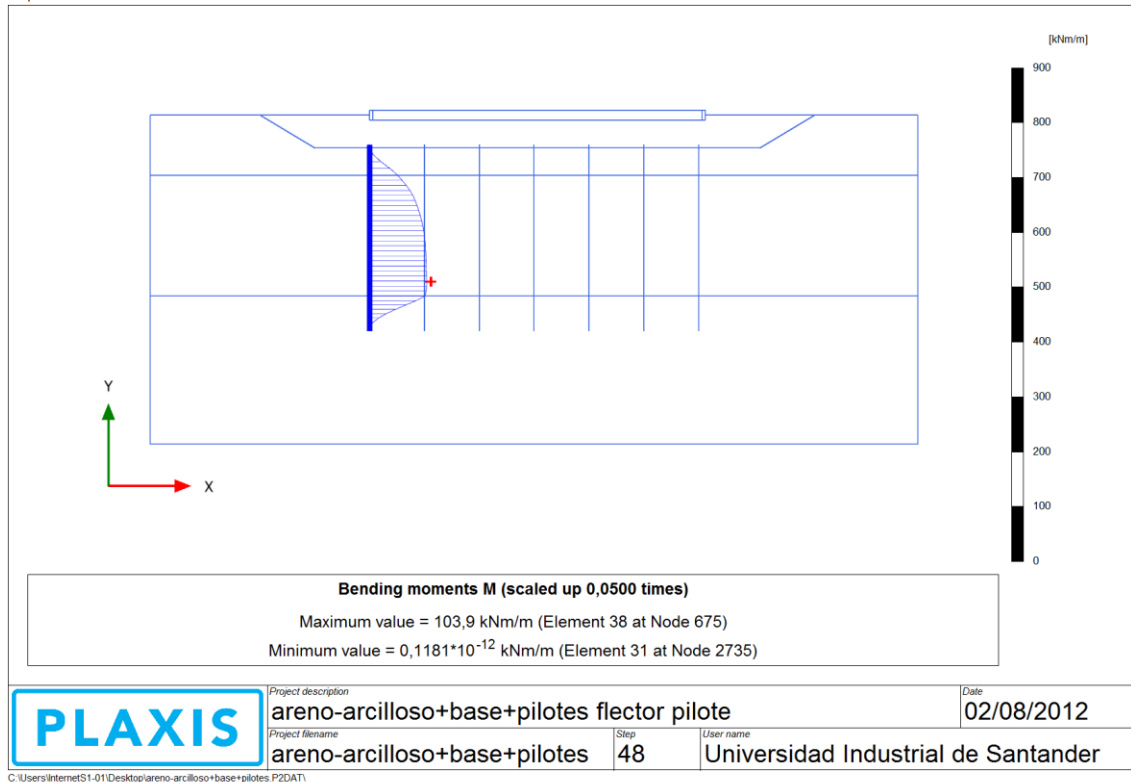
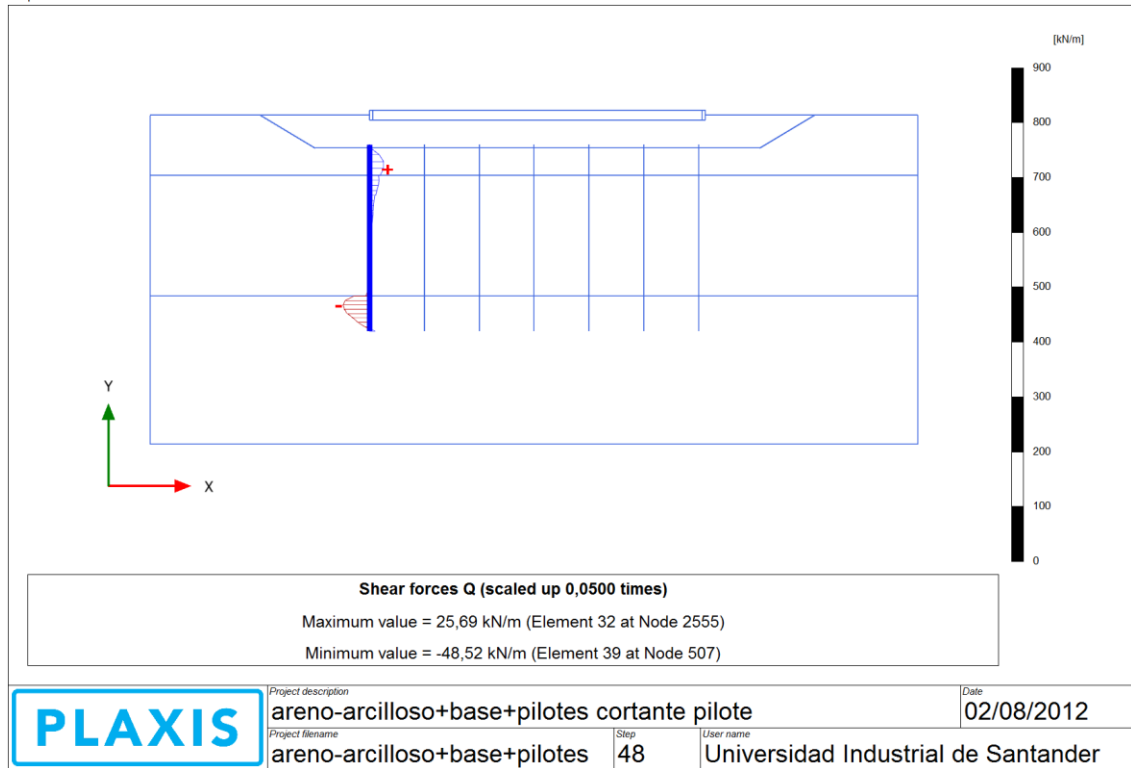
Output Version 2010.1.0.6380

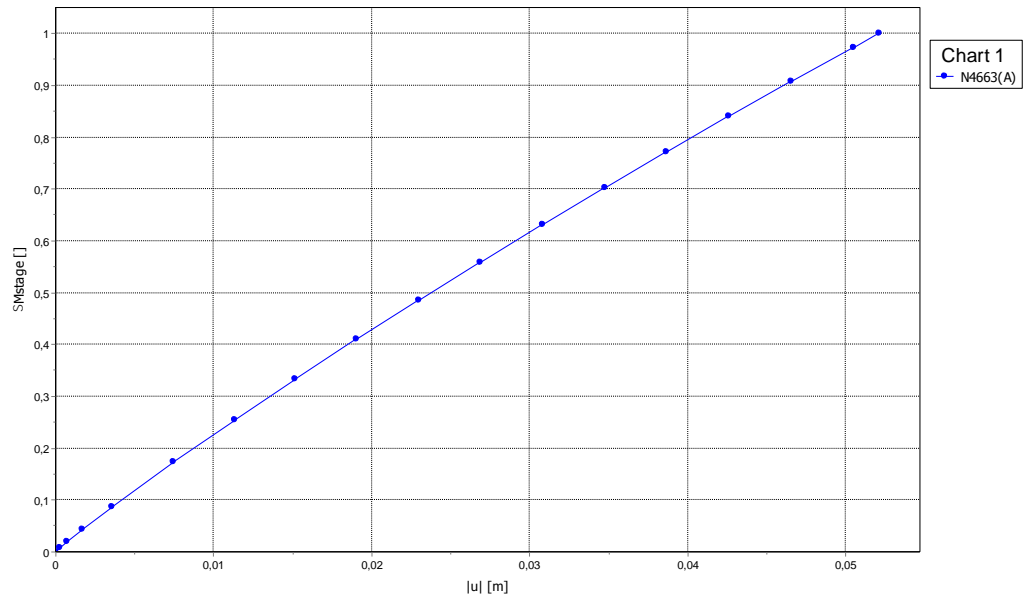


Output Version 2010.1.0.6380







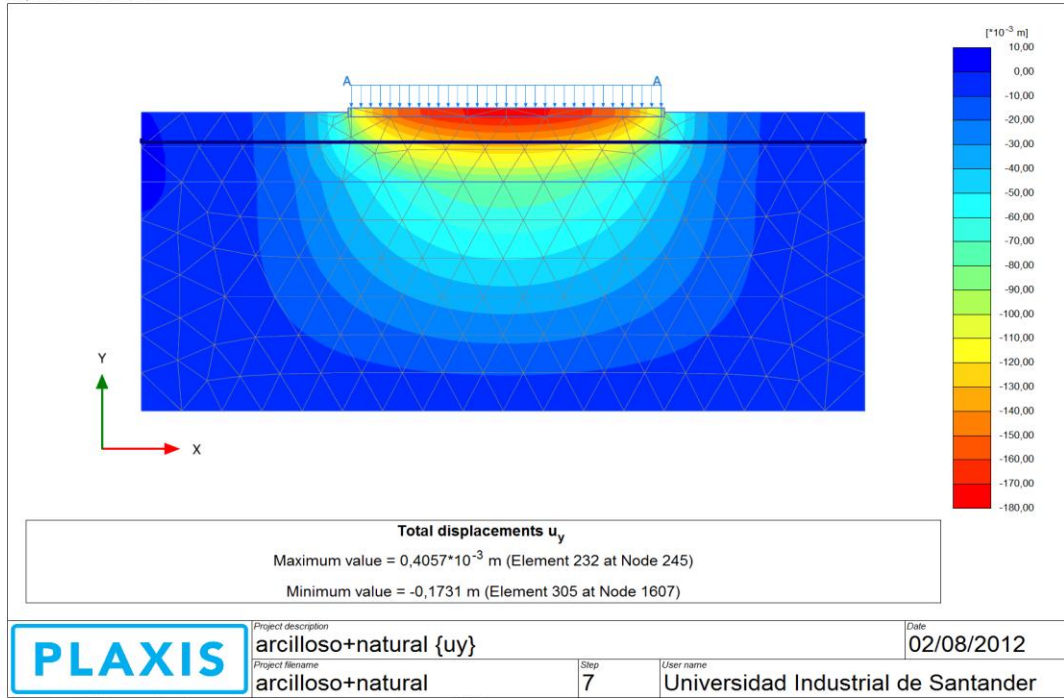


	<small>Project description</small> punto A	<small>Date</small> 02/08/2012	
	<small>Project filename</small> areno-arcilloso+base+pilotes	<small>Step</small> 48	<small>User name</small> Universidad Industrial de Santander

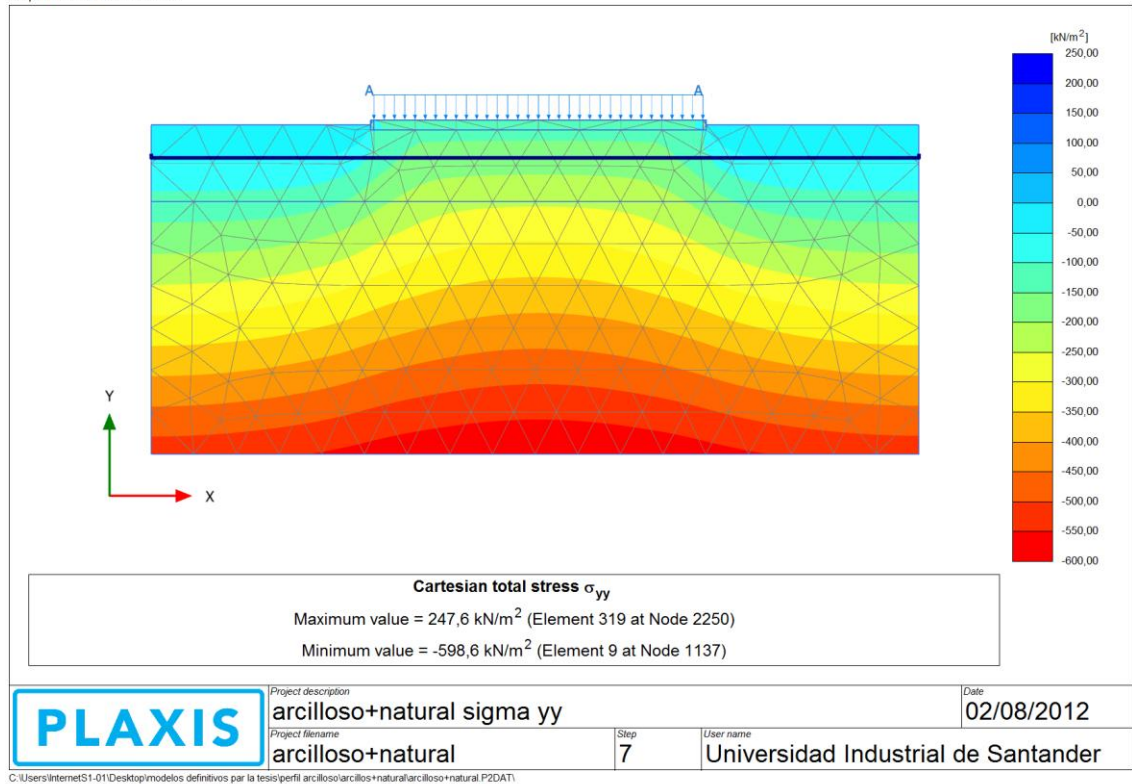
C:\Users\InternetS1-01\Desktop\areno-arcilloso+base+pilotes.P2DAT\

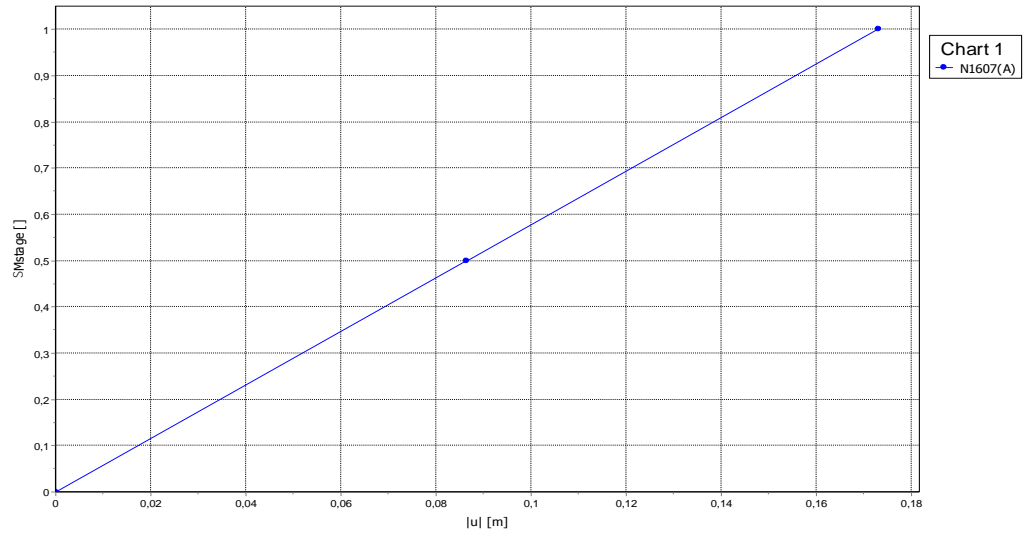
ANEXO K. Resultados del perfil arcilloso natural.

Output Version 2010.1.0.6380



Output Version 2010.1.0.6380

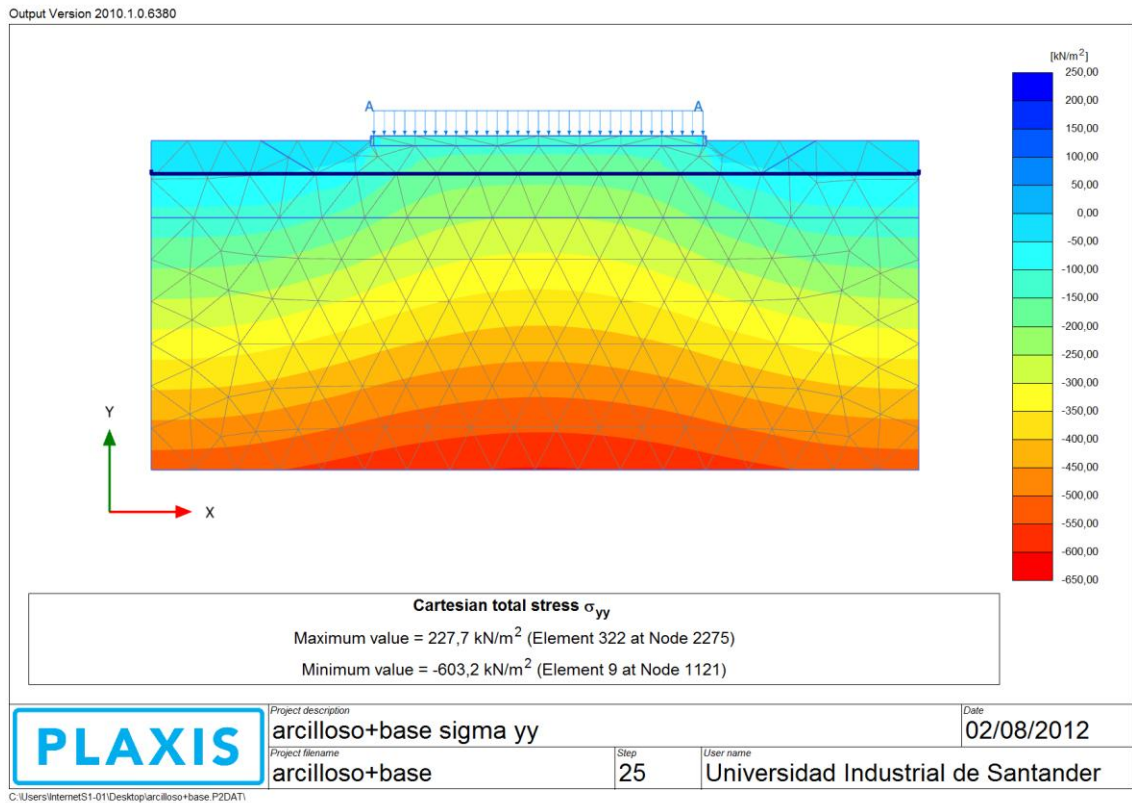
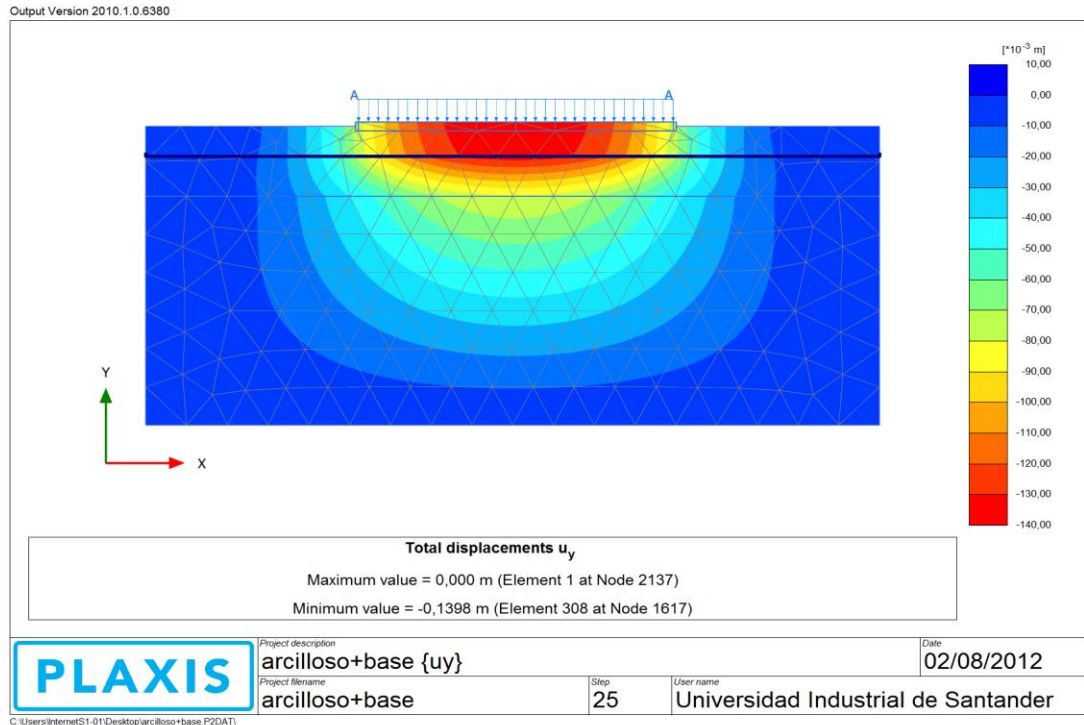


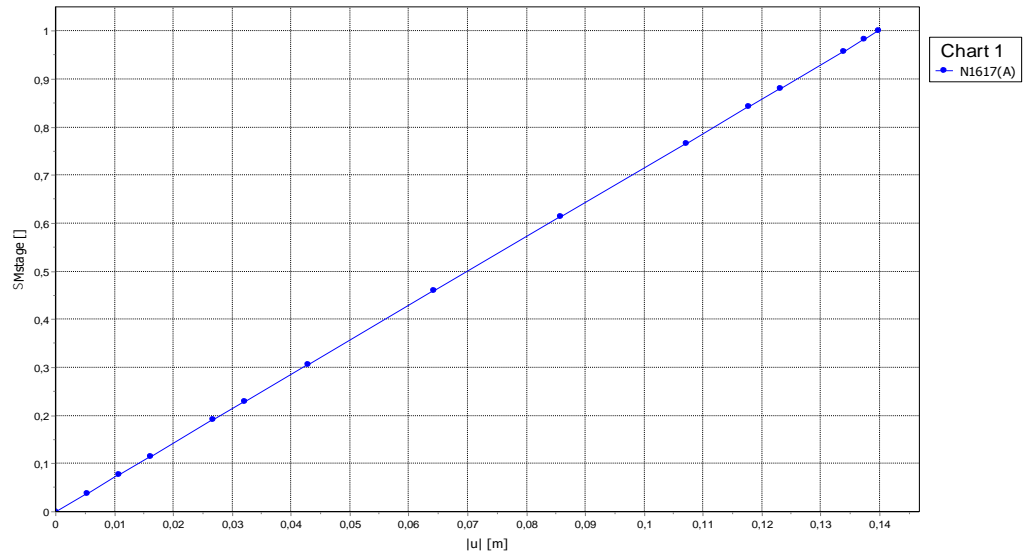


PLAXIS	Project description	Date	
	punto A	02/08/2012	
	Project filename	Step	User name
	arcilloso+natural	7	Universidad Industrial de Santander

C:\Users\InternetS1-01\Desktop\modelos definitivos par la tesis\perfil arcilloso\arcilloso+natural\arcilloso+natural.P2DAT\

ANEXO L. Resultados del perfil arcilloso con relleno.



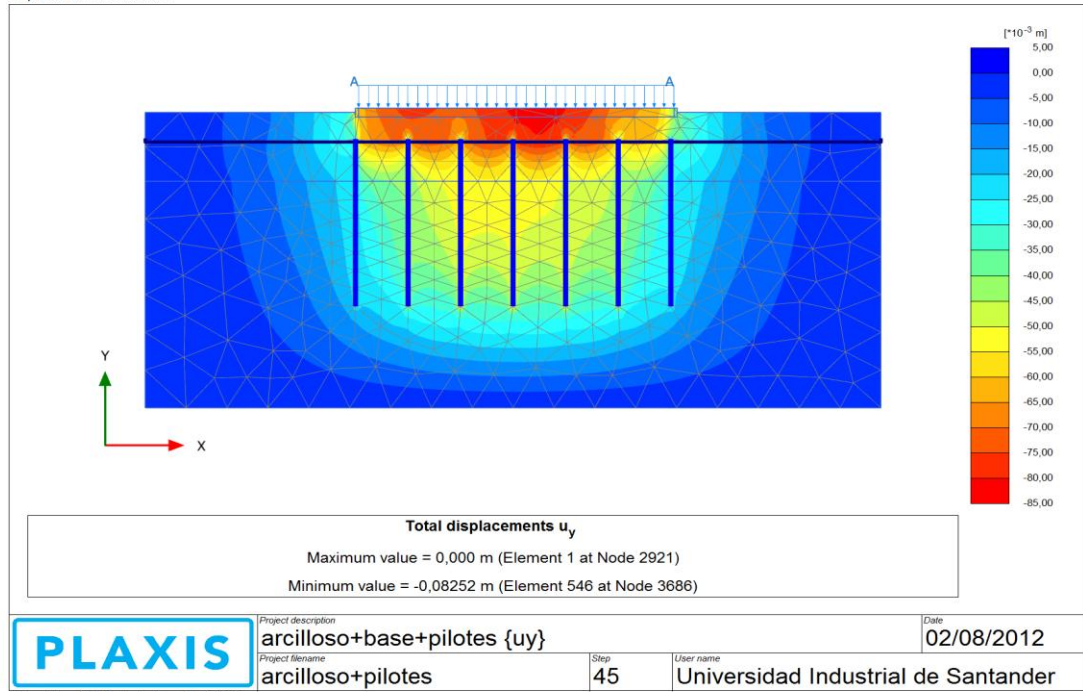


	<small>Project description</small> punto A	<small>Date</small> 02/08/2012
	<small>Project filename</small> arcilloso+base	<small>Step</small> 25

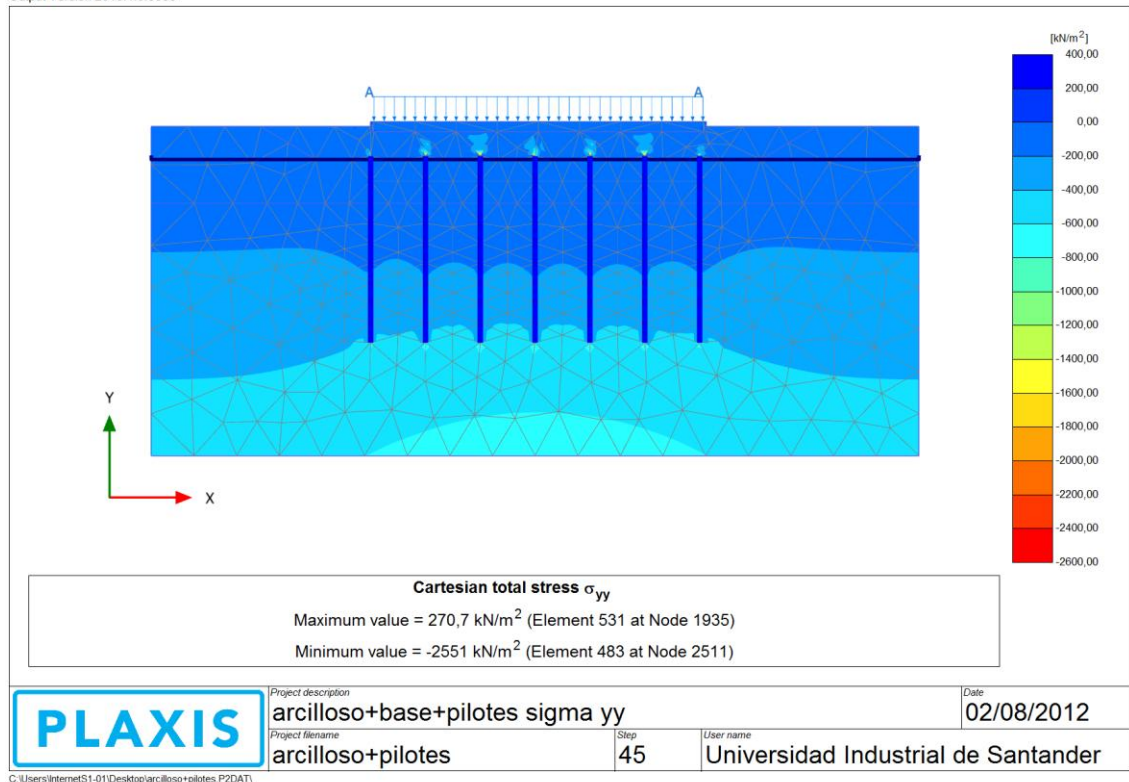
C:\Users\InternetS1-01\Desktop\arcilloso+base.P2DAT\

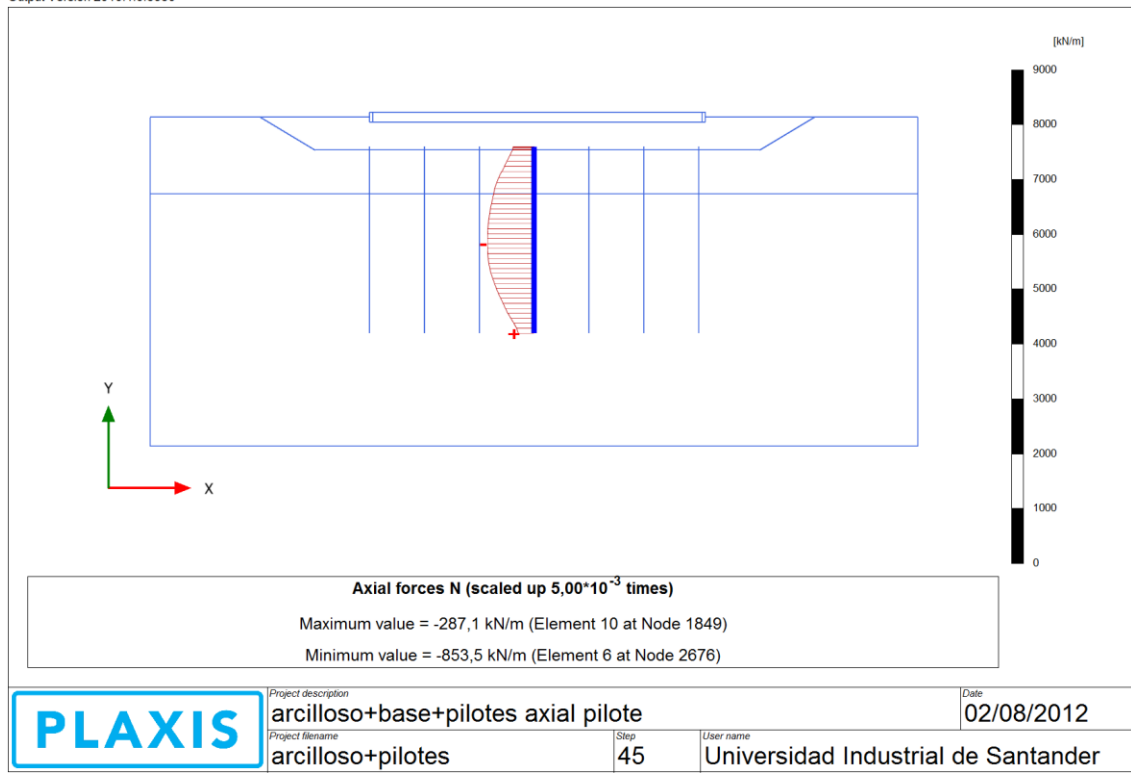
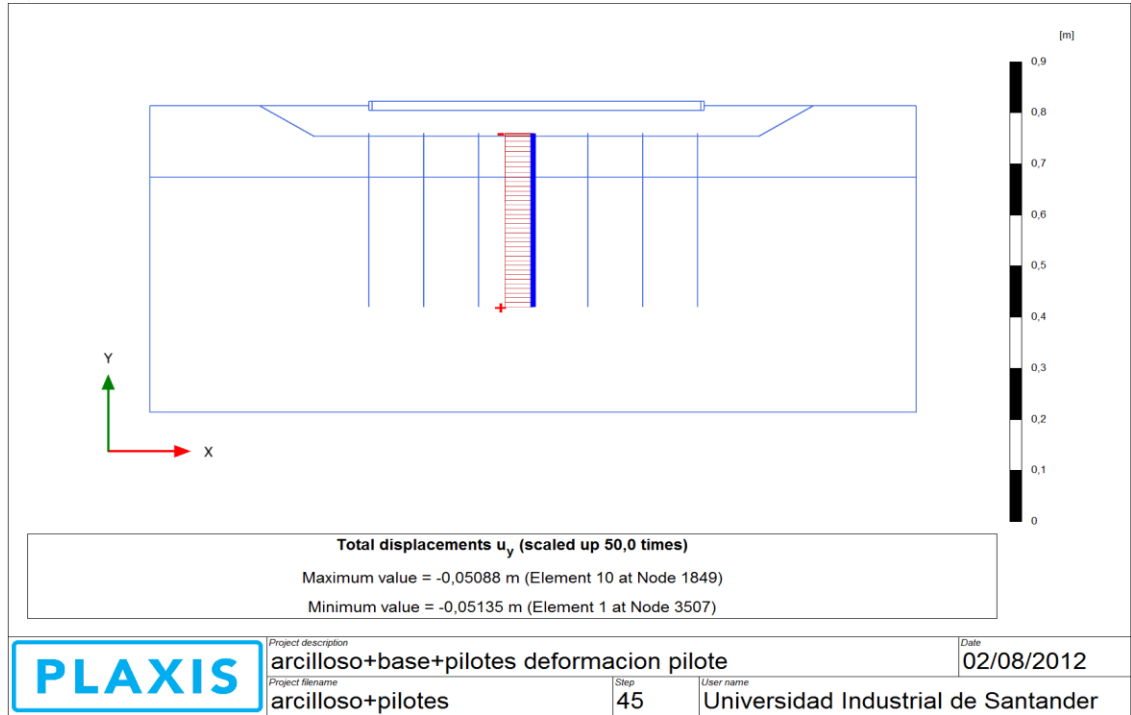
ANEXO M. Resultados del perfil arcilloso con pilotes.

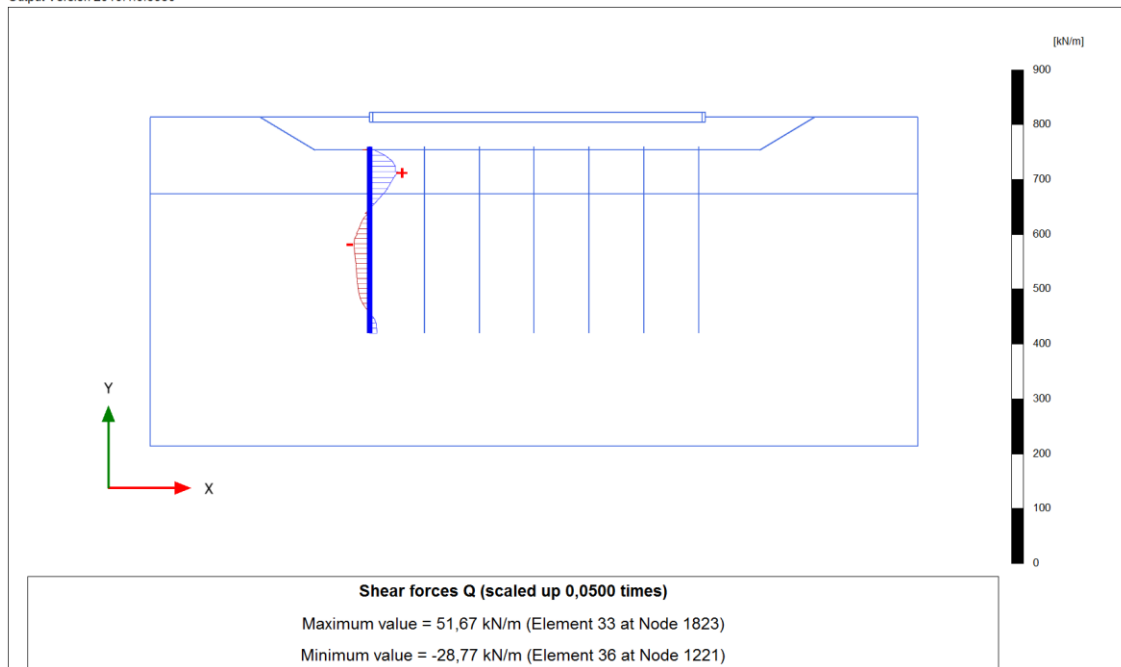
Output Version 2010.1.0.6380



Output Version 2010.1.0.6380

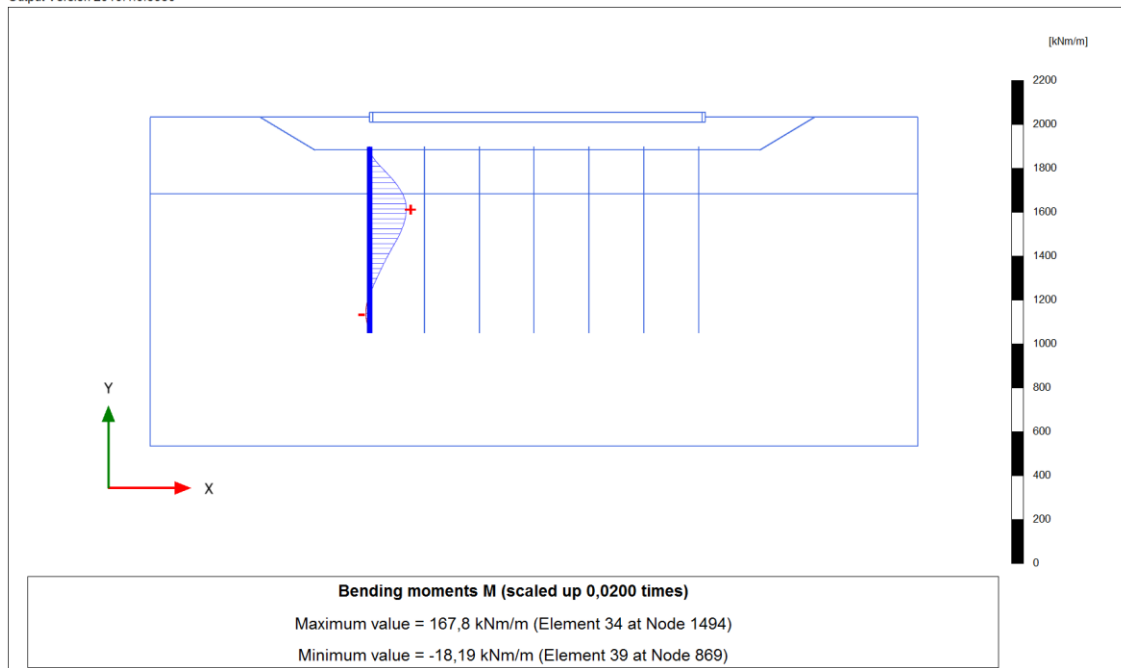






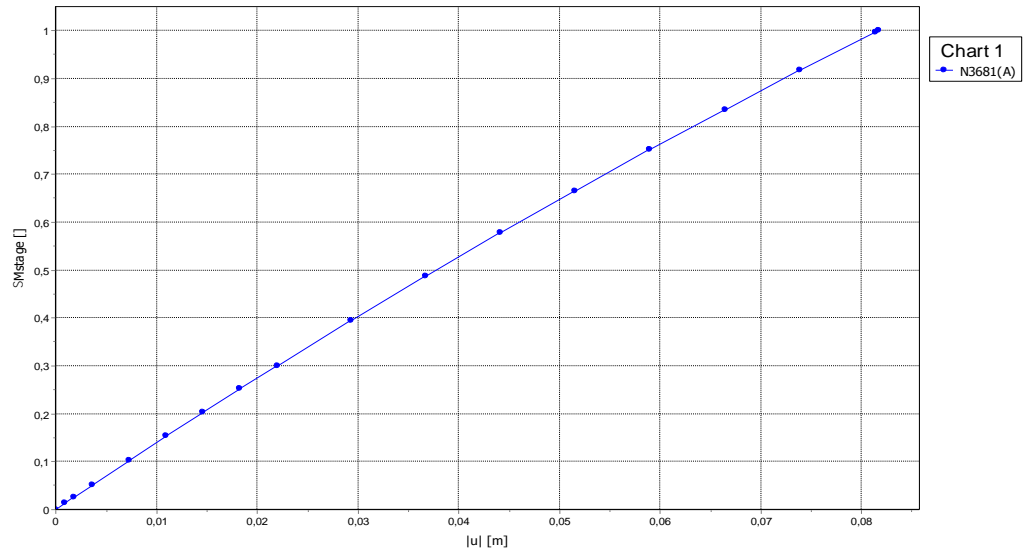
PLAXIS	Project description	arcilloso+base+pilotes cortante pilote		Date	02/08/2012
	Project filename	Step	User name		
arcilloso+pilotes		45	Universidad Industrial de Santander		

C:\Users\InternetS1-01\Desktop\arcilloso+pilotes P2\DAT1



PLAXIS	Project description	arcilloso+base+pilotes flector pilote		Date	02/08/2012
	Project filename	Step	User name		
arcilloso+pilotes		45	Universidad Industrial de Santander		

C:\Users\InternetS1-01\Desktop\arcilloso+pilotes P2\DAT1

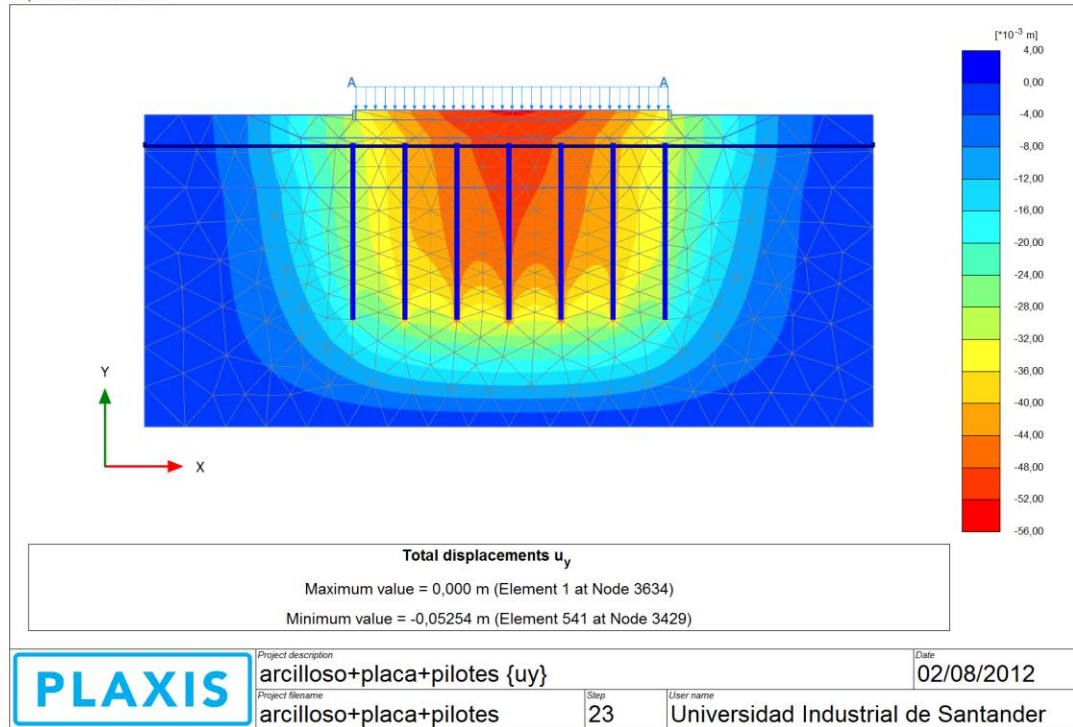


	<small>Project description</small> punto A	<small>Date</small> 02/08/2012
	<small>Project filename</small> arcilloso+pilotes	<small>Step</small> 45

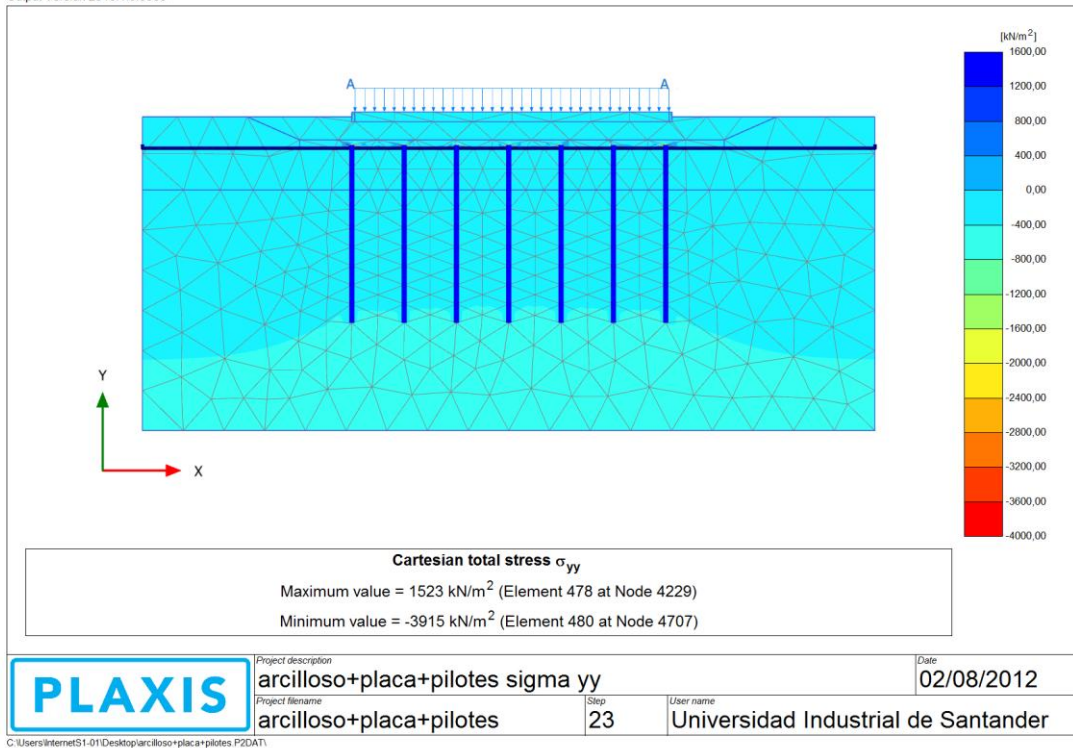
C:\Users\InternetS1-01\Desktop\arcilloso+pilotes.P2DAT\

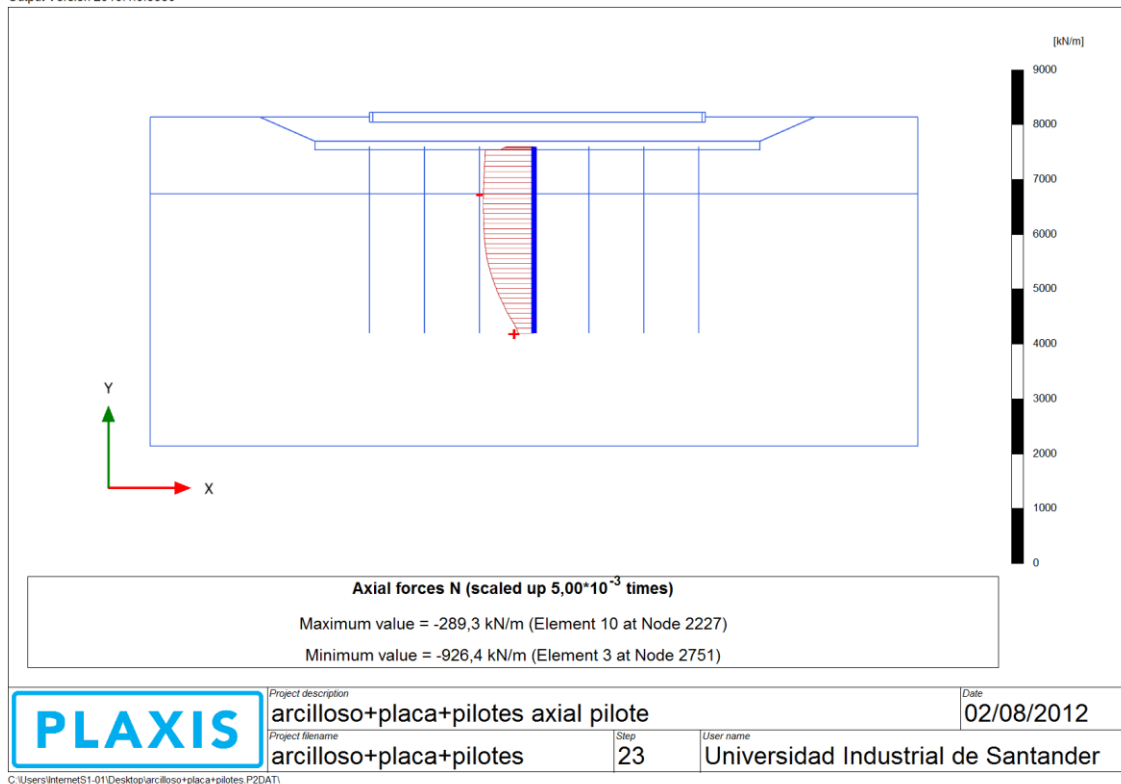
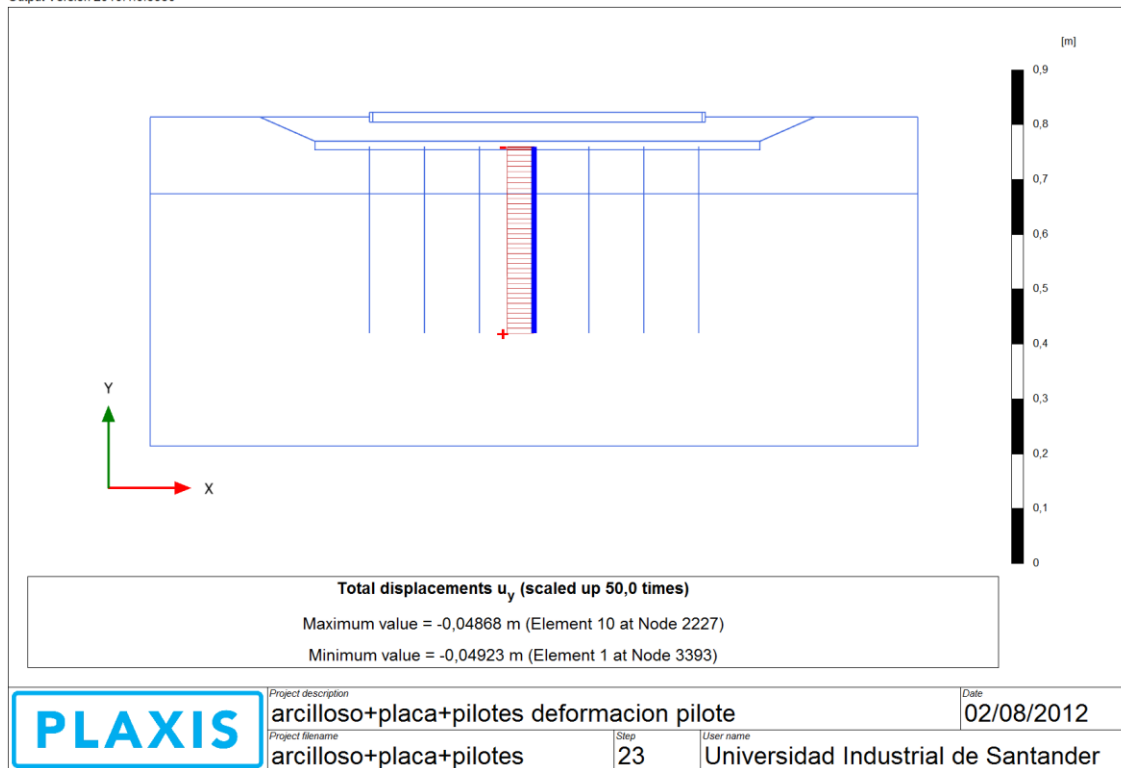
ANEXO N. Resultados del perfil arcilloso con placa y pilotes.

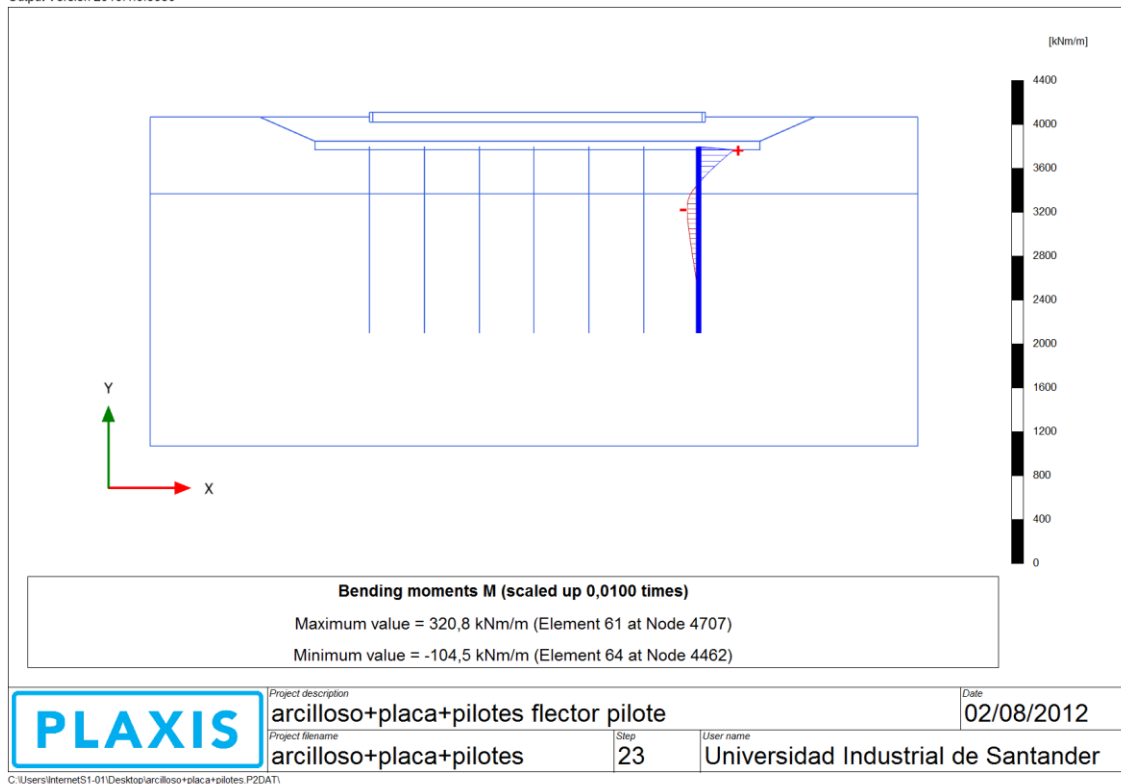
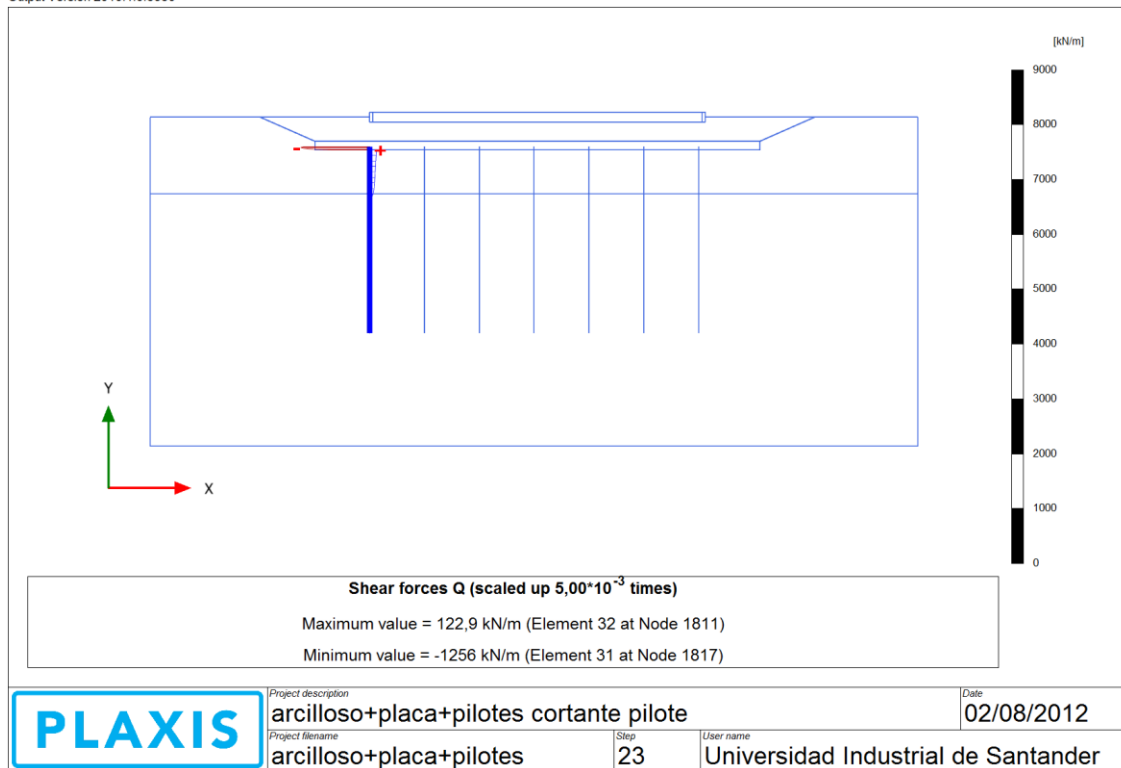
Output Version 2010.1.0.6380

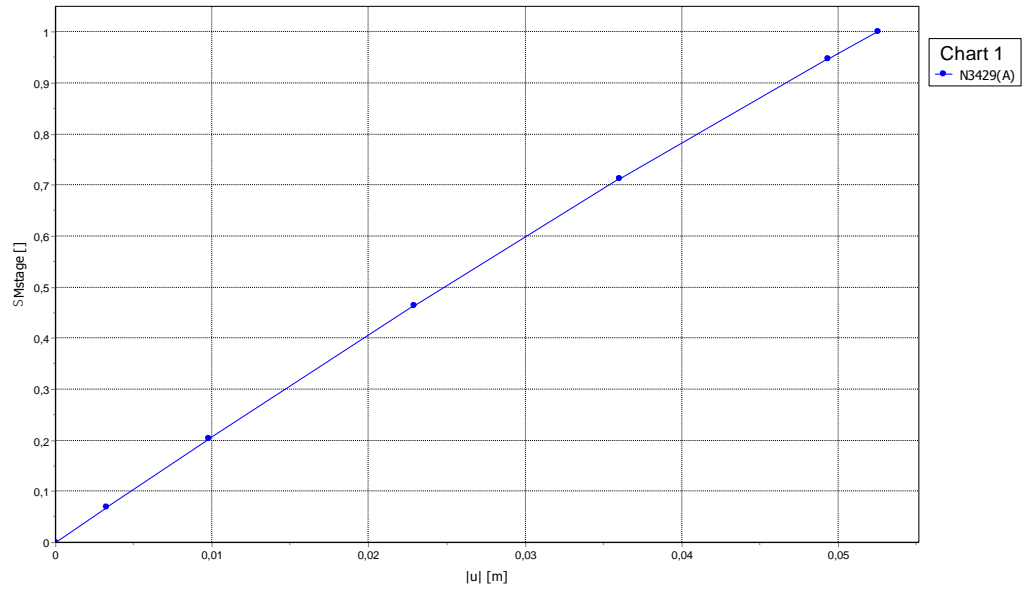


Output Version 2010.1.0.6380







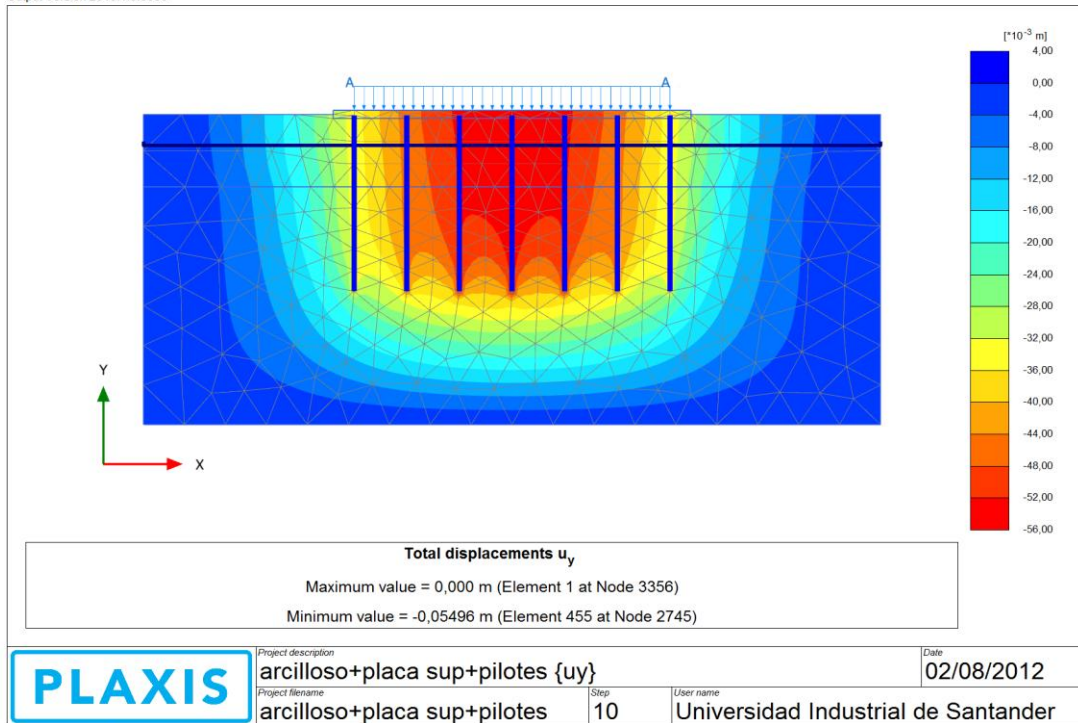


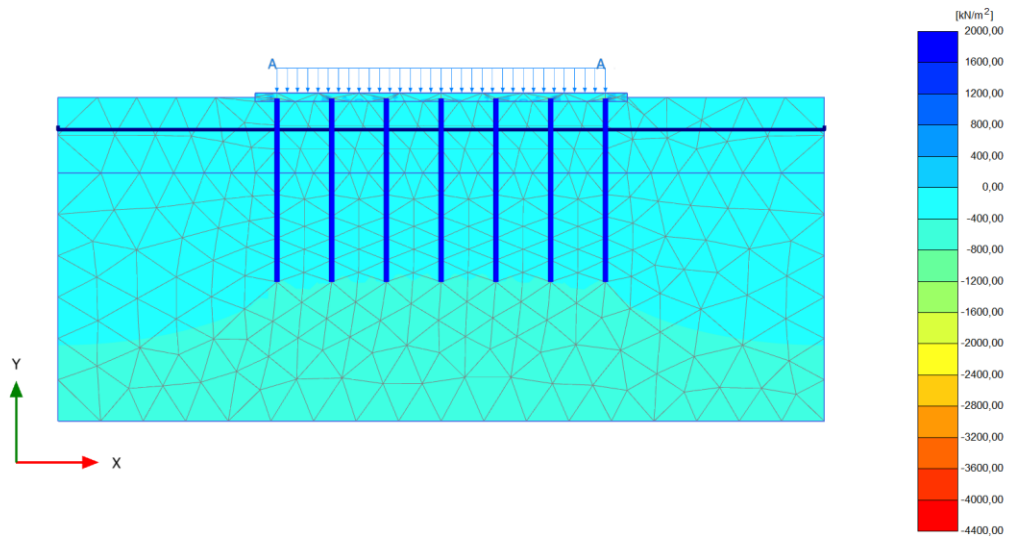
	<i>Project description</i> punto A	<i>Date</i> 02/08/2012	
	<i>Project filename</i> arcilloso+placa+pilotes	<i>Step</i> 23	<i>User name</i> Universidad Industrial de Santander

C:\Users\InternetS1-01\Desktop\arcilloso+placa+pilotes.P2DAT\

ANEXO Ñ. Resultados del perfil arcilloso con placa superior y pilotes.

Output Version 2010.1.0.6380

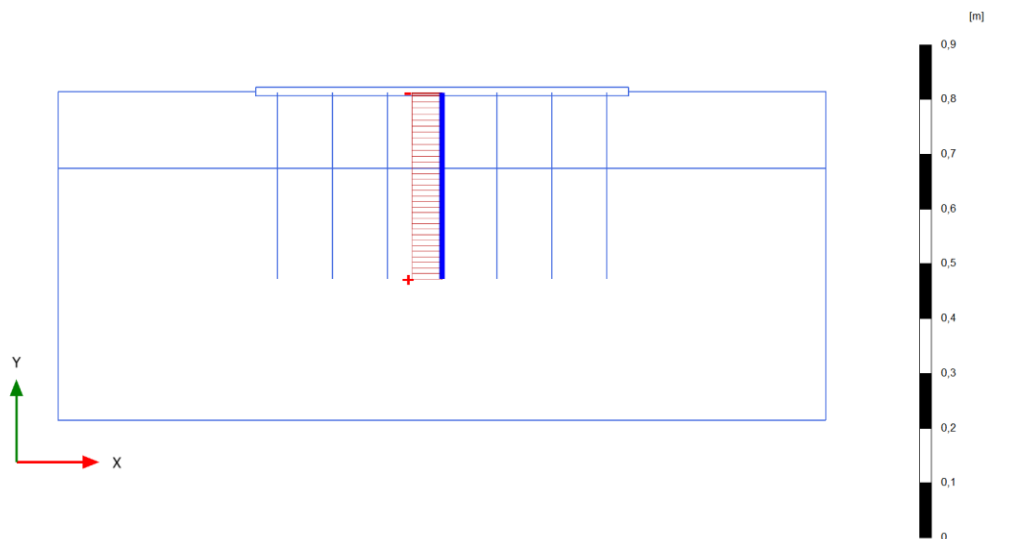




Cartesian total stress σ_{yy}
 Maximum value = 1853 kN/m² (Element 429 at Node 1581)
 Minimum value = -4010 kN/m² (Element 413 at Node 1565)

PLAXIS	Project description	arcilloso+placa sup+pilotes sigma yy		Date	02/08/2012
	Project filename	arcilloso+placa sup+pilotes	Step	10	User name

C:\Users\InternetS1-01\Desktop\arcilloso+placa sup+pilotes P2DAT1



Total displacements u_y (scaled up 50,0 times)
 Maximum value = -0,05434 m (Element 9 at Node 2291)
 Minimum value = -0,05492 m (Element 1 at Node 2737)

PLAXIS	Project description	arcilloso+placa sup+pilotes deformacion pilote		Date	02/08/2012
	Project filename	arcilloso+placa sup+pilotes	Step	10	User name

C:\Users\InternetS1-01\Desktop\arcilloso+placa sup+pilotes P2DAT1

