

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Civil

Recalce de Cimentaciones Mediante Inyección de Resinas

Autor:

Rafael Sánchez Carrasco

Tutor:

Juan Diego Bauzá Castelló

Dep. de Estructuras de Edificación e Ingeniería del Terreno

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

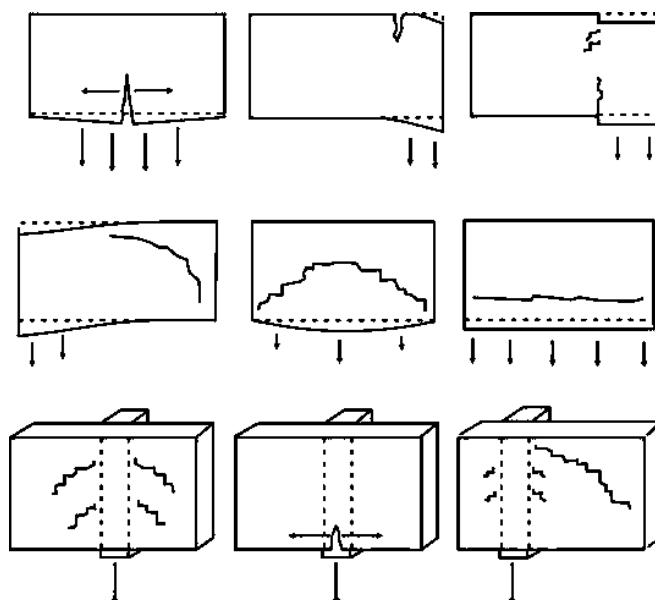
Sevilla, 2016

1. ESTADO DEL CONOCIMIENTO

1.1 PATOLOGÍAS

1.1.1 PATOLOGÍAS CARACTERÍSTICAS DE ASIENTO DIFERENCIAL

El efecto más notorio que se produce en una cimentación defectuosa es el asiento diferencial: la estructura tiene asientos distintos en cada punto y se producen deformaciones y giros no admisibles tanto en la cimentación como en el resto de la estructura. A priori, el asiento no es un fenómeno perjudicial para la estructura si es igual para toda la cimentación porque la estructura se desplaza como si fuera un sólido rígido. La consecuencia primera de estas deformaciones son las fisuras y las grietas. Como se aprecia en la siguiente imagen, cada punto del muro tiene un asiento diferente.



Tipos de grietas en muros debidas a asientos diferenciales.

J. Martínez Larios

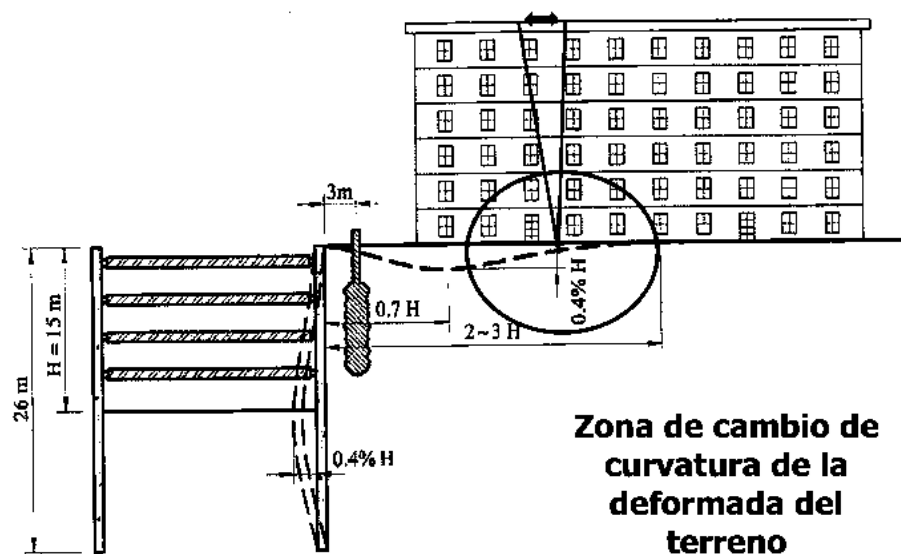
Aunque la cimentación sea adecuada y esté en buen estado, puede sufrir asiento diferencial por variaciones en el estado tensional del terreno: concentraciones de agua, variación del nivel freático, presencia de vacíos en el suelo o desplazamientos locales del terreno. Las concentraciones de agua y la presencia de vacíos generan una disminución puntual de rigidez que puede provocar un hundimiento en el suelo de la superficie.



Grietas producidas por lavado de finos.

GEOSEC

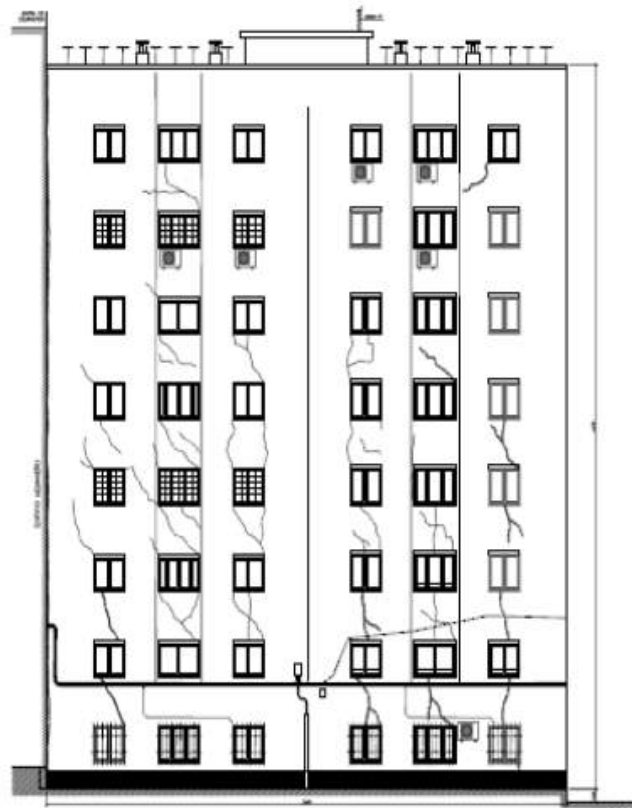
Pueden ocurrir por pérdidas en la redes de saneamiento y distribución de agua, infiltración de agua pluvial, lavado de finos, modificaciones en la red de flujo de agua subterránea, instalación de sistemas de impermeabilización subterránea, estímulo dinámico (vibraciones producidas por tráfico o maquinaria pesada), etc. Los desplazamientos locales de terreno suelen ocurrir por excavaciones cercanas: pantallas, túneles, sótanos, tuberías... debido a que la excavación subterránea introduce una alteración en el estado tensional original del terreno que lleva asociado deformaciones para restablecer el equilibrio del suelo.



Hundimiento local de la superficie por pantalla cercana.

A partir de J. D. Bauzá Castelló

Un descenso del nivel freático puede provocar asiento diferencial en la superficie en suelos cohesivos. Este descenso provoca una disminución de las presiones intersticiales y un aumento de las presiones efectivas (Ley de Terzaghi) que actúan sobre el terreno. Este aumento de presiones efectivas provoca un mayor estado de compresión del suelo que reduce el índice de poros del terreno y provoca el hundimiento de la superficie. Este fenómeno se denomina subsidencia. Consiste en un conjunto de deformaciones que se producen en superficie originadas por alteraciones en el equilibrio interno del terreno y no por sobrecargas directamente aplicadas en ella. Debido a la baja permeabilidad del suelo cohesivo, al disminuir el nivel freático quedan presiones intersticiales en exceso que al disiparse en el tiempo provocan el hundimiento (fenómeno de consolidación de suelos).



Esquema grietas en fachada posterior edificio de viviendas en Ciudad de Los Ángeles (Madrid).

GEOSEC



Ejemplo de grieta debida a asiento diferencial
GEOSEC

1.1.2 CONTROL DE PATOLOGÍAS

No todas las grietas o fisuras tienen la misma afección sobre la estructura. Hay que distinguir si ocurren en elementos estructurales (muro de carga) o en elementos auxiliares (tabiques). Hay que diferenciar también la causa de la patología, por ejemplo las fisuras de dilatación que aparecen y desaparecen estacionalmente (oscilación de la fisura) pero no crecen indefinidamente. Es importante averiguar si se trata de un hecho aislado o una fisura viva. Para el propietario del edificio se pueden plantear dos métodos de control de las fisuras: el marcado y el testigo de yeso.

1.2. TÉCNICAS DE RECALCES TRADICIONALES

El proyecto de una construcción, y en particular el de su cimentación, contempla la situación del entorno en el que se construye en ese momento y se dimensiona en consecuencia. Sin embargo, con el paso del tiempo esta situación puede variar, por ejemplo debido a nuevas construcciones cercanas, instalaciones subterráneas que modifiquen el estado tensional del suelo, flujos de agua que provoquen cavidades, etc., y provocar efectos negativos en la estructura. Aparte de cambios externos a la construcción también se pueden dar cambios internos, como un nuevo uso de la estructura con mayor solicitación. Ante este escenario, imposible de prever, hay que recalzar la cimentación. Un recalce consiste en intervenir los cimientos del edificio ya construido para que la estructura mantenga la estabilidad y seguridad adecuada. La definición de recalce incluye también la reparación del cimiento bien por un incorrecto dimensionamiento o una mala ejecución.

1.2.1. RECALCE DE CIMENTACIONES

Distinguimos principalmente dos tipologías de recalces: los superficiales y los profundos. Los recalces buscan subsanar un defecto de la cimentación o evitar daños a una estructura por otras causas. Estos defectos se pueden ocasionar por una mala ejecución o una inadecuada proyección. Las otras causas pueden ser variaciones en el estado deformativo del terreno por excavaciones cercanas, vibraciones, alteraciones del nivel freático o cambios de uso en la estructura que requieran una mayor capacidad de carga por ejemplo por un incremento de plantas o un cambio de uso. Las fases que componen la ejecución de un recalce se suelen agrupar en:

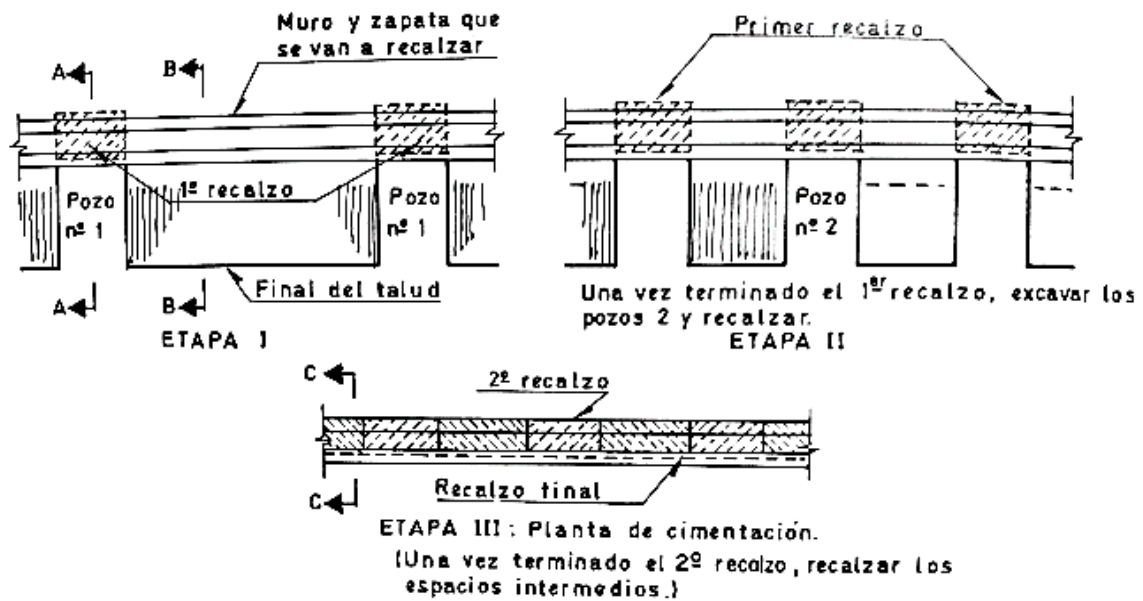
- Refuerzo y apoyo provisional, si es necesario, de la estructura.
- Transferencia de cargas al apoyo provisional.
- Arreglo de la cimentación.
- Transferencia de cargas a la cimentación modificada.

El refuerzo y apoyo provisional se suele realizar con apeos y apuntalamientos tanto exteriores como interiores. En edificios antiguos puede ser un proceso complejo y bastante costoso. La transferencia de cargas al apoyo se hace mediante cuñas, gatos de husillo o gatos hidráulicos. En cuanto al arreglo de la cimentación, se opta por aumentar sus dimensiones, aumentar la profundidad para transmitir las cargas a suelo más resistente o actuar sobre el terreno para mejorar su capacidad portante. En estas tres opciones, el hormigón tiene grandes ventajas para ser usado en recalces porque puede ser bombeado y tiene elevada resistencia incluso bajo el agua a compresión.

Con la técnica de recalce que tratamos en este trabajo, las inyecciones de resina expansiva, conseguimos mejorar la capacidad portante del terreno sin necesidad de transmisión de la cargas de los apoyos ni excavaciones de ningún tipo. Solamente es necesario realizar una pequeña perforación para inyectar la resina en el terreno bajo la cimentación. Además podemos conseguir de forma controlada el levantamiento de una parte de la estructura para corregir problemas de asientos diferenciales.

1.2.2. POZOS DE CIMENTACIÓN

Se añade hormigón debajo de la cimentación existente. Muy utilizado en zapatas continuas y grandes losas porque intercalando en el espacio las excavaciones y el relleno se puede evitar disponer de soportes provisionales gracias al efecto bóveda.



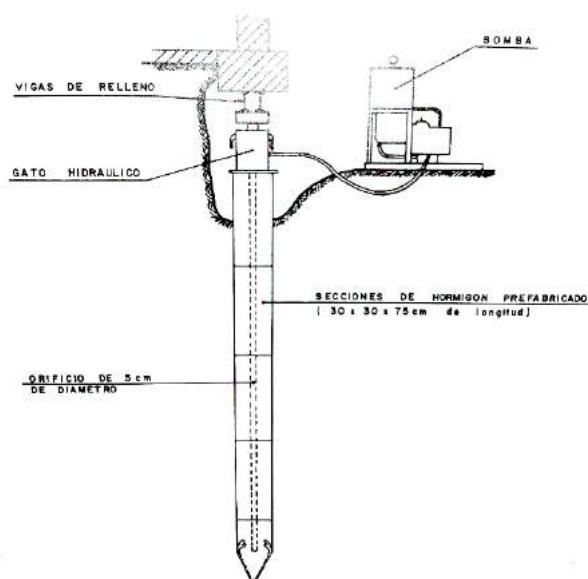
Recalce de un muro mediante pozos (Paterson)

Geotecnia y Cimientos II

1.2.3. MICROPILOTES

Son pilotes cuyo diámetro es menor de 300 mm. Aplicación útil para recalzar zonas de la cimentación no accesibles desde fuera de la estructura. Están formados por un perfil tubular metálico circular de acero estructural que se introduce en el terreno por hinca mediante gatos hidráulicos. Luego se rellena de lechada de hormigón. Gracias a su reducido tamaño se emplea maquinaria relativamente ligera en su construcción. Sin embargo, tienen el inconveniente que se necesita de un apoyo para efectuar la reacción necesaria para la hinca. Se soluciona en la mayoría de los casos utilizando la propia cimentación. El peso de la maquinaria no es suficiente.

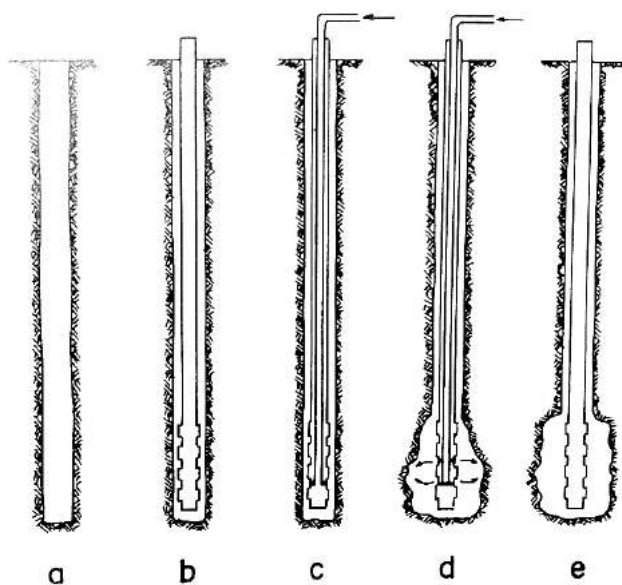
Transmiten las cargas principalmente por adherencia y permiten llevar la sollicitación a estratos profundos más resistentes. No requiere excavación ni medios de apoyo provisional de la estructura. La afección a la cimentación es mínima porque solamente se necesita perforar con el diámetro del micropilote. La maquinaria que se utiliza es similar a la que se puede emplear en la realización de sondeos. Hay que prestar especial atención en la unión entre el micropilote y la cimentación para que no falle por esfuerzo rasante. Normalmente se aplica una textura rugosa a ambas caras y se amplía el diámetro de la perforación en la cimentación para que haya más superficie donde repartir la sollicitación y el esfuerzo tangencial sea menor.



Recalce con micropilote hincado (Tomilson)

Geotecnia y Cimientos III

Cuando se ha terminado de clavar el pilote, con un par de gatos hidráulicos se procede a aplicar hasta una vez y media la sollicitación de servicio para que se produzcan las deformaciones que ponen el micropilote en carga. Si esto no se realiza, al transferir de nuevo el peso de la estructura sobre la cimentación se pueden producir asentamientos inesperados. Los micropilotes perforados no necesitan de reacción. Además, se puede aumentar el diámetro de la perforación en la base para aumentar la resistencia por punta y añadir un efecto “anclaje” a la cimentación.

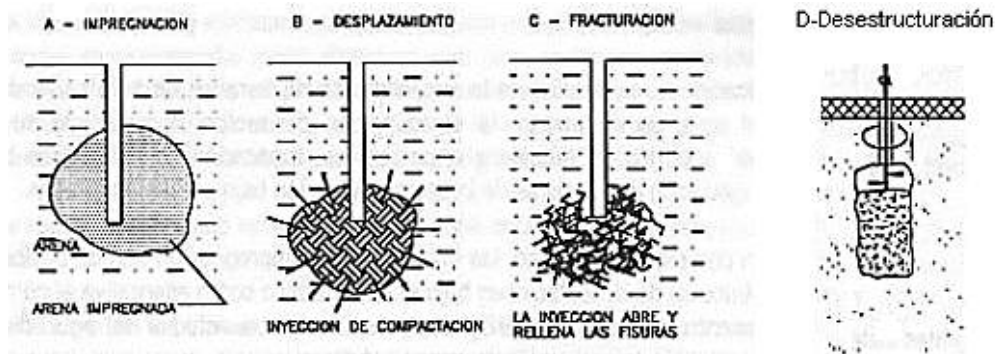


Recalce con micropilote perforado. a) Perforación. b) Armadura tubular. c) Inyección de hormigón. d) Inyección del "bulbo de anclaje". e) Micropilote terminado.

Geotecnia y Cimientos III

1.2.4. INYECCIONES EN EL TERRENO

Este método de recalce es usado cuando no se quiere intervenir los elementos estructurales de la cimentación. Adecuado cuando, por ejemplo, el aumento de carga que va a solicitar la estructura es soportado por la cimentación pero no por el terreno. En vez de modificar la cimentación para repartir la sollicitación y que el suelo reciba menos carga, optamos por mejorar el terreno. Se recurre a aumentar la resistencia y rigidez del terreno mediante la inyección de lechada de cemento u otros productos estabilizadores. Cuando se transmite carga al terreno solamente se ve afectado bajo él el bulbo de tensiones. Esa zona de terreno es la que se deforma y varía su estado tensional. Inyectando estos compuestos se sustituye parte del terreno por un material más resistente que mejora el comportamiento del suelo.



Principales tipos de inyecciones

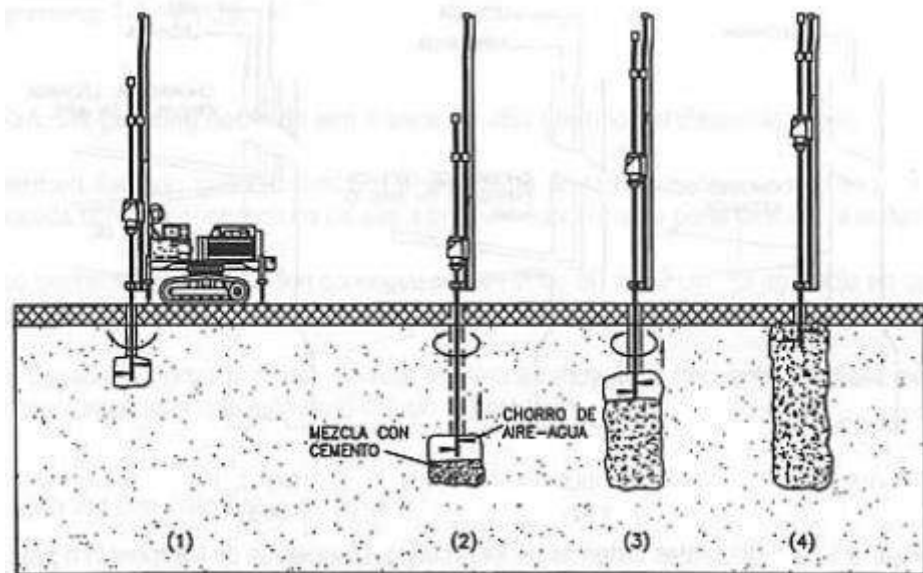
Mitchell, J. K.

También sirven para levantar estructuras que han sufrido asientos diferenciales cuando se consigue que el fluido, en vez de infiltrarse por los huecos del subsuelo, empuje las paredes del terreno y se levante la superficie. La recuperación de asientos mediante inyecciones de resinas expansivas se basa en los mismos principios, pero es más ventajosa, como veremos más adelante. Sobre todo por la comodidad de la ejecución y los costes reducidos.

Según el tipo de inyección distinguimos:

- Inyecciones de impregnación: la lechada fluye por los huecos del suelo y baña el terreno de alrededor.
- Inyecciones de desplazamiento: la lechada no fluye por los huecos del suelo. Empuja las paredes del terreno compactándolo. Se consiguen levantamientos en la superficie.
- Inyecciones de fracturación: la lechada no fluye por los huecos del suelo y empuja las paredes del terreno, pero no lo compacta. Se agrieta y se rellenan las fisuras.

- Inyecciones de desestructuración: Jet-grouting. Formación de un suelocemento dentro del interior del terreno. La lechada se inyecta a alta presión (Jet-grouting simple: solo lechada. Jet-grouting doble: lechada y aire o agua. Jet-grouting triple: lechada, aire y agua) de tal forma que se va rompiendo el terreno conforme se inyecta la lechada. El suelo queda reforzado con columnas de suelocemento. Resultado final parecido a si se hubieran perforado pilotes.



Fases de una inyección a alta velocidad (Jet-grouting)

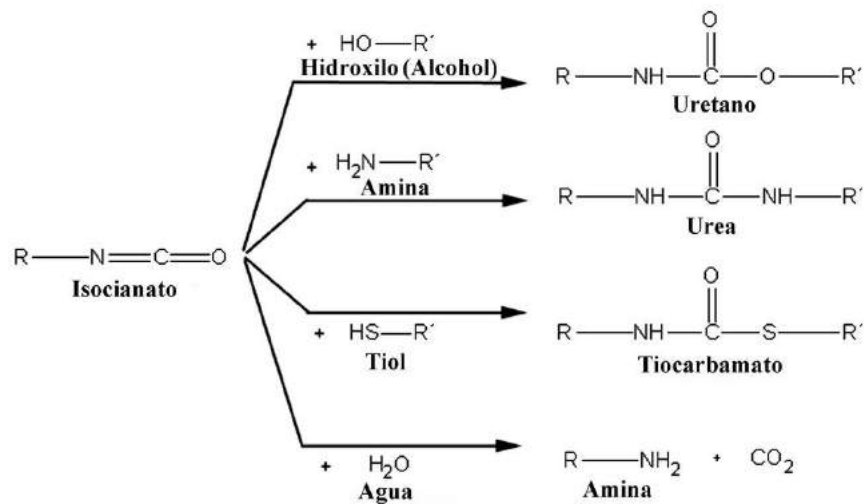
Silsoil

Pasamos ahora a entrar en detalle en el recalce de cimentaciones con resinas expansivas. El fundamento es introducir a través de un fino conducto en el terreno una cierta cantidad de resina a base de compuestos de la clase poliuretano. Esta resina, primero en estado líquido, se expande ejerciendo una gran presión en una reacción química de pocos minutos de duración a la vez que solidifica. Se aprovecha el empuje que produce sobre el suelo del entorno del punto de inyección para recalzar cimentaciones y otros fines de mejora de terreno.

1.3. ESPUMA DE POLIURETANO

1.3.1. MATERIAL

La base más común de la resina expansiva para inyecciones en el terreno es la familia del poliuretano. El poliuretano es un polímero muy versátil y eficiente. Tiene numerosas aplicaciones en la industria y en la construcción: aislante térmico, espumas resiliente, elastómeros adhesivos, selladores, embalajes, juntas, componentes de aeronáutica, etc. La resiliencia se define como la capacidad de un material, mecanismo o sistema para recuperar su estado inicial cuando ha cesado la perturbación a la que había estado sometido.



Reacciones comunes del grupo ISOCIANATO (-NCO)

wikipedia.org/poliuretano

Los poliuretanos suelen ser preparados a base de dioles: poliéteres, poliésteres y policarbonatos. La reacción principal para sintetizar espuma de poliuretano se forma a partir de polialcohol y poliisocianato. Estos dos productos hacen falta transportarlos a obra ya preparados desde laboratorio. Una vez mezclados comienza la reacción química.

1.3.2. REACCIÓN QUÍMICA

La reacción química mediante la cual se produce la expansión de la resina hasta convertirse en la espuma de poliuretano se divide en las siguientes fases. La denominación que se ha tomado es la que sigue la empresa *Era Polimers*, empresa dedicada a la comercialización de polímeros. Los tiempos son orientativos. Dependen de otros componentes (aditivos), de la temperatura ambiente, presión de inyección, presión de los tanques de almacenaje, etc.

- **Tiempo de inicio “Cream Time” (20 segundos):** Mezclamos los reactivos. No se percibe ningún cambio.
- **Tiempo de hilo “Gel Time” (80 segundos):** Aparente cambio gradual de color. Si se toca la mezcla, tiene tacto gelatinoso.
- **Tiempo de ascenso “Rise Time” (100 segundos):** Aun con tacto gelatinoso, la mezcla aumenta su volumen. Si tocamos con el dedo la superficie de expansión también es pringoso y se quedan restos adheridos.
- **Tiempo de curado “Tack Free Time” (120 segundos):** La expansión se ralentiza hasta que se para. Una vez acabada la reacción tiene aspecto mate, no pringoso, y parece un sólido.



Fases de reacción de espuma de poliuretano
ERA POLIMERS

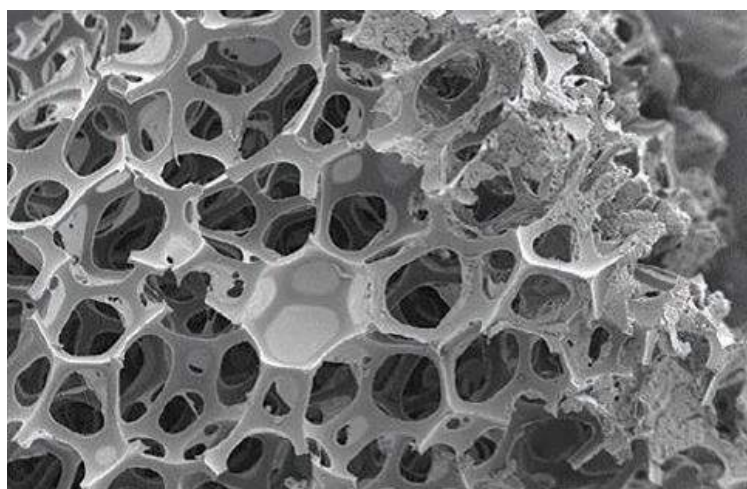


Figure 1. Scanning electron micrograph of the open cell structure of a soft polyurethane foam (Courtesy of Herman-Joseph Christen, Kabelwerk Eupen AG).

Fotografía electrónica de las células de espuma de poliuretano
Herman-Joseph Christen, Kabelwerk Eupen AG

1.3.3. PROPIEDADES

En este apartado presentamos de forma resumida y esquemática las principales propiedades de las espumas de poliuretano. Podemos ampliar información en la referencia bibliográfica *J. M. Pérez Pérez: Química y Tecnología de Macromoléculas (2003)*.

- **Densidad:** Parámetro principal para clasificar los tipos de espumas. Dos parámetros: la de los reactivos y la del producto. Amplio rango de valores. Los más comunes rondan los 30 Kg/m³, aunque se pueden conseguir desde espumas más ligeras de 9 Kg/m³ hasta espumas de alta resistencia de unos 400 Kg/m³. La resistencia de la espuma aumenta con su densidad.

- **Aislamiento térmico:** En la industria y construcción existen tantas aplicaciones de la espuma de poliuretano sobre todo por su capacidad de aislamiento térmico. Las burbujas de aire que quedan ocluidas en el interior forman una barrera térmica tremendamente eficaz. Además, es fácil de aplicar y se puede adoptar a contornos irregulares consiguiendo de forma rápida una capa de aislación continua, sin juntas ni puentes térmicos. Aislamiento de habitaciones, tejados, cámaras frigoríficas, recipientes aislantes... Este bajo coeficiente de transmisión de calor permite usar espesores mucho menores que usando otros materiales convencionales.
- **Durabilidad:** Debidamente protegida, la espuma tiene una vida ilimitada de uso. Resiste al agua potable, lluvia y ambiente marino, hidrocarburos clorados, hidrocarburos alifáticos, acetonas y éteres. No resiste disoluciones concentradas de ácido. Tampoco resiste la radiación solar porque son degradados por los rayos ultravioletas. Deben ser protegidos debidamente en el caso de aplicaciones en el exterior.
- **Resistencia al fuego:** Las espumas de poliuretano están compuestas de productos químicos carbonados. Son inherentemente inflamables. Sin embargo, se pueden añadir retardadores y pinturas especiales en la superficie para que soporte distintos grados de fuego al conseguir una capa cubriente incombustible.
- **Propiedades mecánicas:**
 - Resistencia a la tracción: 3-10 Kg/cm².
 - Resistencia a la compresión: 1,5-9 Kg/cm². Se mide con la fuerza que hay que aplicarle a la probeta para comprimirla a una deformación del 10%.
 - Resistencia al cizallamiento: 1-5 Kg/cm².
 - Módulo de elasticidad: 40-200 Kg/cm².
- **Poder adhesivo:** En la primera fase de expansión, cuando tiene tacto gelatinoso, puede quedarse pegado sobre distintas superficies (papel, cartón, cartón asfaltado, madera, planchas de fibras, piedra, hormigón, fibrocemento, superficies metálicas rugosas, etc.). Gran ventaja para rápida ejecución de aislamientos in situ.

1.3.4. PROBLEMAS MEDIOAMBIENTALES

En la aplicación que estudiamos, que es la inyección en el terreno, se puede decir que la espuma de poliuretano no contamina. Es un producto inerte y no reacciona con los productos naturalmente presentes en el subsuelo, así que no se liberan productos contaminantes. La espuma no tiene mayor impacto en el suelo que provocar algunas acumulaciones de agua. Por otra parte, una vez inyectado, el material permanecerá en el terreno indefinidamente. Sin embargo, como es una aplicación puntual bajo una estructura no se inyectan grandes cantidades. Si se demoliera el edificio, se puede cavar para retirar los restos de poliuretano y tratarlos como un residuo más de construcción.

1.3.5. RESEÑA HISTÓRICA

La primera síntesis de poliuretano la desarrolló Otto Bayer en el año 1937 en los laboratorios IG FARBEN en Leverkusen, Alemania, buscando conseguir un material competitivo con el Nailon desarrollado pocos años antes. No se aplicó inmediatamente en la industria principalmente debido a la falta de recursos por la Segunda Guerra Mundial. No fue hasta los años 50 cuando se desarrollaron e industrializaron las espumas de poliuretano de un modo científico y comercial. Uno de los primeros productos a base de fibras de poliuretano que tuvieron destacada comercialización mundial fue el *Spandex* (elastano), conocido bajo el nombre de Lycra. Hasta entonces no fue previsible en absoluto el éxito que tendría este compuesto polimérico. Desde su invención hasta que estuvo listo para lanzarlo al mercado tuvo que transcurrir más de una década.

1.3.6. LÍNEA TEMPORAL DEL POLIURETANO

- **1937** Dr. Otto Bayer descubre la química del poliuretano.
- **1940** Se introducen piezas de espuma rígida en aviones.
- **1941** Como adhesivo entre goma, metal y cristal.
- **1948** Primera aplicación aislante: barril de cerveza.
- **1949** Patines de goma de poliuretano.
- **1953** Suelas de calzado a base de espuma de poliuretano.
- **1954** Cojines y colchones hechos de espuma de poliuretano.
- **1958** Prendas de ropa de Spandex (Lycra).
- **1959** Prendas de trajes espaciales para la misión Mercury de la NASA.
- **1960** Capa aislante en los paneles metálicos tipo sandwich.
- **1969** Parachoques de poliuretano para aumentar la seguridad del vehículo.
- **1970** Aplicaciones médicas en piezas ortopédicas.
- **1977** Aletas y trajes de goma de poliuretano para deportes acuáticos.
- **1979** Proyección de espuma sobre muros para aislamiento in situ.
- **1989** Asientos y sillas de bebés para vehículos de goma absorbente de golpes.

- **1991** Primeros colchones viscoelásticos (espuma con memoria).
- **2004** Ventrículos artificiales para 10 años de uso.
- **2008** Bañadores de natación de alta velocidad.
- **2011** Las fundas de SmartPhones, Tablets y otros artículos tecnológicos se hacen de poliuretano.
- **2011** La espuma se aplica en el diseño de coches eléctricos de altas prestaciones.
- **2011** Abre en Alemania la primera planta que usa dióxido de carbono del aire para fabricar poliuretano.

1.3.7. APLICACIONES MÁS COMUNES

Entre las aplicaciones más comunes del poliuretano están las que nombramos a continuación. Se resume a partir de la información que podemos encontrar en la página web *Polyurethanes.org* dedicada exclusivamente a las espumas de poliuretano.

- **Productos aislantes para construcción:** La aplicación principal en construcción es la de formar la capa aislante. Constituyen una forma duradera, asequible y segura de mantener aislados los edificios. Se utiliza en muros huecos, techos, recubrimiento de tuberías y suelos.
- **Neveras y congeladores:** También con función aislante. Son ideales para su uso en dispositivos de refrigeración porque son eficaces, seguros, rentables, ligeros y asequibles. Constituyen a mantener precio reducido en los productos. Gracias a la introducción de poliuretanos en los electrodomésticos de refrigeración conseguimos con poca variación de precio, máquinas un 60% más eficientes que hace 15 años. Además, el acabado de la superficie de recubrimiento de poliuretano es impecable.
- **Muebles:** Las espumas de poliuretano son mullidas, duraderas ofrecen un apoyo adecuado porque mantienen su forma original. Forman el relleno de cojines y colchones. Pueden fabricarse en distintas densidades según las necesidades del fabricante. La espuma viscoelástica, presente en los colchones y almohadas de mayor categoría, es de poliuretano.
- **Calzado y ropa:** Adecuado para fabricación de suelas de zapato por ser impermeable, cómodo, barato y duradero. Con estas espumas se pueden rellenar moldes y obtener cualquier forma y textura que requiera el diseño. Se pueden formar fibras de poliuretano para tejidos de ropa. Muy usual en prendas de deporte de montaña, deportes acuáticos (natación, submarinismo) y deportes que requieran ropa suave, flexible y ajustada para mayor comodidad (bicicleta, mallas de fitness, etc.).

- **Automoción:** Combinan las ventajas que ofrece el poliuretano en comodidad (asientos), protección y aislamiento (térmico para climatización y acústico para ruido del motor). Se usan en asientos, reposabrazos, reposacabezas... Las espumas de alta densidad permiten moldear algunas piezas que sustituyan a las metálicas para reducir precio y peso del vehículo.
- **Recubrimientos y adhesivos:** Esta espuma aísla con seguridad por lo que se aplica a recubrimiento de cables, suelos, paredes, carcasas, etc. Durabilidad y resistencia a la corrosión hacen que también se aplique a recubrimiento de superficies expuestas a contaminación y ambientes agresivos. El amortiguamiento que ofrece lo hace idóneo para elaborar embalajes. Estos recubrimientos permiten adherir piezas de papel, cartón, madera, goma o vidrio, entre otros.

En este documento estudiamos una nueva aplicación de esta espuma: el recalce de cimentaciones.

1.3.8. RESINA EXPANSIVA PARA RECALCES

La resina que se utiliza para inyecciones en el terreno tiene la misma base química que la espuma de poliuretano, aunque tiene otros componentes que hacen que se comporte mejor para la esta aplicación. Estas resinas para recalces tienen los reactivos algo más viscosos de lo normal para evitar que se produzca demasiado flujo a través del terreno y que el bulbo expansivo quede bien limitado. Tienen una mayor fuerza de expansión para conseguir compactar el terreno del entorno del bulbo, su principal objetivo, e incluso, levantar una estructura para recuperación de asientos; además de mayor rigidez. La densidad final de la espuma no es relevante en cuanto a que el peso no influye en el acabado final, si bien se sabe que las densidades elevadas son características de las espumas más resistentes.

Llevan aditivos para garantizar que no reaccionen con los compuestos naturalmente presentes en el suelo y no contaminen el medio, aunque estas sustancias se añaden para la certificación medioambiental del producto ya que la espuma de poliuretano en general es una sustancia no reactiva, inerte, con la mayoría de compuestos a excepción de disoluciones concentradas de ácido.

En cualquier caso, cada empresa comercial que oferte técnicas de mejora de terreno mediante inyecciones de resina expansiva elabora su propia formulación química, la patenta y mantiene una seria metodología de confidencialidad al respecto.



Fases de reacción resina expansiva para recalces
RESINA GEOPLUS
URETEK

1.4. INYECCIONES DE RESINA EXPANSIVA EN EL TERRENO: TÉCNICAS DE MEJORA

1.4.1. INTRODUCCIÓN

Una de las recientes aplicaciones de la espuma de poliuretano es la inyección en el terreno. Podemos aprovechar el estado líquido de los reactivos para transportarlos en tanques a obra y poder llevarlos a cualquier punto mediante tuberías. Los componentes vienen totalmente preparados de laboratorio listos para usar de forma inmediata en obra. Este estado líquido también permite inyectarlos fácilmente en el terreno mediante tuberías de pequeño diámetro sin apenas afectar a la construcción. Una vez en el subsuelo comienza la reacción de expansión en la que se genera la espuma. Como el tiempo de reacción es reducido, en la mayoría de las aplicaciones podemos ver al instante el resultado de la intervención. La fuerza de expansión comprime y compacta el entorno del bulbo de inyección. Los cambios que se introducen en el estado tensional del suelo y en sus deformaciones los podemos aprovechar para mejorar el terreno según la necesidad.

La tipología de espuma de poliuretano que se inyecta en el subsuelo se denomina habitualmente resina expansiva.

Como veremos, al ser una aplicación muy reciente y novedosa está sujeta a patentes. Cada empresa que decide invertir en esta especialización patenta sus técnicas y guarda de forma confidencial sus resultados. No existe aún bibliografía de referencia para aprender sobre este tema. En cuanto a aplicaciones, resultados e intervenciones sólo hemos podido disponer en este documento de lo que nos han proporcionado las empresas al ponernos en contacto con ellas. Destacamos la colaboración de GEOSEC y URETEK. Estas firmas son las dos más importantes del sector a nivel nacional e incluso internacional.



1.4.2. INFLUENCIA DEL TIPO DE SUELO

Existen distintas técnicas de mejora del terreno con inyecciones de resina expansiva según la aplicación. Hay que distinguir el diferente comportamiento que tiene en el suelo la inyección de resina bien se trate de suelo granular o cohesivo.

1.4.2.1. COMPORTAMIENTO EN SUELO GRANULAR

En un suelo granular la resina forma un bulbo alrededor del punto de inyección. La alta permeabilidad del suelo permite que los reactivos fluyan por entre los poros empapando completamente cada grano de suelo. Debido a la media-alta viscosidad de los reactivos y el reducido tiempo de reacción, la resina no se propaga demasiado. Se ha comprobado empíricamente que los bulbos de inyección de resina no superan el metro de diámetro. Una vez que comienza la reacción, la resina comienza a solidificar y ya no continúa fluyendo: se forma un bulbo de suelo-resina, parecido a los bulbos de suelo-cemento de las inyecciones grouting pero con resina, que comienza a expandirse. Al expandirse ejerce una presión en el suelo de alrededor que consolida el terreno e incluso, lo desplaza. Si existe agua en los poros, esta se disipa inmediatamente.

Para el estudio de inyecciones de resina en suelo granular se puede tomar como modelo un cilindro o esfera de suelo-resina dentro del terreno en condiciones drenadas al que se le impone una deformación volumétrica.

1.4.2.2. COMPORTAMIENTO EN SUELO PURAMENTE COHESIVO

El comportamiento en suelo cohesivo es totalmente distinto al que se da en terreno granular. En un suelo puramente cohesivo los reactivos de la resina que se inyectan no pueden fluir tanto por su viscosidad como por la reducida permeabilidad que presenta este tipo de suelo. Este alto grado de confinamiento junto con la elevada fuerza de expansión que ejerce la resina al comienzo de la reacción termina por romper el terreno formando grietas horizontales y verticales por las que se introduce la resina mientras continúa la reacción. Dentro de las grietas, la resina se sigue expandiendo presionando las paredes de estas grietas, compactando el terreno y desplazándolo. Si existe agua en los poros, se produce un exceso de presiones intersticiales y al disipar estas presiones, el terreno consolida. La consolidación de un suelo puramente cohesivo ocurre a largo plazo. Es bastante probable que al cabo de cierto tiempo (semanas o incluso meses) haya que volver al lugar para comprobar la evolución de esta consolidación y volver a inyectar si los resultados no son los esperados. En el modelo, el terreno tiene condiciones no drenadas.

Para el estudio de inyecciones de resina en suelo puramente cohesivo no está tan claro la teoría que mejor describe este comportamiento. Se comprueba que cuanto más puramente cohesivo es el terreno, se producen menos grietas de mayor longitud. Las vías de investigación en este tema proponen utilizar la formulación de la Mecánica de la Fractura, pero esta no está pensada para su aplicación a suelos. Si el suelo no tiene demasiada cohesión, se forman más grietas de menor longitud y la resina adquiere en el suelo una forma ramificada, como si se tratara de las raíces de un árbol. En este caso, se tienen resultados bastante buenos modelizando la resina también como un bulbo de suelo-resina aunque el suelo tenga algo de cohesión.



Consolidación en terreno granular



Consolidación en terreno cohesivo

Comportamiento de la resina en suelo granular y cohesivo
GEOSEC

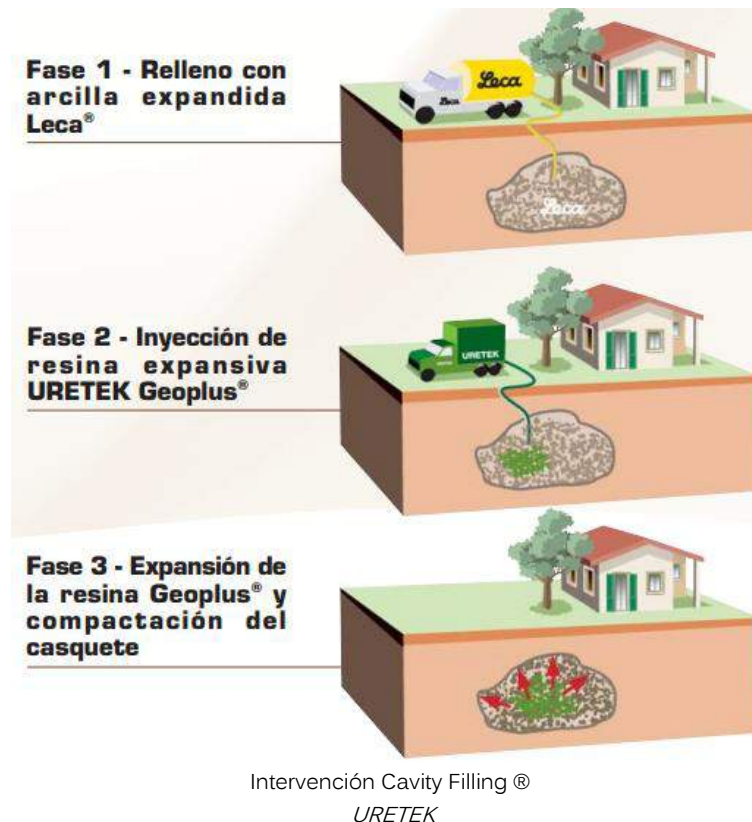
1.4.3. TIPOS DE TRATAMIENTOS

1.4.3.1. RELLENO DE CAVIDADES

Se utiliza para el relleno de cavidades subterráneas y estabilización de las paredes mediante bombeo de arcilla expansiva. Esta arcilla expansiva es una mezcla de resina de poliuretano y arcilla. Las cavidades del suelo hay que rellenarlas con urgencia, sobre todo las que encontramos a poca profundidad. Las deformaciones en las paredes de la cavidad provocan asentamientos en la superficie y una caída repentina de material puede terminar en un desplome de la superficie. El tiempo de reacción de la resina permite realizar la ejecución en un corto periodo de tiempo. Rellenar evita la caída de material de las paredes y la resina introduce un estado de compresiones en las paredes que impide su deformación a largo plazo. Con un tubo de inyección

dirigible se asegura ocupar al menos un 95 % de la cavidad. La intervención presenta notables ventajas, entre las cuales está la recuperación de la continuidad entre cavidad y terreno para conseguir un estado de tensiones uniforme: conseguimos homogeneizar el suelo.

Esta técnica está patentada por URETEK bajo el nombre comercial CAVITY FILLING. El nombre comercial de la arcilla es ARCILLA EXPANDIDA LECA y el de la resina es RESINA URETEK GEOPLUS.



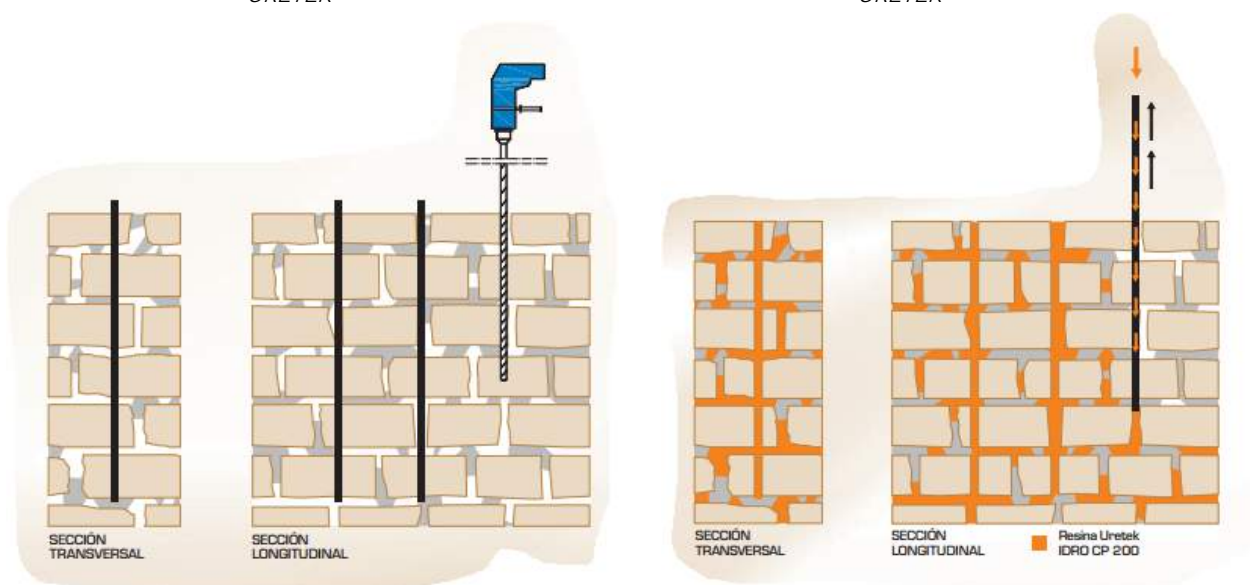
Otra técnica de relleno de cavidades de la misma empresa es la denominada WALLS RESTORING. En este caso, se rellena con resina las cavidades existentes en muros de mampostería deteriorados. El muro se perfora aproximadamente con taladros de 30 mm en sentido vertical con una separación entre 40 y 80 cm y se introducen los tubos de inyección. Se inyecta la resina expansiva IDRO CP 200 conforme se extrae el tubo. Esta resina tiene las características mecánicas similares a los morteros convencionales. Apto para muros constituidos por ladrillos y piedras. Es rápido e inmediatamente eficaz. No precisa trabajos complementarios y se puede ejecutar en una única fase. Limpio: no altera la parte estética del muro. Eficaz incluso en mampostería sumergida. El objetivo de esta técnica es reconstruir el mortero dañado. La difusión de la resina en el interior de la estructura del muro permite reconstruir la integridad estructural de la misma.



Dibujo representativo
URETEK



Sección transversal mejorada
URETEK



Ejecución de la técnica WALL RESTORING
URETEK

1.4.3.2. INYECCIONES DE IMPREGNACIÓN

Reducir los huecos del terreno y sustituir el agua intersticial por resina evita variaciones de humedad del suelo y los efectos que estos producen. Podemos disminuir significativamente el potencial de retracción. Hay que tener cuidado de que estas inyecciones de resina no provoquen acumulaciones indebidas de agua que pueda afectar negativamente a otras zonas del terreno. En la técnica tradicional se usa mezcla de agua-cemento lo suficientemente fluida y con granulometría adecuada para que penetre en los poros del suelo. Si el subsuelo no necesita refuerzo, la técnica tradicional tiene la ventaja de no alterar el estadio tensional del terreno. Con inyecciones de resina es inevitable modificar este estado tensional debido a su propiedad intrínseca de expansión.

1.4.3.3. INYECCIONES DE COMPACTACIÓN

Se busca mejorar las características mecánicas del suelo mediante la densificación del terreno. Con un mallado de inyecciones (se suelen realizar inyecciones aproximadamente cada metro de distancia) conseguimos una superficie más compacta y más rígida, además de unas propiedades mecánicas homogéneas con lo que evitamos en el futuro problemas debidos a asientos diferenciales.

1.4.3.4. INYECCIONES DE DESPLAZAMIENTO

Técnica parecida a las inyecciones para compactación pero se busca la recuperación de asientos de la cimentación. Realizando de forma local inyecciones debajo de las zonas hundidas de la cimentación, la fuerza de expansión de la espuma consigue levantar la estructura y corregir la zona afectada. Es fundamental inyectar la cantidad adecuada de resina. Si no se inyecta suficiente no hay ningún efecto porque como la fuerza de expansión disminuye con el aumento de volumen, no se tiene la suficiente presión. Si por el contrario se inyecta demasiado, la estructura puede dañarse y causar unos defectos más difíciles de solucionar que los que ya había. En los apartados siguientes analizaremos con más profundidad las técnicas de mejora del terreno que se engloban en esta categoría.

1.4.4. TÉCNICAS APLICADAS POR LAS FIRMAS DEL SECTOR

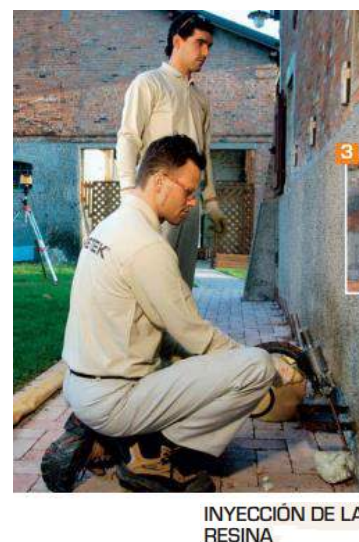
Las firmas del sector están especializadas en inyecciones de desplazamiento. Las inyecciones de resina expansiva las aplican al levantamiento del terreno para corregir problemas de asiento diferencial. La información se ha obtenido a partir del contacto con Marcos Leal de GEOSEC y Moisés García de URETEK a los que agradecemos encarecidamente su atención. También podemos ampliar información en los cuadernos técnicos de GEOSEC y el libro de guía de proyecto de URETEK, referenciados en la bibliografía de este trabajo.

1.4.4.1. URETEK: DEEP INJECTIONS ®

Técnica patentada por URETEK para consolidación de suelo de cimentación a distintas profundidades. La resina utilizada tiene el nombre comercial GEOPLUS. Un camión-laboratorio se desplaza a obra con el instrumental adecuado. Dispone de mangueras con autonomía de 80 m. La cimentación se taladra con un diámetro de 30 mm por el que se introducirán las vainas de inyección. Las perforaciones se suelen distanciar entre ejes 1,5 m. Unos operarios se encargan de la inyección de la resina. Se dispone de una profundidad máxima de tratamiento de 15 m. Al ir inyectando la resina ésta comienza la expansión y va compactando el suelo. Cuando el suelo está suficientemente compactado rechaza la fuerza de la resina y ésta se expande hacia arriba produciendo un levantamiento de la superficie con lo que la estructura recupera asientos.

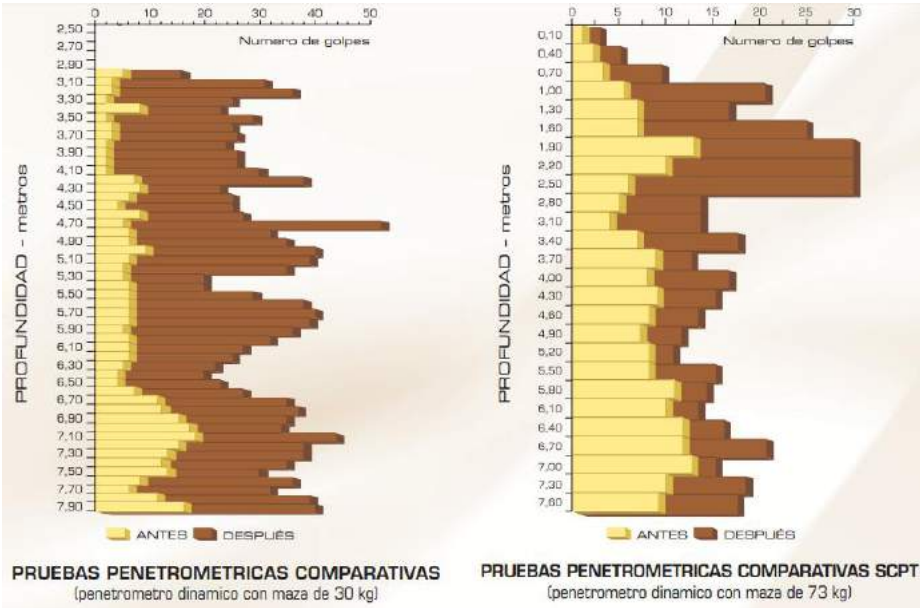
El levantamiento de la estructura se controla a tiempo real con niveles láser. La compactación del suelo se evalúa con un ensayo penetrométrico y/o presiométrico comparativo: uno antes de la ejecución y otro después.

Esta técnica es adecuada para suelos granulares y cohesivos y para cualquier tipología de cimentación (zapatas aisladas, zapatas corridas y losas de cimentación). Por las referencias de las que disponemos, la técnica se aplica principalmente a edificios históricos, naves industriales, edificios de viviendas, chalets, piscinas, torres, iglesias y paredes de contención.



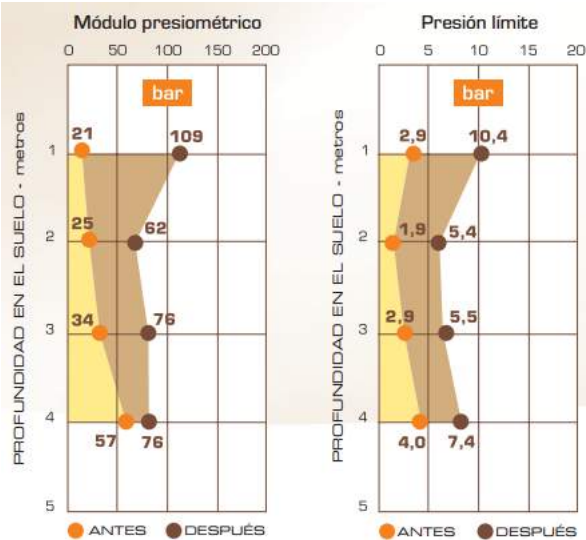
URETEK

Las principales ventajas son su no invasividad (sin excavaciones ni obras de albañilería) y su reducido tiempo de ejecución (en una jornada el equipo puede ejecutar de 10 a 15 metros lineales de cimentación). Es un método seguro, económico y limpio: no ensucia ni produce desechos. No altera la estructura, no le afecta la presencia de agua y dispone de una garantía de 10 años. Permite la habitabilidad inmediata de los lugares que se han intervenido.



URETEK

En las pruebas penetrométricas se evalúa la resistencia del terreno a partir del número de golpes que hay que efectuar para introducir un muestreador (cuchara) en el terreno una longitud determinada. Si aumenta el número de golpes necesarios para introducir el muestreador esa misma longitud se deduce que la resistencia del terreno ha aumentado.



Prueba presiométrica en suelo limoarcilloso

URETEK



Comparativa ilustrativa de los efectos conseguidos
URETEK

1.4.4.2. URETEK: FLOOR LIFT ®

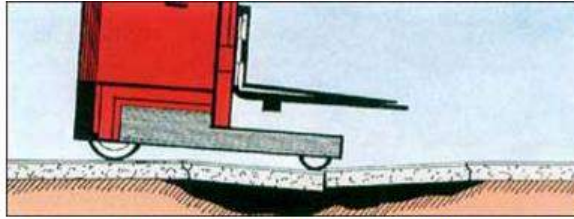
Técnica de inyección de resina expansiva en el terreno diseñada para levantar y nivelar con precisión pavimentos rígidos y flexibles hundidos de naves industriales, tiendas, almacenes, viviendas, carreteras, pistas de aeropuertos, etc. Ejecución parecida a la técnica DEEP INJECTIONS de la misma empresa. Un camión-laboratorio se lleva a obra con el equipo técnico y la instrumentación necesaria, además de los reactivos de la resina almacenados en tanques y la autonomía de 80 metros de manguera. Se localiza la zona hundida del pavimento y alrededor del perímetro el equipo realiza perforaciones de 15 mm para introducir las vainas de inyección en el terreno e inyectar la resina. Consigue corregir desniveles e inclinaciones. El levantamiento se controla a tiempo real con nivel láser.



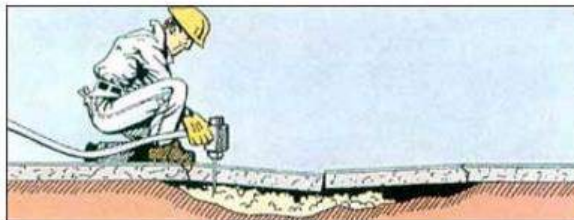
Imagen comparativa de una ejecución FLOOR LIFT
URETEK

Al inyectar la resina se rellenan los eventuales huecos en el intradós del pavimento que causaron el hundimiento y se produce el levantamiento gracias a la fuerza de expansión.

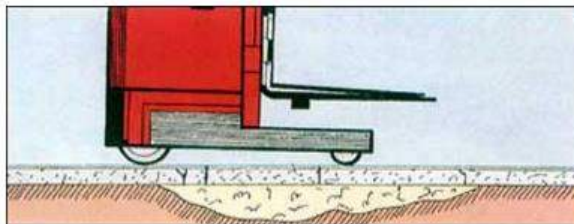
Además, la fuerza de expansión es suficiente para levantar el pavimento sin necesidad de retirar la carga (estanterías, instalaciones, maquinaria...).



Los huecos en el terreno de apoyo causan cedimientos, lesiones, pérdida de planeidad y rotura de juntas.



El material se inyecta a través de los agujeros de 6-12 mm en la interfaz terreno-cimientos y con un monitoreo constante de las operaciones.



El material se expande, sella, compacta y levanta.

Las principales ventajas de esta técnica son su no invasividad, reducido tiempo de ejecución (en una jornada el equipo puede reparar 150 m² de pavimento) y que no requieren la interrupción de la actividad normal del lugar. Es limpio (no produce polvos ni residuos), inmediatamente eficaz y no daña los revestimientos.



Imágenes representativas de FLOOR LIFT
URETEK

1.4.4.3. GEOSSEC: SEE&SHOOT ®

SEE&SHOOT es un método eficaz de consolidación de terrenos bajo una cimentación creado para contrarrestar los asentamientos diferenciales de la estructura. Se lleva a obra un equipo de trabajadores especializados con un laboratorio móvil para inyecciones. Contiene toda la instrumentación (dispositivos de control, tubos, sondas, mandos a distancia para la seguridad del operario), tanques de almacenaje de los reactivos de la resina y una autonomía de manguera de 100 m. El interior del laboratorio móvil permite planificar el proceso de ejecución acorde con las necesidades y tener control de los resultados durante y después de la inyección.

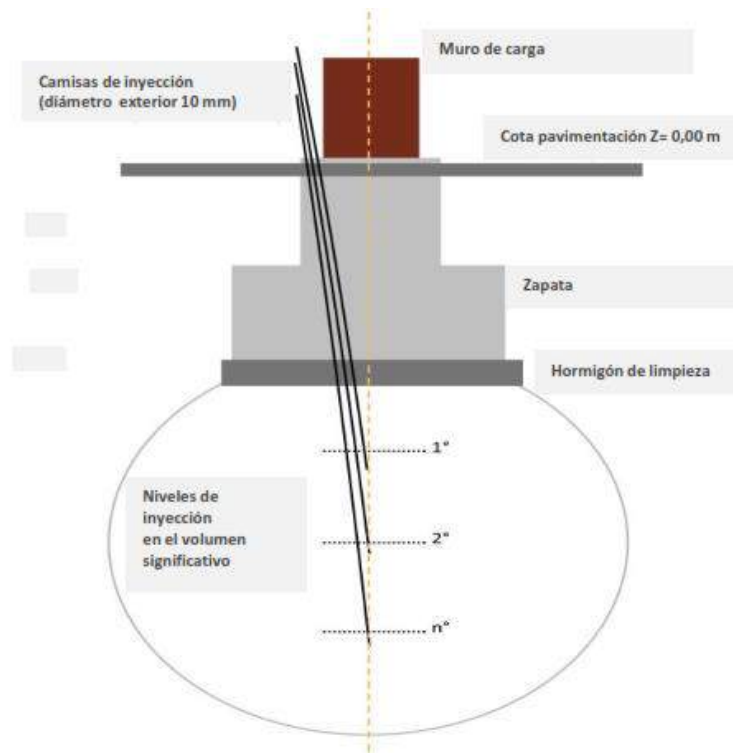
Con ayuda de un implante de diagnóstico de monitorización (tomografía eléctrica ERT) podemos construir el modelo geológico del terreno que se encuentra bajo la estructura a recalzar. Explicaremos esta técnica más adelante.

Definido el proyecto de ejecución de las inyecciones se comienza realizando pequeñas perforaciones manuales con taladro y broca a través de la cimentación. Para edificaciones de pocas plantas los diámetros no superan los 15 mm. La cimentación no se ve afectada. La dirección de las perforaciones va dirigida a aquellos volúmenes de terreno que resultan anómalos, causantes del asentamiento.



Distribución de resina en suelo cohesivo
GEOSEC

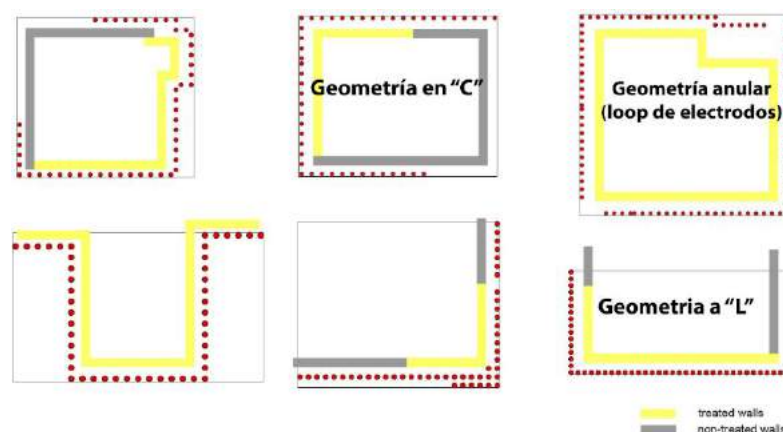
Por estas perforaciones se introducen las vainas para inyectar la resina. Los reactivos se conducen desde las cisternas del laboratorio móvil a través de las mangueras al punto de inyección. Inyección discontinua, con breves pausas de unos minutos para consolidar el terreno delicadamente. Atravesada la cimentación, la resina abandona el tubo de inyección a la profundidad deseada y penetra en el terreno. Durante el tiempo de reacción el geólogo controla el estado del terreno y los efectos obtenidos gracias a la tomografía eléctrica. Explicaremos este procedimiento más adelante.



Niveles de inyección bajo una zapata
GEOSEC

Terminadas las inyecciones se sellan los poros con mortero y se le da un acabado similar al de la superficie vista de la cimentación. El aspecto exterior de la estructura no se ve modificado al finalizar el recalce.

El proceso de ejecución es rápido, resolutorio, no necesita excavaciones y no emite polvo ni vibraciones molestas. Técnica ideal para espacios cerrados y locales pequeños.

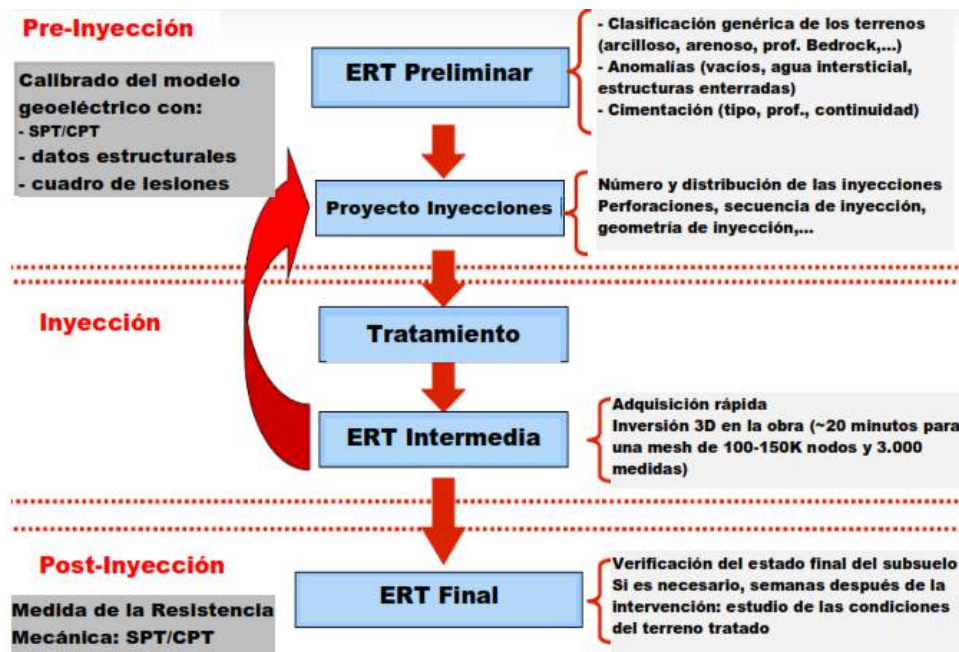


Distribuciones usuales de inyecciones
GEOSEC

La resina utilizada está diseñada por esta empresa. Se denomina resina ECO-MÁXIMA. La base es la misma que la espuma de poliuretano. Los componentes que se añaden para adecuarla a este fin son compatibles con el terreno y no afectan al medio ambiente. Tiene una formulación química expansiva con poliuretano pensada para el respeto del medio en el que se introduce. Las fases y tiempos de reacción son similares a la espuma normal de poliuretano. La expansión comienza a los 40 segundos de su inyección en el terreno y dura de 50 a 1 minuto. Esta resina tiene verificadas y certificadas las características de estabilidad en el tiempo, resistencia mecánica, contaminación del suelo y tiempos de reacción.

Para planificar el proyecto se utiliza la tomografía de resistividad eléctrica, para controlar los efectos se usa la tomografía y nivelación láser y para evaluar los resultados se realizan ensayos penetrométricos CPT y SPT.

Es muy evidente que la presencia de vacíos o canales preexistentes constituyen un camino de huida preferencial para el flujo de resina. Si no existen estos caminos, se forma una red capilar alrededor del eje de la inyección que refuerza el terreno cercano. Por esto es necesario primero ante todo localizar los caminos preferenciales y, aparte, solucionar el problema que causó el asentamiento diferencial. Podemos recuperar el asiento, pero por ejemplo, si se debió a acumulación de agua indebida por pérdida en la red de saneamiento habría que corregir ese fallo para que no se vuelva a acumular el agua y hundir la estructura.



Procedimiento de intervención SEE&SHOOT

GEOSEC

1.4.4.3.1 TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

Los distintos métodos de prospección geofísica (magnética, eléctrica, sísmica...) permiten obtener información detallada de las condiciones y la composición del subsuelo. Las principales ventajas de este tipo de diagnóstico es su no invasividad: se realizan en superficie y no necesitan excavaciones salvo, en todo caso, reducidas perforaciones.

En los últimos años la Geofísica ha avanzado a pasos de gigante en sus aplicaciones en Ingeniería Civil gracias al desarrollo de la instrumentación de medida, algoritmos de modelización y demás software interpretativo. La Geofísica aplicada es siempre más eficaz que otros métodos en cuanto sean necesarias una visión tridimensional del volumen de suelo, una reducida invasividad por parte de la maquinaria y mano de obra y el suelo presente destacada heterogeneidad y anisotropía.

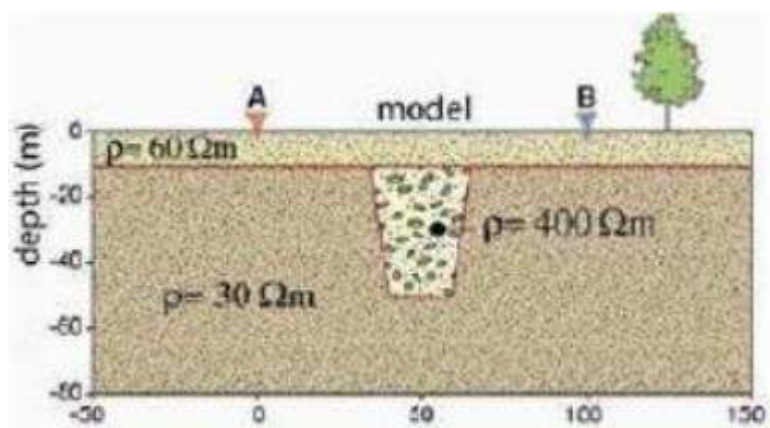
Aunque la Geofísica aplicada está bien definida en cuanto a metodología, todavía se entiende con demasiado escepticismo. Se debe a un escaso conocimiento del procedimiento y fundamento por parte del técnico ordinario. Constituye un conocimiento bastante complejo y no común en manos de pocos profesionales de un sector fuertemente especializado. La Geofísica aplicada es aún una ciencia poco instaurada en la Ingeniería Civil ordinaria. Existen pocas empresas que puedan vender esta técnica porque se requiere tener experiencia previa, personal técnico interno cualificado, dotación propia de instrumentación, atención y asistencia constante en la obra, procedimientos y materiales certificados, etc.

La roca y el material de construcción (hormigón y ladrillos) en cuanto a su composición mineralógica son aislantes de la corriente eléctrica. En el caso del suelo, imperfecciones en la

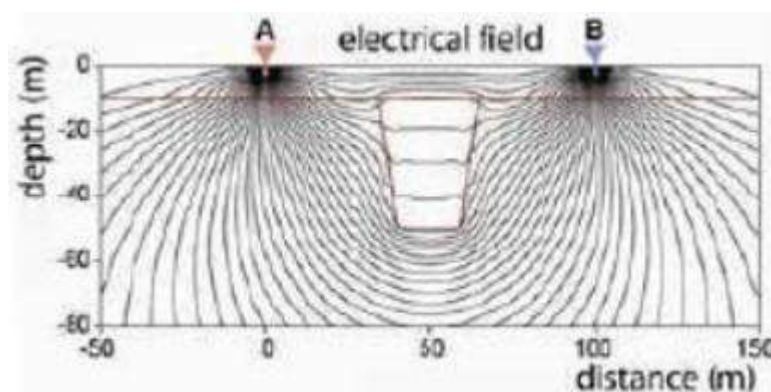
red cristalina, fracturación, porosidad y agua intersticial con sales disueltas hacen posible la circulación de corriente en presencia de un campo eléctrico.

El método eléctrico utiliza la conductividad eléctrica como el parámetro de identificación de las diferentes estructuras del subsuelo. En laboratorio, gracias a numerosos ensayos, se tabulan los valores de conductividad eléctrica según la litología del suelo y otras propiedades como porosidad y agua intersticial. Con esta técnica in situ se obtiene un mapeo en el subsuelo de valores de conductividad eléctrica. Gracias a los valores hallados en laboratorio se puede correlacionar la composición del terreno con la distribución de valores de conductividad eléctrica.

La tomografía de resistividad eléctrica o ERT (Electrical Resistivity Tomography) es una técnica geofísica para el estudio del subsuelo que consiste en determinar, con alta resolución espacial (tanto horizontal como vertical), la distribución de la resistividad a partir de un número muy elevado de medidas realizadas automáticamente desde la superficie del terreno. El modelado del suelo según la resistividad eléctrica se hace con elementos finitos: el volumen se discretiza en bloques de resistividad eléctrica constante y con un algoritmo iterativo de optimización por mínimos cuadrados se calcula la resistividad de cada uno que devuelve las medidas de potencial obtenidas experimentalmente.



Distribución representativa de conductividad en el terreno
GEOSEC



Inducción de un campo eléctrico en el terreno
GEOSEC

El procedimiento para obtener los modelos de resistividad (resistividad y conductividad se relacionan porque uno es el inverso del otro) consiste en inyectar una cantidad conocida de corriente en el suelo y medir la diferencia de potencial entre varios puntos a través de electrodos clavados en la superficie. El proceso se repite en todo el área de inspección. Una vez obtenidas las medidas, se supone una distribución aproximada de resistividad en el terreno. Es necesario remarcar que este conjunto de resistividades no corresponde a la distribución real, sino que representa una amalgama de ellas. El cálculo para obtener el modelo de resistividades reales del subsuelo se realiza con un método iterativo.

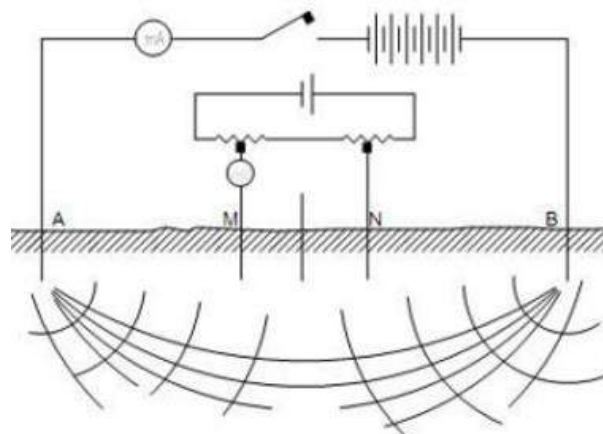
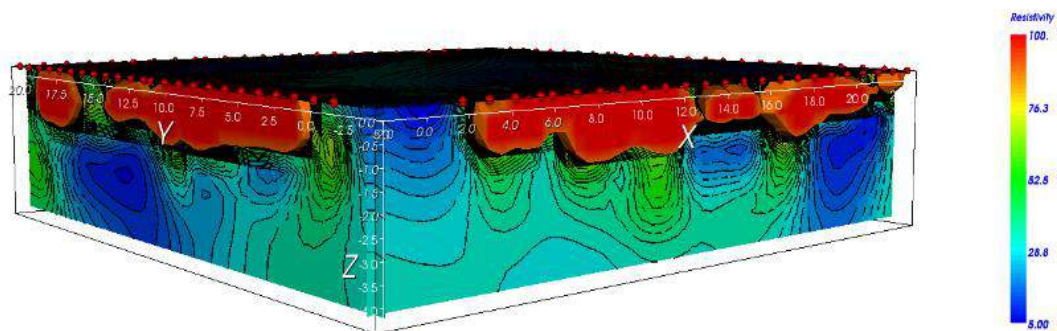


Figura representativa de una medida de diferencia de potencial
GEOSEC

El objetivo del problema es obtener un modelo de distribución de las resistividades reales del subsuelo que genere una respuesta similar a los valores de resistividad medidos con el dispositivo. Se parte de un modelo inicial. En cada paso se varía el campo eléctrico generado en el terreno y se ajusta el modelo para que devuelva la misma respuesta. Se observa cómo el modelo converge. También se sabe, y es fácil de intuir, que en un terreno dado solamente hay una única distribución de resistividades que devuelven los valores de diferencia de potencial medidos, y esa distribución es la del propio terreno.



Distribución de resistividad eléctrica
GEOSEC

Al modelizar esta distribución en el ordenador con un proceso iterativo, paso a paso hay una convergencia a una distribución que devuelve los valores de la diferencia de potencial medidos, y esa distribución tiene que ser también necesariamente la del propio terreno. Al final



de la iteración se asocia a cada valor de conductividad un tipo de material con unas características de porosidad, agua intersticial... y se consigue saber los distintos materiales que forman el suelo que se está estudiando. Es lo que se conoce como "problema inverso" que consiste en la modelización del subsuelo real que tiene la misma resistividad equivalente que la medida experimentalmente. Como hemos dicho, en cada iteración se va corrigiendo el modelo induciendo campos eléctricos variables y con una malla densa de electrodos en superficie.

En cuanto a la instrumentación de medida se necesita un generador de corriente continua (baterías) de tensión variable; un amperímetro para medir la corriente que sale del generador y entra en el subsuelo; 2 electrodos para la corriente y al menos otros 2 para medir diferencia de potencial; un voltímetro para medir la diferencia de potencial entre los electrodos; cables para la conexión de los electrodos y los aparatos de medida. El amperímetro debe ser de baja resistencia interna para minimizar su influencia, con una sensibilidad del orden del miliamperio. Para atenuar la perturbación de otras corrientes eléctricas de origen artificial (líneas eléctricas) los electrodos llevan un filtro de 50 Hz (estándar europeo). Los electrodos de alta precisión evitan además los efectos de la polarización natural de los materiales. Están hechos con sulfato de cloruro de plomo para que no se polaricen.



Ordenador para Tomografía de Resistividad Eléctrica
GEOSEC

Muy útil para localizar acumulaciones de agua. El agua se caracteriza por tener una baja resistividad eléctrica. En la distribución de resistividades se encuentran estas acumulaciones señalando aquellos valores de resistividad notablemente reducidos. Lo mismo ocurre para localizar cavidades. Las cavidades son huecos en el terreno ocupadas solamente por aire y el aire se caracteriza por tener una alta resistividad eléctrica. En la distribución de resistividades se encuentran estas cavidades señalando aquellos valores de resistividad notablemente elevados. Lo mismo ocurre con las estructuras de cimentación que se encuentran enterradas, que tienen alta resistividad. Es responsabilidad del geotécnico supervisor del recalce el decidir de qué se trata (suelo, roca, acumulación de agua, cavidad, estructura de cimentación) según su valor de resistividad y posición en el suelo.

ERT 2D si el modelo es bidimensional, ERT 3D si el modelo es tridimensional y ERT 4D si el modelo es tridimensional y se actualiza en el tiempo. Para aumentar el nivel de precisión en las medidas a mayor profundidad, se clavan los electrodos de medida en el suelo los metros que se estimen necesarios con perforaciones que no superan los 50 mm de diámetro.

Con esta técnica se pueden localizar las zonas causantes del asentamiento diferencial y definir el proceso de ejecución para dirigir hacia éstas las inyecciones de resina para reparar. Con medidas durante la inyección se puede actualizar el proceso de ejecución además de estimar los cambios que se estén produciendo en el terreno. Los efectos esperados son colmatación de vacíos, compactación y reducción del agua intersticial. Si se está expulsando agua intersticial y compactando el terreno reduciendo su porosidad, en el modelo de tomografía eléctrica lo notaremos al ver cómo aumentan los valores de resistividad en el entorno de los puntos de inyección.



Disposición de electrodos en el terreno

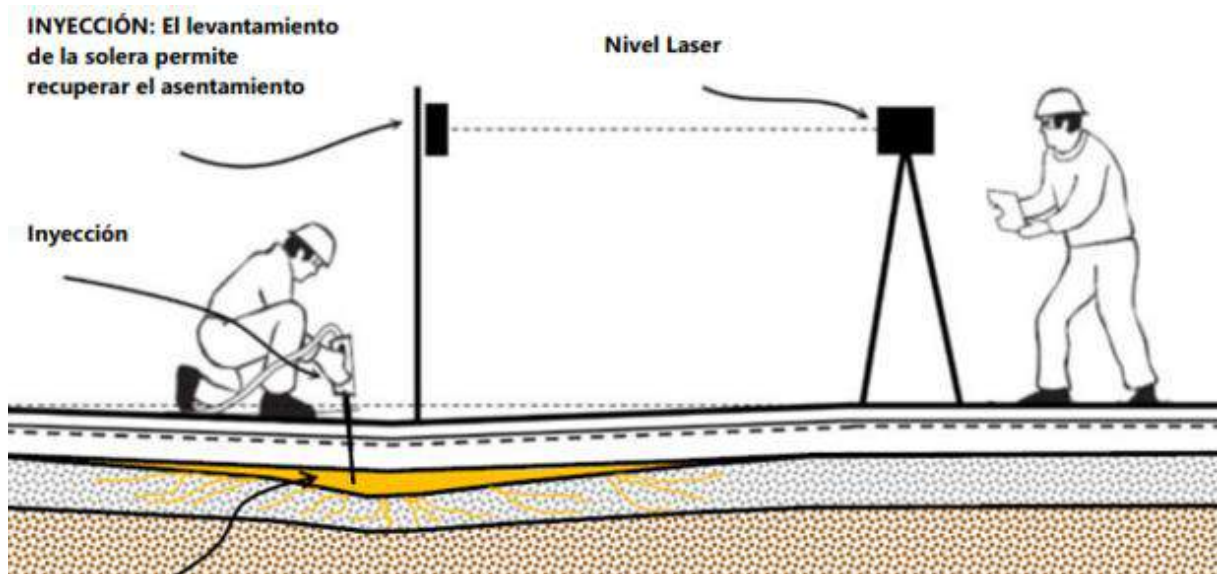
iceageisland.wordpress.com

1.4.4.4. GEOSEC: SOIL STABILIZATION ®

Técnica exclusiva de Geosec, aunque es idéntica a la técnica de Uretak FLOOR LIFT. Orientado a la compactación y consolidación del terreno de apoyo de soleras y pavimentos. También destinado a recuperación de asientos. Utiliza la inyección de resina sintética con fórmula propia de Geosec. Un camión-laboratorio se lleva a obra con el equipo técnico y la instrumentación necesaria, además de los reactivos de la resina almacenados en tanques y la autonomía de 80 metros de manguera. Se localiza la zona hundida del pavimento y alrededor del perímetro el equipo realiza perforaciones de 15 mm para introducir las vainas de inyección en el terreno e inyectar la resina. Consigue corregir desniveles e inclinaciones. El levantamiento se controla a tiempo real con nivel láser.

Al inyectar la resina se rellenan los eventuales huecos en el intradós del pavimento que causaron el hundimiento y se produce el levantamiento gracias a la fuerza de expansión. Además, la fuerza de expansión es suficiente para levantar el pavimento sin necesidad de retirar la carga (estanterías, instalaciones, maquinaria...).

Las principales ventajas de esta técnica son su no invasividad, reducido tiempo de ejecución (en una jornada el equipo puede reparar 150 m² de pavimento) y que no requieren la interrupción de la actividad normal del lugar. Es limpio (no produce polvos ni residuos), inmediatamente eficaz y no daña los revestimientos.



Ejecución de la técnica SOIL STABILIZATION
GEOSEC

1.4.5. TÉCNICAS DE CONTROL POR LAS FIRMAS DEL SECTOR

Para el control de los desplazamientos, las dos firmas del sector que nombramos en este trabajo utilizan niveles láser de alta precisión. Colocando un emisor en un punto fijo podemos obtener instantáneamente el desplazamiento de todos los puntos donde se haya colocado un receptor. Es necesario tener controlado el desplazamiento porque se desconoce la cantidad de resina que va a ser necesaria para conseguir el levantamiento buscado ya que las empresas no realizan un predimensionamiento formal y cuantitativo. Se procede incrementando lentamente la cantidad de resina inyectada hasta que se alcanza el levantamiento adecuado y entonces se para de inyectar.

En el caso de que las inyecciones se apliquen para aumentar la resistencia del terreno, se realizan ensayos de penetración dinámica antes y después de la intervención para comparar los resultados y observar efectivamente cómo el terreno se hace más resistente.

1.5. RELACIÓN DE INTERVENCIONES

1.5.1. AEROPUERTO ADOLFO SUÁREZ, MADRID-BARAJAS, MADRID (GEOSEC)

Tecnología: SOIL STABILIZATION (estabilización del terreno en superficie y levantamiento de la solera).

Ubicación: Aeropuerto de Madrid-Barajas.

Cliente: AENA Aeropuerto Adolfo Suárez, Madrid-Barajas Comunidad de Madrid.

Descripción del estado preoperacional: La intervención de consolidación ha sido ejecutada en una losa de la solera de una rampa de acceso a un sector de aparcamiento de

aviones. La solera está formada por placas de 36 m² con espesor de 70 cm. Presentaba, antes de la intervención, un descenso máximo de 11 cm y un descenso promedio de 6 cm.



Solera intervenida con SOIL STABILIZATION
GEOSEC

Descripción de la intervención: Consolidación del terreno (en profundidad y superficie) y sucesivo levantamiento de una sola placa de solera, en la zona asentada, hasta su nivelación enrasándola con las de alrededor. Se ha combinado la técnica SOIL STABILIZATION con la tecnología de la Tomografía de Resistividad Eléctrica para identificar los volúmenes de tierras anómalos (cavidades y acumulaciones de agua) y actuar inyectando resina en esas precisas posiciones. Además, se continuó con la actualización de la ERT (Tomografía de Resistividad Eléctrica, por sus siglas en inglés *Electrical Resistivity Tomography*) casi a tiempo real como método de control. Se pudo verificar al instante la reducción de vacíos, la colmatación de las cavidades y el alejamiento del agua intersticial en exceso. La fuerza de expansión de la resina va más allá de la consolidación el estrato más superficial del terreno en contacto con la solera asentada y consigue levantar gradualmente la placa hasta llegar al mismo nivel de las zonas no asentadas. Control del desplazamiento con ayuda de niveles láser de alta precisión. Para limitar la expansión lateral de la resina y que no afecte más allá de la losa hundida se realizaron una serie de inyecciones con pequeñas cantidades de resina alrededor del perímetro de la solera objeto de intervención. Así se concentra la acción de la expansión mecánica de la resina dentro del área objeto de intervención.



Zona objeto de intervención
GEOSEC

Resultados obtenidos: Reducción y colmatación de vacíos y porosidades con consiguiente compactación del terreno y mejora de su capacidad de carga; reducción del agua intersticial; reactivación del contacto entre la solera y el terreno subyacente a ella; nivelación de la losa con el resto de las losas de la solera.

1.5.2. NAVE INDUSTRIAL, VALDEMORO, MADRID (URETEK)

Tecnología: FLOOR LIFT

Ubicación: Valdemoro, Madrid.

Descripción del estado preoperacional: La nave industrial se construyó en 2003. Está formada por pórticos de hormigón y muros de cerramiento. La cimentación principal está pilotada, aunque existen zonas de zapatas corridas de 50 cm de ancho. Debido a problemas de vibraciones ocasionadas por tránsito de camiones y maquinaria pesada, rotura de tuberías subterráneas y mala compactación del terreno aparecen hundimientos en los pavimentos y grietas en los muros de cerramiento.

Descripción de la intervención: En un total de 12 días de trabajo se recuperaron los hundimientos de 1.020 m² de solera. Como alternativa a la solución tradicional se optó por la técnica FLOOR LIFT buscando poca invasividad y rapidez en la ejecución. La intervención se ejecuta en dos fases. Primero una compactación superficial mediante inyecciones a cota de apoyo de la cimentación para mejorar las características del terreno, rellenar los huecos presentes entre la cimentación y el suelo y restablecer el contacto suelo-cimentación. A continuación se inyecta a un nivel inferior para consolidar el terreno y levantar las losas de

cimentación. Todo el proceso está controlado con nivel láser de alta precisión por un técnico cualificado.



Vainas de inyección en la solera
URETEK

El resultado se ha verificado a través de la nivelación de las losas hundidas. La resistencia del terreno se confirmó mediante la realización de pruebas penetrométricas.

1.5.3. CERRAMIENTO RECTORADO UNIVERSIDAD SEVILLA, SEVILLA (GEOSEC)

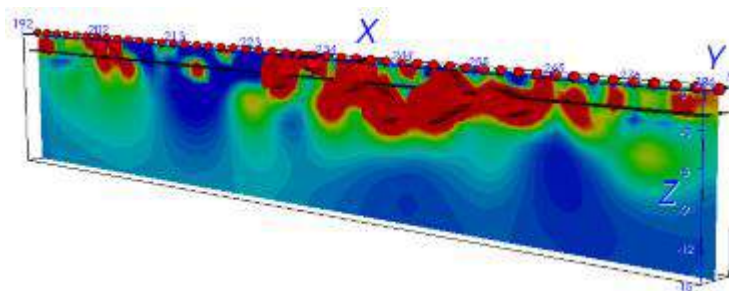
Tecnología: SEE&SHOOT.

Ubicación: Sevilla.

Descripción del estado preoperacional: La Real Fábrica de Tabacos es un edificio construido en piedra durante el siglo XVIII como sede de la primera fábrica de tabacos establecida en Europa. Constituye una de las más espléndidas representaciones de la arquitectura industrial del Antiguo Régimen. Desde mediados del s. XX alberga la sede del rectorado de la Universidad de Sevilla y algunas de sus facultades. El cerramiento del recinto data del año 1919, compuesto por ladrillo de aproximadamente 1,00 m de altura y pilastras cada 5,00 m y verja de hierro con un altura total aproximada de 4,50 m. Se manifiesta una patología características de asiento diferencial: aparición de múltiples grietas y fisuras con desplome en el cerramiento con valores de 1 a 3 cm en todo su desarrollo longitudinal.

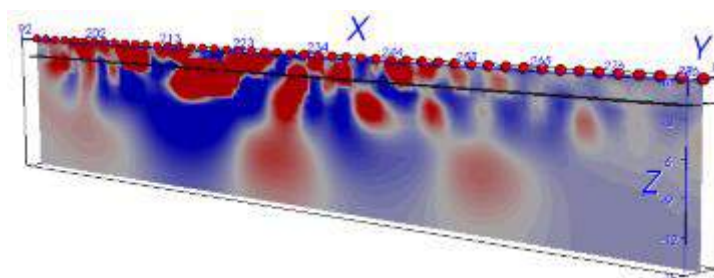
Descripción de la intervención: Primero se hizo una caracterización previa del terreno mediante tomografía de resistividad eléctrica (ERT) y ensayos de penetración dinámica. El equipo técnico dispuso 3 estaciones ERT, 6 ensayos de penetración y se planificaron 3 niveles

de inyección de resina expansiva. La intervención tuvo lugar desde la parte interior del cerramiento sin afectar al normal tránsito de la calle San Fernando ni al paso por la puerta de entrada al edificio.



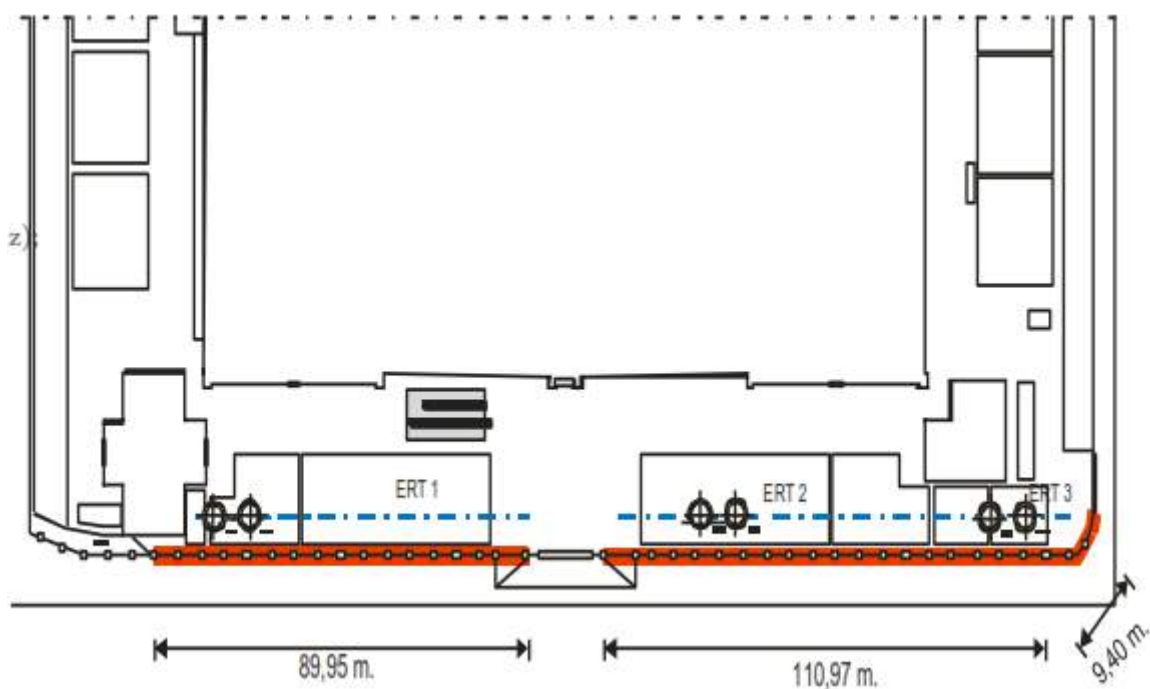
ERT antes de la intervención.
En rojo, mayores valores de resistividad. En azul, menores.

GEOSEC



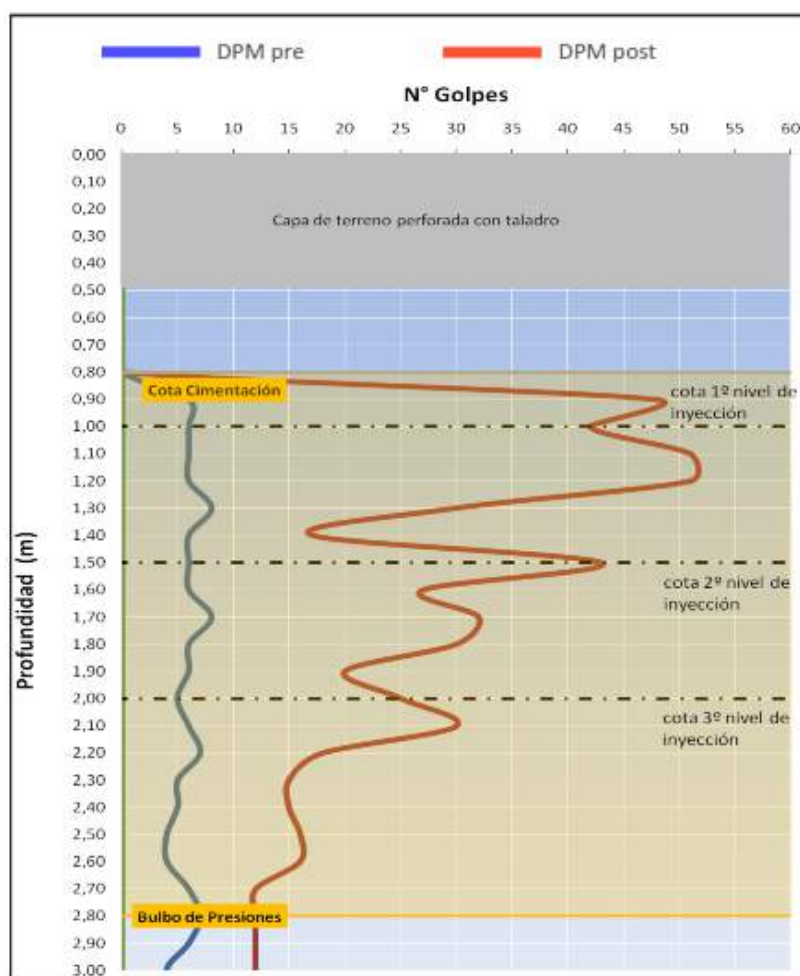
ERT comparativa después de la intervención.
En rojo, incrementos de resistividad del 40 %. En azul, menores.

GEOSEC



Planta de la intervención

GEOSEC



Resultados comparativos ensayo de penetración dinámica.

GEOSEC

1.5.4. CAJÓN DE DRENAJE, CARRETERA C-14 EN LA RIBA, TARRAGONA (URETEK)

Tecnología: DEEP INJECTIONS

Ubicación: Carretera C-14, La Riba (Tarragona)

Descripción del estado preoperacional: Se trata de un cajón de drenaje ejecutado in situ apoyado en una losa de 60 cm de hormigón armado y que presenta una importante abertura en una junta de dilatación. El problema es una filtración de agua por la junta de dilatación que ha lavado el terreno de apoyo provocando una cavidad por debajo del cajón. Esa cavidad ha resultado en un basculamiento de la parte inferior del cajón.

Descripción de la intervención: Dada la necesidad de trabajar en el interior del cajón, las dificultades de entrar maquinaria pesada al mismo y la logística necesaria para otros sistemas de consolidación se ha optado por una tecnología cuyas características son la poca invasividad y rapidez de ejecución, como es DEEP INJECTIONS de URETEK con inyecciones de resina expansiva GEOPLUS elaborada por URETEK. La intervención se ha ejecutado en dos fases. Primero, compactación superficial con inyecciones a cota de apoyo de la cimentación para mejorar las características mecánicas del terreno y rellenar los huecos presentes entre

cimentación y suelo. La segunda fase es la consolidación en profundidad con inyecciones ejecutadas en tres niveles a distinta profundidad en el volumen de suelo afectado por las cargas.



Interior del cajón de drenaje intervenido
URETEK

El objetivo es el de consolidar en profundidad 47 m² de losa de cimentación. Las inyecciones, con el fin de cubrir la totalidad del volumen de suelo a tratar, se realizaron mediante la colocación de conductos de inyección alternada en diferentes cotas de profundidad. El plan de intervención consistió en inyectar la resina en forma columnar en el volumen de terreno correspondientes a los 4 primeros metros.



Exterior del cajón de drenaje intervenido
URETEK

Esta técnica permite la densificación en las profundidades del terreno a través de la inyección de resinas de poliuretano con alta presión de expansión que han transmitido al

volumen sólido de su alrededor una acción de compactación que origina un aumento de la capacidad de carga del suelo.



Trabajo y equipo durante la intervención
URETEK

El resultado de la intervención se ha verificado a través de la monitorización láser durante las inyecciones, así como un control mediante medidores volumétricos y manométricos de la cantidad de resina inyectada y su presión de inyección. Además se ejecutan ensayos penetrométricos comparativos.

1.6. PLANIFICACIÓN DE UN PROYECTO DE EJECUCIÓN

El proyecto de ejecución de un recalce mediante inyección de resina expansiva varía según el tipo de terreno, la técnica y los resultados esperados. Sin embargo, la planificación del proyecto tiene puntos comunes como son una estimación de la cantidad de resina que se necesita inyectar y calcular aproximadamente los resultados que se van a obtener.

En numerosas ocasiones, la situación se presta a resolverse fácilmente teniendo suficiente cantidad de resina almacenada e inyectar controlando los resultados hasta que se tengan los necesarios. Entonces, se para de inyectar y se finaliza el proceso. Esto ocurre, por ejemplo, en el relleno de cavidades subterráneas.

Otras aplicaciones sí requerirían un predimensionamiento más detallado, sobre todo en cuanto a resultados se refiere. En el caso de las inyecciones que provoquen desplazamiento del terreno es necesario tener una idea de este movimiento tanto para salvaguardar la estructura que se recalza como las que hubiera alrededor. La cantidad de resina que se inyecta hay que conocerla, entonces, no tanto por medición sino porque el levantamiento es función directa de

la cantidad de resina inyectada. En comparación con las técnicas de recalce tradicionales, la resina tiene un precio muy económico.

Como los recalces de cimentación con inyecciones de resina expansiva están sujetos a alto grado de confidencialidad es difícil averiguar los métodos de predimensionamiento que usan las empresas para planificar sus proyectos de ejecución, claro está, si los tienen. Personalmente, después de llevar tiempo documentándonos en este tema se puede pensar que las empresas llevan a obra bastante cantidad de resina e inyectan poco a poco desde la cautela y conservadurismo, controlando los resultados de desplazamiento de terreno hasta que se acercan al valor necesario sin pasarse.

En el libro editado por URETEK "Consolidación de terrenos con resinas expansivas. Guía de proyecto" no se describe específicamente un método de dimensionamiento. Sin embargo se hace mención a varias técnicas analíticas y modelización que bien podrían servir para crear nuestra propia metodología de predimensionamiento.

Se hace referencia a las teorías de Carter y las de Yu-Houlsby sobre obtención de expresiones analíticas para tensiones, deformaciones y desplazamientos de una cavidad en forma de cilindro o esférica en expansión dentro de un suelo homogéneo e isótropo tanto si es granular como puramente cohesivo tomando el modelo de Mohr-Coulomb para el comportamiento del terreno. Además se recomienda resolver el modelo con ayuda de algún programa informático de elementos finitos, entre los que hace mención directa a PLAXIS.

Ahora bien, aunque se tengan los modelos de elementos finitos y una serie de fórmulas, estos dependen de unas propiedades del terreno que hay que introducir: es fundamental una buena caracterización del terreno. En ningún documento que hayamos visto hasta ahora se menciona nada acerca de la obtención de los parámetros geotécnicos del suelo para realizar la modelización cuando es una parte fundamental. Nosotros buscaremos un método adecuado para esta caracterización. La principal ventaja de los recalces de cimentaciones con inyecciones de resina expansiva es la rapidez de la ejecución, así que caracterizar el terreno no debería demorarse demasiado. Debemos buscar algún ensayo in situ que nos proporcione de forma directa o indirecta los parámetros necesarios de forma rápida. Hemos decidido, después de contemplar varias posibilidades, en utilizar el ensayo del presiómetro porque se adapta bien a nuestras necesidades en cuanto a que es rápido y existe una correlación que proporciona los parámetros que buscamos con los resultados del ensayo.

En el siguiente apartado damos una serie de herramientas que posteriormente nos valdrán para elaborar con cierta seguridad un método de dimensionamiento para esta técnica de recalce.

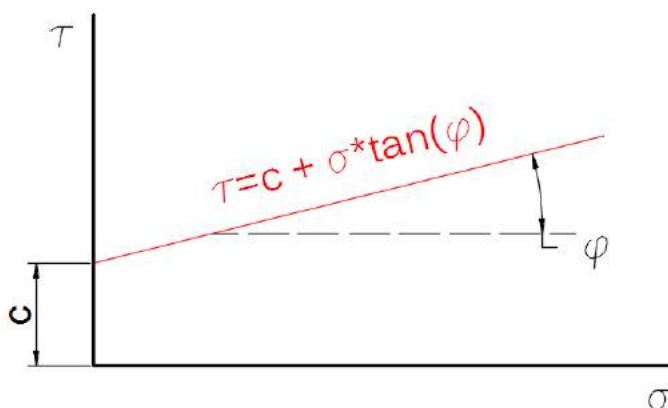
1.7. HERRAMIENTAS TEÓRICAS Y NUMÉRICAS PARA MODELIZACIÓN

1.7.1. MODELO MOHR-COULOMB

Para pequeñas deformaciones, un volumen de suelo lo suficientemente homogéneo puede estudiarse como si se tratara de un material elástico-lineal y abordar el problema mediante la Teoría de Elasticidad. Este tipo de análisis no será válido una vez que el suelo rompa. Estableciendo un criterio de rotura, decimos que el suelo ha roto cuando se cumple dicho criterio. Mientras el suelo no haya roto, podemos utilizar la formulación de la Elasticidad. Una vez que rompa, el suelo sigue teniendo una ley de comportamiento tensión-deformación, pero ya no se rige por las leyes de la Elasticidad. El modelo de comportamiento del suelo Mohr-Coulomb se caracteriza por un criterio de rotura: el criterio de rotura Mohr-Coulomb (*Geotecnia y cimientos I*). Este criterio establece que el suelo rompe cuando en alguno de sus puntos existe un plano cuyos valores asociados de tensión normal y tangencial cumplen que:

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan(\phi)$$

Donde τ es la tensión tangencial, c es la cohesión del suelo, σ es la tensión normal y ϕ es el ángulo de rozamiento interno del terreno. Si representamos este criterio en un plano con ejes σ y τ , es una recta con pendiente $\tan(\phi)$ y ordenada en el origen c .



Representación gráfica criterio de rotura Mohr-Coulomb

En un sólido sometido a una serie de cargas de superficie y/o volumen se generan en cada punto del sólido infinitos vectores tensión asociados a los infinitos planos que pasan por ese punto. El Lema de Cauchy (*Teoría de la Elasticidad, F. París*) pone de manifiesto que conociendo tres vectores tensión en un punto asociados a tres planos perpendiculares, el resto de vectores tensión en cualquier otro plano queda definido. Sean estos tres planos perpendiculares los planos YZ, XZ y XY. Sean σ_x , σ_y y σ_z los vectores tensión, con sus tres componentes cada uno, asociados a aquellos planos respectivamente. Sea T el vector tensión asociado a cualquier otro plano en ese punto y sea n su vector normal, unitario.

$$\sigma_x = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{xz} \end{bmatrix} \quad \sigma_y = \begin{bmatrix} \sigma_{yx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{yz} \end{bmatrix} \quad \sigma_z = \begin{bmatrix} \sigma_{zx} \\ \sigma_{zy} \\ \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad T = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} \quad n = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix}$$

El Lema de Cauchy establece que:

$$T_i = \sigma_{ij} \cdot n_j \Rightarrow \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{yx} & \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & \sigma_{zy} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix}$$

Se puede demostrar que en cada punto existen tres planos perpendiculares cuyos vectores tensión solamente tienen una componente no nula. Estos planos son los planos principales, denominados plano 1, plano 2 y plano 3. Los vectores tensión asociados son σ_1 , σ_2 y σ_3 .

$$\sigma_1 = \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \sigma_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ \sigma_2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \sigma_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \sigma_3 \end{bmatrix} \quad T = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} \quad n = \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{bmatrix}$$

El Lema de Cauchy quedaría de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{bmatrix}$$

Encontrar los planos principales representa un problema de autovalores y autovectores de la matriz genérica en coordenadas xyz. Los vectores normales a los planos principales, en coordenadas de xyz, son los autovectores y los valores de tensión principales, ordenados de tal forma que $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, son los autovalores.

A partir de estas relaciones se definen la tensión normal σ y la tensión tangencial τ :

$$\sigma = T \cdot n \quad \tau = \sqrt{\|T\|^2 - \sigma^2}$$

La resolución de un problema tridimensional puede llegar a ser una tarea bastante compleja, e incluso inabordable. En la mayoría de las aplicaciones se encuentran distintos tipos de simetrías que permiten estudiar el problema general tridimensional mediante un problema bidimensional. En ese problema bidimensional las tensiones quedarían de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} T_x \\ T_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{yx} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \end{bmatrix}$$

Y en planos principales:

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 \\ 0 & \sigma_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix}$$

El vector normal en un problema bidimensional es de la forma: $n = \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \end{bmatrix}$

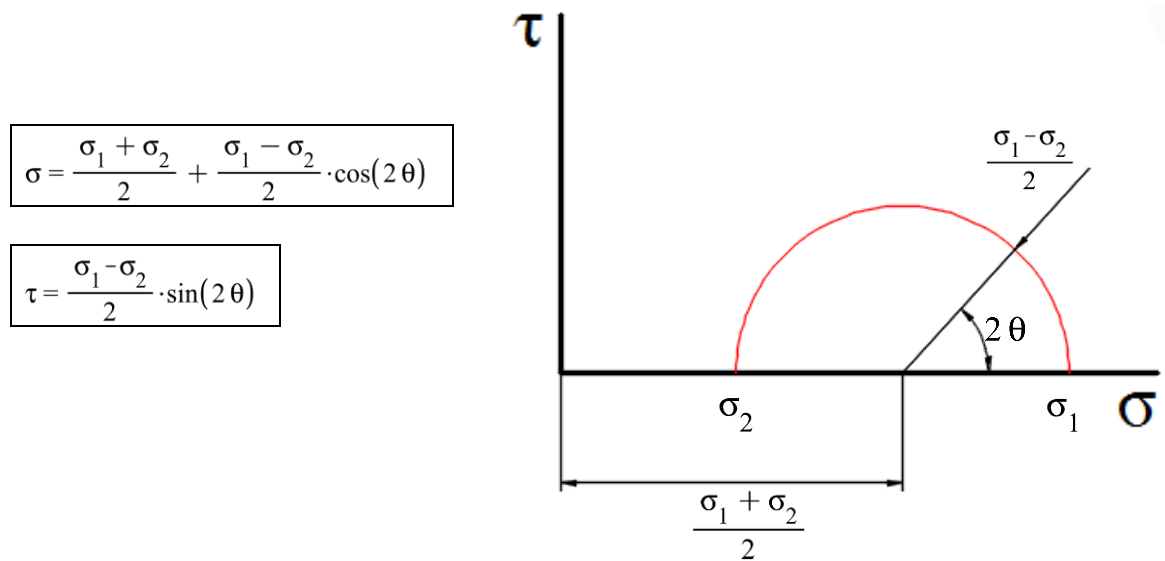
$$T = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 \\ 0 & \sigma_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_1 \cdot \cos(\theta) \\ \sigma_2 \cdot \sin(\theta) \end{bmatrix}$$

$$\sigma = T \cdot n = \begin{bmatrix} \sigma_1 \cdot \cos(\theta) \\ \sigma_2 \cdot \sin(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \end{bmatrix} = \sigma_1 \cdot \cos^2(\theta) + \sigma_2 \cdot \sin^2(\theta)$$

$$\begin{aligned} \tau &= \sqrt{\|T\|^2 - \sigma^2} = \sqrt{\sigma_1^2 \cdot \cos^2(\theta) + \sigma_2^2 \cdot \sin^2(\theta) - (\sigma_1 \cdot \cos^2(\theta) + \sigma_2 \cdot \sin^2(\theta))^2} \\ &= \sqrt{\sigma_1^2 \cdot \cos^2(\theta) \cdot \sin^2(\theta) + \sigma_2^2 \cdot \sin^2(\theta) \cdot \cos^2(\theta) - 2 \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot \cos^2(\theta) \cdot \sin^2(\theta)} \\ &= \sqrt{(\sigma_1 \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\theta) - \sigma_2 \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\theta))^2} \\ &= \sigma_1 \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\theta) - \sigma_2 \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\theta) \\ &= (\sigma_1 - \sigma_2) \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\theta) \end{aligned}$$

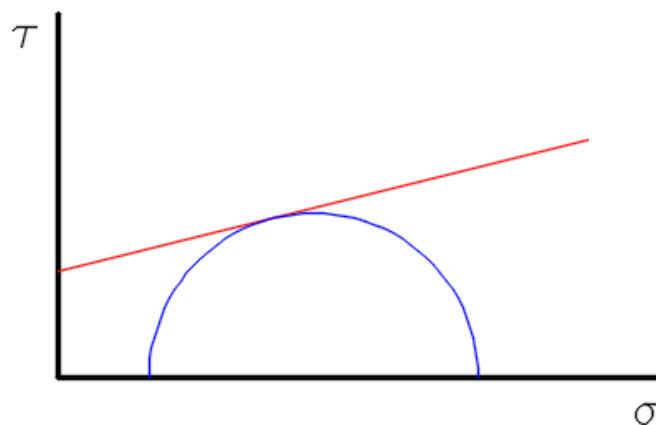
Utilizando las relaciones trigonométricas siguientes podemos expresar σ y τ de una forma más clara para entender su comportamiento.

$$\sin(2\theta) = 2 \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\theta) \quad \cos^2(\theta) = \frac{1 + \cos(2\theta)}{2} \quad \sin^2(\theta) = \frac{1 - \cos(2\theta)}{2}$$



Si representamos esta curva dada en forma paramétrica mediante el parámetro θ obtenemos que todas las combinaciones (σ, τ) del estado tensional del punto del terreno se encuentran en una circunferencia (círculo de Mohr) con centro $\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}$ y radio $\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$.

El terreno romperá justo cuando haya un punto (σ, τ) que cumpla el criterio de rotura. Como este punto pertenece además al círculo de Mohr del estado de tensiones, gráficamente se tiene que el punto debe estar a la vez en la recta del criterio de rotura y en la circunferencia, es decir, circunferencia y recta son tangentes. En otras palabras, si la circunferencia toca la recta, el terreno rompe.



Situación de rotura según modelo Mohr-Coulomb

A continuación estableceremos la relación que se da entre σ_1 y σ_2 para la cual el terreno rompe, es decir, su círculo de Mohr es tangente a la recta del criterio de rotura. Sea OC la posición del centro de la circunferencia y R su radio. La condición de que la circunferencia toque a la recta se representa analíticamente mediante un sistema de ecuaciones. La primera ecuación es la de la circunferencia y la segunda, la de la recta.

$$\begin{cases} \tau = \sqrt{R^2 - (\sigma - OC)^2} \\ \tau = c + \sigma \cdot \tan(\phi) \end{cases} \Rightarrow \sqrt{R^2 - (\sigma - OC)^2} = c + \sigma \cdot \tan(\phi)$$

Operando la ecuación para sigma obtenida de igualar las dos ecuaciones del sistema tenemos una ecuación de segundo grado:

$$\frac{1}{\cos^2(\phi)} \cdot \sigma^2 + 2 \cdot (c \cdot \tan(\phi) - OC) \cdot \sigma + c^2 + OC^2 - R^2 = 0$$

Para que la circunferencia sea tangente a la recta solamente debe haber un punto de corte, es decir, una única solución de la ecuación. Esto ocurre si el discriminante de la ecuación es cero: $b^2 - 4ac = 0$.

$$4 \cdot (c \cdot \tan(\phi) - OC)^2 - 4 \cdot \frac{1}{\cos^2(\phi)} \cdot (c^2 + OC^2 - R^2) = 0 \Rightarrow R = OC \cdot \sin(\phi) + c \cdot \cos(\phi)$$

Introduciendo ahora los valores de R y OC:

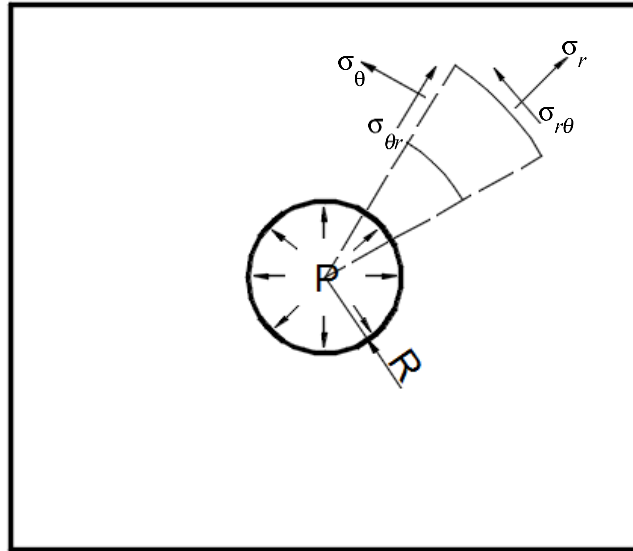
$$\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \cdot \sin(\phi) + c \cdot \cos(\phi) \Rightarrow \boxed{\sigma_1 = \frac{1 + \sin(\phi)}{1 - \sin(\phi)} \cdot \sigma_2 + \frac{2 \cdot c \cdot \cos(\phi)}{1 - \sin(\phi)}}$$

1.7.2. EXPANSIÓN DE UNA CAVIDAD CILÍNDRICA EN EL TERRENO

1.7.2.1. COMPORTAMIENTO ELÁSTICO, PEQUEÑAS DEFORMACIONES

En este apartado vamos a resolver el problema elástico de una cavidad cilíndrica de radio R con una fuerza de expansión P dentro de un sólido elástico-lineal. Servirá para obtener el módulo elástico del suelo a partir del ensayo presiométrico. Este problema, tridimensional, se puede resolver mediante uno bidimensional porque cumple las hipótesis de deformación plana:

1. Hay una dimensión (el eje) que es mucho mayor que las demás.
2. Todas las cargas exteriores están contenidas en el plano perpendicular al eje del cilindro y no cambia a lo largo del mismo.



Problema bidimensional expansión cavidad cilíndrica

Este problema bidimensional es axisimétrico (todos los ejes que pasan por el centro son de simetría), lo que permitirá simplificar su resolución porque, entonces, $\sigma_{r\theta} = \sigma_{\theta r} = 0$ y $u_{\theta} = 0$.

TENSIONES (EQUILIBRIO): σ_r σ_{θ} $\sigma_{r\theta} = \sigma_{\theta r} = 0$

$$\frac{d}{dr} \sigma_r + \frac{1}{r} \cdot (\sigma_r - \sigma_{\theta}) = 0 \quad (1)$$

DEFORMACIONES (DESPLAZAMIENTOS): u_r $u_{\theta} = 0$ ϵ_r ϵ_{θ} $\epsilon_{r\theta} = \epsilon_{\theta r} = 0$

$$\epsilon_r = \frac{d}{dr} u_r \quad \epsilon_{\theta} = \frac{1}{r} \cdot u_r \quad (2)$$

COMPORTAMIENTO: Se definen las constantes auxiliares $E' = \frac{E}{1 - \nu'^2}$ y $\nu' = \frac{\nu}{1 - \nu}$

$$\sigma_r = \frac{E'}{1 - \nu'^2} \cdot (\epsilon_r + \nu' \cdot \epsilon_{\theta}) \quad \sigma_{\theta} = \frac{E'}{1 - \nu'^2} \cdot (\nu' \cdot \epsilon_r + \epsilon_{\theta}) \quad (3)$$

Introducimos las ecuaciones de deformaciones (2) en las ecuaciones de comportamiento (3):

$$\sigma_r = \frac{E'}{1 - \nu'^2} \cdot \left(\frac{d}{dr} u_r + \nu' \cdot \frac{1}{r} \cdot u_r \right) \quad (4)$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{E'}{1 - \nu'^2} \cdot \left(\nu' \cdot \frac{d}{dr} u_r + \frac{1}{r} \cdot u_r \right) \quad (5)$$

Entonces,

$$\frac{d}{dr} \sigma_r = \frac{E'}{1 - \nu'^2} \cdot \left[\frac{d^2}{dr^2} u_r + \nu' \cdot \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} u_r - \frac{1}{r^2} \cdot u_r \right) \right]$$

$$\sigma_r - \sigma_\theta = \frac{E'}{1 - \nu'^2} \cdot \left[(1 - \nu') \cdot \frac{d}{dr} u_r - \frac{1 - \nu'}{r} \cdot u_r \right]$$

Introduciendo estas expresiones en la ecuación de equilibrio (1) obtenemos una ecuación diferencial para el desplazamiento radial:

$$\frac{d^2}{dr^2} u_r + \frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} u_r - \frac{1}{r^2} \cdot u_r = 0 \Rightarrow u_r(r) = \frac{C_1}{r} + C_2 \cdot r \quad (6)$$

Ahora aplicamos las condiciones de contorno para hallar el valor de las constantes. La condición de contorno en desplazamientos dice que debe ser cero conforme r tienda a infinito.

$$\lim_{r \rightarrow +\infty} u_r(r) = 0 \Rightarrow \lim_{r \rightarrow +\infty} \left(\frac{C_1}{r} + C_2 \cdot r \right) = C_2 \cdot \lim_{r \rightarrow +\infty} r = 0 \Rightarrow C_2 = 0 \Rightarrow u_r(r) = \frac{C_1}{r} \quad (7)$$

La condición de contorno en tensiones dice que la tensión radial en el borde de la cavidad debe ser igual a la presión P que se ejerce. Debemos recordar que la presión, tal y como la tenemos definida, es una presión negativa según los criterios de la Elasticidad. Tomando la ecuación (7) e introduciéndola en (4) obtenemos:

$$\sigma_r(r) = \frac{E'}{1 - \nu'^2} \cdot \left(\frac{-C_1}{r^2} + \nu' \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{C_1}{r} \right) = -\frac{E'}{1 - \nu'^2} \cdot \frac{C_1}{r^2} \cdot (1 - \nu')$$

$$= -\frac{E'}{1 + \nu'} \cdot \frac{C_1}{r^2}$$

$$\sigma_r(R) = -\frac{E}{1 + \nu} \cdot \frac{C_1}{R^2} = -P \Rightarrow C_1 = \frac{1 + \nu}{E} \cdot R^2 \cdot P$$

$$u_r(r) = \frac{1 + \nu}{E} \cdot \frac{R^2}{r} \cdot P \quad (8)$$

Justo en $r=R$ tenemos el desplazamiento radial (el incremento de radio) de la cavidad en función de la presión P . Si ya existiera una presión dada en la situación inicial antes del comienzo de la expansión, el valor de presión que hay que utilizar es la diferencia de la presión P absoluta con la inicial.

$$u_r(R) = \frac{1 + \nu}{E} \cdot R \cdot \Delta P = \frac{1 + \nu}{E} \cdot R \cdot (P - P_0)$$

1.7.2.2. PRESIÓN PRIMERA DE PLASTIFICACIÓN

La expresión anterior solamente es válida en régimen elástico. En este apartado calcularemos la presión a partir de la cual el terreno comienza a tener una zona plástica. Como

la presión disminuye con el aumento de la variable r , es el borde de la cavidad la zona que primero plastifica. Introduciendo la expresión (8) en (4) y (5) tenemos el valor de las tensiones.

$$\begin{aligned}\sigma_r(r) &= \left(\frac{R}{r}\right)^2 \cdot \Delta P + P_0 & \sigma_\theta(r) &= -\left(\frac{R}{r}\right)^2 \cdot \Delta P + P_0 \\ \sigma_r(R) &= P & \sigma_\theta(R) &= 2 \cdot P_0 - P\end{aligned}$$

Estas tensiones están asociadas a dos planos perpendiculares entre sí y solamente tienen componente en la dirección normal a su plano: son las tensiones principales. Podemos aplicar el criterio de Mohr-Coulomb para ver cuándo rompe, es decir, comienza a plastificar. Viendo las expresiones se deduce que $\sigma_r > \sigma_\theta$ así que $\sigma_r = \sigma_1$ y $\sigma_\theta = \sigma_2$. En el momento de la plastificación, $P = P_{pl}$.

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{1 + \sin(\phi)}{1 - \sin(\phi)} \cdot \sigma_\theta + \frac{2 \cdot c \cdot \cos(\phi)}{1 - \sin(\phi)} \Rightarrow P_{pl} = \frac{1 + \sin(\phi)}{1 - \sin(\phi)} \cdot (2 \cdot P_0 - P_{pl}) + \frac{2 \cdot c \cdot \cos(\phi)}{1 - \sin(\phi)} \\ \Rightarrow P_{pl} &= P_0 \cdot (1 + \sin(\phi)) + c \cdot \cos(\phi)\end{aligned}$$

$$\boxed{P_{pl} = P_0 \cdot (1 + \sin(\phi)) + c \cdot \cos(\phi)}$$

1.7.2.3. COMPORTAMIENTO PLÁSTICO, PEQUEÑAS DEFORMACIONES

Una vez que el suelo ha plastificado, ya no podemos utilizar la ley de comportamiento de la Elasticidad. Sin embargo, si continuamos suponiendo pequeñas deformaciones podemos seguir utilizando la ecuación de equilibrio y la de deformaciones. Utilizamos la formulación de Carter (1986) "*Cavity Expansion in cohesive frictional soils*". Una vez que hay plastificación, se distinguen dos zonas en el terreno: la zona plástica y la zona elástica. En la zona elástica, más alejada, las tensiones todavía no han plastificado el terreno. Justo la curva que separa la zona plástica de la elástica cumple que la presión es la presión de plastificación primera. Sea $r=b$ esa distancia en la que acaba la zona plástica y comienza la elástica. La zona elástica se encuentra en $R < r < b$ y la zona plástica en $b < r$.

En comportamiento plástico, la relación entre las tensiones normales sigue la envolvente de Mohr-Coulomb. Las leyes de comportamiento de suelo cohesivo se diferencian del granular por el término de la resistencia al corte. Tras varias operaciones podemos estudiar el suelo cohesivo como un suelo granular mediante un cambio de variable.

$$\sigma_r := \frac{1 + \sin(\phi)}{1 - \sin(\phi)} \cdot \sigma_\theta + 2 \cdot c \cdot \frac{\cos(\phi)}{1 - \sin(\phi)}$$

$$\begin{aligned}
 2 \cdot \frac{\cos(\phi)}{1 - \sin(\phi)} &= 2 \cdot \frac{\cos(\phi)}{\sin(\phi)} \cdot \frac{\sin(\phi)}{1 - \sin(\phi)} = \cot(\phi) \cdot \frac{2 \cdot \sin(\phi)}{1 - \sin(\phi)} \\
 &= \cot(\phi) \cdot \frac{1 + \sin(\phi) - 1 + \sin(\phi)}{1 - \sin(\phi)} = \cot(\phi) \cdot \left(\frac{1 + \sin(\phi)}{1 - \sin(\phi)} - 1 \right) \\
 \sigma_r &= \frac{1 + \sin(\phi)}{1 - \sin(\phi)} \cdot \sigma_\theta + 2 \cdot c \cdot \cot(\phi) \cdot \left(\frac{1 + \sin(\phi)}{1 - \sin(\phi)} - 1 \right) \\
 \sigma_r + c \cdot \cot(\phi) &= \frac{1 + \sin(\phi)}{1 - \sin(\phi)} \cdot (\sigma_\theta + c \cdot \cot(\phi))
 \end{aligned}$$

Haciendo el cambio de variable $\sigma_r^* = \sigma_r + c \cdot \cot(\phi)$ y $\sigma_\theta^* = \sigma_\theta + c \cdot \cot(\phi)$ analíticamente podemos estudiar el suelo como si fuera granular.

$$\sigma_r^* = \frac{1 + \sin(\phi)}{1 - \sin(\phi)} \cdot \sigma_\theta^* \quad \sigma_r^* = N \cdot \sigma_\theta^* \quad N = \frac{1 + \sin(\phi)}{1 - \sin(\phi)}$$

Entonces, la ecuación de equilibrio (1) queda de la siguiente forma. Aplicamos la condición de contorno en que la tensión radial en $r=R$ debe ser $\sigma_r(R) = P \Rightarrow \sigma_r^*(R) = P + c \cdot \cot(\phi)$

$$\begin{aligned}
 \sigma_r^* - \sigma_\theta^* &= \left(1 - \frac{1}{N} \right) \cdot \sigma_r^* = \frac{N-1}{N} \cdot \sigma_r^* \\
 \frac{d}{dr} \sigma_r^* + \frac{1}{r} \cdot \frac{N-1}{N} \cdot \sigma_r^* &= 0 \Rightarrow \sigma_r^* = \frac{C_1}{r^{\frac{N-1}{N}}} \\
 \sigma_r(r) &= \left(\frac{R}{r} \right)^{\frac{N-1}{N}} \cdot (P - P_0) + P_0 \\
 \sigma_\theta(r) &= \frac{1}{N} \cdot \left(\frac{R}{r} \right)^{\frac{N-1}{N}} \cdot (P - P_0) + P_0
 \end{aligned} \tag{9}$$

Ahora estamos en condiciones de calcular la extensión de la zona plástica b tal que $\sigma_r(b) = P_{pl} = P_0 \cdot (1 + \sin(\phi)) + c \cdot \cos(\phi)$. Realizando las operaciones matemáticas necesarias de sustitución y simplificación conseguimos las siguientes expresiones. Este valor de b es útil para introducirlo en las expresiones de los desplazamientos que veremos luego.

$$\begin{aligned}
 b &= K^{\frac{N}{N-1}} \cdot R \\
 K &= \frac{(1+N) \cdot [Y + (N-1) \cdot P]}{2 \cdot N \cdot [Y + (N-1) \cdot P_0]} \quad Y = \frac{2 \cdot c \cdot \cos(\phi)}{1 - \sin(\phi)}
 \end{aligned}$$

Por lo que respecta al estado de deformaciones en la zona de plastificación, es necesario señalar que, en la hipótesis de que el terreno que circunda la cavidad se caracterice por una ley

de flujo plástico no asociado, la relación de comportamiento que une las tensiones y las deformaciones es la siguiente, donde el ángulo Ψ es el ángulo de dilatación del terreno.

$$\begin{bmatrix} d\sigma_r^* \\ d\sigma_\theta^* \end{bmatrix} = \frac{2 \cdot G}{\chi} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{M} \\ \frac{1}{N} & \frac{1}{MN} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} d\varepsilon_r \\ d\varepsilon_\theta \end{bmatrix}$$

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad M = \frac{1 + \sin(\Psi)}{1 - \sin(\Psi)} \quad \chi = \frac{(1 - \nu)(1 + M \cdot N) - \nu \cdot (M + N)}{M \cdot N}$$

De esta ley de comportamiento tenemos 2 ecuaciones linealmente dependientes. Una de ellas es:

$$d\sigma_r^* = \frac{2 \cdot G}{\chi} \cdot \left(d\varepsilon_r + \frac{1}{M} \cdot d\varepsilon_\theta \right) \quad (10)$$

De la expresión (9) se deduce:

$$d\sigma_r^* = \frac{1 - N}{N} \cdot \left(\frac{R}{r} \right)^{\frac{N-1}{N}} \cdot (P - P_0) \cdot \frac{dr}{r} \quad (11)$$

De las expresiones (2) se deduce:

$$d\varepsilon_r = \frac{d^2 u_r}{dr^2} \cdot dr \quad d\varepsilon_\theta = \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{du_r}{dr} - \frac{1}{r^2} \cdot u_r \right) \cdot dr \quad (12)$$

Introduciendo (11) y (12) en (10) obtenemos una ecuación diferencial para $u_r(r)$.

$$\frac{1 - N}{N} \cdot \left(\frac{R}{r} \right)^{\frac{N-1}{N}} \cdot (P - P_0) = \frac{2 \cdot G}{\chi} \cdot \left(r \cdot \frac{d^2 u_r}{dr^2} + \frac{1}{M} \cdot \frac{du_r}{dr} - \frac{1}{M} \cdot \frac{1}{r} \cdot u_r \right)$$

Esta ecuación tiene solución analítica con dos constantes de integración. Para sacar estas constantes, se aplican las condiciones de contorno. Una de ellas es que el desplazamiento tienda a cero. La siguiente es imponer que en $r = b$ (donde acaba el dominio plástico y comienza el elástico) el desplazamiento sea igual al desplazamiento de una cavidad de radio b en medio elástico con presión igual a la presión de plastificación primera, es decir:

$$u_r(b) = \frac{1 + \nu}{E} \cdot b \cdot (P_{pl} - P_0)$$

Aunque no se indique aquí el desarrollo matemático completo, la solución final que se obtiene según se recoge en la bibliografía es:

$$u_r(R) = \left[\frac{Y + (N - 1) \cdot P_0}{2 \cdot (1 + N) \cdot G} + \frac{N \cdot M \cdot \xi}{N + M} - \frac{M \cdot \eta}{M + 1} \right] \cdot \left(\frac{b}{R} \right)^{\frac{1}{M}} \cdot b + \left[\frac{M \cdot \eta}{M + 1} + \frac{N \cdot M \cdot \xi}{N + M} \cdot \left(\frac{b}{R} \right)^{\frac{N-1}{N}} \right] \cdot r$$

$$\xi = \frac{(1 - \nu^2) \cdot [Y + (N - 1) \cdot P_0]}{(1 + \nu) \cdot (N - 1) \cdot M \cdot (N + 1) \cdot G}$$

$$\eta = \frac{(M + 1) \cdot (1 - 2 \cdot \nu) \cdot [Y + (N - 1) \cdot P_0] \cdot (1 + \nu)}{E \cdot (N - 1) \cdot M}$$

1.7.2.4. COMPORTAMIENTO PLÁSTICO, GRANDES DEFORMACIONES

En el caso en que no sea posible simplificar el problema de la cavidad expandida utilizando la aproximación del análisis de las pequeñas deformaciones, Yu y Houlsby (1991) han elaborado una serie de relaciones que permiten definir el estado tenso-deformativo del material que circunda la cavidad en presencia de grandes deformaciones en la zona de plastificación. En este apartado nos limitaremos a la expresión del desplazamiento del borde de la cavidad. Otras expresiones de desplazamientos, tensiones y deformaciones en todo el dominio las encontramos en las referencias bibliográficas.

$$u_r(R) = \left\{ \frac{K \cdot \frac{N \cdot (M + 1)}{(N - 1) \cdot M}}{\left[1 - \frac{Y + (N - 1) \cdot P_0}{2 \cdot (N + 1) \cdot G} \right]^{\frac{M + 1}{M}} - \frac{N \cdot (M + 1)}{(N - 1) \cdot M \cdot \eta} \Lambda_1(K, \xi)} \right\}^{\frac{M}{M + 1}} - R$$

$$Y = \frac{2 \cdot c \cdot \cos(\phi)}{1 - \sin(\phi)} \quad N = \frac{1 + \sin(\phi)}{1 - \sin(\phi)} \quad M = \frac{1 + \sin(\psi)}{1 - \sin(\psi)}$$

$$K = \frac{(1 + N) \cdot [Y + (N - 1) \cdot P]}{2 \cdot N \cdot [Y + (N - 1) \cdot P_0]}$$

$$\xi = \frac{(1 - \nu^2) \cdot [Y + (N - 1) \cdot P_0]}{(1 + \nu) \cdot (N - 1) \cdot M \cdot (N + 1) \cdot G}$$

$$\eta = \frac{(M + 1) \cdot (1 - 2 \cdot \nu) \cdot [Y + (N - 1) \cdot P_0] \cdot (1 + \nu)}{E \cdot (N - 1) \cdot M}$$

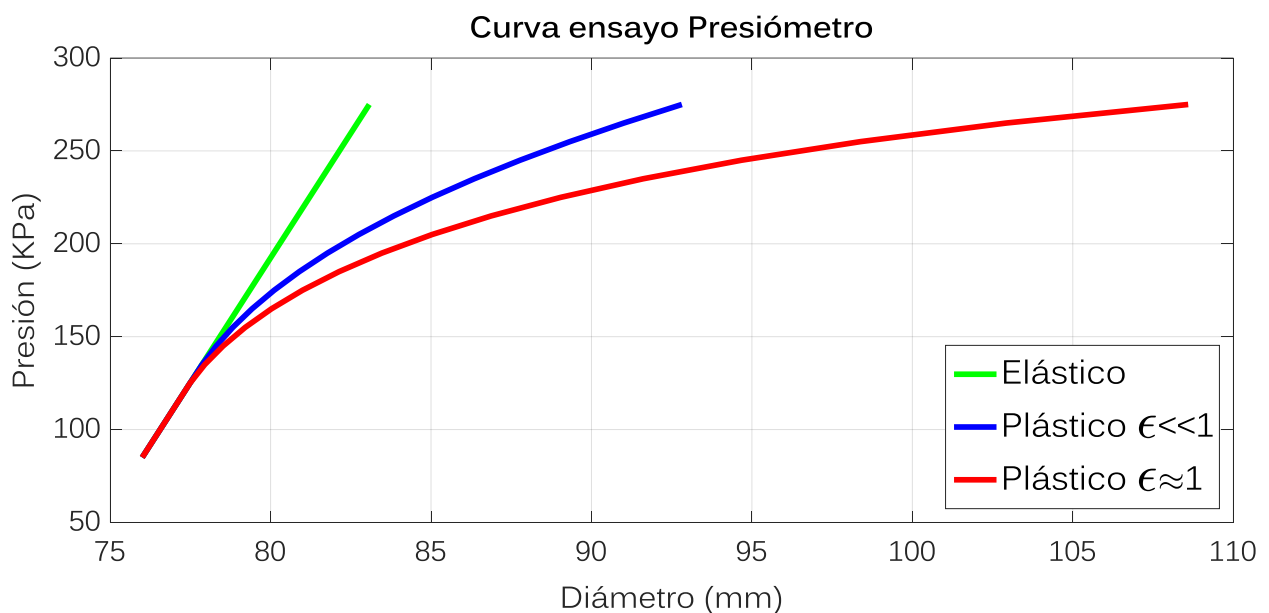
La función $\Lambda_1(x, y)$ queda definida de la siguiente forma: $\Lambda_1(x, y) = \sum_{n=0}^{+\infty} A_n(x, y)$

$$A_n(x, y) = \begin{cases} \frac{y^n}{n!} \cdot \ln(x) & \text{si } n = \frac{N \cdot (M + 1)}{(N - 1) \cdot M} \\ \frac{y^n}{n! \cdot \left(n - \frac{N \cdot (M + 1)}{(N - 1) \cdot M} \right)} \cdot \left(x^{n - \frac{N \cdot (M + 1)}{(N - 1) \cdot M}} - 1 \right) & \text{si } n \neq \frac{N \cdot (M + 1)}{(N - 1) \cdot M} \end{cases}$$

Con un análisis matemático más profundo se demuestra que existe un valor de la presión para el cual el desplazamiento de la cavidad tiende a infinito. Este valor se denomina presión límite teórica.

1.7.2.5. COMPARATIVA DE DISTINTAS HIPÓTESIS

En el programa MATLAB evaluamos las expresiones anteriores dentro de un suelo granular genérico con los valores usuales de los parámetros del terreno y mostramos por pantalla una curva radio-presión para las tres hipótesis que se han formulado: comportamiento elástico, comportamiento plástico con pequeñas deformaciones y comportamiento plástico con grandes deformaciones. Se ha elegido un diámetro inicial de 76 mm y una presión inicial de 85 KPa.

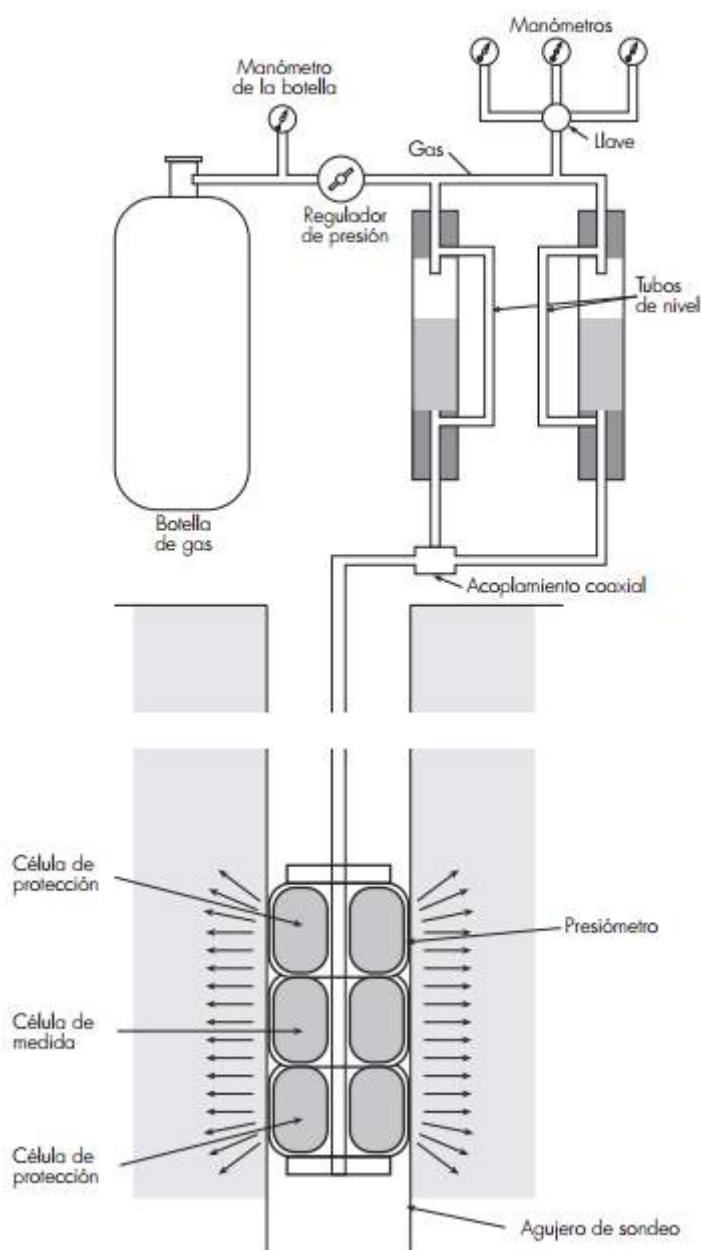


Comparativa de las distintas hipótesis

Observamos que, como era de esperar, la hipótesis de plasticidad con grandes deformaciones se parece a la de pequeñas deformaciones para pequeñas deformaciones y esta a su vez se parece a la de comportamiento elástico cuando nos encontramos por debajo de la presión de plastificación primera, que en este caso es de 118 KPa.

1.7.3. ENSAYO PRESIOMÉTRICO Y CORRELACIONES

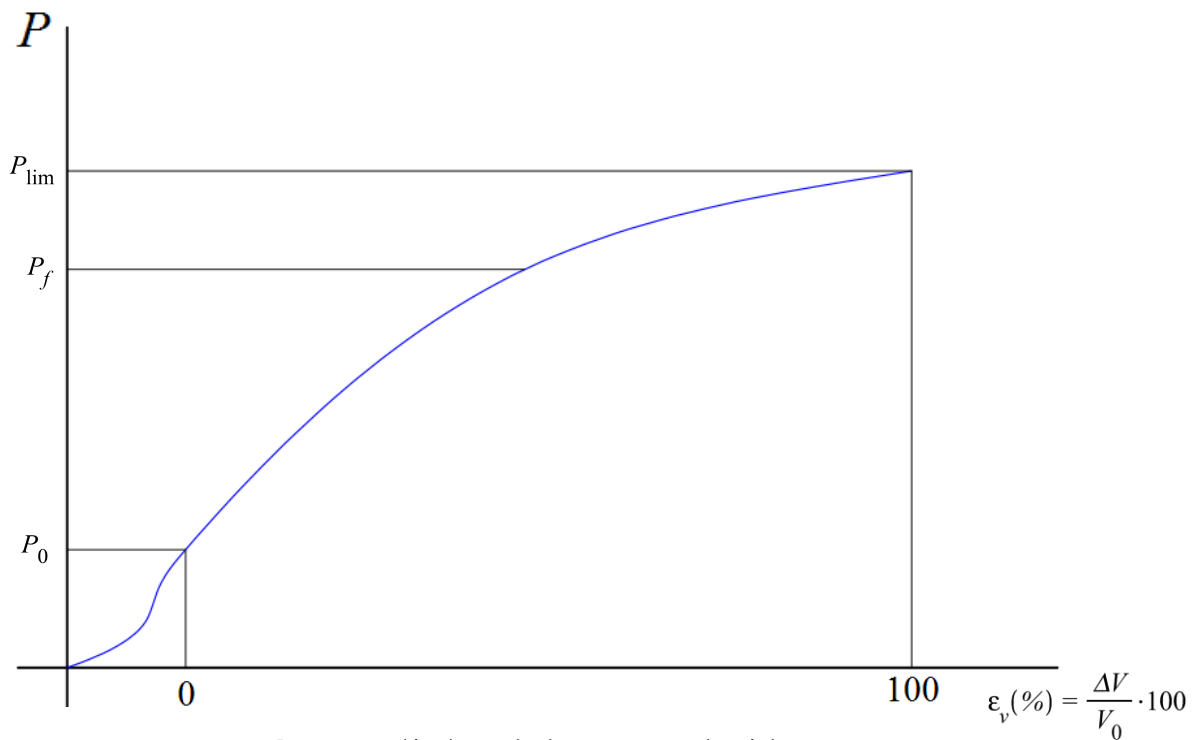
1.7.3.1. ENSAYO PRESIOMÉTRICO



Los presiómetros son aparatos que miden la presión necesaria para dilatar una cavidad cilíndrica dentro del terreno. Una cámara cilíndrica de unos 50 cm de altura y de 30 a 80 mm de diámetro con pared elástica se introduce en el terreno a través de una perforación la cual se recubre con una camisa de acero para evitar desprendimientos. Estos aparatos se denominan presiómetros de pre-perforación (PBPT: *Self Boring Pressuremeter Test*). Se introduce aire, gas o agua a presión, la camisa se hincha, choca con las paredes de la cavidad y a partir de ahí se ensancha movilizándolo el terreno. Sin embargo un problema difícil de evitar con los presiómetros clásicos es la alteración del estado tensional del suelo que se introduce con la perforación. En los años 70 aparecen presiómetros autoperforantes (PBPT: *Self Boring Pressuremeter Test*) que intentan evitar este inconveniente. Otra fuente de error es la propia expansión de la cavidad, que nunca es perfectamente circular.

El invento de este ensayo se atribuye a Kögler en 1938, aunque el primer dispositivo de esta clase que alcanzó aplicación práctica fue el presiómetro diseñado por Ménard en los años 50. El sistema de medida del volumen de la cámara se realiza por volumen de agua y dispone de tres células de medida de presión equiespaciadas a lo largo de la cámara y luego el resultado final se promedia.

Los resultados se muestran en una gráfica. En abscisas se representa la deformación radial de la cavidad (o también la deformación volumétrica) y en ordenadas se representa la presión dentro de la cámara. La curva de este ensayo tiene varios tramos definidos por un comportamiento característico.



- En la fase inicial ocurre el ajuste de la cámara con las paredes del terreno. La presión que hay que ejercer para establecer este contacto es la presión en reposo del terreno. A partir de este punto si aumentamos la presión comienza a moverse el terreno. Esa presión se denomina P_0 .
- A continuación se distingue la fase elástica en la que la curva parece lineal. En este caso el comportamiento del suelo es elástico-lineal.
- Luego viene la fase pseudoelástica en la que la curva deja de parecerse a una recta porque el terreno empieza a plastificar. Es difícil determinar con exactitud dónde acaba la fase elástica y comienza la pseudoelástica. Ese valor frontera se determina con la presión de fluencia P_f .
- Finalmente tenemos la fase plástica en la que el terreno rompe. Da la sensación que la curva adquiere un carácter asintótico a una presión, lo que se denomina presión límite teórica. Para determinar este valor se necesitan deformaciones elevadas, que no se alcanzan en el ensayo normalizado. Buscamos una presión límite "práctica". Se ha establecido como parámetro de correlación la presión límite P_{lim} como el valor de la presión cuando la deformación volumétrica de la cámara es del 100 % (se duplica el volumen). En deformación radial, equivale a llegar a una deformación del 40 %). De hecho, ni aun así se llega al 100 % de la deformación volumétrica en algunos ensayos. Entonces, el tramo final de la rama plástica se extrapola con una rama generalmente de tipo logarítmico.

Estos resultados se utilizan para resolver un problema inverso. El problema directo sería, conociendo las propiedades mecánicas del material, hallar las tensiones y deformaciones para una carga. El problema inverso consiste en hallar las propiedades mecánicas del material a partir de unos resultados de tensiones y deformaciones. El proceso de resolución de este problema inverso también se denomina estimación paramétrica.

La estimación paramétrica es un método de identificación de parámetros. Teniendo unos resultados experimentales de unas magnitudes y un método de cálculo de estas magnitudes se inicia un proceso iterativo en el que se pretende minimizar la diferencia entre los resultados calculados y los experimentales. El método de cálculo suele ser formulación analítica o cálculo numérico con elementos finitos. Los parámetros que hacen mínima esta diferencia deberán ser los característicos del terreno.

Aunque también, para resolver el problema inverso, podemos acudir a correlaciones.

1.7.3.2. CORRELACIONES

En este apartado obtendremos los parámetros necesarios para el modelo Mohr-Coulomb E, ϕ, c a partir de correlaciones según los valores principales de un ensayo presiométrico: presión inicial, presión de plastificación y presión límite.

1.7.3.2.1. MÓDULO ELÁSTICO (E)

El módulo elástico del terreno se obtiene a partir de la rama elástica de la curva. Como en este tramo el comportamiento del suelo es elástico, la relación entre presión y deformación radial debe ser parecida a la obtenida de la resolución del problema elástico equivalente (ver 1.7.2.1).

$$u_r(R) = \Delta R = \frac{1 + \nu}{E} \cdot R \cdot (P - P_0) \Rightarrow E = (1 + \nu) \cdot R \cdot \frac{P - P_0}{\Delta R} \quad P < P_f$$

Si los resultados están en deformación radial:

$$\epsilon_r(\%) = \frac{\Delta R}{R} \cdot 100 \Rightarrow \frac{R}{\Delta R} = \frac{100}{\epsilon_r(\%)} \Rightarrow E = 100 \cdot (1 + \nu) \cdot \frac{P - P_0}{\epsilon_r(\%)} \quad P < P_f \quad (1)$$

Si los resultados están en deformación volumétrica:

$$\left\{ \begin{array}{l} \epsilon_v = \frac{\Delta V}{V} = \frac{V_2 - V}{V} = \frac{\pi \cdot R_2^2 \cdot h - \pi \cdot R^2 \cdot h}{\pi \cdot R^2 \cdot h} = \left(\frac{R_2}{R} \right)^2 - 1 \\ \epsilon_r = \frac{\Delta R}{R} = \frac{R_2 - R}{R} = \frac{R_2}{R} - 1 \end{array} \right. \Rightarrow \epsilon_v = (\epsilon_r + 1)^2 - 1 = \epsilon_r^2 + 2 \cdot \epsilon_r$$

Para pequeñas deformaciones: $\epsilon_v = \epsilon_r^2 + 2 \cdot \epsilon_r \approx 2 \cdot \epsilon_r \Rightarrow \epsilon_r \approx \frac{1}{2} \cdot \epsilon_v$ y sustituyendo en (1):

$$E = 2 \cdot 100 \cdot (1 + \nu) \cdot \frac{P - P_0}{\epsilon_v(\%)} \Rightarrow \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} = G = 100 \cdot \frac{P - P_0}{\epsilon_v(\%)} \text{ con } G \text{ el módulo de rigidez}$$

transversal.

Es difícil elegir el valor de P adecuado para estimar el módulo elástico (o el de rigidez transversal) en la curva del ensayo presiométrico. Este valor de P debe ser menor que la presión de fluencia. En realidad no existe un claro tramo lineal, por lo que es difícil determinar adecuadamente esta presión de fluencia. Al final, lo que ocurre es que con el valor de presión elegido ya existe una zona de plastificación en el terreno. Entonces, el valor de E que resulta de la expresión anterior es menor que el "real". Para corregir este defecto, el módulo elástico obtenido a partir de la fórmula se denomina módulo presiométrico E_m y se recurren a factores correctores para obtener el módulo elástico del suelo. La idea de utilizar un factor corrector fue propuesta por Ménard y Rousseau (1962) y los valores más utilizados son los tabulados por la ISSMFE (International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering).

$$E_m = 100 \cdot (1 + \nu) \cdot \frac{P - P_0}{\epsilon_r(\%)} \quad \text{y} \quad E = \alpha \cdot E_m$$

	ARCILLA	LIMO	ARENA	GRAVA
α	1,1	1,5	2,2	3

1.7.3.2.2. ÁNGULO DE ROZAMIENTO INTERNO (ϕ)

Ménard (1975) propone la siguiente expresión para obtener el ángulo de rozamiento en función de la presión límite y la presión inicial.

$$\phi^0 = 4 \cdot \log_2 \frac{P_{\text{lim}} - P_0}{2.5} + 24$$

Las Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias (ROM) propone la siguiente expresión para el ángulo de rozamiento.

$$\phi^0 = 7 \cdot \left(1 + 10 \cdot \frac{\ln \left(\frac{P_2 - u_0}{P_1 - u_0} \right)}{\ln \left(\frac{\epsilon_{r,2}}{\epsilon_{r,1}} \right)} \right) \quad P_f \leq P_1 < P_2 \leq P_{\text{lim}}$$

u_0 es la presión hidrostática del agua intersticial al nivel del ensayo.

$\epsilon_{r,1}$ es la deformación radial correspondiente a la presión P_1 .

$\epsilon_{r,2}$ es la deformación radial correspondiente a la presión P_2 .

Normalmente se suelen tomar la presión de fluencia para P_1 y la presión límite para P_2 . Entonces la expresión queda:

$$\phi^0 = 7 \cdot \left(1 + 10 \cdot \frac{\ln \left[\frac{P_{\text{lim}} - u_0}{P_f - u_0} \right]}{3.7 - \ln[\epsilon_{r,f}(\%)]} \right)$$

1.7.3.2.3. RESISTENCIA AL CORTE SIN DRENAJE (c_u)

Las Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias (ROM) propone la siguiente expresión para estimar la resistencia al corte sin drenaje.

$$c_u = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_2 - P_1}{\ln \left(\frac{\epsilon_{v,2}}{\epsilon_{v,1}} \right)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_2 - P_1}{\ln \left(\frac{\left(\frac{\epsilon_{r,2}(\%)}{100} + 1 \right)^2 - 1}{\left(\frac{\epsilon_{r,1}(\%)}{100} + 1 \right)^2 - 1} \right)} \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{P_2 - P_1}{\ln \left(\frac{\epsilon_{r,2}}{\epsilon_{r,1}} \right)} \quad P_f \leq P_1 < P_2 \leq P_{\text{lim}}$$

$\epsilon_{v,1}$ es la deformación volumétrica correspondiente a la presión P_1 .

$\epsilon_{v,2}$ es la deformación volumétrica correspondiente a la presión P_2 .

$\epsilon_{r,1}$ es la deformación radial correspondiente a la presión P_1 .

$\epsilon_{r,2}$ es la deformación radial correspondiente a la presión P_2 .

Normalmente se suelen tomar la presión de fluencia para P_1 y la presión límite para P_2 . Entonces la expresión queda:

$$c_u = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_{\text{lim}} - P_f}{4.61 - \ln(\epsilon_{v,f}(\%))} \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{P_{\text{lim}} - P_f}{3.91 - \ln(\epsilon_{r,f}(\%))}$$

Amar y Jézéquel (1972) proponen la siguiente correlación para la resistencia al corte sin drenaje:

$$c_u (KPa) = \begin{cases} \frac{P_{\text{lim}} - P_0}{5.5} & \text{si } P_{\text{lim}} - P_0 \leq 300 \text{ KPa} \\ \frac{P_{\text{lim}} - P_0}{10} + 25 & \text{si } P_{\text{lim}} - P_0 > 300 \text{ KPa} \end{cases}$$

1.7.3.2.4. ÁNGULO DE DILATANCIA (Ψ)

El ángulo de dilatancia se puede obtener a partir del ángulo de rozamiento. Solamente aplicable a suelo granular.

$$\Psi = \phi - 30^\circ$$

1.7.4. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF)

El Método de Elementos Finitos permite calcular soluciones con precisión que resultan inabordables analíticamente. Además, una de las ventajas más importantes es la facilidad de implementación en un programa informático con lo que los problemas se resuelven en tiempos y con niveles de precisión imposibles de conseguir manualmente.

PLAXIS es un programa informático diseñado para la resolución de problemas geotécnicos mediante el Método de los Elementos Finitos.



Permite realizar análisis de deformación, tensiones, estabilidad, obtención de coeficientes de seguridad, flujo de agua y calor, consolidación... en el suelo en distintas aplicaciones como son excavaciones, cimentaciones, túneles, taludes, etc. Incluye elementos para introducir pantallas, alcajes y apuntalamientos, entre otros, en el modelo. Para la resolución del problema también incluye varios modelos de comportamiento del suelo (elástico-lineal, Mohr-Coulomb, Soft Soil, Hardening Soil, etc.).

Gracias a todo eso y a su continuo desarrollo, PLAXIS se ha convertido en una herramienta indispensable para el diseño de obras que requieran los conocimientos de la ingeniería del terreno.

2. MODELIZACIÓN DE UN RECALCE

2.1. INTRODUCCIÓN

Uno de los objetivos que nos proponemos en este trabajo es elaborar una metodología formal, práctica, rápida y eficaz para estimar los efectos en el terreno y en la estructura de un recalce con inyección de resina expansiva. No existe nada similar en la actualidad. Para la recuperación de asientos, las firmas inyectan lentamente la resina y midiendo instantáneamente el levantamiento mediante nivel láser. Finalizan la inyección una vez que se alcanza el valor buscado. Para aumentar la resistencia del terreno realizan ensayos penetrométricos antes y después de la ejecución para comparar los resultados. Se comprueba cómo los resultados de después de la intervención corresponden a los de un suelo más resistente.

Para estimar los efectos de una inyección con resina expansiva es necesario realizar una modelización del problema. Para solucionarlo debemos elegir un modelo de comportamiento para el terreno, y éste depende de unos parámetros. La caracterización de un suelo consiste en obtener el valor de estos parámetros.

La resina en el suelo se comporta como una cavidad en expansión que presiona las paredes y provoca un desplazamiento de terreno. El ensayo presiométrico es el ensayo in situ normalizado que mejor reproduce el fenómeno de la expansión de la resina en el terreno. Utilizamos este ensayo y sus correlaciones para caracterizar el suelo.

La metodología propuesta consistirá en los siguientes pasos:

Primero hay que modelizar la situación inicial del terreno y de la estructura: estados tensionales, asientos diferenciales, cavidades subterráneas, nivel freático, flujos de agua, los elementos relevantes cercanos como tuberías, otras cimentaciones, excavaciones, túneles, plantas de sótano... En este paso es fundamental una correcta caracterización del suelo a través de la obtención de los parámetros geotécnicos necesarios. Propondremos el ensayo presiométrico y sus correlaciones.

Una vez que queda bien definida la situación preoperacional hay que plantear los puntos de inyección de resina, su profundidad y la cantidad de resina que se va a inyectar. El modelo de comportamiento del suelo que elijamos en el programa tendrá una consecuencia directa en la validez y precisión de los resultados obtenidos. Comenzaremos comprobando la validez del modelo Mohr-Coulomb. Es necesario conocer la ley de comportamiento de la resina, presión-deformación volumétrica, para saber el valor final de la expansión de la resina. Esta ley se obtiene experimentalmente. Depende del tipo de resina. Cada resina tiene su propia ley de comportamiento. Estos puntos de inyección y cantidad de resina se introducen en el programa y calculamos. Al final, tenemos unos resultados.

Evaluando los resultados se decide si son adecuados o no. Si son adecuados se puede dar por bueno el planteamiento elegido y llevarlo a la práctica con la seguridad de que si se ha

trabajado adecuadamente el resultado real no se distanciará mucho del previsto. Si, por el contrario, no son adecuados el técnico que esté realizando esta tarea deberá ir modificando cantidad de resina inyectada, puntos de inyección y/o profundidad hasta dar con la configuración que proporcione los resultados buscados.

Así que esquemáticamente los pasos a seguir son los siguientes:

1. Modelizar en el programa de elementos finitos PLAXIS la situación inicial.
2. Caracterizar el terreno. Obtenemos los parámetros con la correlación del ensayo presiométrico.
3. Plantear una solución de inyección: puntos de inyección, profundidad y cantidad de resina.
4. Modelizar las inyecciones en PLAXIS y calcular el resultado con ayuda de la ley de comportamiento de la resina.
5. Si el resultado no es adecuado, plantear otra solución de inyección.

2.2. CARACTERIZACIÓN DEL SUELO CON ENSAYO PRESIOMÉTRICO

En este apartado tomaremos una curva real de un ensayo presiométrico realizado en un suelo arenoso y haremos a modo de ejemplo la caracterización del mismo. Contiene una rama de descarga, pero no afecta para nada al procedimiento. Como la resina solamente tiene expansión positiva, no hay zonas de descarga. Esta rama de descarga la ignoramos. Se trata de un ensayo real sobre suelo granular a una profundidad de 5,10 m. El acta adjunta incluye todos los datos del ensayo, su ejecución y resultados.

ENSAYO R0 = 36,74 mm				
P (KPa)	P (Kg/cm ²)	ΔR (mm)	ϵ_r (%)	ϵ_v (%)
80	0,82	0,00	0,00	0,00
83	0,85	0,51	1,39	2,80
101	1,03	1,04	2,83	5,74
103	1,05	1,58	4,30	8,79
123	1,25	2,08	5,66	11,64
175	1,79	4,21	11,46	24,23
208	2,12	5,61	15,27	32,87
206	2,10	5,95	16,19	35,01
204	2,08	6,27	17,07	37,04
235	2,40	6,99	19,03	41,67
117	1,19	6,99	19,03	41,67
34	0,35	6,78	18,45	40,31
2	0,02	6,51	17,72	38,58
79	0,81	6,49	17,66	38,45
170	1,73	7,08	19,27	42,25

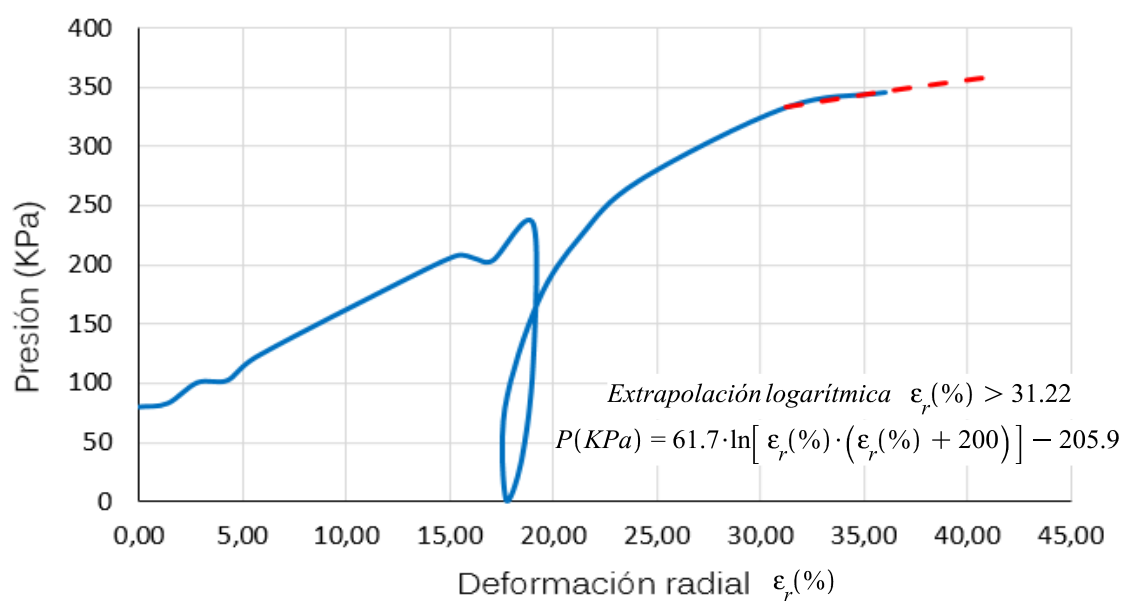
ENSAYO R0 = 36,74 mm				
P (KPa)	P (Kg/cm2)	ΔR (mm)	ϵ_r (%)	ϵ_v (%)
225	2,29	7,83	21,31	47,17
272	2,77	8,87	24,14	54,11
333	3,40	11,47	31,22	72,19
346	3,53	13,23	36,01	84,99
356	3,63	14,70	40,00	96,00
359	3,66	15,22	41,42	100,00

Resultados del ensayo presiométrico

PROFUNDIDAD DEL ENSAYO: 5,10 m

RADIO INICIAL: 37 mm

LONGITUD DE LA CAMISA: 50 cm



P_0 (KPa)	80	$\epsilon_{r,0}$ (%)	0
P_f (KPa)	235	$\epsilon_{r,f}$ (%)	17,5
P_{lim} (KPa)	360	$\epsilon_{r,lim}$ (%)	41,4

Valores de cálculo para correlaciones

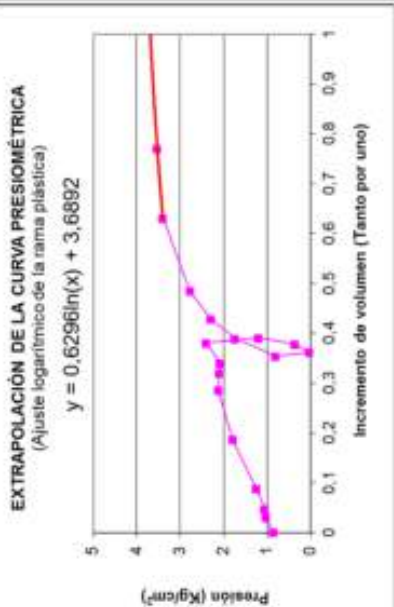
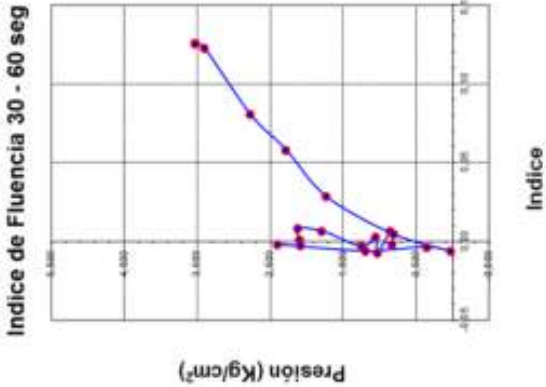
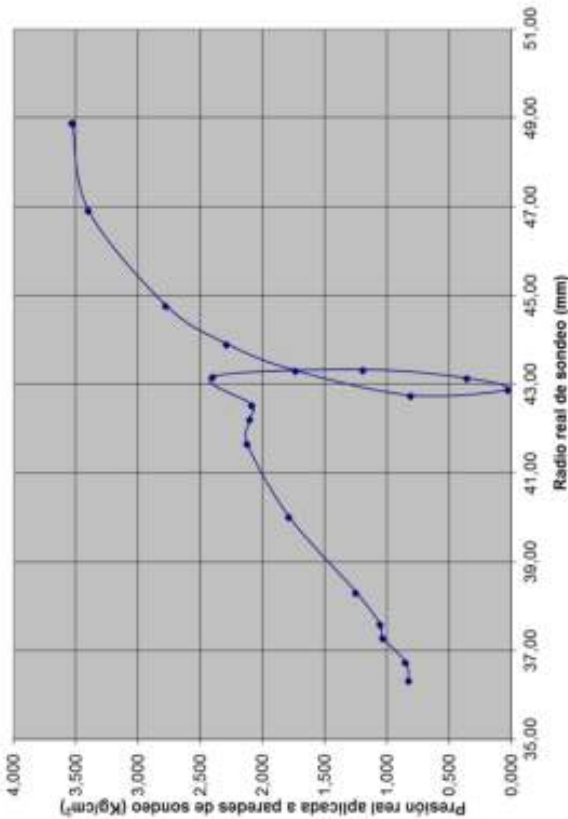
PRESION DE FLUENCIA		PRESION LIMITE
$P_f = 0.235 \text{ MPa}$		$P_L = 0.302 \text{ MPa}$

MODULO PRESIOMETRICO	
$E_p = (1+ \frac{1}{18} \frac{dR}{dRm}) \frac{dP}{d\Delta R}$ $E_p = 1,206 \text{ MPa}$	

OBSERVACIONES	
---------------	--

CALIBRACION DE CAMISA				
Efecto reaccion de la camisa				
B (x/3)	C (x/2)	D (x/1)	E (x/0)	
0.0008	-0.0415	0.7701	-1.8308	
Efecto Presion				
A (x/1)	B (x/0)			
0.0023	0.0087			
Efecto Volumen				
A (x/1)	B' (x/0)			
0.2184	-1.5913			

PARAMETROS DE CALCULO	
Radio inicial de la cavidad:	30.74 mm
Inicio del tramo elastico	36.74 mm
Radio p1:	0.85 kg/cm ²
Presion en p1:	43.17 mm
Radio p2:	2.40 kg/cm ²
Presion en p2:	



LECTURAS INSTRUMENTALES				CALIBRACION				LECTURAS CORREGIDAS			
Presion kg/cm²	Radio mm	R+1% mm	R+50% mm	RADIO EFFECTO PRESION	RADIO EFFECTO TEMPERATURA	RADIO EFFECTO VOLUMEN	RADIO EFFECTO CORRECCION	RADIO EFFECTO CORRECCION	RADIO EFFECTO CORRECCION	RADIO EFFECTO CORRECCION	
0.15	1.05	1.06	1.05	-0.07	1.25	0.82	2.83	2.83	2.83	2.83	
0.51	2.18	2.29	2.30	-0.07	1.13	0.85	3.24	3.32	3.34	3.34	
1.09	2.88	2.97	3.00	-0.07	0.98	1.03	3.79	3.86	3.88	3.87	
1.33	3.27	3.33	3.33	-0.07	0.89	1.05	4.09	4.14	4.14	4.14	
1.98	4.20	4.31	4.32	-0.07	0.69	1.25	4.81	4.90	4.91	4.91	
3.59	6.39	6.59	7.04	-0.08	0.21	1.79	6.32	7.00	7.03	7.04	
4.33	8.49	8.79	8.83	-0.08	-0.25	2.12	8.16	8.40	8.43	8.44	
4.46	9.18	9.26	9.27	-0.08	-0.40	2.10	8.70	8.77	8.78	8.78	
4.53	9.60	9.69	9.70	-0.08	-0.49	2.08	9.03	9.10	9.11	9.10	
4.99	10.41	10.60	10.61	-0.08	-0.67	2.40	9.07	9.81	9.82	9.82	
3.82	10.61	10.61	10.61	-0.08	-0.71	1.19	9.83	9.82	9.83	9.82	
2.94	10.36	10.35	10.34	-0.08	-0.66	0.35	9.63	9.62	9.61	9.61	
2.55	10.04	10.01	10.00	-0.08	-0.38	0.02	9.38	9.30	9.34	9.34	
3.20	9.87	9.94	9.93	-0.08	-0.53	0.81	9.23	9.30	9.31	9.32	
4.35	10.58	10.67	10.69	-0.08	-0.70	1.73	9.80	9.87	9.88	9.91	
5.02	11.36	11.55	11.61	-0.08	-0.87	2.29	10.40	10.56	10.60	10.60	
5.04	12.47	12.82	12.92	-0.08	-1.11	2.77	11.27	11.55	11.62	11.70	
6.50	15.22	16.03	16.19	-0.09	-1.71	3.40	13.42	14.03	14.18	14.30	
6.76	17.74	18.28	18.43	-0.09	-2.26	3.53	15.39	15.81	15.93	16.06	

Con estos datos aplicamos las correlaciones vistas en el apartado 1.7.3 sobre "ENSAYO PRESIOMÉTRICO Y CORRELACIONES", obteniendo los siguientes resultados:

MÓDULO ELÁSTICO (E)

$$E = \alpha \cdot E_m = \alpha \cdot 100 \cdot (1 + \nu) \cdot \frac{P_f - P_0}{\epsilon_{r,f}(\%)} = 2.2 \cdot 100 \cdot (1 + 0.33) \cdot \frac{235 - 80}{17.5} = 2600 \text{ KPa}$$

Como se trata de un suelo arenoso, hemos tomado el coeficiente α igual al dado en la tabla para arena con valor 1,1.

ÁNGULO DE ROZAMIENTO INTERNO (ϕ)

Ménard (1975):

$$\phi^o = 4 \cdot \log_2 \frac{P_{\text{lim}} - P_0}{2.5} + 24 = 4 \cdot \log_2 \left(\frac{360 - 80}{2.5} \right) + 24 = 51^o$$

ROM (no hay presencia de nivel freático):

$$\phi^o = 7 \cdot \left(1 + 10 \cdot \frac{\ln \left[\frac{P_{\text{lim}} - u_0}{P_f - u_0} \right]}{3.7 - \ln[\epsilon_{r,f}(\%)]} \right) = 7 \cdot \left(1 + 10 \cdot \frac{\ln \left(\frac{360}{235} \right)}{3.7 - \ln(17.5)} \right) = 42^o$$

De las dos correlaciones, tomamos la que devuelve menor ángulo de rozamiento.

RESISTENCIA AL CORTE SIN DRENAJE (c_u)

ROM:

$$c_u = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_{\text{lim}} - P_f}{3.91 - \ln(\epsilon_{r,f})} = \frac{1}{2} \cdot \frac{360 - 235}{3.91 - \ln(17.5)} = 60 \text{ KPa}$$

Amar y Jézéquel (1972):

$$c_u(\text{KPa}) = \begin{cases} \frac{P_{\text{lim}} - P_0}{5.5} & \text{si } P_{\text{lim}} - P_0 \leq 300 \text{ KPa} \\ \frac{P_{\text{lim}} - P_0}{10} + 25 & \text{si } P_{\text{lim}} - P_0 > 300 \text{ KPa} \end{cases} = \frac{360 - 80}{5.5} = 51 \text{ KPa}$$

Valores de resistencia al corte muy parecidos. Esta similitud nos puede llevar a pensar que el valor es próximo al real.

DILATANCIA (Ψ)

$$\psi = 30 - 42 = 8^\circ$$

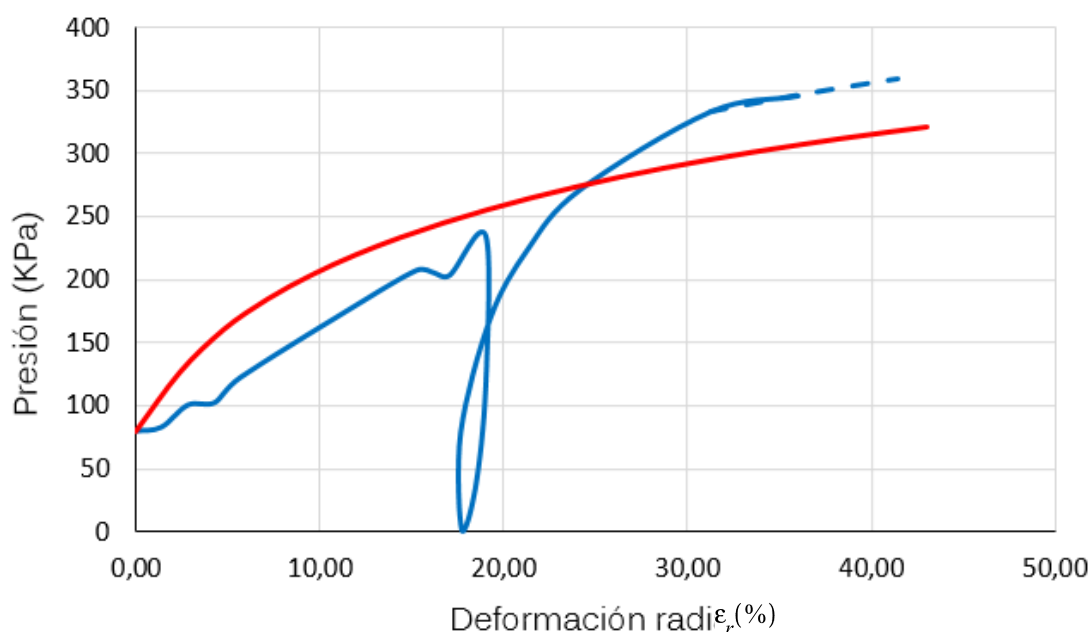
$E(KPa)$	ν	$\phi(^{\circ})$	$c_u(KPa)$	$\psi(^{\circ})$
2600	0,33	42	51	8

Parámetros del suelo

Con estos valores podemos modelizar el ensayo presiométrico y obtener la curva. Si son adecuados, debe parecerse a la curva real proporcionada en el ensayo. En el apartado 1.7 vimos "HERRAMIENTAS TEÓRICAS Y NUMÉRICAS PARA MODELIZACIÓN". Estas herramientas nos permiten modelizar el ensayo presiométrico de distintas formas: modelización analítica (formulación matemática), modelización numérica axisimétrica con PLAXIS AXISIMÉTRICO y modelización numérica en deformación plana con PLAXIS DEFORMACIÓN PLANA.

2.3. MODELIZACIÓN ANALÍTICA

Tomando los parámetros del suelo obtenidos con la correlación los introducimos en las expresiones de la teoría de "Expansión de una cavidad cilíndrica en el terreno" (Apartado 1.7.2) y comparamos los resultados con la curva real. Como vamos a llevar el terreno hasta la rotura y una deformación volumétrica del 100 % debemos utilizar la expresión del desplazamiento del borde de la cavidad con comportamiento plástico y grandes deformaciones (Apartado 1.7.2.4). Nos ayudamos del programa MATLAB para evaluar la fórmula y generar los resultados.



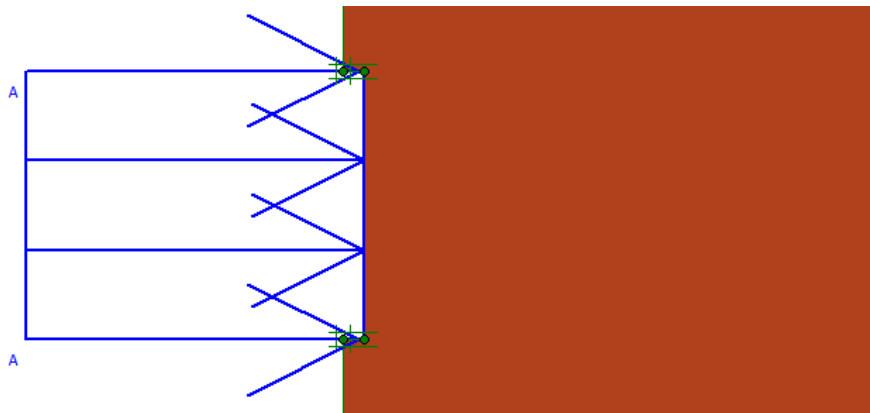
Comparación ANALÍTICO vs REAL

2.4. MODELIZACIÓN NUMÉRICA (PLAXIS AXISIMÉTRICO)

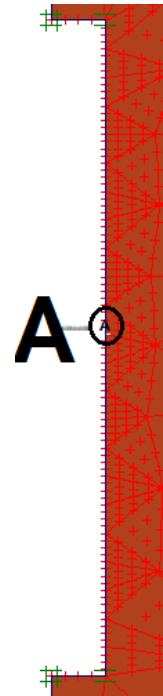
Profundidad	Estratigrafía	Descripción	Nivel freático
0.40		Asfalto y hormigón.	
0.70		Albero.	
1.60		Arcilla limosa marrón con vetas y lentes negras.	
		Limo arenoso y arena limosa muy fina marrón. - Presencia de raíces.	
5.50		Limo arenoso con niveles arcillosos blandos intercalados de color gris.	4.90
7.40		Arena limosa gris.	

En este apartado modelizaremos el ensayo en el programa PLAXIS. Para ello disponemos también de un sondeo realizado junto al ensayo para introducir los distintos ensayos en el modelo. Encontramos que hasta la profundidad del punto donde se realiza el ensayo tenemos 40 cm de asfalto y hormigón, 30 cm de albero, 90 cm de arcilla limosa y 3,5 m de limo arenoso con arena limosa. Para simplificar el modelo, tomaremos el suelo homogéneo con las características del limo arenoso con arena limosa. El nivel freático se encuentra a 20 cm sobre el punto del ensayo, así que tampoco lo tendremos en cuenta. Para el cálculo de la presión

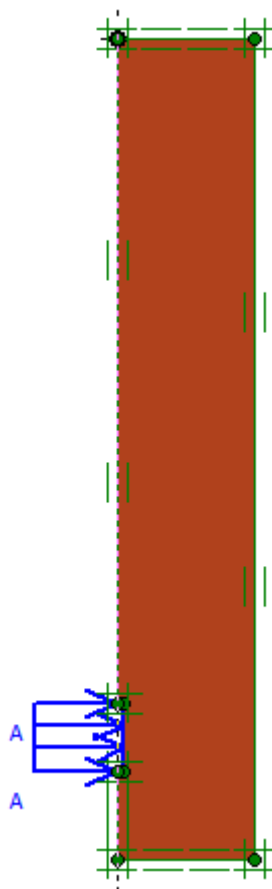
horizontal necesitamos el peso específico del suelo, que también se nos ha facilitado: 17,8 KN/m³.



Detalle de la modelización de la cavidad



Nodo A seleccionado para curva presión-desplazamiento

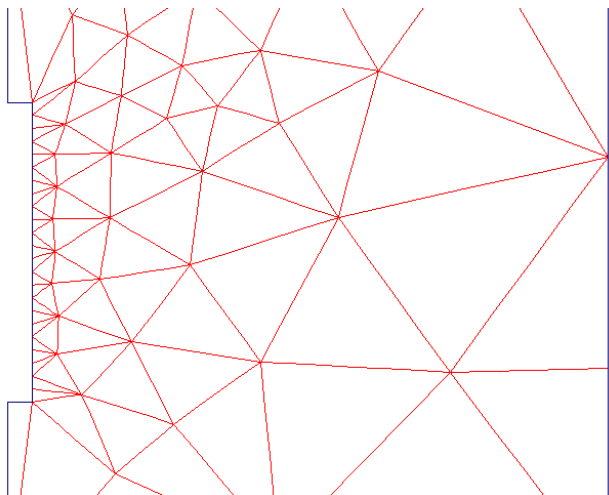


Gracias a la simetría cilíndrica del problema, podemos estudiar una sección vertical y le indicamos al programa que aplique las condiciones que se derivan de la simetría axisimétrica. Esta sección vertical presenta además otro eje de simetría vertical que pasa por el centro de la cavidad, permitiéndonos estudiar nada más una mitad. La cavidad del presiómetro queda como un hueco rectangular de 50 cm de largo y 37 mm de ancho.

La presión de la cámara se ha modelizado con una carga lineal uniformemente distribuida a lo largo de toda la longitud de la camisa. En la primera fase de cálculo se llega hasta el valor de la presión inicial (80 KPa). En una segunda fase, se toma la primera fase como predecesora, se toman los desplazamientos igual a cero, se aplican 280 KPa para tener los 360 KPa totales que tenemos en el ensayo real y se mide la deformación radial con la expansión. Los resultados se obtienen a través de la curva presión-desplazamiento de un punto marcado en el centro de la cavidad. Para el comportamiento del suelo elegimos el modelo Mohr-Coulomb. Si con el modelo de Mohr-Coulomb se representa adecuadamente el comportamiento del terreno en estas condiciones, los resultados deberán parecerse a los del ensayo en la medida que los parámetros geotécnicos del suelo se parezcan a los reales.

$E(KPa)$	ν	$\phi(^{\circ})$	$c_u(KPa)$	$\psi(^{\circ})$
2600	0,33	42	51	8

Valores de los parámetros obtenidos por correlaciones



Detalle del mallado de la cavidad



Deformada de la cavidad (aumentado 10 veces)

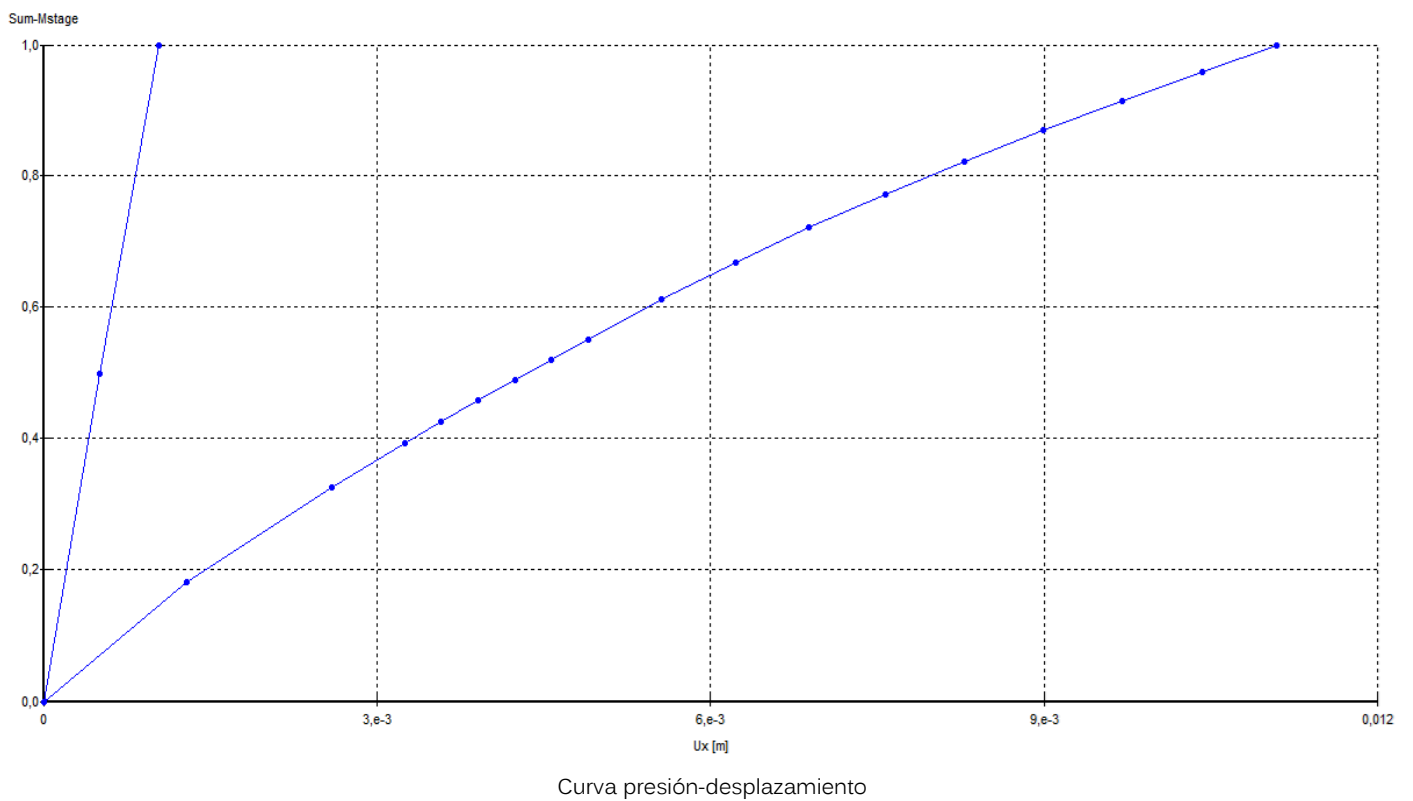
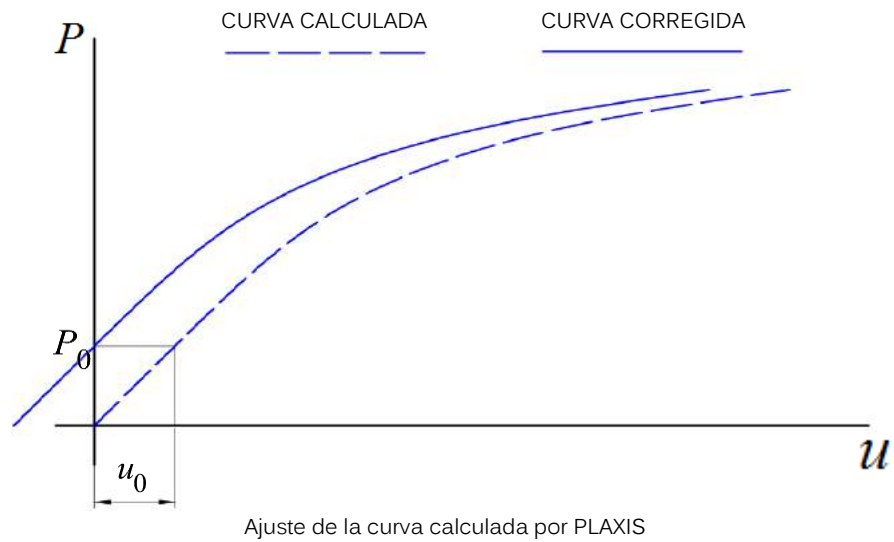
Probablemente, el módulo elástico esté sobredimensionado porque hemos utilizado el coeficiente corrector de la arena y en la descripción del estrato del terreno se dice que es un limo arenoso. El coeficiente corrector para el módulo elástico del limo es menor que el de la arena. No lo hemos usado así antes porque ante este detalle nos hemos remitido al acta de un sondeo que se hizo a la vez que el ensayo y en esa acta se especifica que el terreno es arenoso, pero con limo.

Se van a definir dos fases constructivas independientes (ambas tienen como predecesoras la fase inicial del programa por defecto). En la primera se aplica una carga igual a la presión horizontal inicial del ensayo P_0 , en este caso igual a 80 KPa. En la segunda se aplica la presión límite del ensayo P_{lim} . Lo hemos definido de esta forma para restar las deformaciones debidas a un estado tensional en el borde de la cavidad de 80 KPa y así tener mayor similitud con el verdadero comportamiento del suelo cuando se realiza el ensayo presiométrico. Efectivamente, la deformación radial comienza a aumentar a partir de P_0 , así que la curva que devuelve el programa hay que restarle el desplazamiento correspondiente a la presión P_0 .

Una vez que se haya corregido la curva, se multiplican los coeficientes sum-Mstage por 360 KPa para tener el valor de la presión y los desplazamientos (que son los incrementos de radio) se pasan a deformación radial para tener las mismas variables que la curva del ensayo presiométrico y así poder compararlas gráficamente sobre un mismo sistema de ejes.

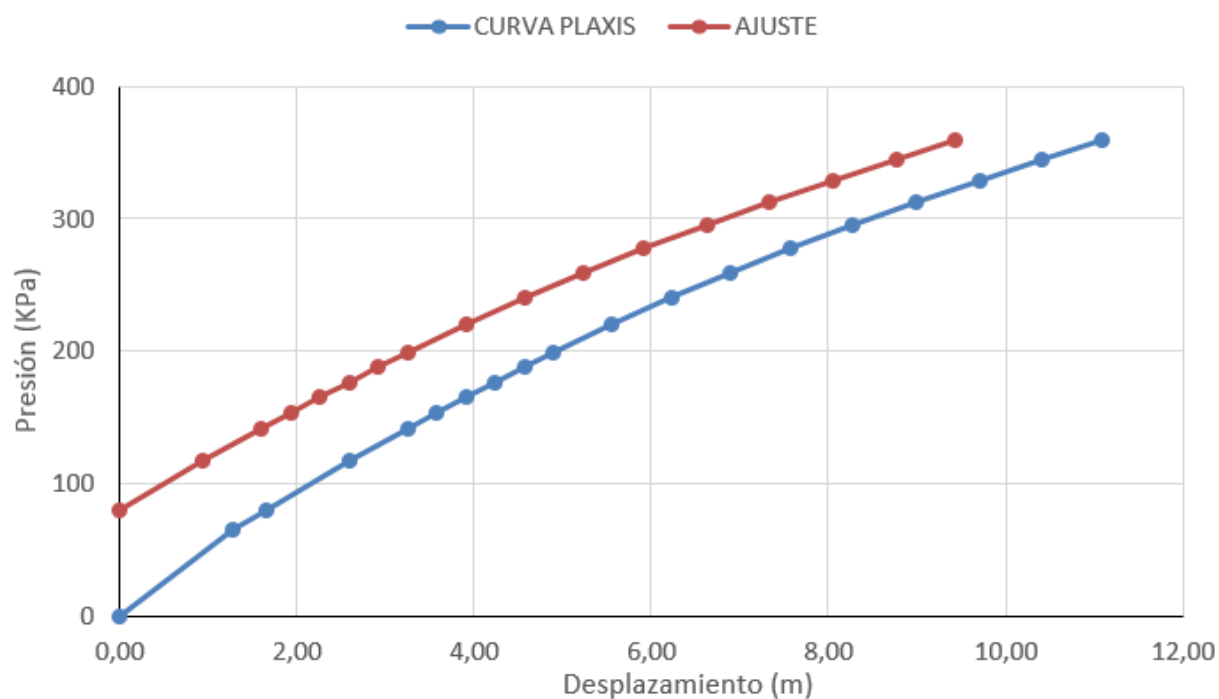
La curva siguiente tiene en el eje de abscisas el desplazamiento horizontal del nodo A y en el eje de ordenadas el factor Sum-Mstage que indica el porcentaje de carga aplicado en tanto

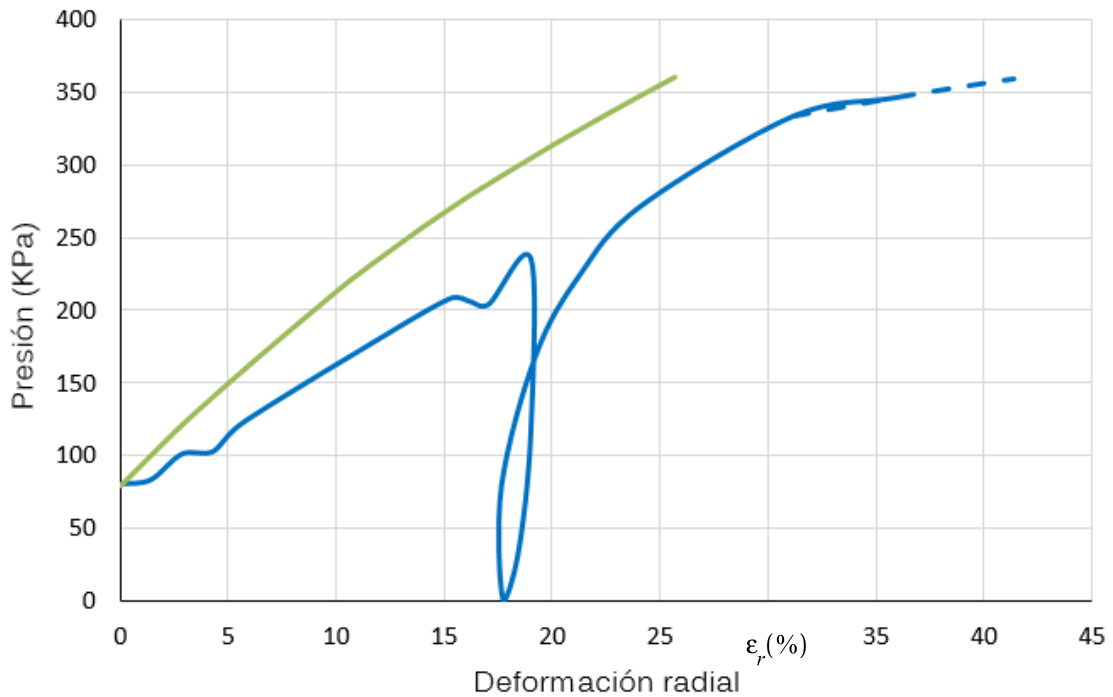
por uno. La rama más vertical corresponde al desplazamiento para una carga de 80 KPa y la otra es el desplazamiento para 360 KPa.



Los valores con los que comparamos los resultados del ensayo son:

Valores PLAXIS		Para comparar	
P (KPa)	u (mm)	$u - 1,65$	$\varepsilon_p(\%)$
0	0,00	-1,65	-4,50
65	1,29	-0,36	-0,99
80	1,65	0,00	0,00
118	2,59	0,94	2,56
142	3,25	1,60	4,35
153	3,58	1,93	5,24
165	3,91	2,26	6,14
176	4,24	2,59	7,04
188	4,57	2,92	7,94
199	4,90	3,25	8,84
221	5,56	3,91	10,63
240	6,22	4,57	12,44
260	6,89	5,23	14,25
278	7,57	5,92	16,11
296	8,28	6,63	18,04
313	8,99	7,34	19,97
329	9,70	8,05	21,91
345	10,42	8,76	23,86
360	11,09	9,44	25,69





Comparación del ensayo y modelo en PLAXIS
con parámetros de la correlación

Observamos en la gráfica que la forma de la curva es parecida a la rama de carga del ensayo. Conforme aumenta la deformación, los valores aumentan su diferencia. El modelo realizado en PLAXIS tiende a sobreestimar los valores de la presión conforme nos acercamos al valor límite. La coincidencia de los resultados podemos suponer que se debe a los valores de los parámetros del suelo. A continuación, ajustaremos el valor de los parámetros para conseguir un mayor parecido de los resultados con los reales.

2.4.1. AJUSTE DE PARÁMETROS: ESTUDIO DE SENSIBILIDAD

Proponemos tomar los valores de la correlación como punto de partida e irlos modificando de un modo iterativo hasta conseguir un mayor parecido entre los resultados calculados y los del ensayo. Si efectivamente tenemos una mayor similitud, se deduce que los nuevos valores de los parámetros son más parecidos a los reales del suelo.

2.4.1.1. MÓDULO ELÁSTICO

Primero podemos corregir el módulo elástico. Este parámetro influye significativamente en el primer tramo de la curva del ensayo porque es la que corresponde al comportamiento elástico del suelo.

El módulo elástico determina la pendiente inicial del tramo lineal de la curva presiométrica. Un módulo superior al real resulta en una mayor inclinación. El valor elegido anteriormente fue de 2600 KPa y como se ve en la curva comparativa, el tramo lineal tiene mayor

pendiente que el del ensayo: debemos disminuirlo. Los 2600 KPa se han obtenido utilizando el coeficiente corrector de módulo elástico para resinas. Sin embargo, en la descripción del terreno adjunta al ensayo se decide que se trata de un limo arenoso y efectivamente el limo tiene menor coeficiente corrector de módulo elástico que la arena.

Como método para ajustar el módulo elástico, tomamos aquel valor que haga que el punto final del tramo elástico sea el mismo que el del ensayo. En el ensayo se tiene que el punto final del tramo elástico, el punto de fluencia, es el correspondiente a una presión de 235 KPa y una deformación radial del 17,5 %. Para el caso anterior con 2600 KPa de módulo elástico tenemos una deformación del 11,94 % para una presión de 235 KPa (interpolando linealmente los resultados mostrados en la tabla). Probamos con otros valores de módulo elástico para estimar aquel que cumple la condición establecida.

- AJUSTE 1: $E = 2000$ KPa

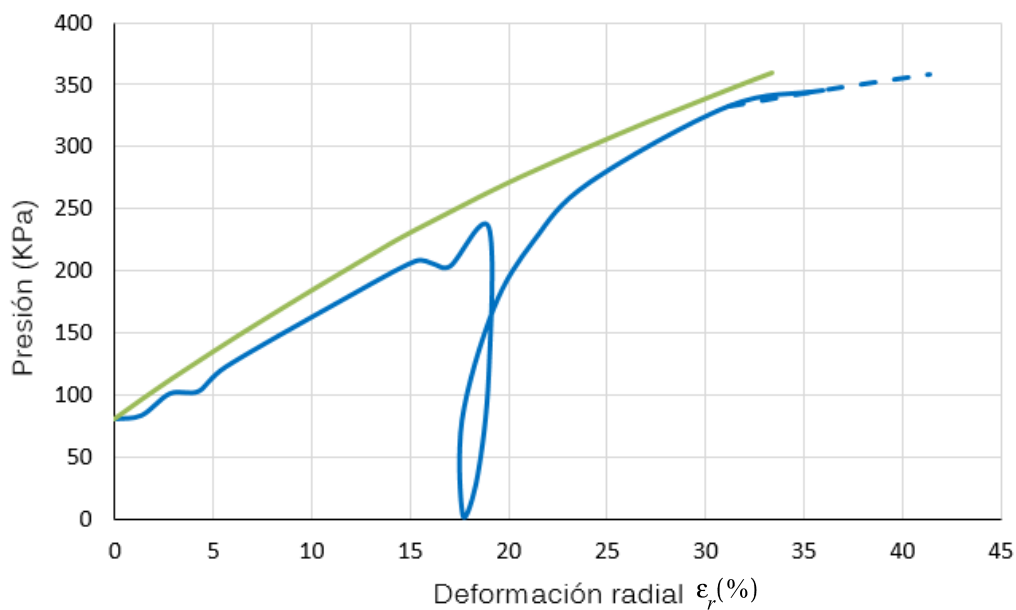
$E(KPa)$	ν	$\phi(^{\circ})$	$c_u(KPa)$	$\psi(^{\circ})$
2000	0,33	42	51	8

AJUSTE 1: Valor de los parámetros

Procedemos de la misma forma: aplicamos en PLAXIS 80 KPa y 360 KPa. A los desplazamientos con la carga de 360 KPa le restamos los que se tienen con 80 KPa, pasamos los desplazamientos a deformación radial y lo comparamos con el ensayo.

P (KPa)	u (mm)	u - 2,12	$\epsilon_r(\%)$
80,0	2,12	0,00	0,00
95,9	2,63	0,51	1,39
112,6	3,19	1,07	2,92
128,6	3,76	1,64	4,46
136,5	4,04	1,92	5,22
144,4	4,32	2,20	5,99
152,1	4,60	2,48	6,76
167,3	5,17	3,05	8,30
174,8	5,45	3,33	9,07
189,6	6,02	3,90	10,61
204,3	6,58	4,46	12,15
211,5	6,87	4,75	12,92
226,0	7,44	5,32	14,47
239,0	8,00	5,88	16,02
251,7	8,57	6,45	17,57
264,2	9,14	7,02	19,11
276,5	9,73	7,61	20,72
287,8	10,32	8,20	22,32

P (KPa)	u (mm)	u - 2,12	$\epsilon_r(\%)$
299,0	10,91	8,79	23,92
309,9	11,50	9,38	25,54
320,7	12,09	9,97	27,14
331,3	12,70	10,58	28,80
341,8	13,31	11,19	30,45
352,1	13,91	11,79	32,10
360,0	14,39	12,27	33,40



Con un valor de 2000 KPa para el módulo elástico se tiene una deformación de 15,54 % para 235 KPa de presión.

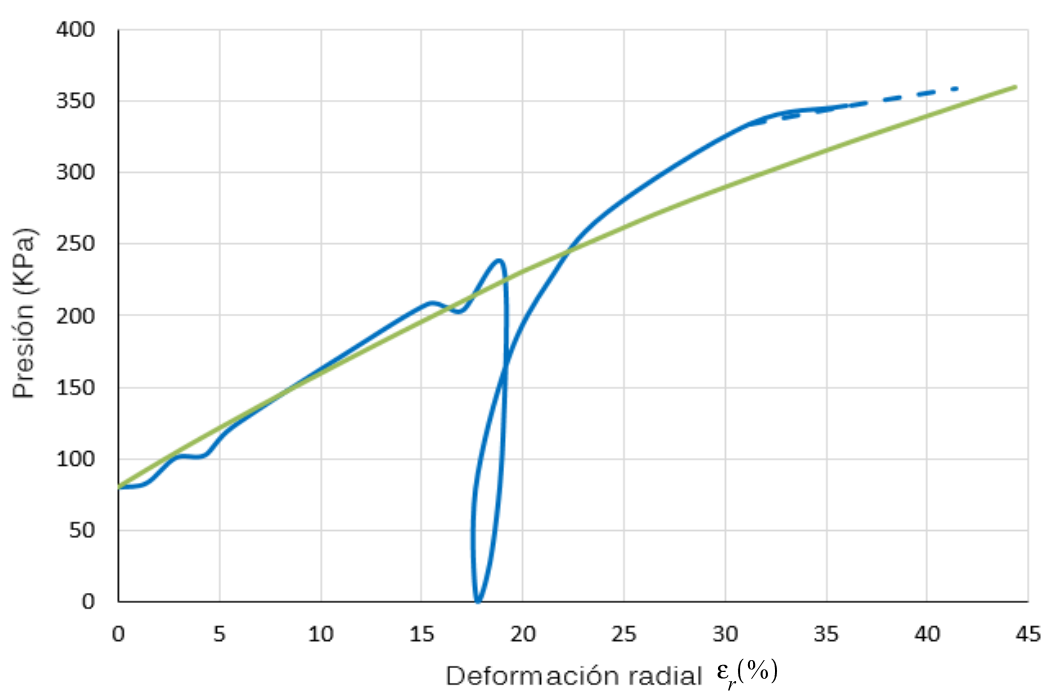
- AJUSTE 2: $E = 1500$ KPa

$E(KPa)$	ν	$\phi(^{\circ})$	$c_u(KPa)$	$\psi(^{\circ})$
1500	0,33	42	51	8

AJUSTE 2: Valor de los parámetros

P (KPa)	u (mm)	u - 2,83	$\epsilon_r(\%)$
80,00	2,83	0,00	0,00
81,8	2,90	0,07	0,19
109,2	4,10	1,27	3,45
122,1	4,70	1,87	5,09
128,5	5,00	2,17	5,91
134,8	5,30	2,47	6,73

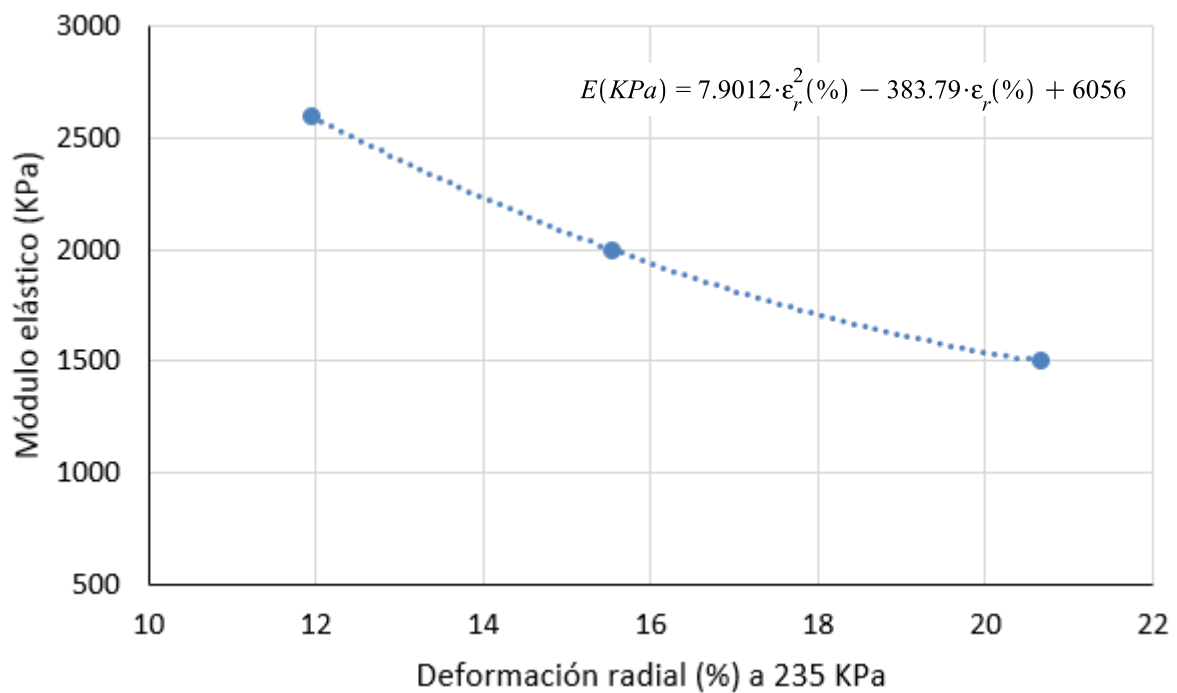
P (KPa)	u (mm)	u - 2,83	$\epsilon_r(\%)$
139,6	5,53	2,70	7,34
145,9	5,83	3,00	8,17
152,0	6,13	3,30	8,99
164,2	6,74	3,91	10,63
176,23	7,34	4,51	12,28
185,17	7,79	4,96	13,51
191,08	8,10	5,27	14,34
199,88	8,55	5,72	15,57
211,54	9,16	6,33	17,22
223,11	9,76	6,93	18,87
228,87	10,07	7,24	19,70
231,69	10,22	7,39	20,12
235,85	10,47	7,64	20,79
244,08	10,96	8,13	22,12
254,91	11,61	8,78	23,88
265,67	12,25	9,42	25,65
276,30	12,93	10,10	27,48
286,74	13,63	10,80	29,39
296,83	14,34	11,51	31,32
306,79	15,05	12,22	33,27
316,66	15,77	12,94	35,21
326,26	16,49	13,66	37,17
335,73	17,22	14,39	39,16
342,79	17,76	14,93	40,64
347,46	18,13	15,30	41,63
354,43	18,67	15,84	43,11
360,00	19,12	16,29	44,34



La deformación radial a 235 KPa es del 20,65 %.

Buscamos el valor de E que hace 17,5 % la deformación radial a 235 KPa, la presión de fluencia. Sabemos los siguientes valores:

E (KPa)	$\varepsilon_r(\%)$ a P_f
2600	11,94
2000	15,54
1500	20,65



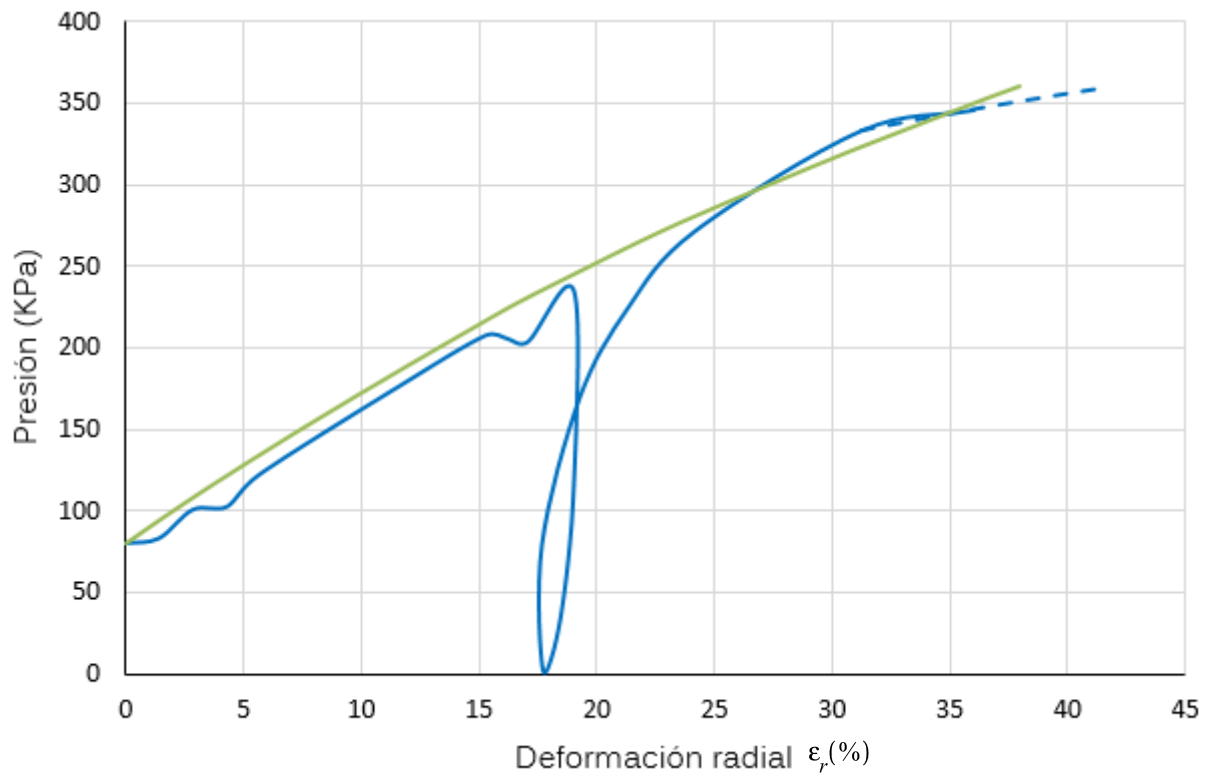
Sustituyendo el valor de 17,5 % para la deformación radial obtenemos un módulo elástico de 1759 KPa.

- AJUSTE 3: E = 1759 KPa

$E(KPa)$	ν	$\phi(^{\circ})$	$c_u(KPa)$	$\psi(^{\circ})$
1759	0,33	42	51	8

AJUSTE 3: Valor de los parámetros

P (KPa)	u (mm)	u - 2,41	ϵ_r (%)
80	2,41	0,00	0,0
96	2,99	0,58	1,6
113	3,63	1,22	3,3
129	4,27	1,86	5,1
137	4,59	2,18	5,9
144	4,91	2,50	6,8
152	5,23	2,82	7,7
167	5,88	3,47	9,4
175	6,20	3,79	10,3
190	6,84	4,43	12,1
204	7,49	5,08	13,8
212	7,81	5,40	14,7
226	8,45	6,04	16,5
239	9,10	6,69	18,2
252	9,75	7,34	20,0
264	10,39	7,98	21,7
276	11,06	8,65	23,6
288	11,73	9,32	25,4
299	12,40	9,99	27,2
310	13,08	10,67	29,0
321	13,75	11,34	30,9
331	14,44	12,03	32,7
342	15,13	12,72	34,6
352	15,82	13,41	36,5
360	16,36	13,95	38,0



2.4.1.2. ÁNGULO DE ROZAMIENTO Y RESISTENCIA AL CORTE

Ángulo de rozamiento y resistencia al corte sin drenaje determinan el comportamiento de la rama plástica de la curva. Para ajustar estos dos parámetros, buscaremos que la deformación volumétrica a la presión límite del ensayo sea del 100 % (deformación radial del 41,42 %). Como tenemos dos parámetros que influyen en esta condición, para pasarlo a un problema de una variable propondremos que la variación de ambos parámetros sea la multiplicación por un mismo factor. Entonces, tomamos unos cuantos valores de este factor, vemos la deformación a la presión límite (360 KPa) del ensayo y luego interpolamos para hallar el valor del factor que hace que se cumpla la condición impuesta para el ajuste. Sea γ_R este factor.

El ajuste para $\gamma_R = 1$ ya lo tenemos, el valor del ajuste 3. Se tiene una deformación radial del 38 % para la presión límite del ensayo. Hace falta reducir los parámetros para tener mayor deformación radial para la misma presión.

- AJUSTE 4: $\gamma_R = 0,8$

Los dos parámetros los multiplicamos por 0,8.

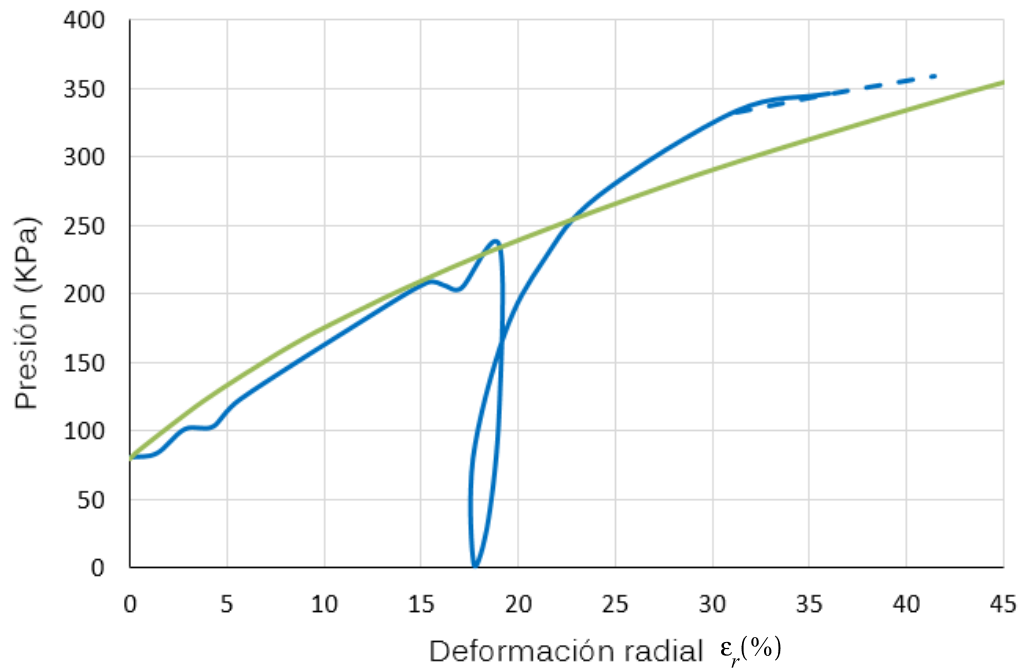
$$\tan(\phi) = 0.8 \cdot \tan(42^\circ) = 0.7203 \Rightarrow \phi = 36^\circ$$

$$c_u = 0.8 \cdot 51 = 41 \text{ KPa}$$

$E(KPa)$	ν	$\phi(^{\circ})$	$c_u(KPa)$	$\psi(^{\circ})$
1759	0,33	36	41	8

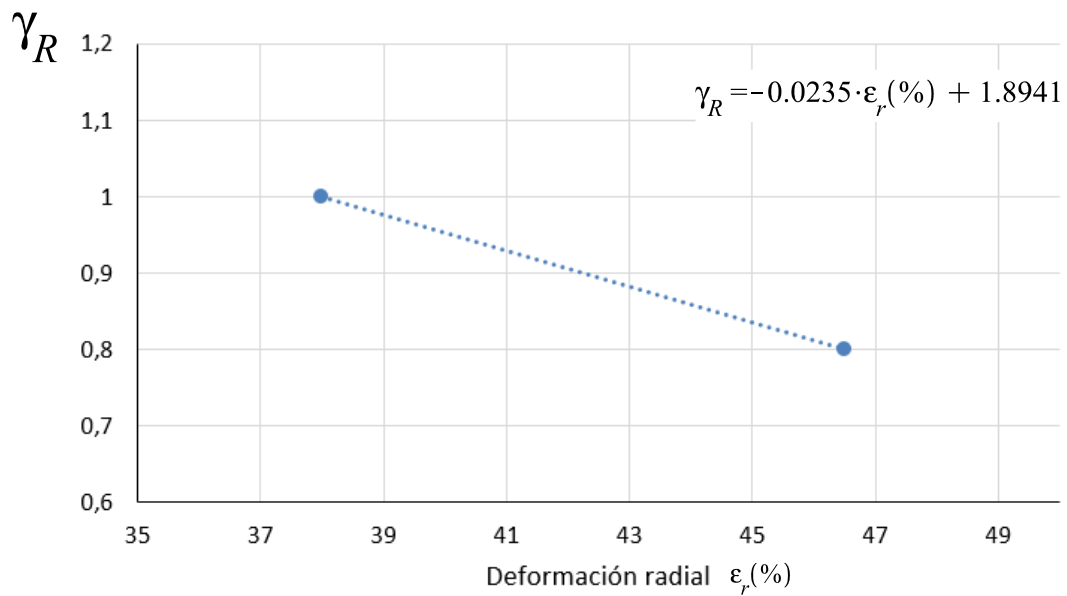
AJUSTE 4: Valor de los parámetros

P (KPa)	u (mm)	u - 2,24	$\epsilon_r(\%)$
80	2,24	0,00	0,0
87	2,43	0,18	0,5
122	3,65	1,40	3,8
152	4,85	2,61	7,1
166	5,45	3,21	8,7
172	5,76	3,52	9,6
179	6,08	3,84	10,4
185	6,41	4,16	11,3
191	6,73	4,49	12,2
197	7,05	4,81	13,1
203	7,38	5,13	14,0
209	7,70	5,46	14,9
220	8,36	6,12	16,7
231	9,03	6,78	18,5
241	9,70	7,45	20,3
251	10,37	8,12	22,1
260	11,04	8,80	23,9
270	11,71	9,47	25,8
279	12,39	10,15	27,6
288	13,06	10,82	29,4
297	13,76	11,52	31,3
305	14,46	12,22	33,3
314	15,17	12,92	35,2
322	15,87	13,63	37,1
330	16,58	14,33	39,0
338	17,28	15,04	40,9
346	17,98	15,74	42,8
353	18,70	16,45	44,8
360	19,32	17,08	46,5



Para $\gamma_R = 0,8$ tenemos una deformación radial del 46,5 %.

$\varepsilon_r(\%)$	γ_R
38	1
46,5	0,8



Sustituyendo el valor de la deformación radial por 41,42 en la ecuación de interpolación entre los valores conocidos tenemos un γ_R igual a 0,92.

$$\tan(\phi) = 0.92 \cdot \tan(42^\circ) = 0.8284 \Rightarrow \phi = 39^\circ$$

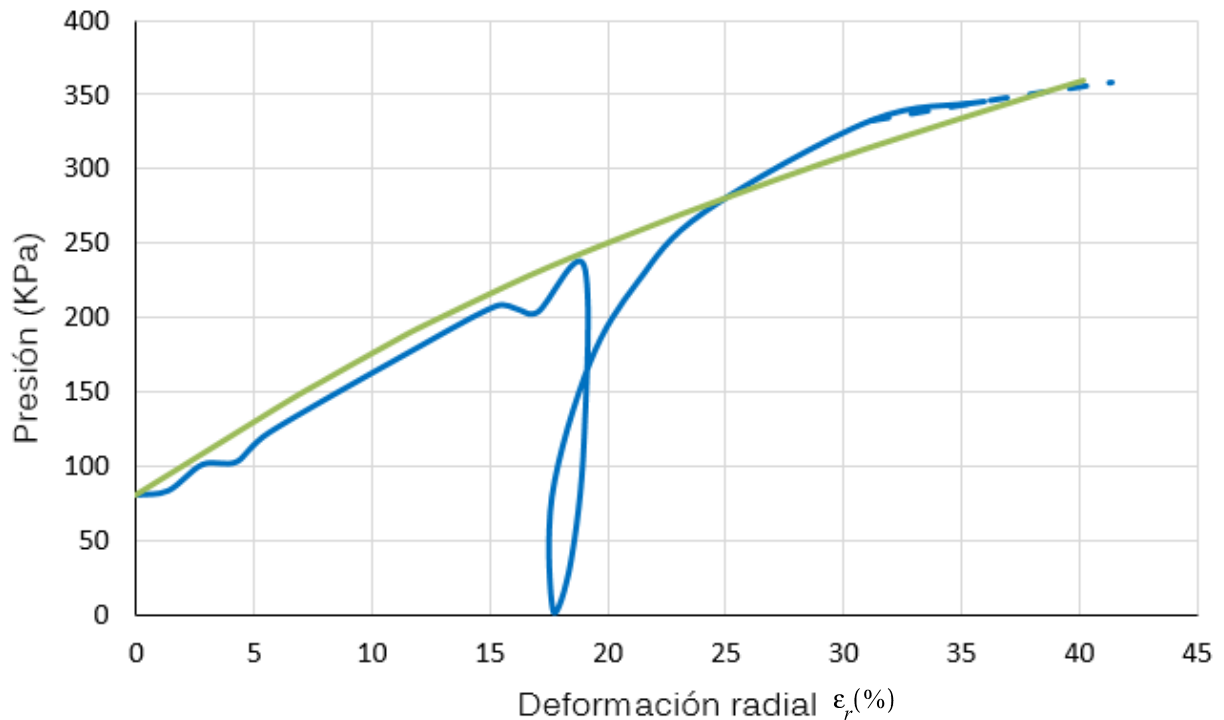
$$c_u = 0.92 \cdot 51 = 47 \text{ KPa}$$

- AJUSTE 5: $\gamma_R = 0.92$.

$E(\text{KPa})$	ν	$\phi(^{\circ})$	$c_u(\text{KPa})$	$\psi(^{\circ})$
1759	0,33	39	47	8

Valores ajustados

P (KPa)	u (mm)	u - 2,32	$\epsilon_r(\%)$
80	2,32	0,00	0,00
143	4,68	2,36	6,42
158	5,28	2,95	8,04
173	5,87	3,55	9,67
180	6,17	3,85	10,48
187	6,47	4,15	11,30
191	6,63	4,31	11,72
194	6,79	4,47	12,17
201	7,12	4,80	13,06
208	7,45	5,13	13,96
215	7,78	5,45	14,85
221	8,10	5,78	15,74
228	8,43	6,11	16,64
234	8,78	6,45	17,57
241	9,12	6,80	18,50
247	9,46	7,14	19,43
258	10,15	7,83	21,31
270	10,84	8,52	23,18
281	11,54	9,22	25,09
292	12,24	9,92	27,00
303	12,95	10,62	28,92
313	13,66	11,34	30,85
323	14,37	12,05	32,80
333	15,09	12,77	34,75
343	15,80	13,48	36,70
353	16,52	14,20	38,65
360	17,08	14,75	40,16



2.4.1.3. DILATANCIA

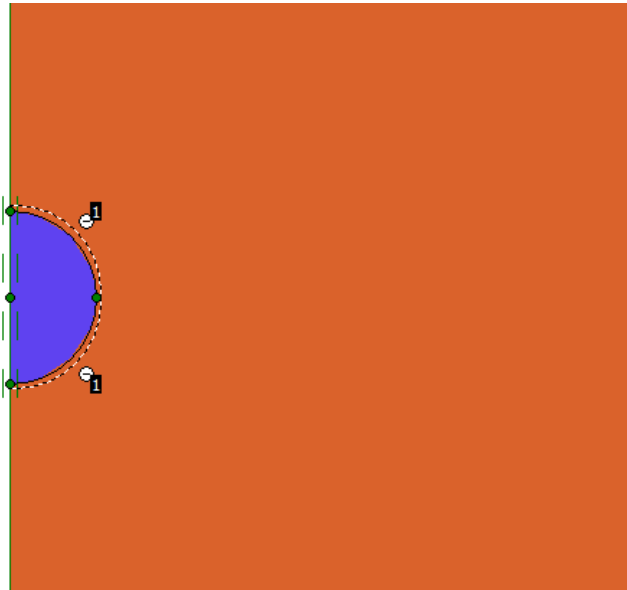
El valor de la dilatancia no lo vamos a variar con respecto al que se tiene con la correlación $\psi = \phi - 30^\circ$. Como hemos obtenido ángulo de rozamiento 39° , dejamos la dilatancia a 8° .

2.5. MODELIZACIÓN NUMÉRICA II (PLAXIS DEFORMACIÓN PLANA)

2.5.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

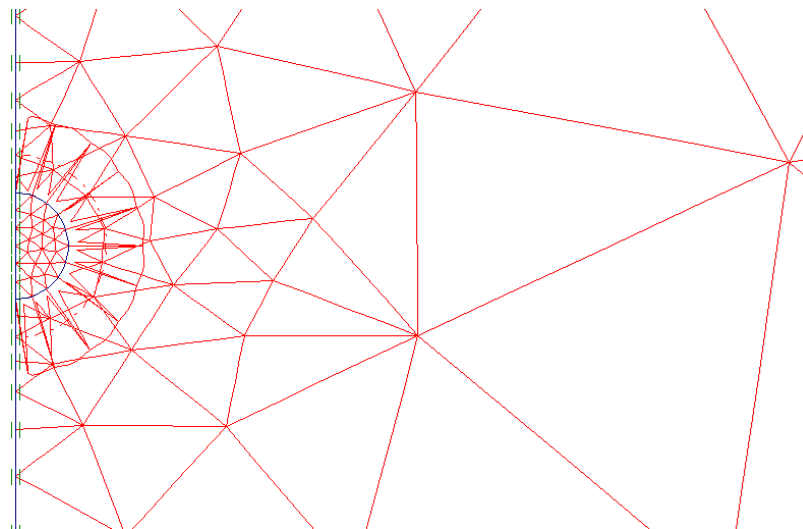
En este apartado modelizamos el ensayo presiométrico en PLAXIS como un problema en deformación plana.

Como la longitud de la camisa es mayor que el radio de la cavidad y todas las cargas, prácticamente iguales, se encuentran en un plano perpendicular al eje de la perforación, se cumplen las hipótesis de deformación plana. Esta sección es a su vez simétrica respecto a un eje que pase por el centro del círculo: podemos resolver una mitad de la sección. En realidad, también podríamos resolver solamente un cuarto de sección, pero PLAXIS no permite introducir arcos de cuarto de circunferencia. Tampoco permite aplicar carga uniformemente distribuida a lo largo de una línea curva, por lo que tendremos que ir aplicando deformación volumétrica y con un elemento interfaz ver luego la presión que le corresponde o tomar un punto representativo del borde de la cavidad para graficar la curva presión-deformación.

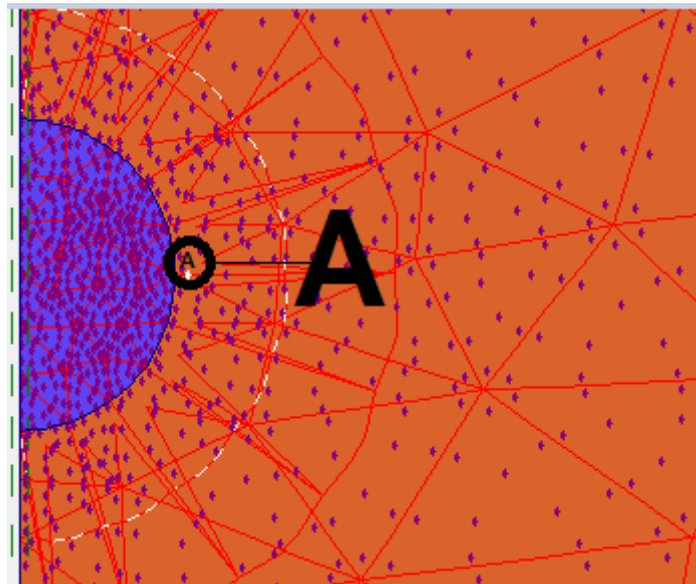


Detalle sección transversal de la cavidad

Antes de comenzar a expandir la cavidad debemos introducir la presión inicial P_0). En un volumen de material, PLAXIS no permite introducir una presión constante e isotrópica. Solamente permite introducir deformaciones volumétricas. A continuación resolveremos la deformación volumétrica ($\epsilon_v(\%)$), si existe, que hay que imponer para conseguir que el suelo se encuentre en un estado de tensión homogéneo e isotrópico de valor.



Mallado del modelo

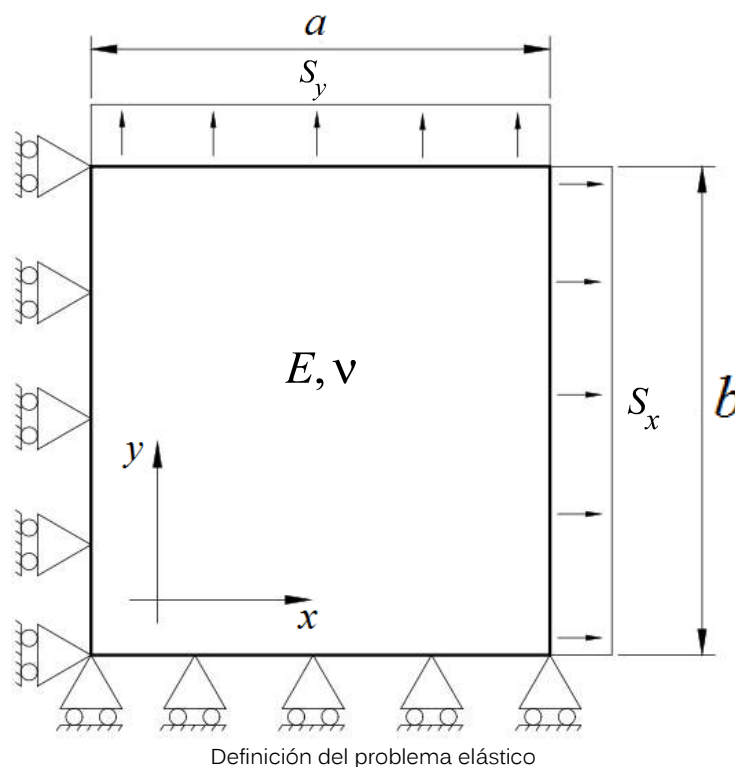


Punto de tensión para cálculo de la curva presión-deformación

2.5.2. DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA QUE CONSIGUE P_0 .

Como la presión que buscamos es pequeña en comparación con la presión de plastificación del terreno podemos tomar la solución del problema elástico equivalente. El volumen de terreno, al estar confinado, si se le impone una deformación volumétrica las condiciones de contorno ejercen la correspondiente presión que contrarresta el efecto de la deformación para que no se expanda. Esa presión es la misma que la presión que habría que ejercer sobre el volumen de suelo expandido libremente para volverlo a su posición inicial después de expandirse la deformación volumétrica dada.

El problema que resolveremos es: a un volumen de material le aplicamos una tensión en los bordes libres y vemos la deformación volumétrica que le corresponde. Entonces, si aplicamos esa deformación volumétrica en un volumen con los bordes confinados, la presión que obtenemos es aquella pero de signo contrario. Luego comprobaremos que el estado de tensiones que se genera es isótropo y homogéneo en todo el volumen.



Si solamente actúa la carga S_x , entonces: $\sigma_x = S_x$ $\sigma_y = 0$ $\sigma_{xy} = 0$

$$\Delta a = \frac{(1+\nu)(1-\nu)}{E} \cdot S_x \cdot a \quad \Delta b = -\frac{\nu(1+\nu)}{E} \cdot S_x \cdot b$$

Si solamente actúa la carga S_y , entonces: $\sigma_x = 0$ $\sigma_y = S_y$ $\sigma_{xy} = 0$

$$\Delta a = -\frac{\nu(1+\nu)}{E} \cdot S_y \cdot a \quad \Delta b = \frac{(1+\nu)(1-\nu)}{E} \cdot S_y \cdot b$$

Actuando ambas a la vez:

$$\Delta a = \frac{1+\nu}{E} \cdot ((1-\nu) \cdot S_x - \nu \cdot S_y) \cdot a \quad \Delta b = \frac{1+\nu}{E} \cdot (-\nu \cdot S_x + (1-\nu) \cdot S_y) \cdot b \quad (1)$$

La deformación volumétrica es:

$$\epsilon_v = \frac{\Delta V}{V} = \frac{V_f - V}{V} = \frac{(a + \Delta a) \cdot (b + \Delta b) - a \cdot b}{a \cdot b} = \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b} + \Delta a \cdot \Delta b \approx \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b}$$

Hace falta una segunda ecuación para relacionar la deformación volumétrica con las tensiones. PLAXIS impone que la escala de la deformada se siga manteniendo con respecto a la escala inicial μ .

$$\mu = \frac{a}{b} = \frac{a + \Delta a}{b + \Delta b} \Rightarrow \frac{\Delta a}{a} = \frac{\Delta b}{b} = \frac{1}{2} \cdot \epsilon_v$$

Se deduce, imponiendo esta condición en (1), que ambas cargas deben ser iguales, por lo que conseguimos un estado de tensiones homogéneo e isótropo.

$$\frac{1+\nu}{E} \cdot ((1-\nu) \cdot S_x - \nu \cdot S_y) = \frac{1+\nu}{E} \cdot (-\nu \cdot S_x + (1-\nu) \cdot S_y) \Rightarrow S_x = S_y = S$$

$$\sigma_x = \sigma_y = S \Rightarrow \sigma_{ij} = S \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T = S \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \end{bmatrix} = S \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \end{bmatrix}$$

$$\sigma = T \cdot n = S \cdot (\cos^2(\theta) + \sin^2(\theta)) = S$$

$$\tau = \sqrt{T^2 - \sigma^2} = \sqrt{S^2 - S^2} = 0$$

Y finalmente tenemos la relación que buscábamos: $\epsilon_v = 2(1+\nu)(1-2\cdot\nu) \frac{S}{E}$

Si queremos conseguir una presión P_0 , introducimos en PLAXIS la siguiente deformación:

$$\epsilon_v = 2(1+\nu)(1-2\cdot\nu) \frac{P_0}{E}$$

2.5.3. EXPANSIÓN DE LA CAVIDAD

A partir de aquí solamente tenemos que ir introduciendo la expansión de la cavidad imponiendo deformación volumétrica. Recordamos que para tener una deformación radial dada hay que introducir la deformación volumétrica:

$$\epsilon_v = (\epsilon_r + 1)^2 - 1.$$

Por cada expansión hay dos opciones para obtener la presión: sacar manualmente la presión en el borde de la cavidad mediante un elemento interfaz (hay que ir sacando la curva

presión-deformación punto a punto) o tomar un punto de presión representativo en el programa para graficar directamente la curva presión-deformación.

Si elegimos la primera opción, para agilizar el proceso introducimos una fase constructiva en el programa por cada valor de expansión y le dejamos por defecto que la fase predecesora sea la inmediatamente anterior. Entonces, los cálculos de una fase se aprovechan para la siguiente. Pero hay que tener cuidado: los valores de deformación que imponemos ya no son los mismos. Hay que introducir el incremento de expansión que consigue el valor buscado mediante la siguiente expresión:

$$\Delta \varepsilon = \frac{\varepsilon_{n+1} - \varepsilon_n}{\varepsilon_n + 1}, \text{ válido tanto para deformación radial como volumétrica.}$$

Por ejemplo: en la fase 1 indicamos 10 % de deformación volumétrica.

En la fase 2 queremos deformación volumétrica del 20 %.

Sin embargo, para aprovechar los cálculos de la fase 1, podemos tomar la fase 1 como predecesora de la fase 2 y a ésta aplicarle una deformación volumétrica del 9,09 % porque una expansión del 9,09 % sobre otra del 10 % es lo mismo que aplicar 20 % sobre la situación inicial.

$$\Delta \varepsilon_v (\%) = \frac{\frac{20}{100} - \frac{10}{100}}{\frac{10}{100} + 1} \cdot 100 = 9.09 \%$$

La segunda opción simplifica bastante el proceso. El programa calcula tensiones en la dirección OX y OY, pero como asumimos que la distribución de tensiones es constante en todo el borde de la cavidad, el valor de la presión lo podemos calcular por ejemplo en el extremo derecho porque en ese punto el valor de la tensión en dirección OX coincide con el valor de la tensión normal a la interfaz.

2.5.4. RESULTADOS

En el caso del suelo que queremos modelizar:

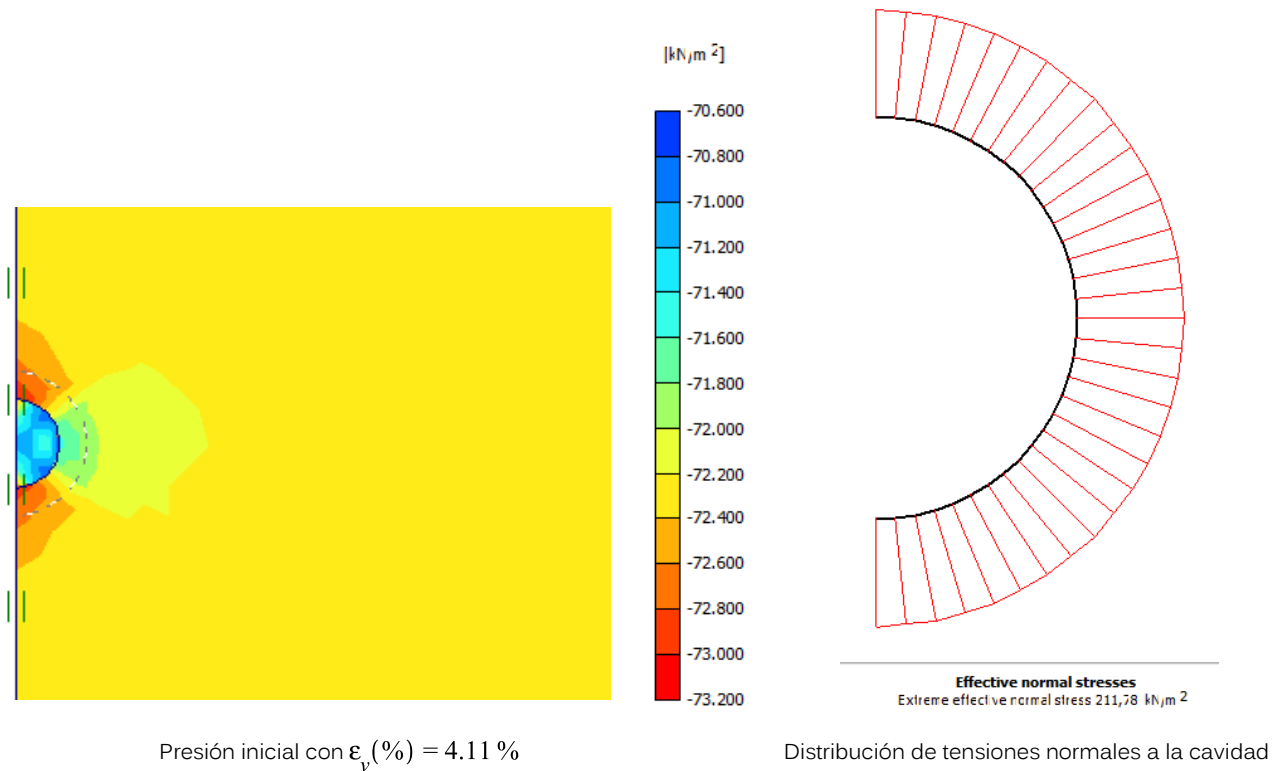
$E(KPa)$	ν	$\phi (^{\circ})$	$c_u(KPa)$	$\psi (^{\circ})$
1759	0,33	39	47	8

Valores de los parámetros del suelo

La deformación volumétrica que consigue P_0 :

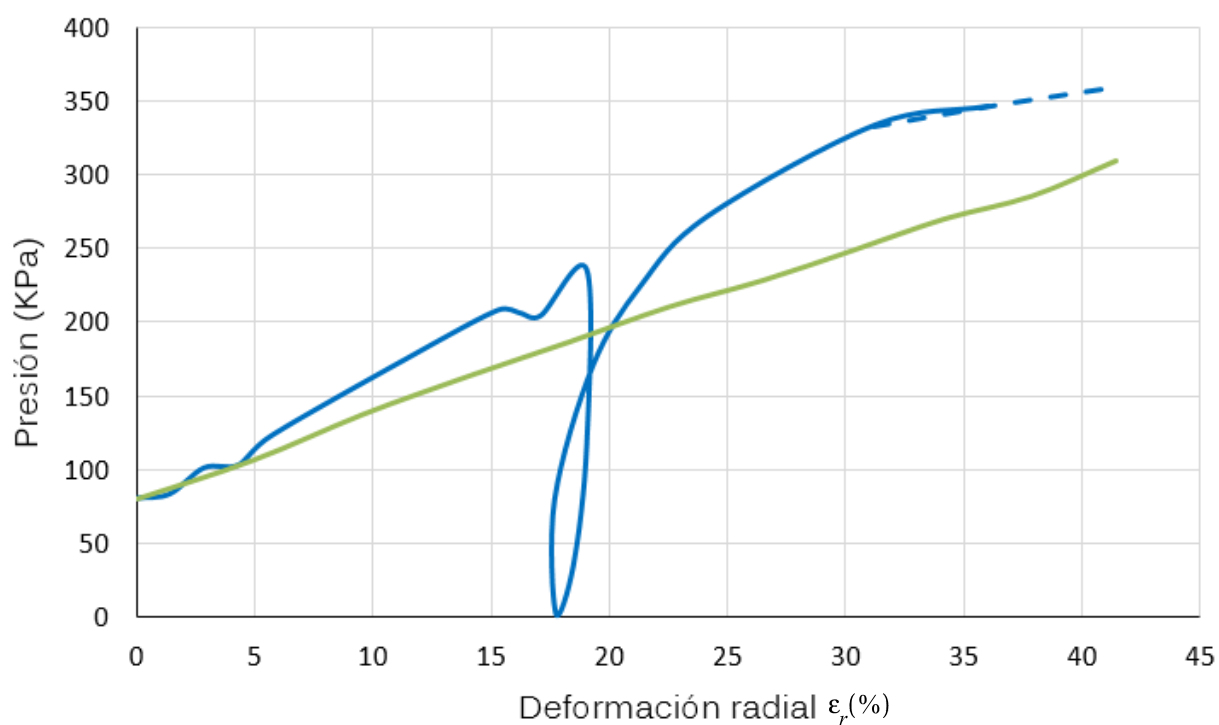
$$\varepsilon_v (\%) = 100 \cdot 2 \cdot (1 + 0.33) \cdot (1 - 2 \cdot 0.33) \cdot \frac{80}{1759} = 4.11 \%$$

En la figura se muestran los resultados de PLAXIS. No es exactamente isótropo ni homogéneo, pero, como podemos ver en la leyenda de colores, el rango de variación es mínimo. Tampoco marca 80 KPa, aunque podemos tomar el valor de la expresión anterior como punto de partida y luego aumentar la deformación lo justo para que devuelva los 80 KPa. Con una deformación de 4,69 % conseguimos los 80 KPa.



Obtenemos los siguientes resultados realizando varias fases constructivas con deformación volumétrica acumulada y calculando la presión correspondiente como la tensión media en la interfaz de la cavidad.

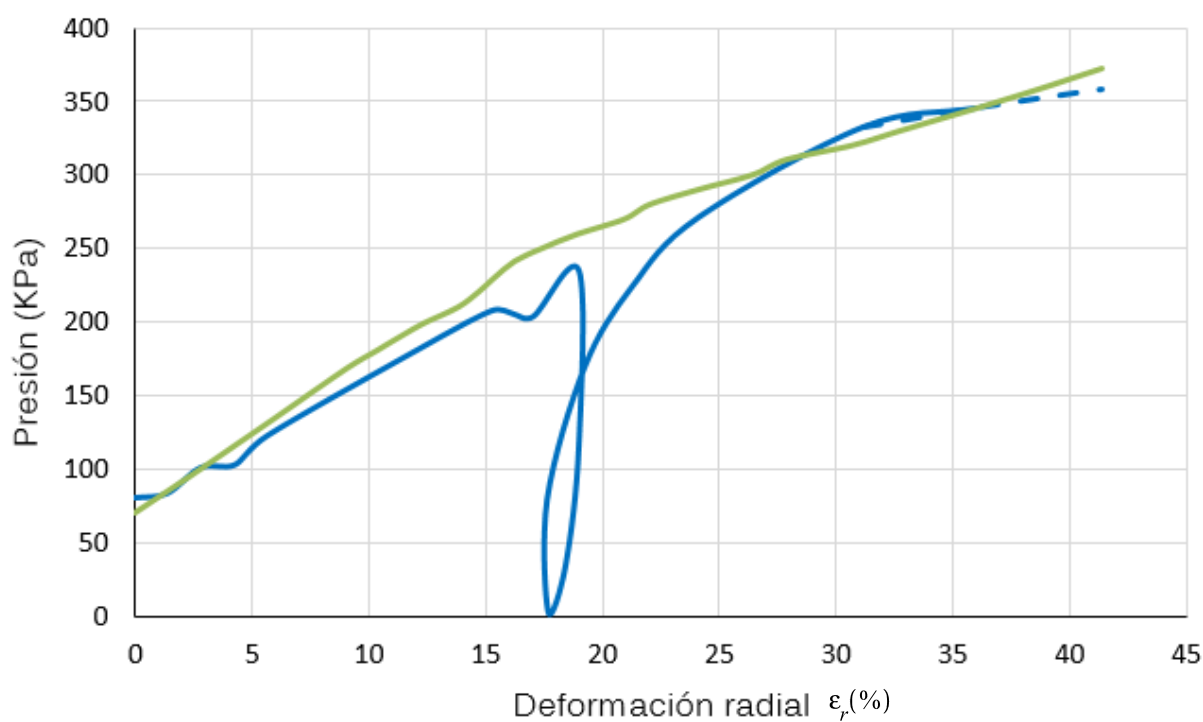
$\epsilon_v(\%)$	$\Delta\epsilon_v(\%)$	$\epsilon_r(\%)$	P (KPa)
0	0	0,00	80
10	10,00	4,88	106
20	9,09	9,54	137
30	8,33	14,02	163
40	7,69	18,32	187
50	7,14	22,47	210
60	6,67	26,49	229
70	6,25	30,38	250
80	5,88	34,16	270
90	5,56	37,84	286
100	5,26	41,42	310



Obtenemos los siguientes resultados imponiendo un 100 % de deformación volumétrica y calculando la presión correspondiente como la tensión σ_{xx} en el extremo derecho del borde de la cavidad (donde la dirección de la normal a la cavidad tiene el sentido del eje OX).

P (KPa)	ϵ_v (%)	ϵ_r (%)
71	0,00	0,00
86	3,00	1,49
103	6,20	3,05
136	12,60	6,11
169	19,00	9,09
181	21,80	10,36
191	24,20	11,45
200	26,40	12,43
210	29,60	13,84
220	31,60	14,72
230	33,20	15,41
241	35,20	16,28
250	37,80	17,39
260	41,50	18,95
270	46,30	20,95
280	49,00	22,07
290	54,30	24,22
300	59,90	26,45

P (KPa)	$\varepsilon_v(\%)$	$\varepsilon_r(\%)$
310	63,60	27,91
320	70,90	30,73
330	76,30	32,78
340	82,50	35,09
350	88,20	37,19
360	93,80	39,21
372	100,00	41,42



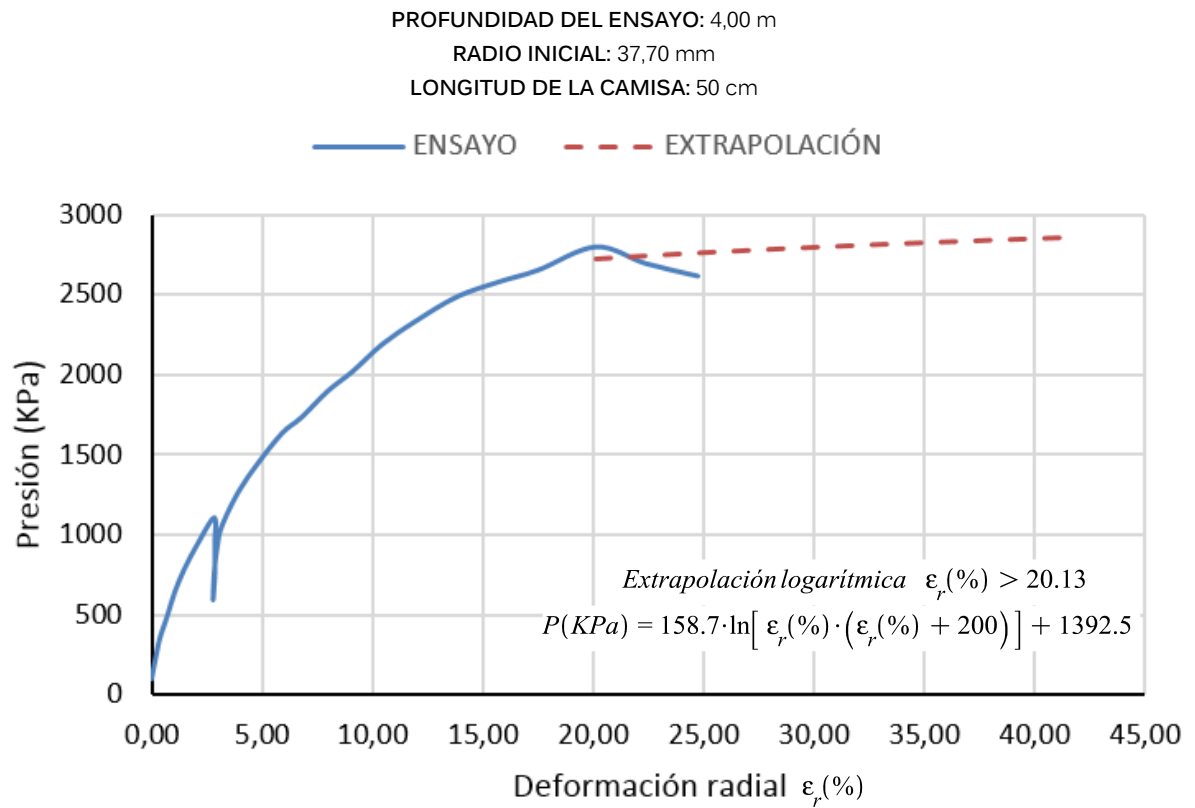
2.6. MÁS EJEMPLOS DE CARACTERIZACIÓN DE SUELO CON ENSAYO PRESIOMÉTRICO

2.6.1. EJEMPLO DE CARACTERIZACIÓN II

Aplicamos la misma metodología de caracterización de suelo con ensayo presiométrico a un suelo arcilloso.

ENSAYO R0 = 37,70 mm				
P (KPa)	P (Kg/cm2)	ΔR (mm)	$\varepsilon_r(\%)$	$\varepsilon_v(\%)$
105	1,07	0,00	0,00	0,00
200	2,04	0,05	0,13	0,27
357	3,64	0,14	0,37	0,74
488	4,98	0,26	0,69	1,38

ENSAYO R0 = 37,70 mm				
P (KPa)	P (Kg/cm2)	ΔR (mm)	ε_r (%)	ε_v (%)
641	6,54	0,39	1,03	2,08
783	7,99	0,55	1,46	2,94
944	9,63	0,78	2,07	4,18
1111	11,34	1,07	2,84	5,76
958	9,78	1,08	2,86	5,81
864	8,82	1,08	2,86	5,81
760	7,75	1,08	2,86	5,81
598	6,10	1,05	2,79	5,65
769	7,85	1,07	2,84	5,76
953	9,72	1,13	3,00	6,08
1068	10,90	1,21	3,21	6,52
1277	13,03	1,49	3,95	8,06
1457	14,87	1,83	4,85	9,94
1639	16,72	2,23	5,92	12,18
1737	17,72	2,56	6,79	14,04
1901	19,40	3,01	7,98	16,61
2026	20,67	3,44	9,12	19,08
2193	22,38	3,94	10,45	21,99
2337	23,85	4,51	11,96	25,36
2490	25,41	5,22	13,85	29,61
2582	26,35	5,93	15,73	33,93
2656	27,10	6,60	17,51	38,08
2801	28,58	7,59	20,13	44,32
2697	27,52	8,44	22,39	49,79
2619	26,72	9,33	24,75	55,62
2784	28,41	10,59	28,08	64,04
2804	28,61	11,84	31,41	72,68
2822	28,80	13,10	34,74	81,54
2839	28,97	14,35	38,07	90,63
2854	29,13	15,61	41,40	99,93



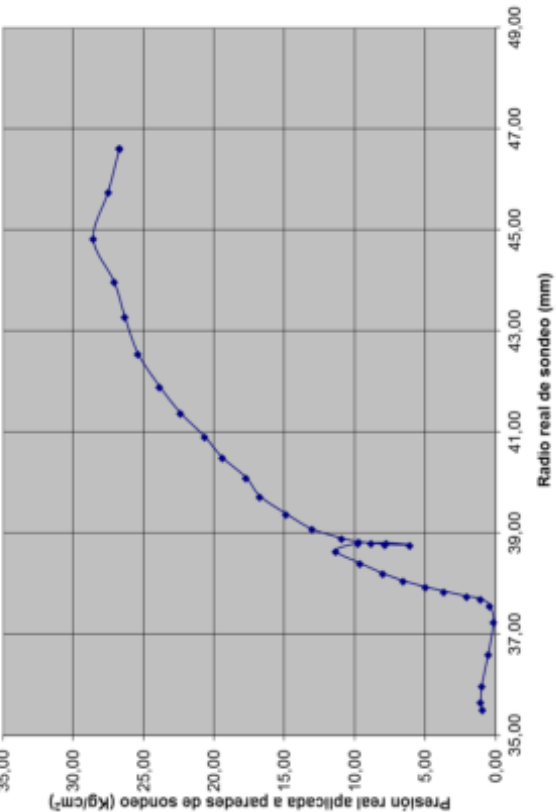
P_0 (KPa)	105,00	$\epsilon_{r,0}$ (%)	0,00
P_f (KPa)	1457,00	$\epsilon_{r,f}$ (%)	4,85
P_{lim} (KPa)	2854,00	$\epsilon_{r,lim}$ (%)	41,42

CALIBRACIÓN DE CAMISA				
Efecto reacción de la camisa		D (x<1)		E (x<0)
B (x<3)	C (x<2)	3,0579		-3,5882
0,015	-0,3661			
Efecto Presión				
A (x<1)	B (x<0)			
0,0023	0,003			
Efecto Volumen				
A (x<1)	B' (x<0)			
0,2349	-1,2461			
PARÁMETROS DE CÁLCULO				
Radio Inicial de la cavidad:		37,50		
Inicio del tramo elástico		37,70 mm		
Presión en p1:		1,07 kg/cm ²		
Final del tramo elástico		39,38 mm		
Radio p2:		39,87 kg/cm ²		
Presión en p2:				

PRESIÓN DE FLUENCIA		PRESIÓN LIMITE	
P _f (MPa)		P _L (MPa)	
P _f = 1,438 MPa		P _L = 2,857 MPa	

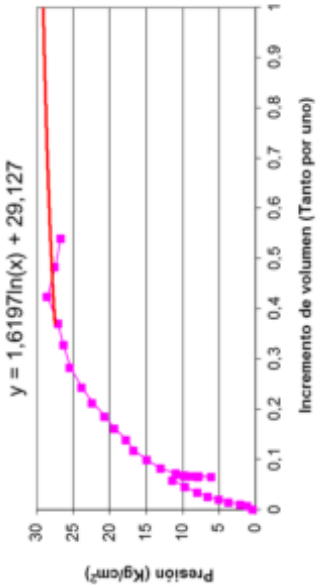
MÓDULO PRESIOMÉTRICO	
$E_p = (1+\nu)(R_p + \Delta R_m) \cdot (\Delta P / \Delta R)$	
E _p = 40,113 MPa	

OBSERVACIONES	
---------------	--

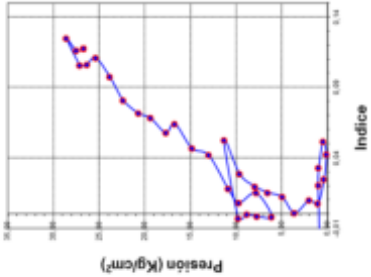


LECTURAS INSTRUMENTALES				CALIBRACION				LECTURAS CORREGIDAS			
Presión kg/cm ²	Radio mm	R+15s mm	R+60s mm	RADIO EFFECTO PRESION	RADIO EFFECTO VOLUMEN	PRESION INSTRUMENTAL CORREGIDA	RADIO INSTRUMENTAL CORREGIDO	RADIO EFFECTO PRESION	RADIO EFFECTO VOLUMEN	RADIO INSTRUMENTAL CORREGIDO	RADIO INSTRUMENTAL CORREGIDO
3,90	3,80	3,87	3,99	-0,01	0,28	0,40	4,07	4,12	4,19	4,21	4,16
4,80	3,98	3,97	3,99	-0,01	0,24	1,07	4,20	4,19	4,21	4,21	4,22
5,83	4,05	4,06	4,08	-0,02	0,22	2,04	4,23	4,26	4,26	4,26	4,27
7,54	4,18	4,20	4,21	-0,02	0,19	3,64	4,35	4,36	4,36	4,36	4,36
8,97	4,30	4,33	4,34	-0,02	0,16	4,98	4,43	4,43	4,43	4,47	4,48
10,64	4,46	4,51	4,52	-0,03	0,12	6,34	4,53	4,59	4,60	4,60	4,61
12,22	4,67	4,71	4,74	-0,03	0,06	7,99	4,70	4,74	4,74	4,77	4,77
14,02	4,94	5,01	5,04	-0,04	0,00	9,63	4,90	4,93	4,93	4,98	5,00
15,90	5,27	5,37	5,40	-0,04	-0,09	11,34	5,14	5,22	5,24	5,29	5,29
14,42	5,48	5,48	5,48	-0,04	-0,14	9,78	5,30	5,30	5,30	5,30	5,30
13,46	5,48	5,48	5,48	-0,03	-0,14	8,82	5,30	5,31	5,31	5,31	5,30
12,39	5,48	5,48	5,48	-0,03	-0,14	7,75	5,30	5,30	5,30	5,30	5,30
10,72	5,42	5,43	5,44	-0,03	-0,13	6,10	5,27	5,27	5,27	5,28	5,27
12,48	5,44	5,45	5,45	-0,03	-0,13	7,85	5,28	5,28	5,28	5,27	5,29
14,38	5,51	5,53	5,54	-0,04	-0,15	9,72	5,33	5,34	5,34	5,34	5,35
15,59	5,61	5,62	5,63	-0,04	-0,17	10,90	5,40	5,40	5,40	5,41	5,43
17,80	5,86	5,95	5,98	-0,04	-0,24	13,03	5,58	5,64	5,67	5,67	5,71
19,76	6,27	6,38	6,43	-0,05	-0,34	14,87	5,88	5,96	6,00	6,00	6,05
21,71	6,73	6,89	6,95	-0,05	-0,46	16,72	6,22	6,34	6,39	6,39	6,45
22,77	7,23	7,35	7,41	-0,06	-0,58	17,72	6,60	6,68	6,73	6,78	6,78
24,31	7,77	7,92	8,00	-0,06	-0,72	19,40	6,99	7,10	7,16	7,16	7,23
25,82	8,33	8,49	8,57	-0,06	-0,86	20,67	7,41	7,53	7,58	7,66	7,66
27,59	8,96	9,14	9,24	-0,07	-1,02	22,38	7,87	8,01	8,08	8,16	8,16
29,16	9,66	9,89	9,98	-0,07	-1,20	23,85	8,39	8,57	8,63	8,73	8,73
30,95	10,35	10,80	10,92	-0,07	-1,42	25,41	9,05	9,24	9,33	9,44	9,44
32,34	11,53	11,77	11,89	-0,08	-1,67	26,35	9,78	9,96	10,04	10,15	10,15
33,79	12,46	12,69	12,79	-0,08	-1,91	27,10	10,47	10,64	10,72	10,82	10,82
36,01	13,61	13,97	14,10	-0,09	-2,20	28,58	11,32	11,59	11,69	11,81	11,81
37,75	14,80	15,14	15,25	-0,09	-2,52	27,52	12,25	12,40	12,54	12,60	12,60
39,84	16,02	16,33	16,43	-0,09	-2,81	26,72	13,11	13,34	13,43	13,53	13,53

EXTRAPOLACIÓN DE LA CURVA PRESIOMÉTRICA
(Ajuste logarítmico de la rama plástica)



Indice de Fluencia 30 - 60 seg



MÓDULO ELÁSTICO (E)

$$E = \alpha \cdot E_m = 1.1 \cdot 100 \cdot (1 + 0.33) \cdot \frac{1457 - 105}{4.85} = 40783 \text{ KPa}$$

ÁNGULO DE ROZAMIENTO INTERNO (ϕ)

Ménard (1975)

$$\phi^o = 4 \cdot \log_2 \left(\frac{2854 - 105}{2.5} \right) + 24 = 64^o$$

ROM:

$$\phi^o = 7 \cdot \left(1 + 10 \cdot \frac{\ln \left(\frac{2854}{1457} \right)}{3.7 - \ln(4.85)} \right) = 29^o$$

RESISTENCIA AL CORTE SIN DRENAJE (c_u)

ROM:

$$c_u = \frac{1}{2} \cdot \frac{2854 - 1457}{3.91 - \ln(4.85)} = 300 \text{ KPa}$$

Amar y Jézéquel (1972):

$$c_u = \frac{2854 - 1457}{10} + 25 = 165 \text{ KPa}$$

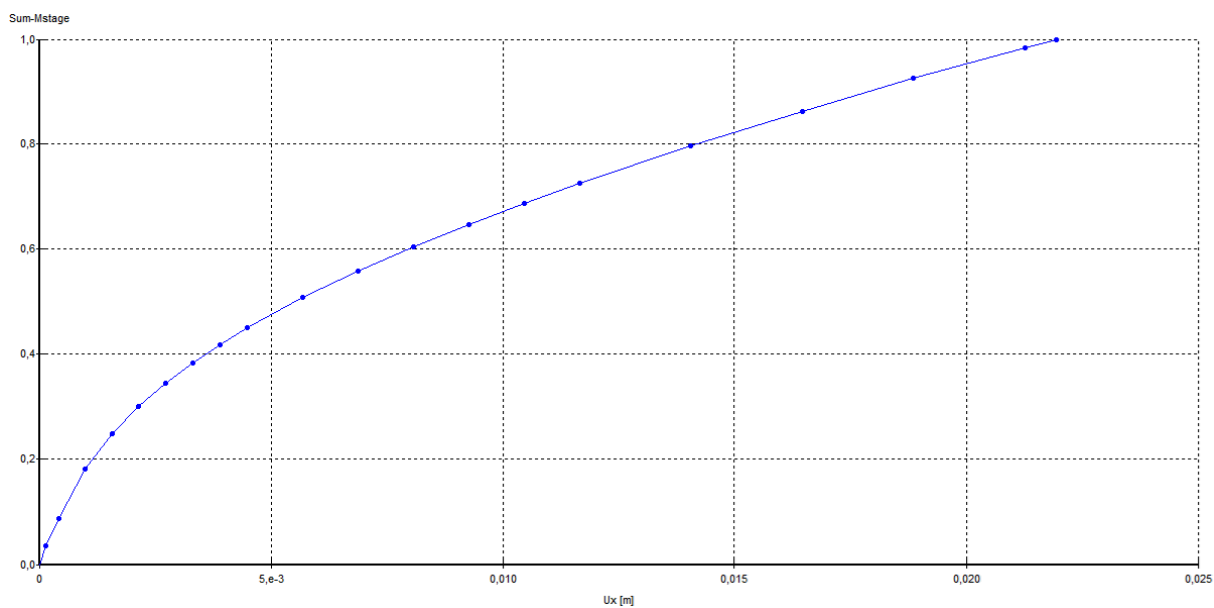
DILATANCIA (Ψ)

Tratándose de un suelo cohesivo, la dilatancia es cero.

$E(\text{KPa})$	ν	$\phi (^o)$	$c_u(\text{KPa})$	$\Psi (^o)$
40 783	0,33	29	165	0

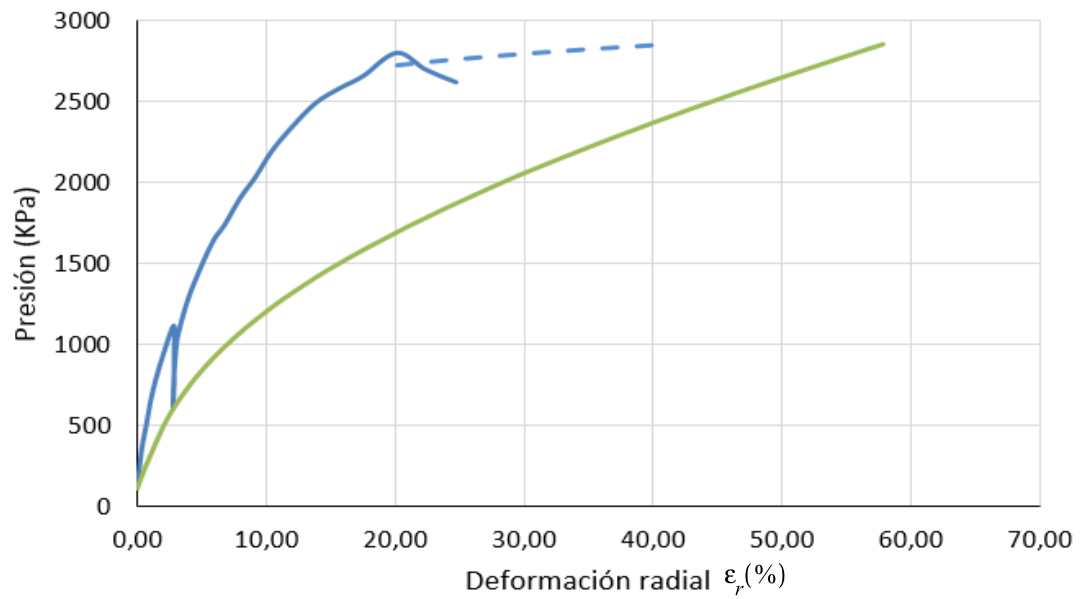
Valores de los parámetros del suelo

Realizamos el modelo axisimétrico en PLAXIS tomando 20 KN/m3. Luego procederemos a ajustar el valor de los parámetros de la misma forma que en la caracterización del suelo anterior.



Curva desplazamiento-Mstage

P (KPa)	u (mm)	u - 0,1	ε_r (%)
105	0,1	0,0	0,0
252	0,4	0,3	0,7
521	1,0	0,8	2,2
710	1,6	1,4	3,8
860	2,1	2,0	5,3
985	2,7	2,6	6,8
1097	3,3	3,2	8,4
1196	3,9	3,8	10,0
1288	4,5	4,4	11,5
1452	5,7	5,5	14,7
1595	6,9	6,7	17,9
1727	8,1	7,9	21,0
1849	9,3	9,1	24,2
1965	10,5	10,3	27,4
2074	11,7	11,5	30,5
2276	14,1	13,9	36,9
2464	16,5	16,3	43,3
2640	18,9	18,7	49,6
2809	21,3	21,1	56,0
2854	21,9	21,8	57,8



Para ajustar el valor de los parámetros, comenzamos por el módulo elástico. Buscamos que la deformación radial a la presión de fluencia sea la del ensayo (deformación radial igual a 4,85 % para una presión de 1457 KPa). De tomar E igual a 40783 KPa tenemos una deformación del 14,7 % para la presión de fluencia.

MÓDULO ELÁSTICO (E)

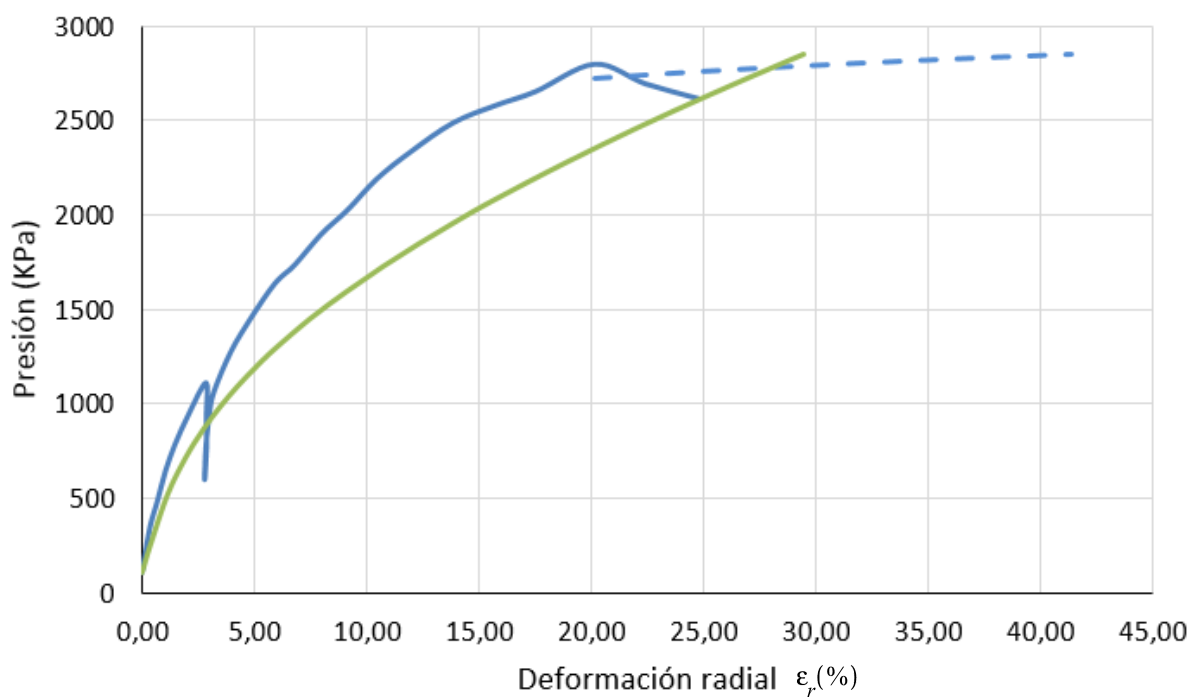
- AJUSTE 1: $E = 80\,000$ KPa.

E (KPa)	ν	ϕ ($^{\circ}$)	c_u (KPa)	ψ ($^{\circ}$)
80 000	0,33	29	165	0

AJUSTE 1: Valores de los parámetros

P (KPa)	u (mm)	$u - 0,08$	ϵ_r (%)
105	0,08	0,00	0,00
252	0,22	0,14	0,37
521	0,51	0,43	1,14
710	0,80	0,72	1,92
860	1,09	1,02	2,70
985	1,39	1,31	3,48
1097	1,69	1,61	4,28
1196	1,99	1,92	5,08
1288	2,29	2,22	5,88
1452	2,90	2,82	7,49
1595	3,51	3,43	9,10

P (KPa)	u (mm)	u - 0,08	$\epsilon_r(\%)$
1727	4,12	4,04	10,72
1849	4,72	4,65	12,33
1965	5,33	5,26	13,95
2074	5,95	5,87	15,57
2276	7,17	7,09	18,81
2464	8,39	8,32	22,06
2640	9,62	9,54	25,31
2809	10,84	10,77	28,56
2854	11,18	11,11	29,47



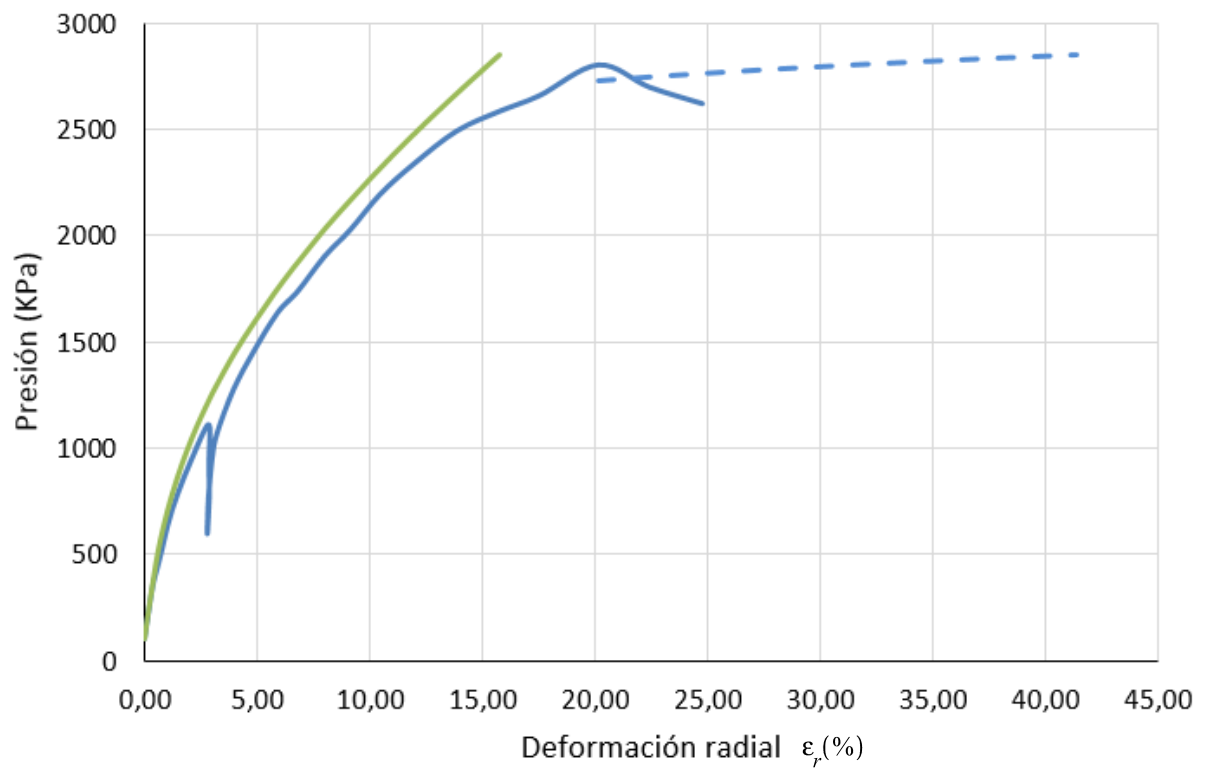
Con E igual a 80 000 KPa tenemos deformación radial de 7,49 % para 1457 KPa, la presión de fluencia.

- AJUSTE 2: E = 150 000 KPa.

$E(KPa)$	ν	$\phi(^{\circ})$	$c_u(KPa)$	$\psi(^{\circ})$
150 000	0,33	29	165	0

AJUSTE 2: Valores de los parámetros

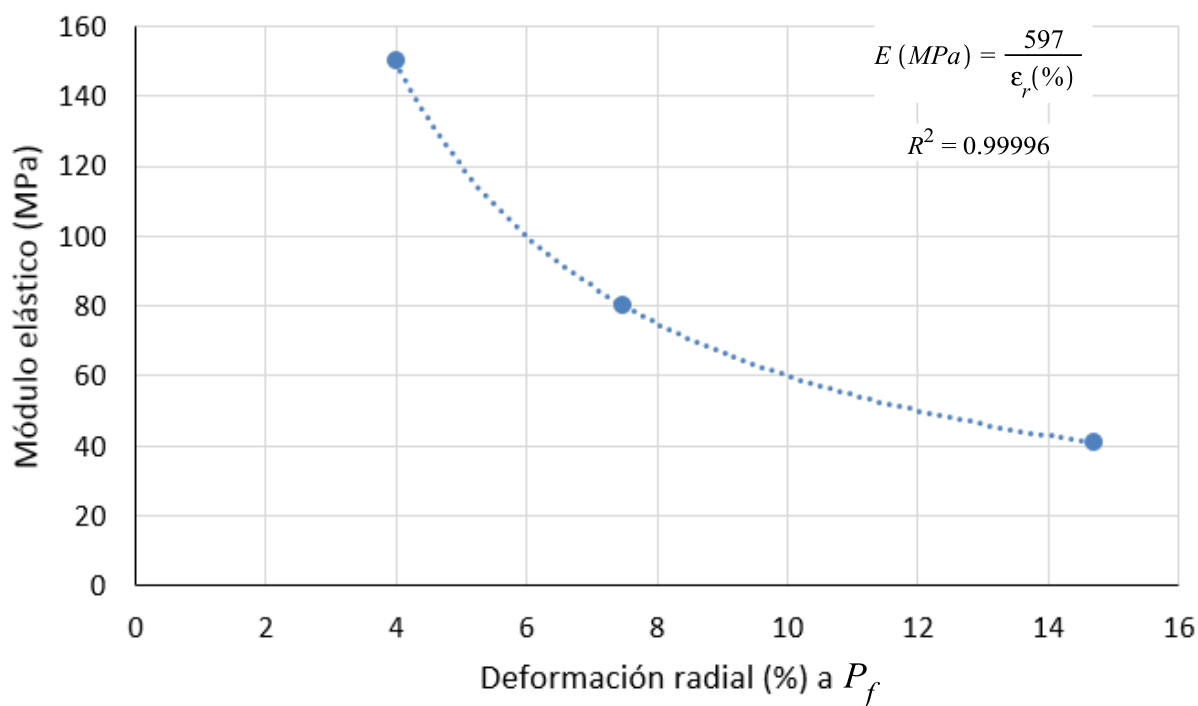
P (KPa)	u (mm)	u - 0,04	ϵ_r (%)
105	0,04	0,00	0,00
252	0,11	0,07	0,20
521	0,27	0,23	0,61
710	0,43	0,39	1,03
860	0,58	0,54	1,44
985	0,74	0,70	1,86
1097	0,90	0,86	2,28
1196	1,06	1,02	2,71
1288	1,22	1,18	3,14
1452	1,55	1,51	3,99
1595	1,87	1,83	4,85
1727	2,19	2,15	5,72
1849	2,52	2,48	6,58
1965	2,85	2,81	7,44
2074	3,17	3,13	8,30
2276	3,82	3,78	10,03
2464	4,48	4,44	11,77
2640	5,13	5,09	13,50
2809	5,78	5,74	15,23
2854	5,96	5,92	15,72



Para E igual a 150 000 KPa tenemos una deformación del 3,99 % para 1457 KPa, la presión de fluencia.

Con estos valores podemos interpolar para hallar el valor del módulo elástico que cumple la condición.

$\varepsilon_r(\%)$	E (MPa)
14,7	40,8
7,49	80
3,99	150



Como lo que buscamos es una deformación del 4,85 %, sustituimos en la expresión y obtenemos un módulo elástico igual a 123,1 MPa.

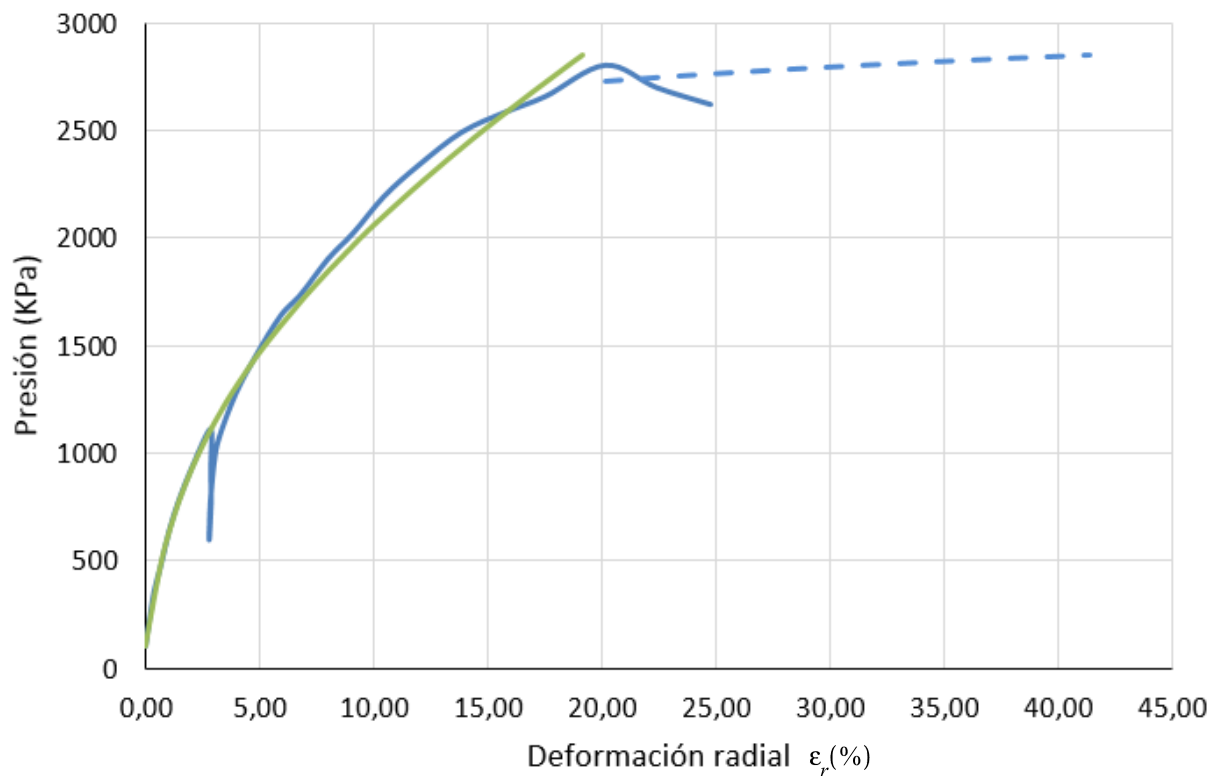
- AJUSTE 3: $E = 123\ 100$ KPa

$E(\text{KPa})$	ν	$\phi(^{\circ})$	$c_u(\text{KPa})$	$\psi(^{\circ})$
123 100	0,33	29	165	0

AJUSTE 3: Valores de los parámetros

P (KPa)	u (mm)	u - 0,05	$\varepsilon_r(\%)$
105	0,05	0,00	0,00
252	0,14	0,09	0,24
521	0,33	0,28	0,74

P (KPa)	u (mm)	u - 0,05	ϵ_r (%)
710	0,52	0,47	1,25
860	0,71	0,66	1,75
985	0,90	0,85	2,26
1097	1,10	1,05	2,78
1196	1,29	1,24	3,30
1288	1,49	1,44	3,82
1452	1,88	1,83	4,87
1595	2,28	2,23	5,92
1727	2,67	2,63	6,96
1849	3,07	3,02	8,01
1965	3,47	3,42	9,07
2074	3,86	3,81	10,12
2276	4,66	4,61	12,23
2464	5,45	5,40	14,34
2640	6,25	6,20	16,45
2809	7,05	7,00	18,56
2854	7,27	7,22	19,15



Tenemos una similitud bastante buena con la curva del ensayo, sobre todo en la rama inicial. Pero en la zona de plastificación el suelo modelado tiende a mayores presiones para una deformación radial dada, es decir, el suelo modelado es más rígido que el real. Para disminuir la inclinación de la curva y aumentar su curvatura y que se parezca más a la real hay que modificar el ángulo de rozamiento y la resistencia al corte sin drenaje. Utilizamos una metodología parecida

al caso anterior de modelización de suelo granular: dividimos y multiplicamos el ángulo de rozamiento y la resistencia al corte por el mismo factor γ_M . Buscamos que la curva modelo y la curva real coincidan en el punto antes de que empiece la extrapolación: 2800 KPa para una deformación radial del 20 %. Para los siguientes ajustes aplicamos 2800 KPa para que el último valor sea el que buscamos.

- AJUSTE 4: $\gamma_M = 1,2$.

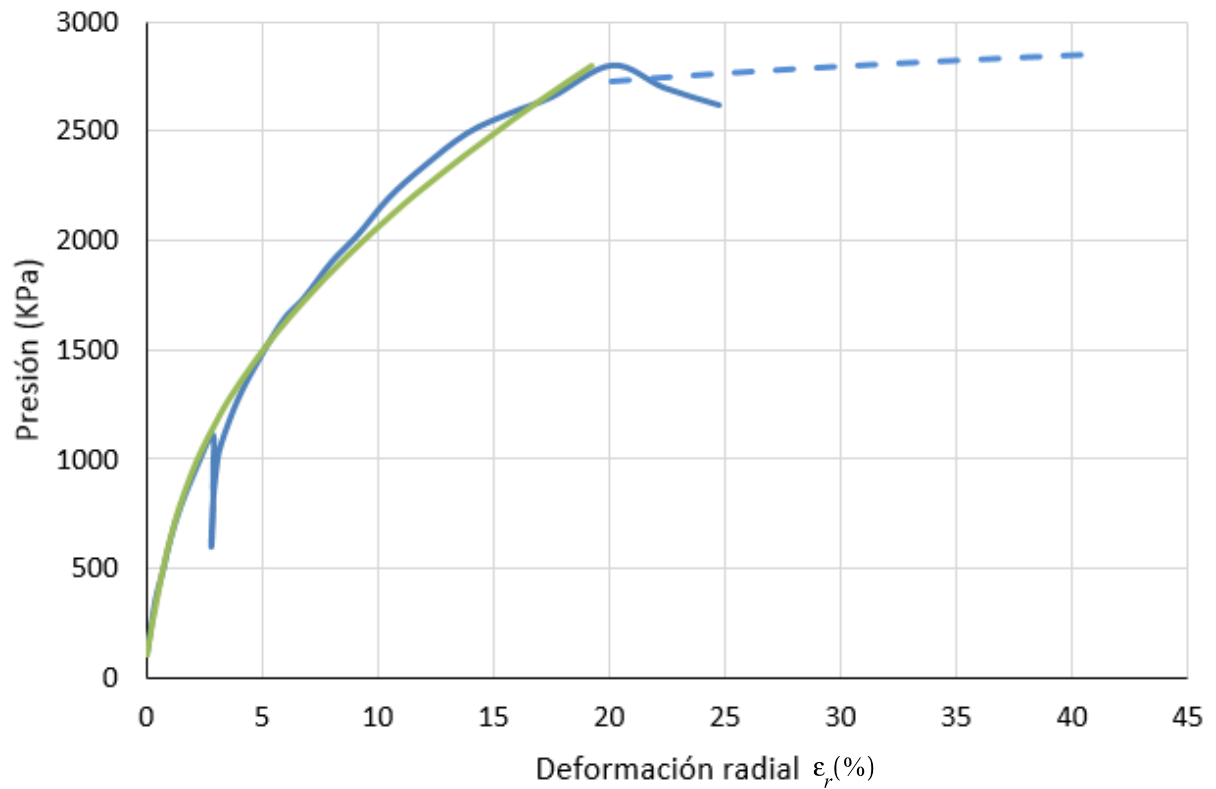
$$\tan(\phi) = \frac{1}{1,2} \cdot \tan(29^\circ) = 0,4619 \Rightarrow \phi = 25^\circ$$

$$c_u = 1,2 \cdot 165 = 200 \text{ KPa}$$

$E(\text{KPa})$	ν	$\phi(^{\circ})$	$c_u(\text{KPa})$	$\psi(^{\circ})$
123 100	0,33	25	200	0

AJUSTE 4: Valores de los parámetros

P (KPa)	u (mm)	u - 0,05	$\epsilon_r(\%)$
105	0,05	0,00	0,00
244	0,13	0,08	0,22
501	0,31	0,27	0,70
703	0,49	0,45	1,18
861	0,68	0,63	1,67
993	0,86	0,81	2,16
1103	1,05	1,00	2,66
1202	1,24	1,19	3,16
1291	1,43	1,38	3,66
1447	1,81	1,76	4,66
1586	2,19	2,14	5,67
1710	2,57	2,52	6,68
1826	2,95	2,90	7,69
1932	3,33	3,28	8,70
2034	3,71	3,66	9,72
2130	4,09	4,05	10,73
2221	4,48	4,43	11,74
2391	5,24	5,19	13,77
2550	6,01	5,96	15,81
2700	6,77	6,73	17,84
2800	7,31	7,26	19,26



Tenemos una deformación del 19,26 % para 2800 KPa, que lo podemos dar por bueno.

$E(KPa)$	ν	$\phi (^{\circ})$	$c_u(KPa)$	$\psi (^{\circ})$
123 100	0,33	24	200	0

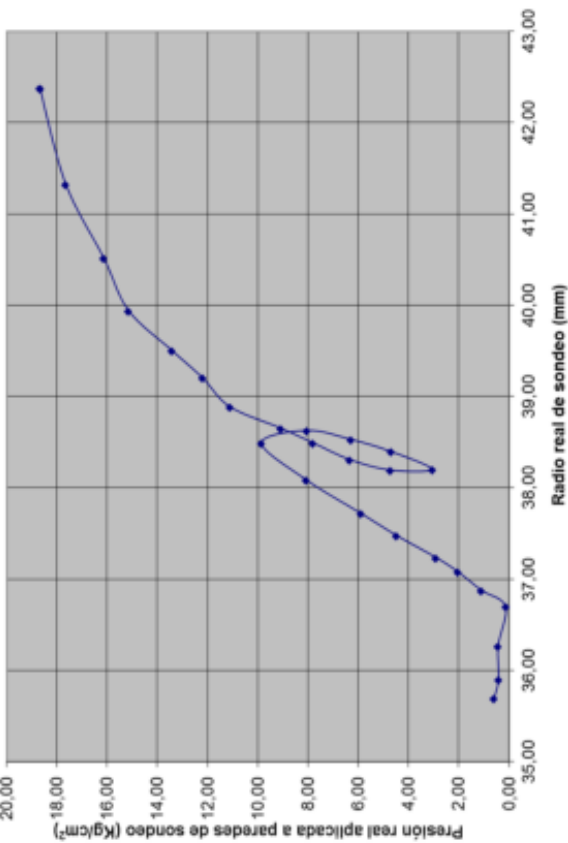
Valores de los parámetros del suelo

2.6.2. EJEMPLO DE CARACTERIZACIÓN III

Este ensayo corresponde a un suelo arcilloso. Se realiza a 12,00 de profundidad. El nivel freático se encuentra a 6,90 m de profundidad, así que la arcilla está saturada. En el modelo de PLAXIS realizamos el ensayo sin drenaje porque en un ensayo presiométrico el tiempo de espera entre cada paso de carga es de un minuto.

LECTURAS INSTRUMENTALES			CALIBRACION			LECTURAS CORREGIDAS				
Presión kg/cm ²	Radio mm.	R+15s mm.	R+30s mm.	R+60s mm.	CORRECCION Efecto Volumen	Presión INMEDIATA CORREG.	RADIO INMEDIATO CORREGIDO	RADIO +15seg CORREGIDO	RADIO +30seg CORREGIDO	RADIO +60seg CORREGIDO
0,33	1,27	1,28	1,26	1,26	0,00	0,32	2,19	2,19	2,18	2,18
0,74	1,55	1,77	1,84	1,86	0,00	0,85	0,42	2,40	2,56	2,63
1,70	2,03	2,22	2,28	2,30	-0,01	0,73	0,43	2,77	2,89	2,96
2,32	2,63	2,73	2,77	2,77	-0,01	0,58	0,13	3,20	3,27	3,30
3,64	2,87	2,92	2,93	2,96	-0,01	0,52	1,11	3,38	3,41	3,43
4,92	3,15	3,19	3,18	3,22	-0,01	0,45	2,04	3,58	3,61	3,63
6,04	3,36	3,39	3,39	3,42	-0,02	0,39	2,91	3,74	3,76	3,78
7,94	3,69	3,73	3,74	3,77	-0,02	0,31	4,48	3,98	4,01	4,02
9,67	4,02	4,08	4,10	4,11	-0,03	0,23	5,91	4,22	4,27	4,29
12,21	4,51	4,62	4,68	4,72	-0,03	0,10	8,08	4,59	4,67	4,74
14,30	5,06	5,18	5,24	5,28	-0,04	-0,03	9,85	4,99	5,08	5,12
12,59	5,24	5,26	5,28	5,27	-0,03	-0,08	8,05	5,13	5,15	5,15
10,77	5,10	5,10	5,12	5,10	-0,03	-0,05	6,30	5,03	5,02	5,04
9,09	4,92	4,92	4,88	4,89	-0,02	0,00	4,71	4,90	4,89	4,87
7,28	4,05	4,60	4,60	4,60	-0,02	0,06	3,06	4,70	4,66	4,66
8,94	4,65	4,66	4,67	4,68	-0,02	0,07	4,72	4,69	4,70	4,71
10,68	4,81	4,83	4,86	4,87	-0,03	0,03	6,36	4,81	4,83	4,85
12,27	5,06	5,10	5,08	5,09	-0,03	-0,04	7,81	4,99	5,02	5,01
13,66	5,28	5,34	5,33	5,36	-0,03	-0,09	9,10	5,15	5,20	5,21
15,80	5,60	5,70	5,73	5,79	-0,04	-0,17	11,12	5,39	5,46	5,53
17,03	6,02	6,14	6,19	6,26	-0,04	-0,28	12,20	5,70	5,79	5,88
18,36	6,43	6,57	6,61	6,71	-0,05	-0,38	13,43	6,00	6,10	6,21
20,18	7,02	7,24	7,36	7,46	-0,05	-0,53	15,15	6,44	6,60	6,77
21,24	7,79	8,06	8,17	8,35	-0,05	-0,73	16,13	7,01	7,22	7,43
22,85	8,89	9,28	9,44	9,69	-0,06	-1,00	17,05	7,83	8,12	8,43
24,14	10,30	10,78	10,99	11,24	-0,06	-1,36	18,68	8,88	9,23	9,58

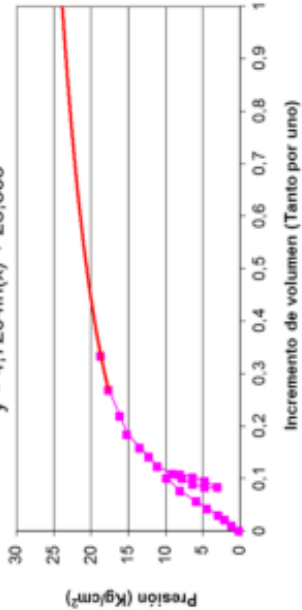
CALIBRACION DE CAMISA			PRESION DE FLUENCIA			PRESION LIMITE		
Efecto reacción de la camisa			P _y (MPa)			P _L (MPa)		
B (x\A3)	C (x\A2)	D (x\A1)	P _y = 1,197 MPa			P _L = 2,340 MPa		
0,015	-0,3661	3,0579						
Efecto Presión								
A (x\A1)	B (x\A0)							
0,0023	0,003							
Efecto Volumen								
A (x\A1)	B' (x\A0)							
0,2549	-,12461							
PARAMETROS DE CALCULO			OBSERVACIONES					
Radio inicial de la cavidad:								
Inicio del tramo elástico								
Radio p1:								
Presión en p1:								
Final del tramo elástico								
Radio p2:								
Presión en p2:								



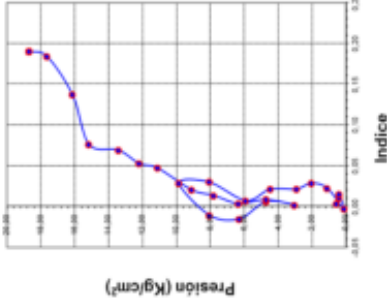
LECTURAS INSTRUMENTALES					CALIBRACION			LECTURAS CORREGIDAS				
Presión kg/cm ²	Radio mm	R+15s mm	R+30s mm	R+60s mm	Efecto Presión	Efecto Volumen	Presión Inmediata Correg.	Radio Inmediato Corregido	Radio +15seg Corregido	Radio +30seg Corregido	Radio +60seg Corregido	
0,33	1,27	1,28	1,26	1,26	0,00	0,92	0,39	2,19	2,19	2,18	2,18	
0,74	1,55	1,77	1,84	1,86	0,00	0,85	0,42	2,40	2,56	2,62	2,63	
1,70	2,03	2,22	2,28	2,30	-0,01	0,73	0,43	2,77	2,89	2,94	2,96	
2,32	2,63	2,73	2,77	2,77	-0,01	0,58	0,13	3,20	3,27	3,31	3,30	
3,64	2,87	2,92	2,93	2,96	-0,01	0,52	1,11	3,38	3,41	3,42	3,45	
4,92	3,15	3,19	3,18	3,22	-0,01	0,45	2,04	3,58	3,61	3,60	3,63	
6,04	3,36	3,39	3,39	3,42	-0,02	0,39	2,91	3,74	3,76	3,76	3,78	
7,94	3,69	3,73	3,74	3,77	-0,02	0,31	4,48	3,98	4,01	4,02	4,04	
9,67	4,02	4,08	4,10	4,11	-0,03	0,23	5,91	4,22	4,27	4,29	4,29	
12,21	4,51	4,62	4,68	4,72	-0,03	0,10	8,08	4,59	4,67	4,71	4,74	
14,30	5,06	5,18	5,24	5,28	-0,04	-0,03	9,85	4,99	5,08	5,12	5,15	
12,59	5,24	5,26	5,28	5,27	-0,03	-0,08	8,05	5,13	5,15	5,16	5,15	
10,77	5,10	5,10	5,12	5,10	-0,03	-0,05	6,30	5,03	5,02	5,04	5,02	
9,09	4,92	4,92	4,88	4,89	-0,02	0,00	4,71	4,90	4,89	4,87	4,87	
7,28	4,05	4,60	4,60	4,60	-0,02	0,06	3,06	4,70	4,66	4,66	4,66	
8,94	4,65	4,66	4,67	4,68	-0,02	0,07	4,72	4,69	4,70	4,71	4,72	
10,68	4,81	4,83	4,86	4,87	-0,03	0,03	6,36	4,81	4,83	4,85	4,85	
12,27	5,06	5,10	5,08	5,09	-0,03	-0,04	7,81	4,99	5,02	5,01	5,02	
13,66	5,28	5,34	5,33	5,36	-0,03	-0,09	9,10	5,15	5,20	5,19	5,21	
15,80	5,60	5,70	5,73	5,79	-0,04	-0,17	11,12	5,39	5,46	5,49	5,53	
17,03	6,02	6,14	6,19	6,26	-0,04	-0,28	12,20	5,70	5,79	5,82	5,88	
18,36	6,43	6,57	6,61	6,71	-0,05	-0,38	13,43	6,00	6,10	6,14	6,21	
20,18	7,02	7,24	7,36	7,46	-0,05	-0,53	15,15	6,44	6,60	6,69	6,77	
21,24	7,79	8,06	8,17	8,35	-0,05	-0,73	16,13	7,01	7,22	7,29	7,43	
22,85	8,89	9,28	9,44	9,69	-0,06	-1,00	17,05	7,83	8,12	8,24	8,43	
24,14	10,30	10,78	10,99	11,24	-0,06	-1,36	18,68	8,88	9,23	9,39	9,58	

EXTRAPOLACIÓN DE LA CURVA PRESIOMÉTRICA
(Ajuste logarítmico de la rama plástica)

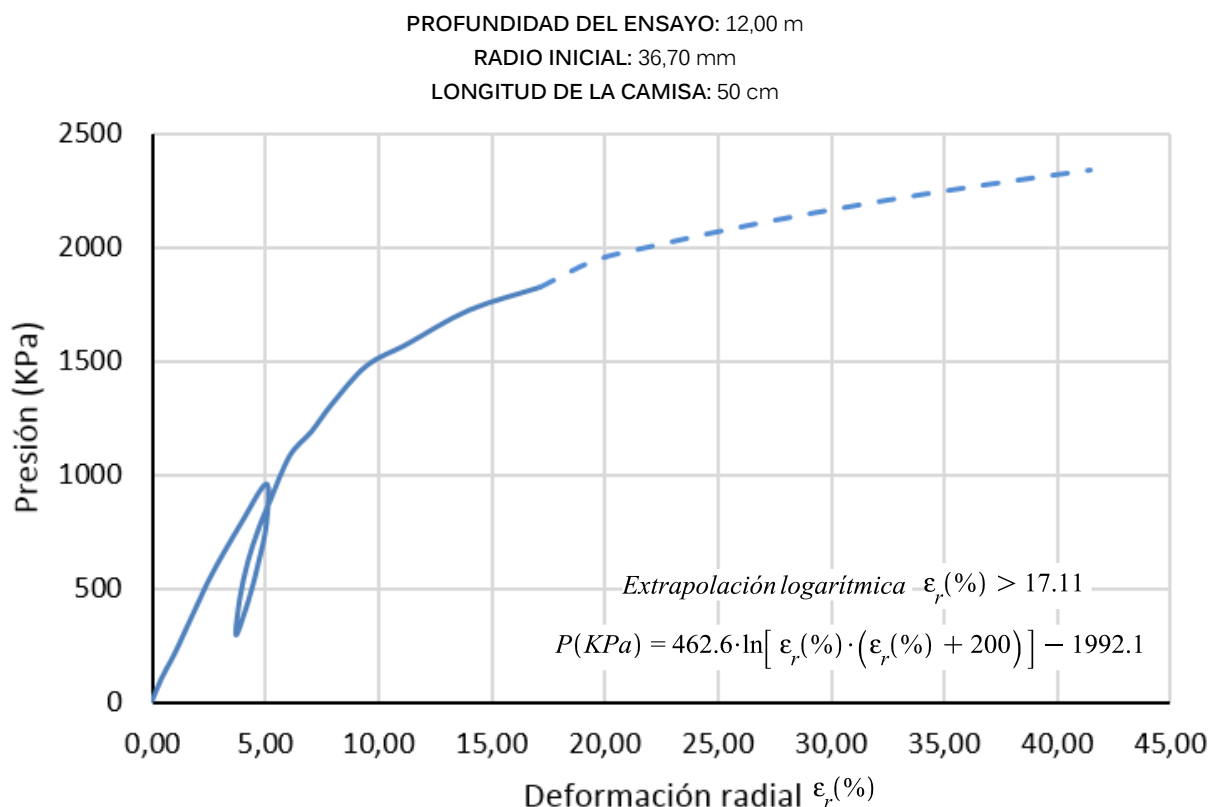
$y = 4,7204\ln(x) + 23,863$



Indice de Fluencia 30 - 60 seg



ENSAYO R0 = 36,70 mm				
P (KPa)	P (Kg/cm2)	ΔR (mm)	ϵ_r (%)	ϵ_v (%)
13	0,13	0,00	0,00	0,00
109	1,11	0,15	0,41	0,82
200	2,04	0,33	0,90	1,81
285	2,91	0,48	1,31	2,63
439	4,48	0,74	2,02	4,07
579	5,91	0,99	2,70	5,47
792	8,08	1,44	3,92	8,00
965	9,85	1,85	5,04	10,34
789	8,05	1,85	5,04	10,34
617	6,30	1,72	4,69	9,59
462	4,71	1,57	4,28	8,74
300	3,06	1,36	3,71	7,55
463	4,72	1,42	3,87	7,89
623	6,36	1,55	4,22	8,63
765	7,81	1,72	4,69	9,59
892	9,10	1,91	5,20	10,68
1090	11,12	2,23	6,08	12,52
1196	12,20	2,58	7,03	14,55
1316	13,43	2,91	7,93	16,49
1485	15,15	3,47	9,46	19,80
1581	16,13	4,13	11,25	23,77
1730	17,65	5,13	13,98	29,91
1831	18,68	6,28	17,11	37,15
1947	19,87	7,17	19,54	42,90
2006	20,47	8,06	21,97	48,77
2060	21,02	8,96	24,40	54,76
2109	21,52	9,85	26,83	60,87
2154	21,98	10,74	29,27	67,09
2196	22,41	11,63	31,70	73,44
2235	22,80	12,52	34,13	79,90
2271	23,18	13,42	36,56	86,48
2306	23,53	14,31	38,99	93,18
2339	23,86	15,20	41,42	100,00



$P_0(KPa)$	12,7	$\epsilon_{r,0}(\%)$	0,00
$P_f(KPa)$	1195,6	$\epsilon_{r,f}(\%)$	7,03
$P_{lim}(KPa)$	2339,0	$\epsilon_{r,lim}(\%)$	41,42

MÓDULO ELÁSTICO (E)

$$E = \alpha \cdot E_m = 1.1 \cdot 100 \cdot (1 + 0.33) \cdot \frac{1196 - 12.7}{7.03} = 24\,625\,KPa$$

ÁNGULO DE ROZAMIENTO INTERNO (ϕ)

Ménard (1975):

$$\phi = 4 \cdot \log_2 \left(\frac{2339 - 12.7}{2.5} \right) + 24 = 63^\circ$$

$$ROM: u_0 = \Delta h \cdot \gamma_\omega = (12.00 - 6.90) \cdot 9.81 = 50\,KPa$$

$$\phi = 7 \cdot \left(1 + 10 \cdot \frac{\ln \left(\frac{2339 - 50}{1196 - 50} \right)}{3.7 - \ln(7.03)} \right) = 35^\circ$$

RESISTENCIA AL CORTE SIN DRENAJE (c_u)

ROM:

$$c_u = \frac{1}{2} \cdot \frac{2339 - 1196}{3.91 - \ln(7.03)} = 292 \text{ KPa}$$

Amar y Jézéquel (1972):

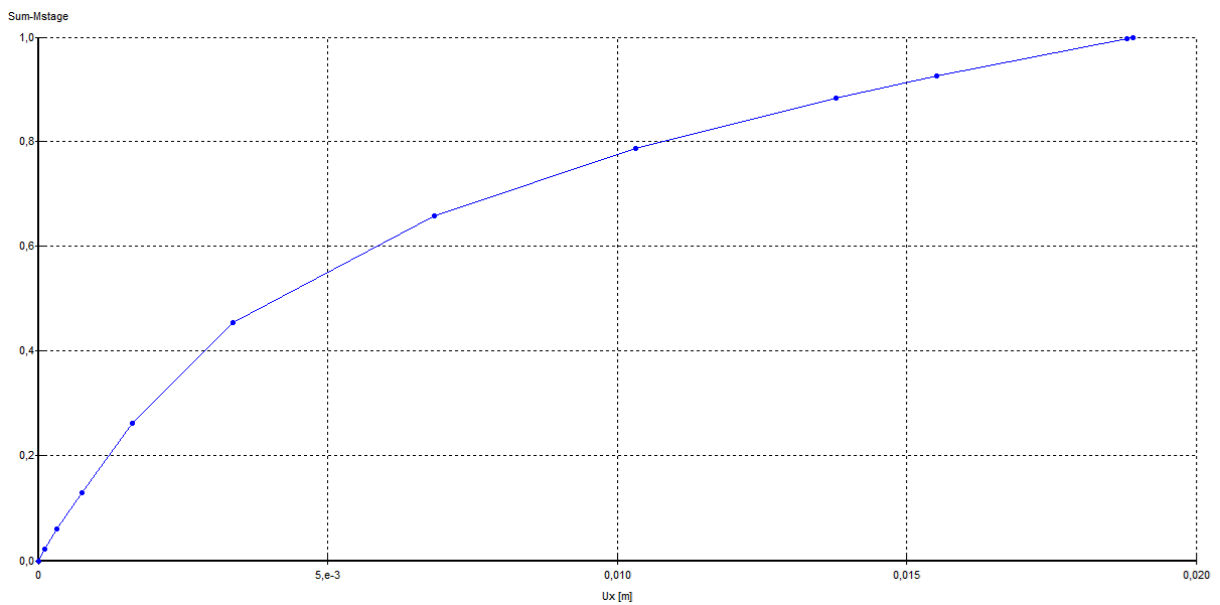
$$c_u = \frac{2339 - 12.7}{10} + 25 = 258 \text{ KPa}$$

DILATANCIA (Ψ)

La dilatancia es cero por tratarse de un suelo cohesivo.

$E(\text{KPa})$	ν	$\phi(^{\circ})$	$c_u(\text{KPa})$	$\psi(^{\circ})$
24 625	0,33	35	292	0

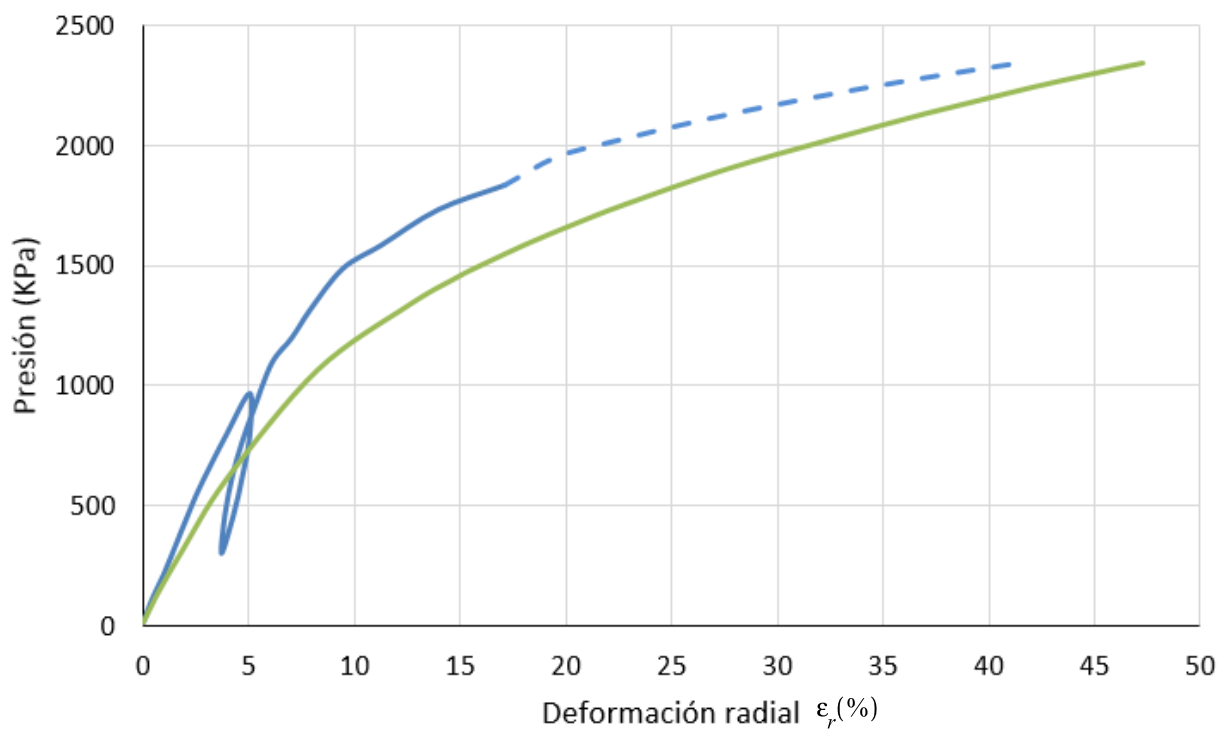
Valores de los parámetros del suelo



Curva Ux-Mstage calculada en PLAXIS

P (KPa)	u (mm)	u - 0,03	$\epsilon_r(\%)$
12,7	0,03	0,00	0,00
48	0,10	0,07	0,20
141	0,29	0,27	0,73
305	0,69	0,66	1,80
609	1,47	1,45	3,94

P (KPa)	u (mm)	u - 0,03	ϵ_r (%)
1060	3,04	3,01	8,21
1331	4,63	4,60	12,54
1441	5,42	5,40	14,71
1493	5,84	5,82	15,85
1587	6,69	6,66	18,15
1672	7,54	7,51	20,47
1752	8,40	8,37	22,82
1896	10,13	10,10	27,53
2015	11,86	11,84	32,25
2128	13,59	13,57	36,97
2231	15,33	15,30	41,69
2323	17,06	17,04	46,42
2339	17,38	17,35	47,28



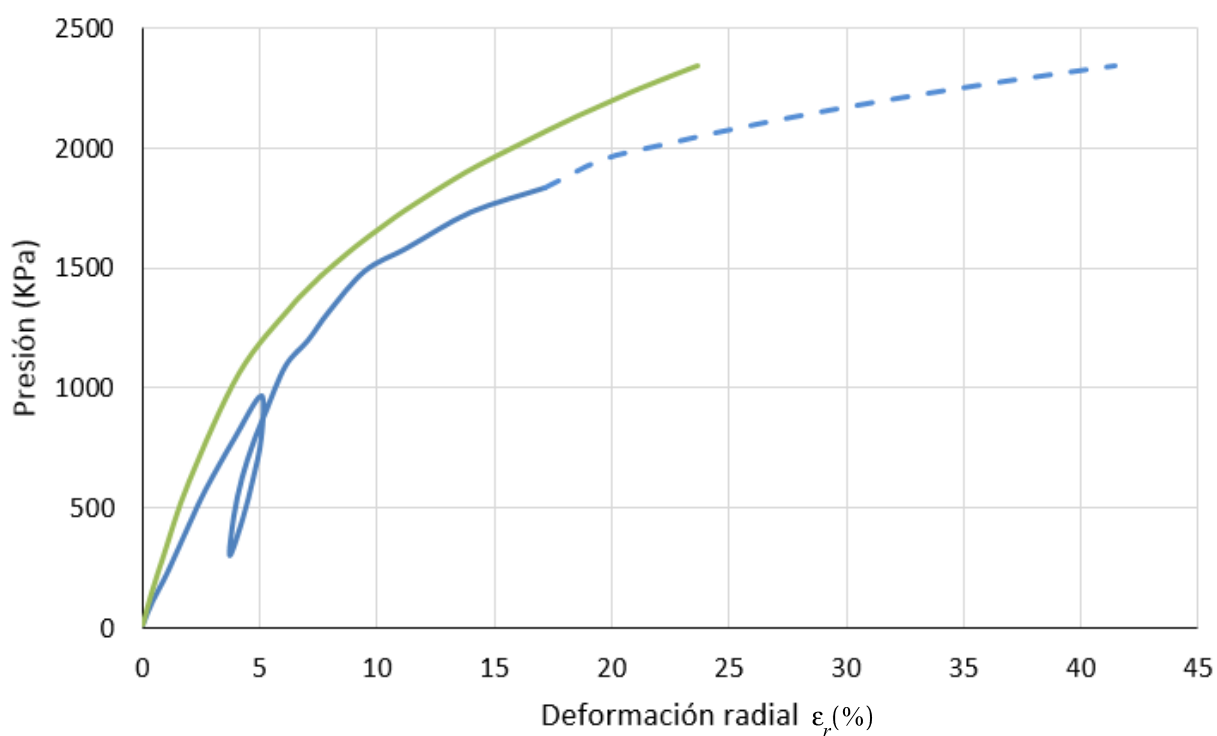
Ajustamos primero el módulo elástico (E). Para ello buscamos que la deformación radial a la presión de fluencia (1196 KPa) sea la del ensayo: 6,81 %. Interpolando los valores de la tabla anterior tenemos una deformación radial igual a 10,38 % para el valor de la presión de fluencia (1196 KPa).

- AJUSTE 1: Multiplicamos por 2 el módulo elástico.

$E(KPa)$	ν	$\phi(^{\circ})$	$c_u(KPa)$	$\psi(^{\circ})$
49 250	0,33	35	292	0

AJUSTE 1: Valores de los parámetros del suelo

P (KPa)	u (mm)	u - 0,01	$\epsilon_r(\%)$
12,7	0,01	0,00	0,00
48	0,05	0,04	0,10
141	0,15	0,13	0,37
305	0,34	0,33	0,90
609	0,74	0,72	1,97
1060	1,52	1,51	4,11
1331	2,31	2,30	6,27
1441	2,71	2,70	7,35
1493	2,92	2,91	7,92
1587	3,34	3,33	9,07
1672	3,77	3,76	10,23
1752	4,20	4,19	11,41
1896	5,07	5,05	13,77
2015	5,93	5,92	16,12
2128	6,80	6,78	18,49
2231	7,66	7,65	20,85
2323	8,53	8,52	23,21
2339	8,69	8,68	23,64



A 1196 KPa, la presión de fluencia del ensayo, tenemos una deformación con estos valores de los parámetros igual a 5,19 % (interpolación lineal de la tabla de resultados).

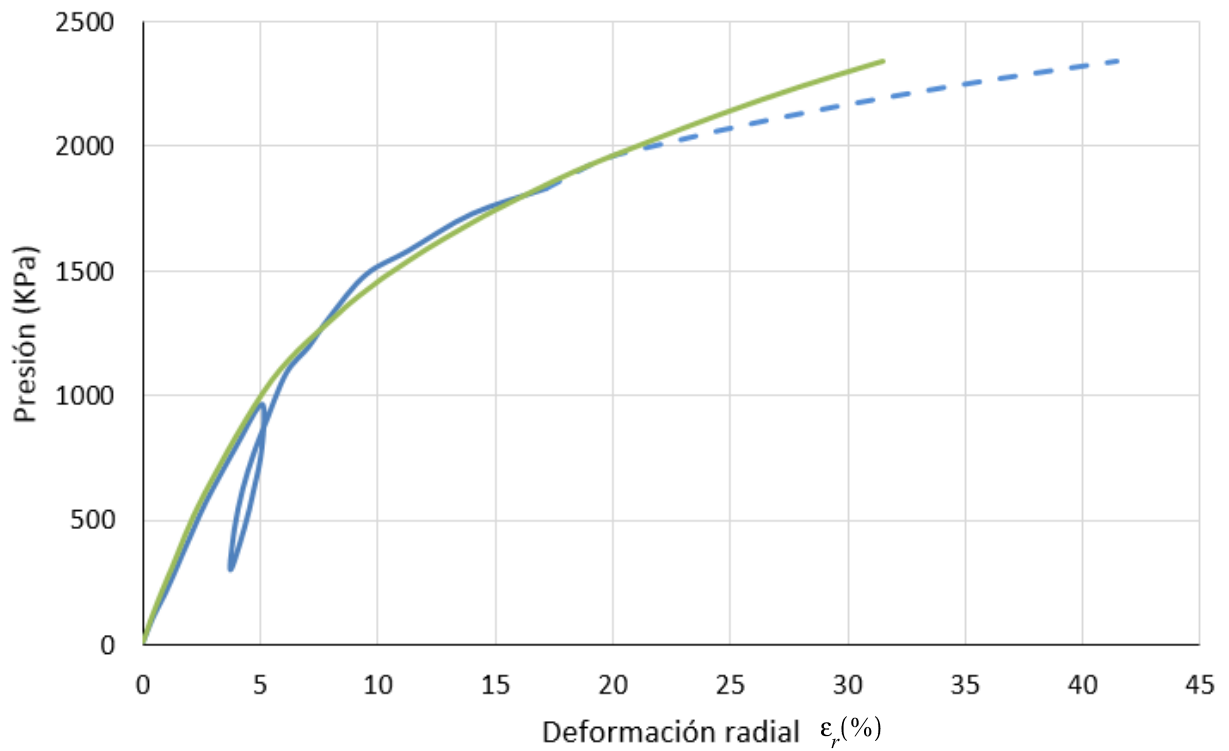
- AJUSTE 2: Multiplicamos el módulo elástico por 1,5.

$E(KPa)$	ν	$\phi (^{\circ})$	$c_u(KPa)$	$\psi (^{\circ})$
36 938	0,33	35	292	0

AJUSTE 2: Valores de los parámetros del suelo

$P (KPa)$	$u (mm)$	$u - 0,02$	$\epsilon_r (\%)$
12,7	0,02	0,00	0,00
48	0,07	0,05	0,13
141	0,20	0,18	0,49
305	0,46	0,44	1,20
609	0,98	0,96	2,63
1060	2,03	2,01	5,48
1331	3,09	3,07	8,36
1441	3,62	3,60	9,80
1493	3,89	3,88	10,56
1587	4,46	4,44	12,10
1672	5,02	5,01	13,64
1752	5,60	5,58	15,21
1896	6,75	6,74	18,35

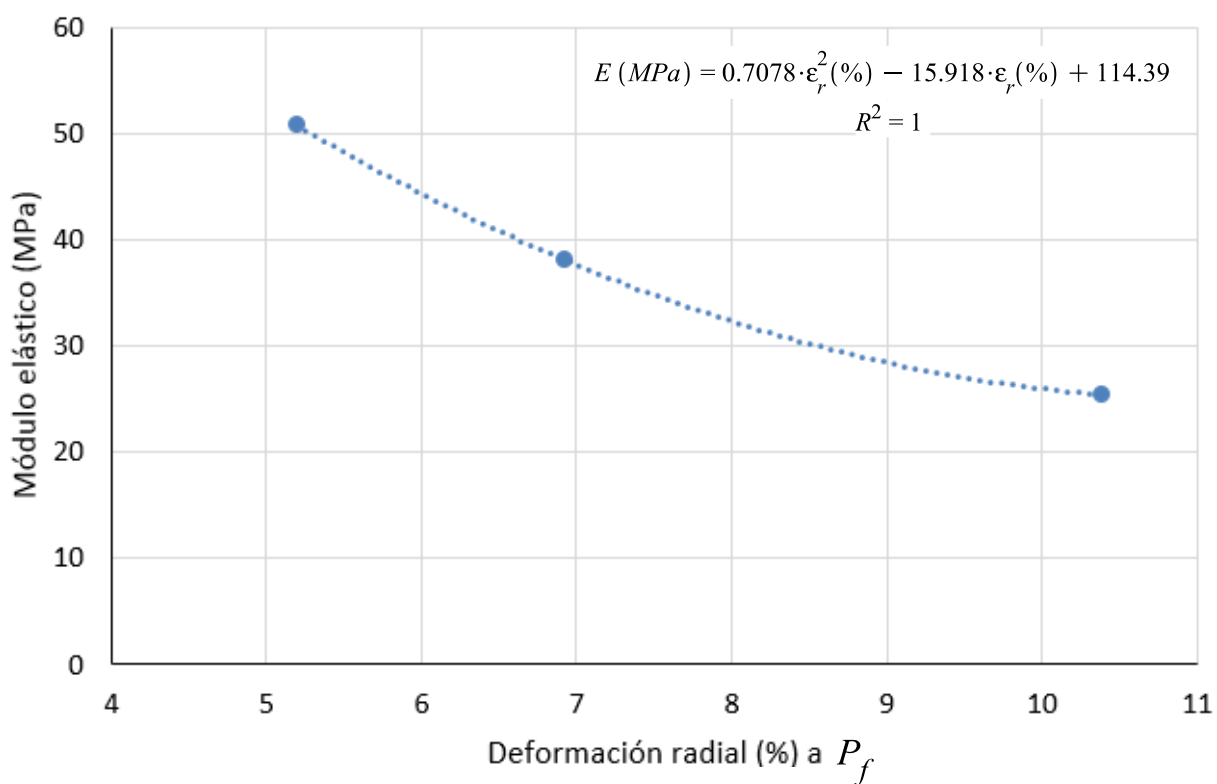
P (KPa)	u (mm)	u - 0,02	ϵ_r (%)
2015	7,91	7,89	21,50
2128	9,06	9,05	24,65
2231	10,22	10,20	27,79
2323	11,38	11,36	30,95
2339	11,58	11,57	31,52



Obtenemos una deformación radial igual a 6,92 % correspondiente a 1196 KPa.

Con los valores obtenidos podemos estimar el valor del módulo elástico que cumple la condición impuesta:

E (MPa)	ϵ_r (%)
25,420	10,38
38,130	6,92
50,840	5,19



Buscamos que la deformación a la presión de fluencia sea igual a 7,03 %. Sustituimos en la ecuación de la interpolación y calculamos el valor del módulo elástico ajustado: 42,645 MPa.

$$E(\text{MPa}) = 0.7078 \cdot 7.03^2 - 15.918 \cdot 7.03 + 114.39 = 37.467 \text{ MPa}$$

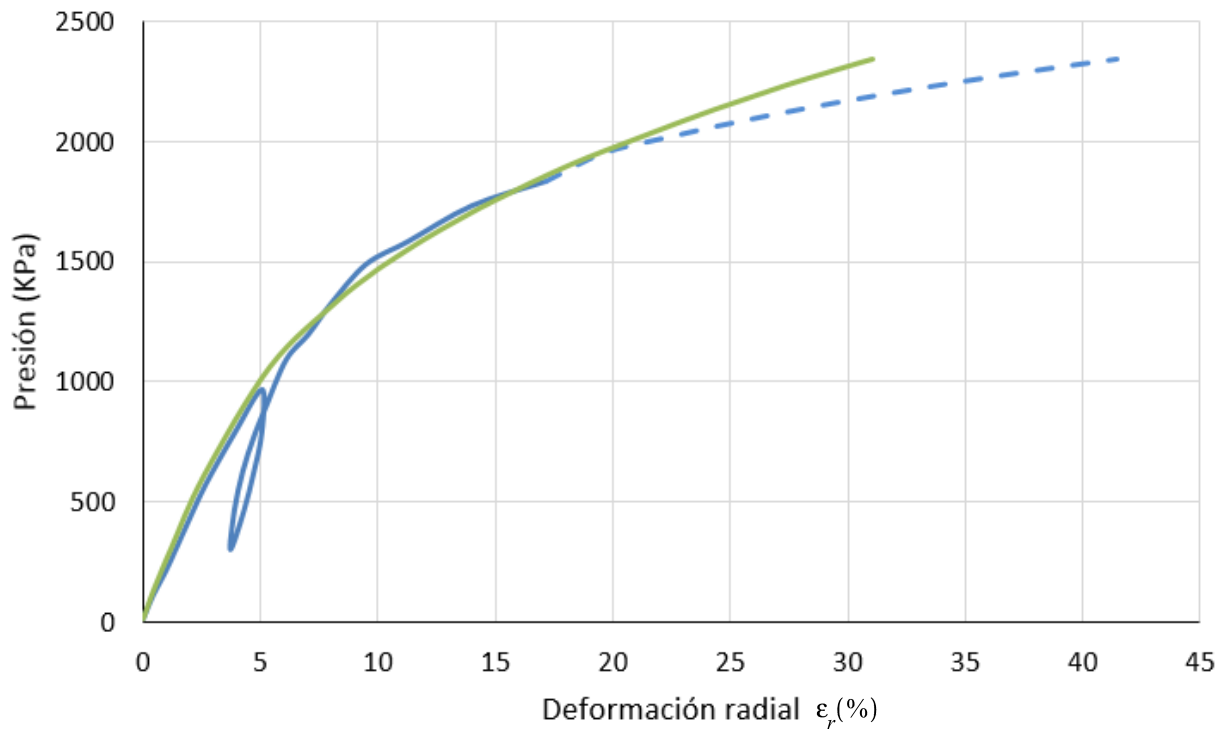
- AJUSTE 3: Módulo elástico ajustado.

$E(\text{KPa})$	ν	$\phi(^{\circ})$	$c_u(\text{KPa})$	$\psi(^{\circ})$
37 467	0,33	35	292	0

AJUSTE 3: Valores de los parámetros del suelo

P (KPa)	u (mm)	u - 0,02	$\epsilon_r(\%)$
12,7	0,02	0,00	0,00
48	0,06	0,05	0,13
141	0,19	0,18	0,48
305	0,45	0,43	1,18
609	0,97	0,95	2,59
1060	2,00	1,98	5,40
1331	3,04	3,02	8,24
1441	3,56	3,55	9,67
1493	3,84	3,82	10,42
1587	4,39	4,38	11,93
1672	4,95	4,94	13,45

P (KPa)	u (mm)	u - 0,02	$\epsilon_r(\%)$
1752	5,52	5,50	15,00
1896	6,66	6,64	18,10
2015	7,80	7,78	21,20
2128	8,94	8,92	24,30
2231	10,07	10,06	27,40
2323	11,21	11,20	30,51
2339	11,42	11,40	31,07



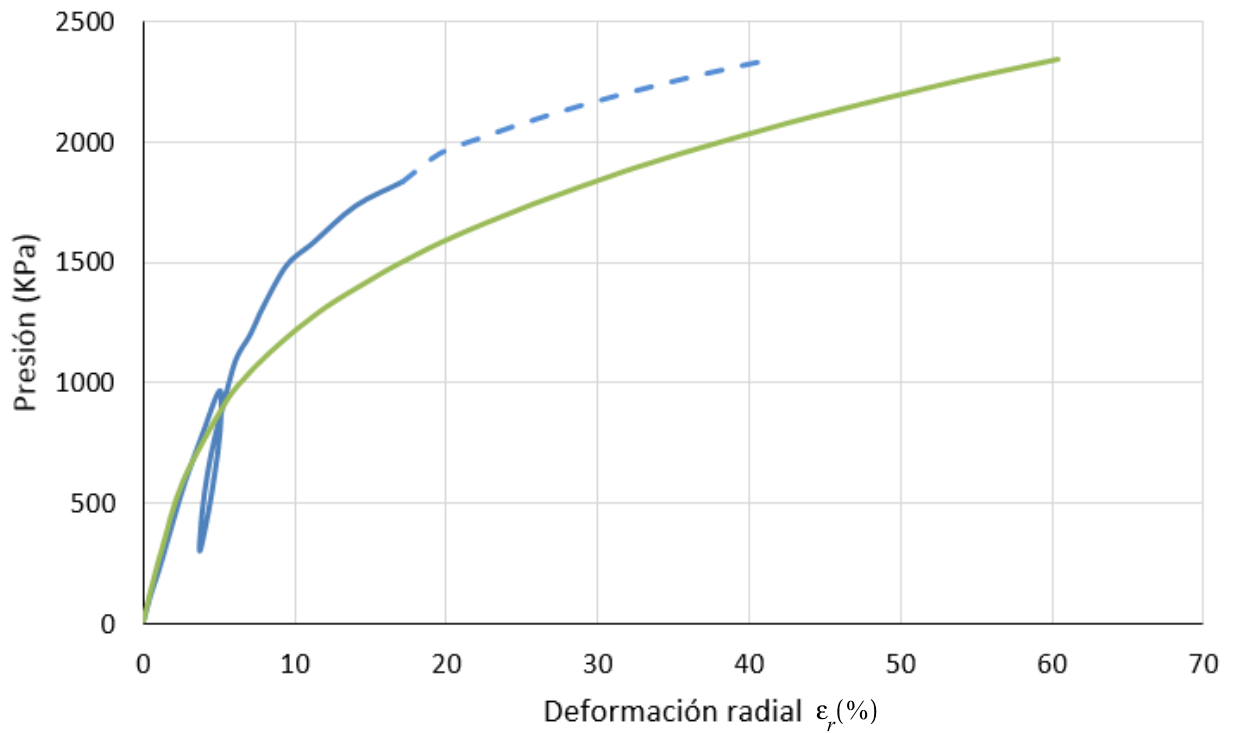
Falta ajustar el ángulo de rozamiento y la resistencia al corte sin drenaje. Las dos expresiones de correlación de resistencia al corte devuelven valores muy parecidos así que los damos por buenos. Para ajustar el ángulo de rozamiento, lo modificamos hasta obtener un 41,42 % de deformación radial a la presión límite. En este caso tenemos una deformación del 31,07 % para la presión límite del ensayo.

- AJUSTE 4: Reducimos el ángulo de rozamiento a 17° .

$E(KPa)$	ν	$\phi(^{\circ})$	$c_u(KPa)$	$\psi(^{\circ})$
37 467	0,33	17	292	0

AJUSTE 4: Valores de los parámetros del suelo

P (KPa)	u (mm)	u - 0,02	ϵ_r (%)
12,7	0,02	0,00	0,00
48	0,06	0,05	0,13
141	0,19	0,18	0,48
305	0,45	0,43	1,18
590	0,97	0,95	2,59
917	2,00	1,98	5,41
1027	2,52	2,50	6,81
1075	2,78	2,76	7,53
1120	3,05	3,03	8,26
1161	3,32	3,30	9,00
1202	3,59	3,58	9,75
1240	3,87	3,86	10,51
1312	4,43	4,41	12,02
1372	4,99	4,97	13,55
1428	5,55	5,53	15,07
1483	6,11	6,09	16,59
1580	7,22	7,21	19,63
1663	8,34	8,33	22,68
1740	9,46	9,45	25,74
1810	10,58	10,57	28,79
1877	11,70	11,69	31,84
1938	12,82	12,81	34,89
1966	13,38	13,37	36,42
2022	14,50	14,49	39,48
2075	15,63	15,61	42,53
2125	16,75	16,73	45,59
2149	17,31	17,29	47,12
2173	17,87	17,85	48,65
2197	18,43	18,41	50,17
2220	18,99	18,97	51,70
2243	19,55	19,54	53,23
2265	20,11	20,10	54,76
2285	20,68	20,66	56,29
2306	21,24	21,22	57,82
2326	21,80	21,78	59,35
2339	22,16	22,14	60,32



Obtenemos deformación radial igual al 60,32 % para la presión límite del ensayo.

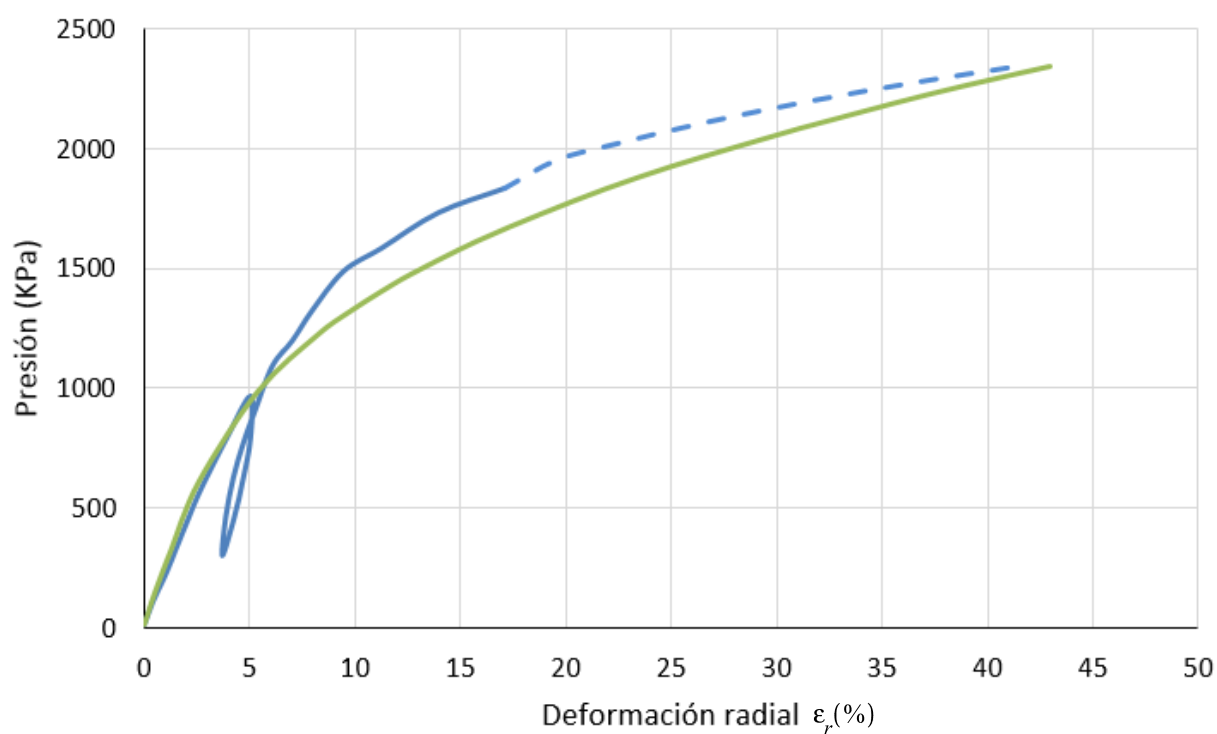
- AJUSTE 5: Reducimos el ángulo de rozamiento a 26°.

E (KPa)	ν	ϕ (°)	c_u (KPa)	ψ (°)
37 467	0,33	26	292	0

AJUSTE 5: Valores de los parámetros del suelo

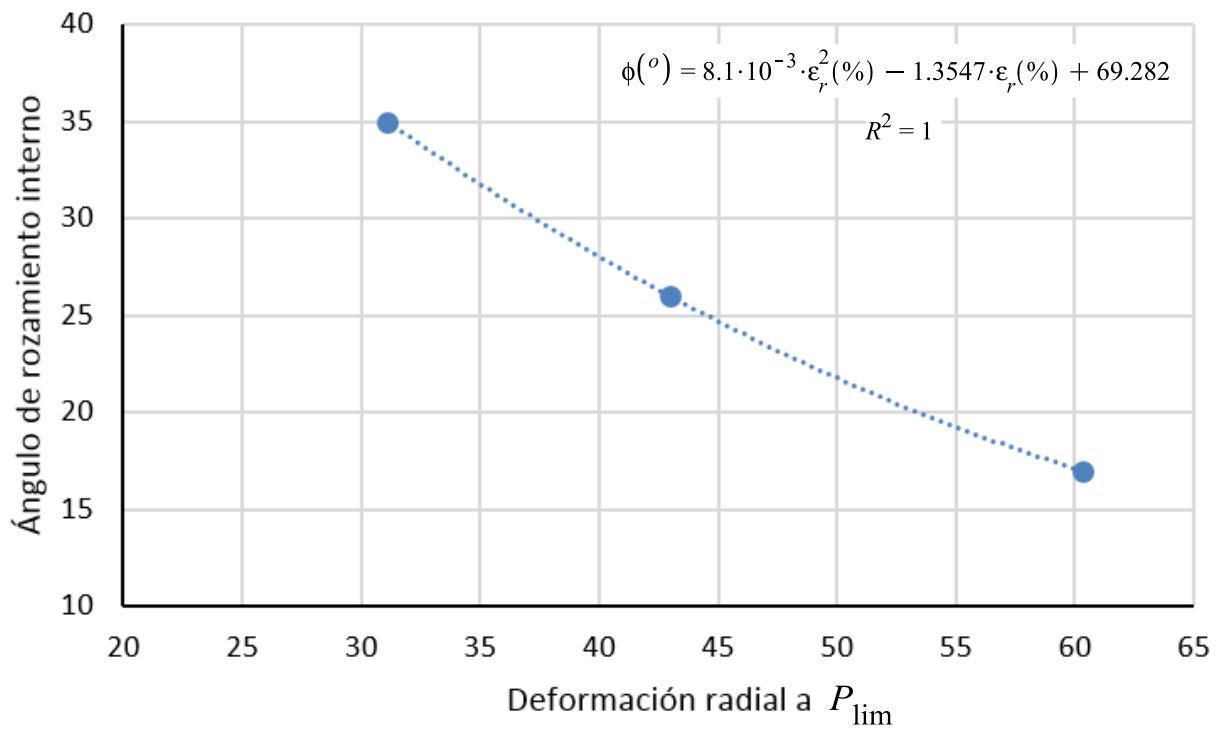
P (KPa)	u (mm)	u - 0,02	ϵ_r (%)
12,7	0,02	0,00	0,00
48	0,06	0,05	0,13
141	0,19	0,18	0,48
305	0,45	0,43	1,18
609	0,97	0,95	2,59
986	2,00	1,98	5,40
1220	3,03	3,02	8,22
1314	3,58	3,56	9,70
1398	4,13	4,11	11,20
1476	4,69	4,67	12,72
1610	5,80	5,79	15,77
1724	6,92	6,91	18,82
1828	8,04	8,03	21,87
1920	9,17	9,15	24,94

P (KPa)	u (mm)	u - 0,02	$\epsilon_r(\%)$
2001	10,30	10,28	28,01
2080	11,42	11,40	31,07
2152	12,55	12,53	34,14
2222	13,67	13,65	37,20
2285	14,80	14,78	40,27
2339	15,79	15,77	42,98



Obtenemos deformación radial igual al 42,98 % para la presión límite del ensayo.

$\phi (^{\circ})$	$\epsilon_r(\%) a P_{lim}$
17	60,32
26	42,98
35	31,07



Buscamos una deformación del 41,42 % a la presión límite:

$$\phi(^{\circ}) = 8.1 \cdot 10^{-3} \cdot 41.42^2 - 1.3547 \cdot 41.42 + 69.282 = 27^{\circ}$$

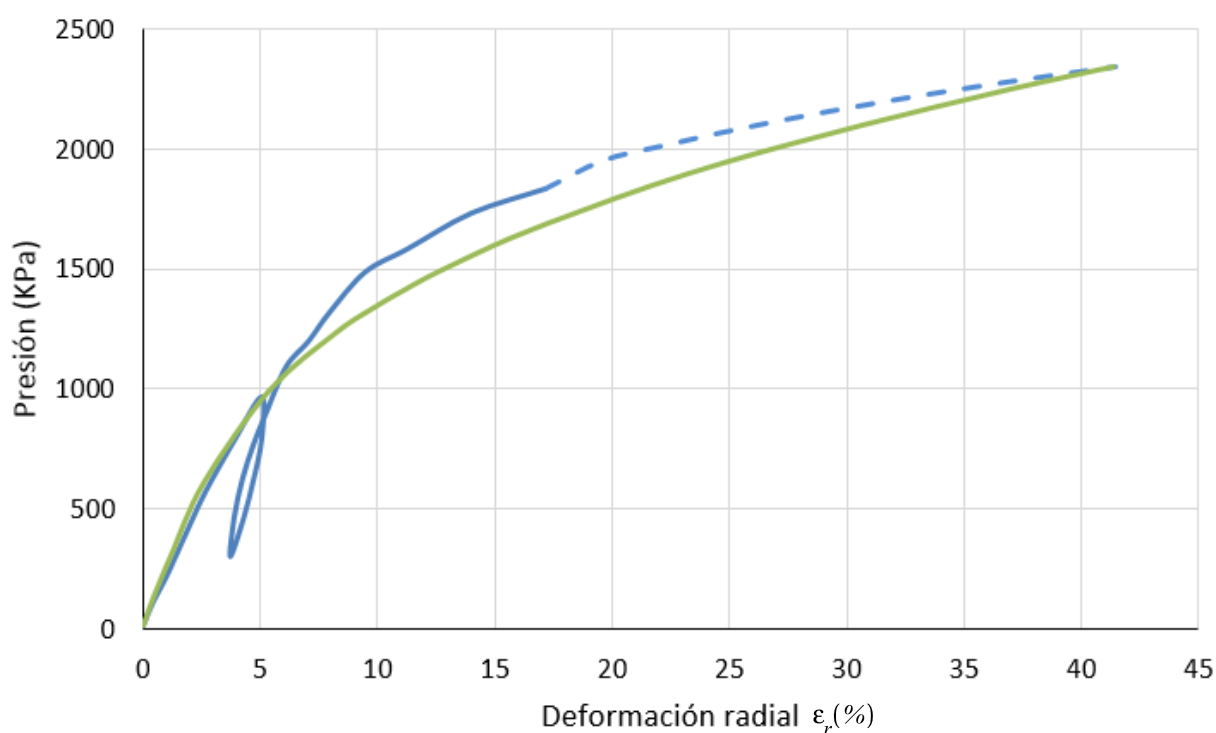
- AJUSTE 6: Parámetros ajustados.

$E(KPa)$	ν	$\phi(^{\circ})$	$c_u(KPa)$	$\psi(^{\circ})$
37 467	0,33	27	292	0

AJUSTE 6: Valores de los parámetros del suelo

P (KPa)	u (mm)	u - 0,02	$\epsilon_r(\%)$
12,7	0,02	0,00	0,00
48	0,06	0,05	0,13
141	0,19	0,18	0,48
305	0,45	0,43	1,18
609	0,97	0,95	2,59
994	2,00	1,98	5,40
1231	3,03	3,02	8,22
1327	3,57	3,55	9,68
1411	4,11	4,10	11,17
1489	4,67	4,65	12,67
1626	5,77	5,75	15,68
1739	6,88	6,86	18,69

P (KPa)	u (mm)	u - 0,02	ϵ_r (%)
1845	7,98	7,96	21,69
1938	9,08	9,07	24,70
2020	10,19	10,17	27,72
2097	11,30	11,28	30,73
2171	12,40	12,39	33,75
2241	13,51	13,49	36,76
2306	14,62	14,60	39,78
2339	15,21	15,20	41,41



2.7. CONCLUSIONES

La caracterización de un suelo mediante la obtención con el ensayo presiométrico del valor de los parámetros geotécnicos es una metodología que proponemos en este trabajo: no está normalizada. El objetivo es buscar la combinación de estos valores que en un modelo del ensayo devuelva resultados lo más parecidos posibles a los reales obtenidos en el ensayo.

Con que la curva calculada se parezca a la del ensayo no podemos garantizar a priori que hayamos encontrado con precisión el valor de los parámetros. Sin embargo, sí podemos decir con seguridad que el modelo de comportamiento de suelo Mohr-Coulomb describe adecuadamente el fenómeno de expansión de una cavidad en el terreno, así que lo podemos utilizar para modelizar la reacción de expansión de la resina en el suelo.

De las pruebas que hemos realizado variando los parámetros podemos deducir que únicamente el módulo elástico rige el comportamiento del suelo en el tramo elástico porque al variar el ángulo de rozamiento y la resistencia al corte solamente cambian los resultados correspondientes a presiones mayores que la de fluencia. Así que el módulo elástico sí se puede obtener siguiendo esta metodología propuesta.

No podemos decir lo mismo de los otros dos parámetros, porque seguramente existen varias combinaciones que consiguen un buen parecido con la curva del ensayo in situ. Recomendaríamos entonces realizar ensayos de triaxial, ensayo normalizado para la obtención del ángulo de rozamiento interno y la resistencia al corte. Este ensayo no se tarda demasiado en hacer (depende del número de veces que se repita para tener una nube de puntos más densa y mejor aproximación de los resultados) y las muestras necesarias se pueden tomar a la vez que se realiza el sondeo para introducir la camisa del ensayo presiométrico. Además, las herramientas e instrumentos se pueden transportar en el camión-laboratorio donde se lleva lo necesario para realizar las inyecciones de resina. Y por último, es un ensayo barato.

Como solamente disponemos del ensayo presiométrico, debemos usar las correlaciones de la bibliografía para los valores de ángulo de rozamiento y resistencia al corte y si los resultados del modelo no se parecen a los del ensayo, modificarlos. Para el ángulo de rozamiento tenemos la correlación de Ménard y la de la ROM. La de Ménard devuelve valores muy elevados, así que recomendamos su uso solamente en suelos granulares (gravas y arenas). De las dos utilizadas, pensamos que la de la ROM es más acertada. En cuanto a la resistencia al corte, tenemos la correlación de la ROM y la de Amar y Jézéquel. De los tres suelos caracterizados en dos de ellos (uno granular y otro cohesivo) ambas expresiones devuelven valores parecidos. Nos lleva a pensar que las dos expresiones son adecuadas para los dos tipos de suelos y que el grado de precisión del valor es mayor.

Si tenemos que modificar el valor de los parámetros del suelo, elegiremos siempre la combinación de valores que reduzca la rigidez del terreno: que la curva del modelo se quede siempre por debajo de la del ensayo. Con este criterio estaremos del lado de la seguridad porque para la misma presión tenemos más deformación que la real, es decir, haría falta menos presión en el modelo para un valor dado de deformación. Trasladado a un recalce equivale a decir que conseguimos la recuperación buscada de asiento con menor cantidad de resina. Planificar una menor cantidad de resina permite añadir más en obra, siempre por debajo del valor admisible. Modelizar el recalce en un suelo más rígido devolvería mayor cantidad de resina que luego in situ puede provocar una siento excesivo por encima del admisible que deje la estructura incluso en peores condiciones a las que estaba antes de la operación.

En este apartado hemos descrito varias formas de modelizar el ensayo: modelización analítica y numérica (en deformación plana y en condiciones de axisimetría).

La modelización analítica reduce el modelo a una expresión matemática. Sirve en cuanto al interés de la obtención de fórmulas que describan el comportamiento del suelo pero no tiene

interés práctico: está sujeto a numerosas condiciones de homogeneidad del terreno (suelo homogéneo e infinito) y estados tensionales que no se dan en la realidad. Aunque su evaluación es inmediata con la ayuda de un programa de cálculo como MATLAB o incluso EXCEL, no permite tener en cuenta otras cavidades cercanas, suelo estratificado, variación de la presión con la profundidad, nivel freático, etc.

Con la modelización numérica en deformación plana ocurre un tanto de lo mismo: el estudio de una sección en particular no permite tener en cuenta el resto de factores del entorno próximo que puedan influenciar en los resultados del ensayo. Además, en PLAXIS lo modelizamos como un material rígido en perfecta expansión. Esto no describe correctamente el ensayo porque en el ensayo lo que se controla es la presión, que sí es uniforme en toda la camisa pero la expansión es irregular y de hecho el resultado del ensayo es una media de los valores registrados a lo largo de varios puntos en la camisa.

De las dos variantes que se estudian (curva por puntos y la obtención directa con un punto de tensión en el contorno de la cavidad), para este tipo de modelización recomendaríamos la obtención directa de la curva mediante a elección de un punto de tensión en el contorno de la cavidad porque de la otra forma se alarga demasiado el tiempo empleado sacando los puntos de uno en uno y se acumula demasiado error. Se acumula demasiado error por definir tantas fases constructivas con deformaciones volumétricas distintas. Podría parecer que tomar solo un punto de todo el contorno de la cavidad para graficar la curva presión-desplazamiento no es correcto, pero efectivamente si elegimos el punto del borde de la cavidad tal que el vector normal sea paralelo al eje x, entonces la presión en el eje x coincide con la presión normal, que es la buscada. Y esta presión es constante en módulo a lo largo de toda la cavidad.

La modelización más adecuada es la numérica en condiciones de axisimetría. No permite modelizar la geometría real del entorno porque en general no se cumplen las hipótesis de axisimetría, pero podemos modelizar suelo estratificado, variación de la presión con la profundidad y presencia de nivel freático. La cavidad del ensayo queda como una línea recta, con lo que podemos aplicar una carga de presión uniformemente distribuida y que luego la deformación varíe en el contorno: exactamente lo que ocurre en el ensayo del presiómetro. Solamente necesita un mallado fino en el borde de la cavidad y el resto del dominio puede hacerse con mayores tamaños de elemento: los cálculos se realizan rápidamente.

Es por esto que siempre trabajemos con un modelo numérico en PLAXIS con condiciones de axisimetría para aplicar la metodología de caracterización del suelo con ensayo presiométrico.

En el primer ejemplo de caracterización de suelo elegimos un terreno granular. El módulo elástico se ha correlacionado con los valores de presión y deformación iniciales y de fluencia. El coeficiente corrector elegido es el de la arena, obteniendo 2600 KPa. Sin embargo, en el modelo (tanto en el analítico como en el de PLAXIS axisimétrico) vemos que la pendiente de la curva en el tramo elástico es notablemente mayor que la del ensayo. Esto ocurre porque el módulo

elástico es mayor al real. Como hemos visto, en los resultados del tramo elástico solamente influye el módulo elástico. El método elegido para ajustarlo de tal forma que la deformación radial a la presión de fluencia sea la misma en el modelo que en el ensayo da buenos resultados y permite con apenas tres valores distintos de E conseguir mediante interpolación el valor buscado. Resulta ser de 1759 KPa. Para obtenerlo en la correlación, el coeficiente debiera haber sido igual a 1,49. Esto concuerda con la tabulación de la bibliografía y con las características del terreno proporcionadas en el sondeo: es suelo es un limo arenoso, así que esperaríamos un coeficiente situado entre el correspondiente al limo y el de la arena y el coeficiente es efectivamente el del limo, no el de la arena. No queremos decir que el terreno sea un limo, sino que se manifiesta la mezcla de limo con la arena en un coeficiente parecido al del limo.

La resistencia al corte que se obtiene de las dos fórmulas de correlaciones es muy parecida: 60 y 51 KPa. Esta similitud nos lleva a pensar que el valor está bien correlacionado. El ángulo de rozamiento que proporciona la fórmula propuesta por Ménard es demasiado elevado, así que elegimos el de la ROM. El método elegido para ajustar estos parámetros ha sido multiplicarlos ambos por un mismo coeficiente. También podría haber sido válido modificar solamente el ángulo de rozamiento dando por bueno 51 KPa para la resistencia al corte. Finalmente conseguimos un más que satisfactorio parecido a la curva real del ensayo.

En el segundo ejemplo de caracterización de suelo hemos elegido un terreno arcilloso. Las correlaciones de ángulo de rozamiento y resistencia al corte dan valores muy distintos así que elegimos los que sean menores aunque con bastante incertidumbre. Efectivamente, la curva calculada con los valores correlacionados no se parece en nada a la del ensayo. Ajustando el valor de E resulta que el factor corrector debiera haber sido de 3,32. No podemos concluir a qué se debe tanta diferencia con respecto al que da la tabulación de la bibliografía.

Ajustando también el ángulo de rozamiento y resistencia al corte conseguimos un parecido muy bueno hasta que acaba el ensayo y comienza la recta de extrapolación. No somos capaces de conseguir parecido a la recta de extrapolación. Pudiera ocurrir que no se haya calculado de la forma más acertada. Vemos que es demasiado horizontal para tener 24° de ángulo de rozamiento y 200 KPa: poco incremento de presión en un amplio intervalo de deformación. Sin embargo hemos realizado el ajuste con demasiada incertidumbre. Recomendamos encarecidamente obtener la resistencia al corte y el ángulo de rozamiento con ensayos de corte para comparar.

Realizamos un tercer ejemplo de caracterización con un suelo arcilloso buscando una mayor seguridad sobre los resultados obtenidos en suelo cohesivo que en el caso anterior para garantizar que la metodología aplicada puede ser válida tanto en suelo granular como en cohesivo. Además en este tercer caso tenemos presencia de nivel freático.

De nuevo, con la correlación del ángulo de rozamiento tenemos valores muy distintos. Nos quedamos con el que proporciona la expresión de la ROM. La expresión de Ménard devuelve valores excesivos para terrenos cohesivos. El caso de la resistencia al corte ocurre como en el

primer ejemplo: valores parecidos. Vemos que la extrapolación tiene mayor pendiente que en el segundo ejemplo, con lo que se trata de un suelo más resistente. Así que tomamos el valor de la ROM que es ligeramente mayor. Desde los primeros resultados, el parecido es razonable. Nos lleva a pensar que en este caso las expresiones de correlaciones sí son adecuadas. Con el módulo elástico ajustado, el coeficiente corrector debería haberse tomado igual a 1,67. Más elevado que el que da la tabulación de la bibliografía para suelo arcilloso pero no tanto como en el segundo ejemplo en el que resultaba un coeficiente incluso mayor que la grava. La resistencia al corte la damos por bien correlacionada y no la modificamos. Modificamos solamente el ángulo de rozamiento. Reduciéndolo a 27° tenemos menos parecido en la zona plástica con el ensayo pero más en el tramo de la correlación. En general, para todas las deformaciones la curva del modelo está por debajo de la del ensayo con lo que nos quedamos del lado de la seguridad si hubiera que modelizar inyecciones de resina expansiva.

En este tercer ejemplo hemos trabajado con mayor seguridad y hemos conseguido un parecido de resultados más que satisfactorio.

Concluimos finalmente que solo con el ensayo presiométrico podemos obtener con precisión el módulo elástico aplicando siempre la misma metodología: lo variamos tres o cuatro veces y con interpolación sacamos el valor que consigue la deformación radial de fluencia del ensayo a la presión de fluencia. Con el ángulo de rozamiento y la resistencia al corte la metodología de ajuste no está tan clara. Será el encargado de esta tarea el que deba decidir en base a su experiencia la combinación que consiga parecerse a los valores del ensayo.

2.8. CONDICIÓN DE EQUILIBRIO: LEY DE COMPORTAMIENTO DE LA RESINA

La resina dentro del suelo se comporta como una cavidad en expansión. Con el incremento de volumen de la resina, la presión de confinamiento del terreno aumenta pero la fuerza de expansión de la resina disminuye. Se deduce que el equilibrio se alcanzará cuando la presión de confinamiento del suelo se iguale a la fuerza de expansión de la resina. La curva presión-deformación del terreno la calcula el programa informático en cada caso. Sin embargo, la curva de la resina depende de su formulación y componentes químicos. Se obtiene experimentalmente en el laboratorio. Para ello, se toma un volumen inicial de resina y se le permite que se expanda hasta una deformación volumétrica dada, midiéndose en ese momento la presión de expansión. De esta forma se saca una serie de puntos. La serie de puntos se intenta aproximar con una curva, normalmente de tipo exponencial.

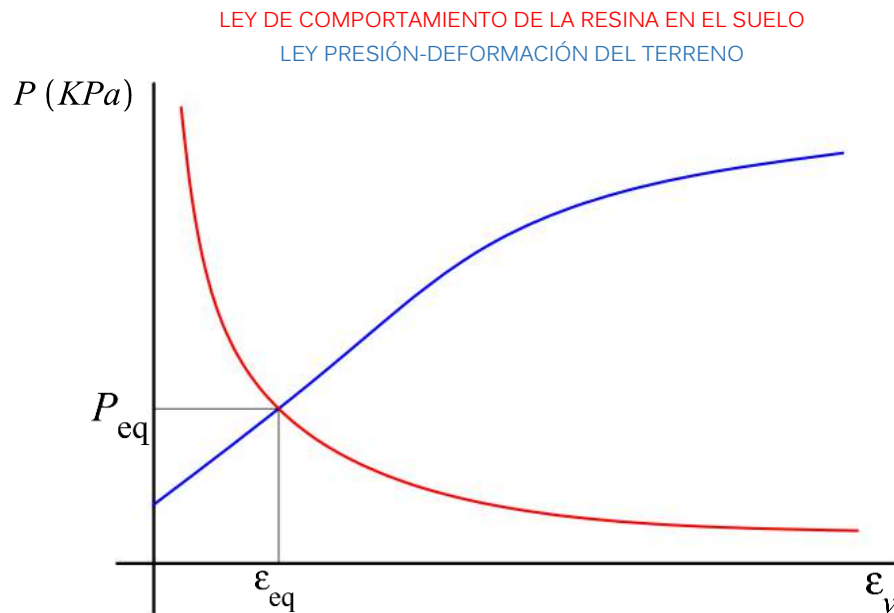


Figura representativa del cálculo del equilibrio resina-terreno

El valor de la deformación de equilibrio es el que hay que introducirle al programa para que calcule los resultados.

La expresión de la curva de comportamiento de la resina se suele tomar de la forma:

$$P = \exp[A \cdot (\gamma_i - B)] + C$$

γ_i es el peso específico de la resina.

A, B, C son coeficientes a determinar experimentalmente.

En esta expresión, la variable independiente es el peso específico de la resina. Nos interesa pasarlo a deformación volumétrica, que es la variable con el que vamos a trabajar mediante la expresión:

$$\gamma_i = \frac{\gamma_0}{\varepsilon_v + 1}$$

γ_0 es el peso específico inicial de la resina.

ε_v es la deformación volumétrica de la resina.

Por otra parte, el volumen inicial de la cavidad en el suelo no va a ser solamente resina líquida: tenemos una mezcla de suelo y resina. El valor de la deformación volumétrica habría que corregirlo para tener en cuenta el volumen ocupado por suelo, que no va a sufrir expansión alguna. Del volumen total V_T , podemos calcular la fracción ocupada por resina V_0 , mediante la porosidad n del terreno:

$$V_0 = n \cdot V_T$$

Una vez que comienza la expansión, la resina va teniendo una deformación volumétrica $\epsilon_{v,r}$ mientras que la totalidad suelo-resina tiene deformación volumétrica ϵ_v . Las podemos relacionar sabiendo que en ambos casos el incremento de volumen se debe exclusivamente a la resina.

$$\epsilon_v = \frac{\Delta V}{V_T} \quad \epsilon_{v,r} = \frac{\Delta V}{V_0} \quad \frac{\epsilon_v}{\epsilon_{v,r}} = \frac{V_0}{V_T} = n \Rightarrow \epsilon_{v,r} = \frac{\epsilon_v}{n}$$

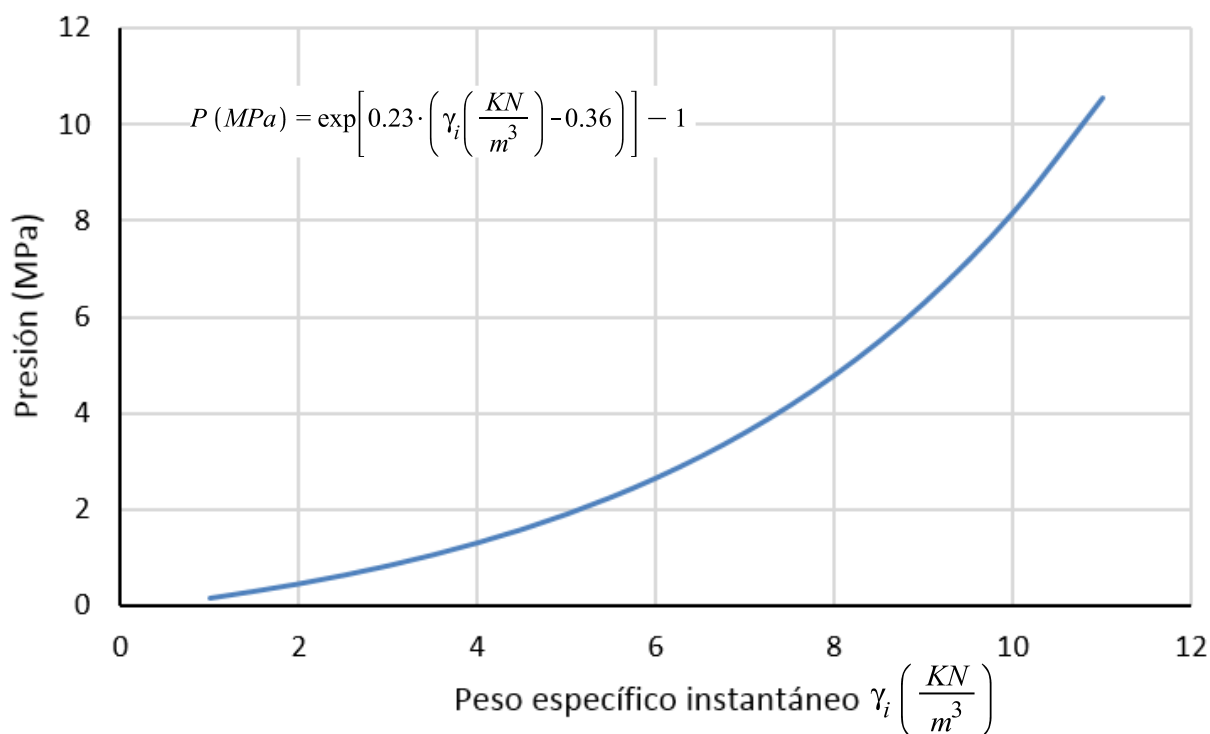
Así que la expresión de la curva de comportamiento de la resina en función de la deformación volumétrica de la cavidad formada por la mezcla suelo-resina quedaría:

$$P = \exp \left[A \cdot \left(\frac{\gamma_0}{\frac{\epsilon_v}{n} + 1} - B \right) \right] + C$$

La resina que utilizaremos en la aplicación es la resina URETEK de la empresa URETEK. La densidad inicial de la resina es de 10,5 KN/m³. Tiene la ley de comportamiento:

$$P \text{ (MPa)} = \exp \left[0.23 \cdot \left(\gamma_i \left(\frac{\text{KN}}{\text{m}^3} \right) - 0.36 \right) \right] - 1$$

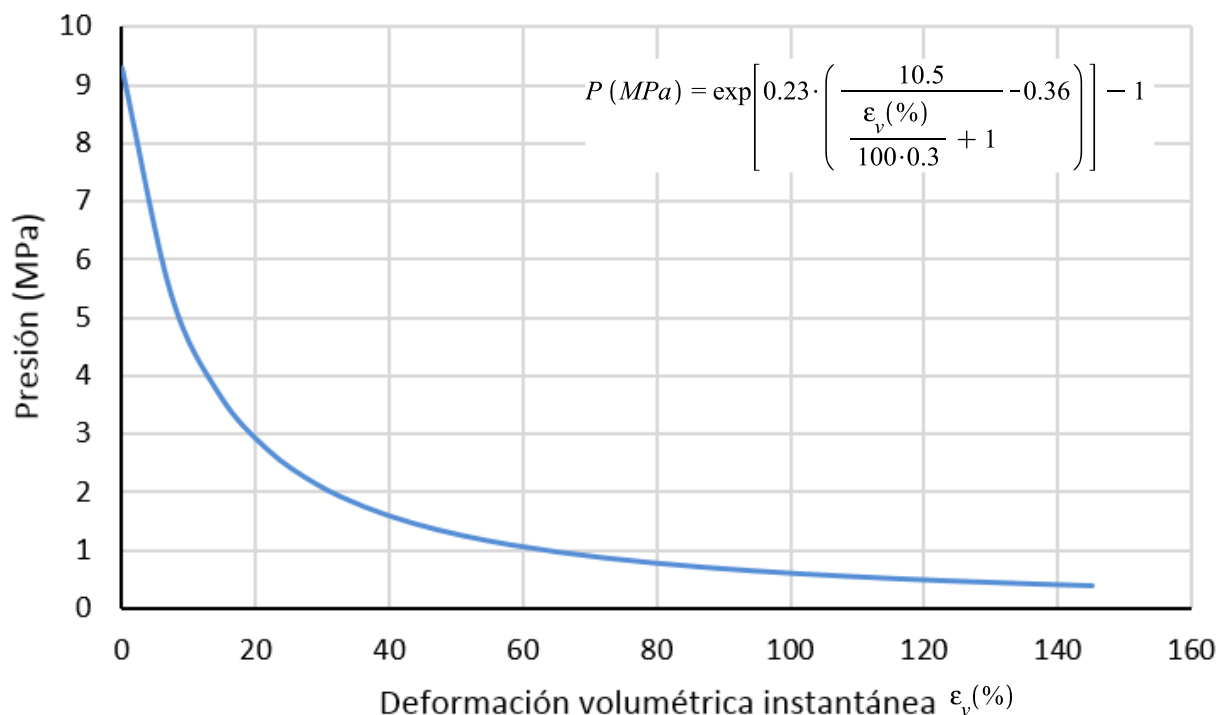
$$A = 0.23 \quad B = 0.36 \quad C = -1$$



Ley de comportamiento de la resina URETEK
URETEK

La ley con la que tenemos que hallar la condición de equilibrio de la resina con el terreno tomando una porosidad de 0.3 y cambiando de variable para que sea la deformación en vez del peso específico es la siguiente. Esta expresión es la que se utilizarán en los cálculos de aplicación.

$$P \text{ (MPa)} = \exp \left[0.23 \cdot \left(\frac{10.5}{\frac{\varepsilon_v(\%)}{100 \cdot 0.3} + 1} - 0.36 \right) \right] - 1$$



Ley de comportamiento de la resina en el terreno

Aparte, es necesario conocer el radio inicial de la cavidad para modelizar en el programa. Suponiendo que el bulbo de inyección adopta forma esférica el radio inicial de la cavidad se calcula:

$$R = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot M_0 \cdot g}{4 \cdot \pi \cdot n \cdot \gamma_0}}$$

M_0 la masa de resina líquida inyectada.

g la aceleración de la gravedad.

n la porosidad del terreno.

γ_0 el peso específico inicial de la resina líquida.

3. APLICACIÓN

3.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo aplicaremos la formulación a un problema tipo de inyección de desplazamiento. Plantearemos un caso y lo resolveremos con ayuda de la teoría que hemos visto y siguiendo los pasos establecidos en el capítulo anterior. A continuación planteamos el problema. No es un problema real, sino un problema tipo que refleje de una manera representativa la aplicación de los conocimientos estudiados en este trabajo.

La cimentación de una estructura destinada a un uso comercial se tiene una zapata con un asiento excesivo se va a recalzar mediante inyecciones de resina expansiva. El desplazamiento de esa zapata con respecto al resto de la cimentación está provocando grietas en muros, techos y tabiques interiores. Debemos levantar la zapata entre 40 y 45 mm para que se nivele con el resto de la cimentación.

En este apartado nos encargamos de la planificación de las inyecciones para que se ejecuten en obra.

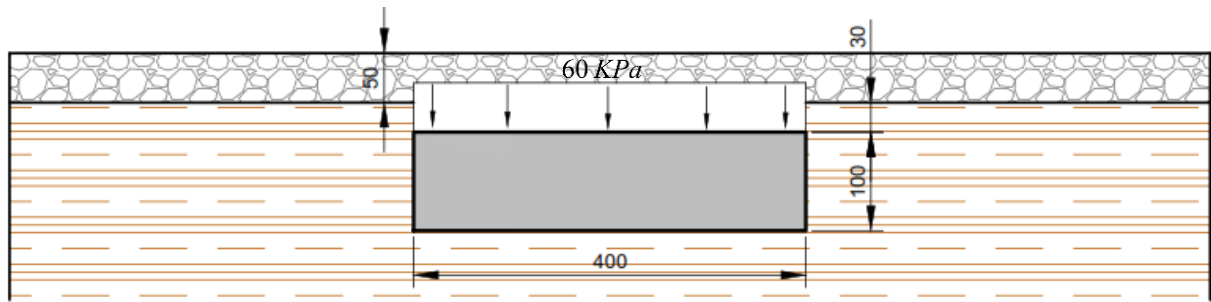
Primero pedimos que se realice en las proximidades un ensayo presiométrico y que se nos proporcione información acerca de las dimensiones de la zapata, la carga que soporta y otros elementos cercanos como plantas de sótano, tuberías, etc. Al cabo de unos días vienen los resultados. En este caso, tomaremos el suelo caracterizado en el apartado 2.2.

Con esa información modelamos el problema en PLAXIS y los parámetros geotécnicos del terreno los sacamos de las correlaciones del ensayo. Planteamos una solución de inyección y calculamos la curva presión-deformación. Con la curva de comportamiento de la resina que utilizamos hallamos la deformación que experimenta la resina cuando se llega a la deformación de equilibrio.

El valor de equilibrio de la deformación lo introducimos en el programa y del resultado sacamos el asiento que recupera la zapata. Si no es adecuado, modificamos el planteamiento inicial de inyección.

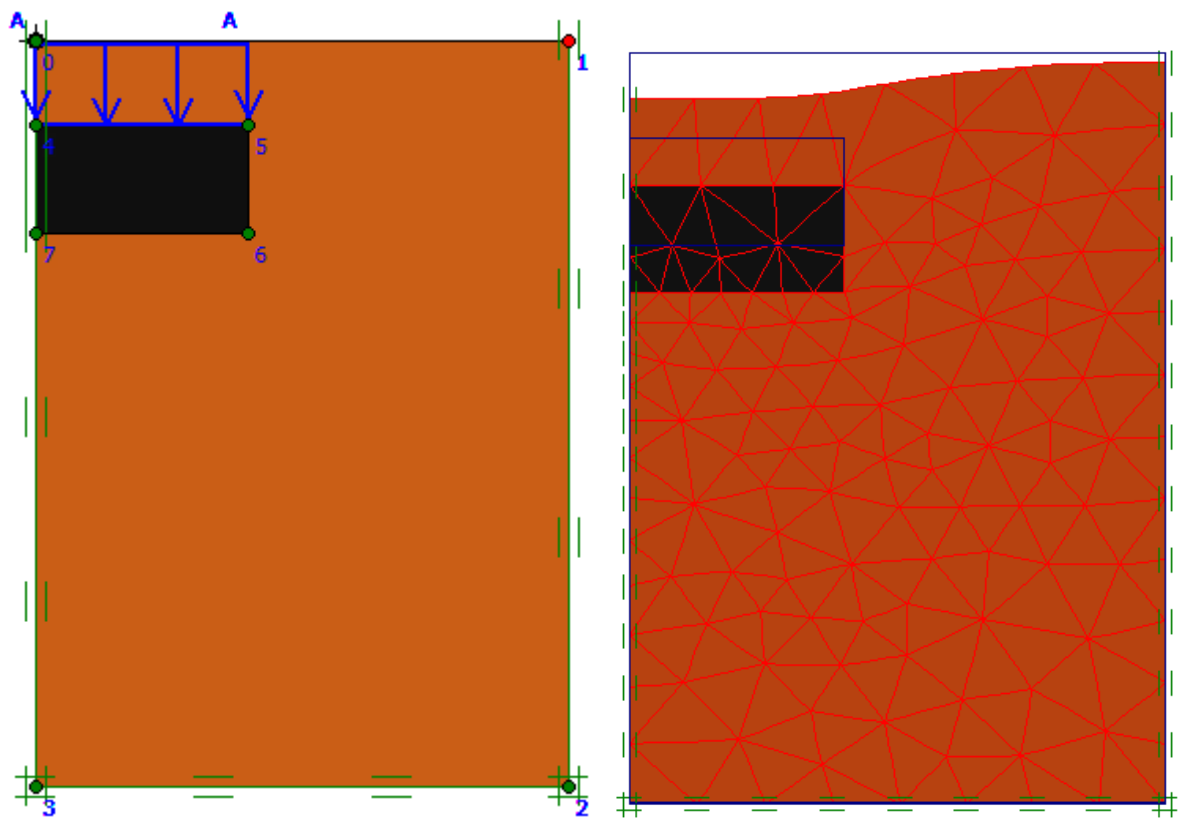
3.2. MODELADO DEL PROBLEMA EN PLAXIS

La zapata es cuadrada de 4 m de lado y 1 m de canto. Está enterrada cubierta por 30 cm de suelo y 50 cm de grava formando el forjado sanitario. Está sometida a una presión de 60 KPa (peso de hormigón incluido) y necesitamos levantarla entre 40 y 45 mm.



Geometría del problema

Este problema consta de tres dimensiones. Sin embargo, al tratarse de una zapata aislada con carga uniformemente distribuida el eje central cumple las hipótesis de axisimetría, con lo que podemos resolver el problema bidimensional equivalente. De las dos opciones de cálculo (deformación plana y axisimétrico) tenemos que elegir axisimétrico porque es la que mejor se adapta a nuestro caso. La planificación de inyecciones deberá cumplir la hipótesis de axisimetría: cualquier plano que pase por el eje central del problema es plano de simetría. El modelo de la zapata sería entonces una zapata circular, aunque es una aproximación teórica.



Modelo en PLAXIS de la situación inicial

Aproximación de la deformación real del terreno

3.3. CARACTERIZACIÓN DEL TERRENO

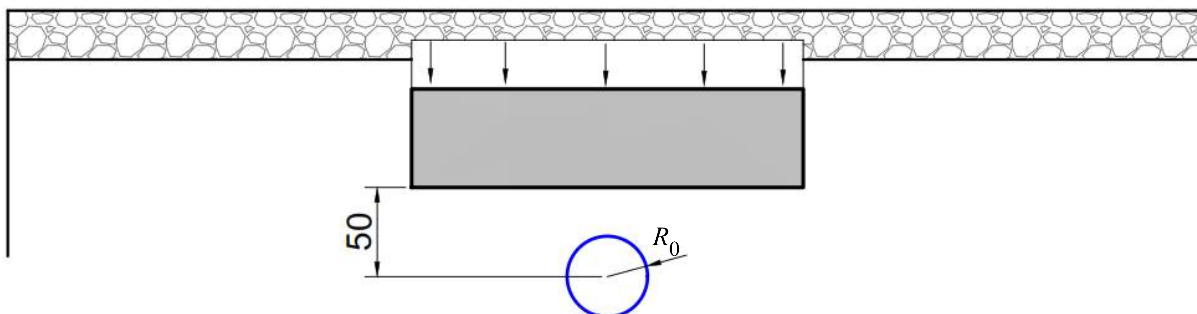
Tenemos los resultados del ensayo presiométrico. Supondremos que son los que se tienen en el apartado 2.2. sobre caracterización del suelo con ensayo presiométrico. La forma de trabajar con los datos del ensayo se describe detalladamente en dicho apartado. Para el hormigón de la zapata, señalamos material elástico lineal no poroso con un módulo elástico de 21 GPa y peso específico 25 KN/m³. Se obtuvieron los siguientes valores de los parámetros necesarios del suelo:

$E(KPa)$	ν	$\phi(^{\circ})$	$c_u(KPa)$	$\psi(^{\circ})$
1759	0,33	39	47	8

Valores de los parámetros geotécnicos de suelo

3.4. INYECCIONES Y MODELADO EN PLAXIS

3.4.1. PRIMERA PROPUESTA DE SOLUCIÓN



Estudiaremos los resultados de realizar únicamente una inyección a una profundidad de 2,3 m (50 cm debajo de la zapata). Las características de la resina se corresponden a la resina de poliuretano URETEK con una densidad inicial de 10,5 KN/m³. Esta resina forma en el terreno un bulbo con forma esférica de radio inicial:

$$R_0 = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot M_0 \cdot g}{4 \cdot \pi \cdot n \cdot \gamma_0}}$$

M_0 la masa de resina líquida inyectada.

g la aceleración de la gravedad.

n la porosidad del terreno.

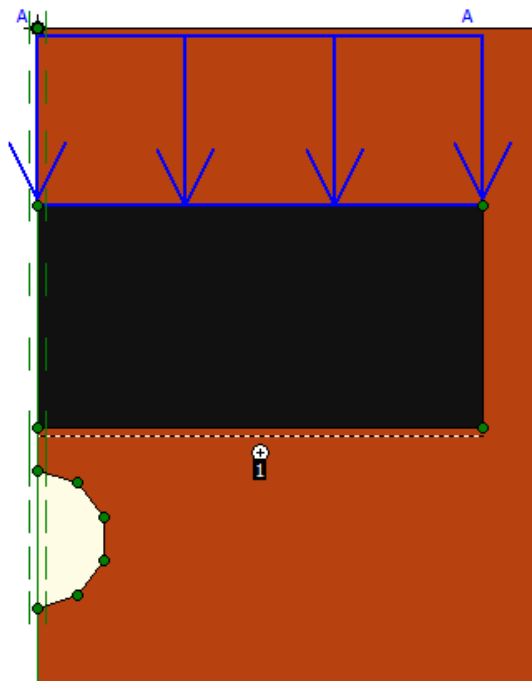
γ_0 el peso específico inicial de la resina líquida.

La cavidad en PLAXIS no podemos modelizarla con forma circular porque las cargas de presión solamente se pueden aplicar sobre líneas rectas, así que deberíamos aproximar la circunferencia del modelo por una poligonal. Este proceso lo simplificamos con una cavidad esférica a la que le imponemos la deformación y obtenemos la curva de presiones mediante uno o varios puntos representativos del borde de la cavidad. Comenzamos modelando la cavidad mediante una poligonal y aplicamos carga distribuida.

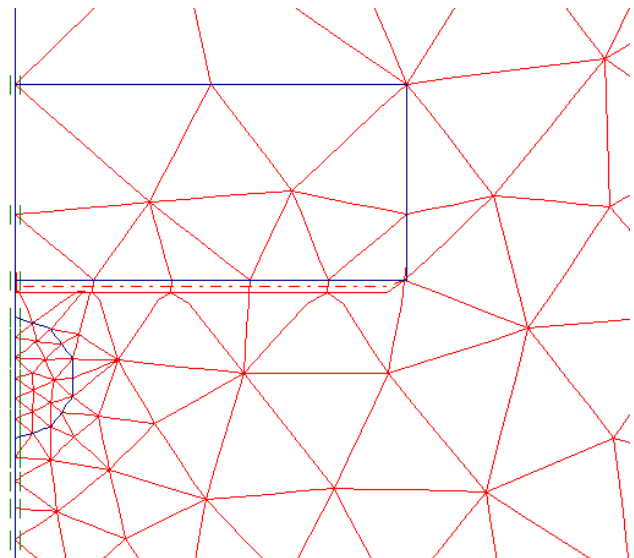
3.4.1.1. INYECCIÓN DE 40 Kg

Como primera opción, probaremos con una inyección de 40 Kg de resina a una profundidad de 2,3 m (50 cm debajo de la zapata). Adoptando un valor de 0,3 para la porosidad del suelo tenemos un radio inicial de cavidad esférica:

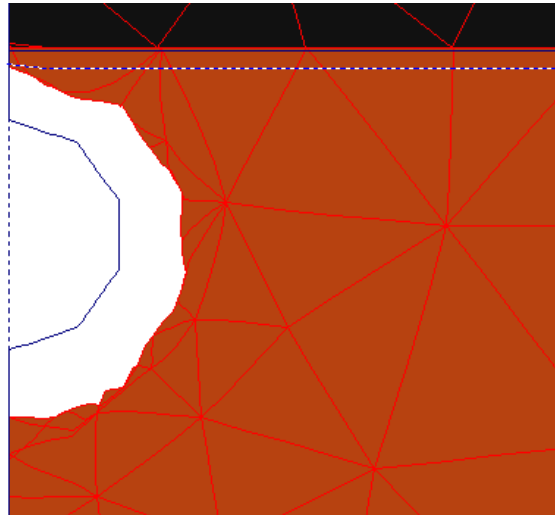
$$R = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot M_0 \cdot g}{4 \cdot \pi \cdot n \cdot \gamma_0}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 40 \cdot 9.81}{4 \cdot \pi \cdot 0.3 \cdot 10.5 \cdot 10^3}} = 0.310 \text{ m}$$



Detalle de la cavidad bajo la zapata



Mallado del problema



Deformada de la cavidad

Para calcular la curva presión-desplazamiento aplicamos una presión normal al borde de la cavidad de, por ejemplo, 800 KPa (debemos alcanzar la presión de equilibrio. Si no se alcanza, hay que aumentar este valor) y señalamos puntos en el entorno de la circunferencia para graficar el desplazamiento. Señalamos los puntos superior, inferior y extremo derecho del borde de la cavidad para sacar el desplazamiento medio y así una aproximación de la deformación volumétrica. Señalamos también un punto central de la zapata para obtener el levantamiento en la posición de equilibrio.

Para simular mejor el estado inicial de tensiones en el terreno, se tomará como situación inicial la deformada que calcula el programa solamente teniendo la zapata cargada. Con esa situación los desplazamientos se hacen cero y a partir de ahí calculamos los incrementos debidos a la expansión de la cavidad.

El incremento medio de radio de la cavidad lo calcularemos con la media de los desplazamientos de los puntos.

$$\Delta R = \frac{u_A + u_B + u_C}{3}$$

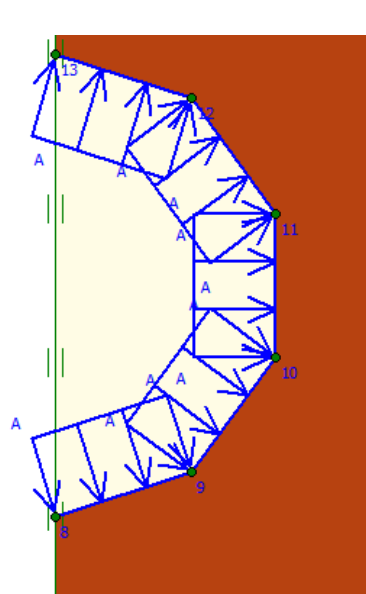
u_A es el desplazamiento vertical del punto A.

u_B es el desplazamiento horizontal del punto B.

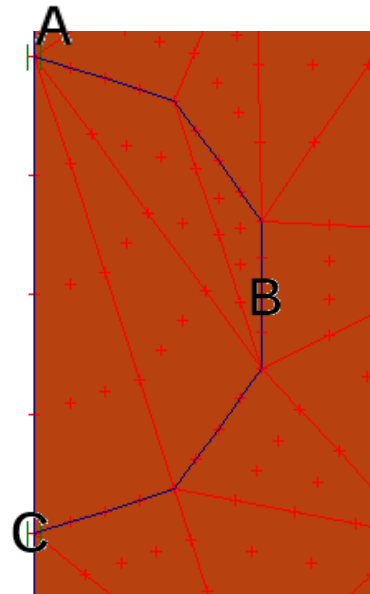
u_C es el desplazamiento vertical del punto C.

Con el valor medio del incremento de radio ΔR calculamos la deformación volumétrica y ya tenemos la curva presión-deformación de la cavidad. El punto de equilibrio lo buscamos en el punto de corte con la ley de comportamiento de la resina.

$$\epsilon_v = \frac{\Delta V}{V_0} = \frac{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R_1^3 - \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R_0^3}{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R_0^3} = \left(\frac{R_1}{R_0} \right)^3 - 1 = \left(\frac{\Delta R}{R_0} + 1 \right)^3 - 1$$

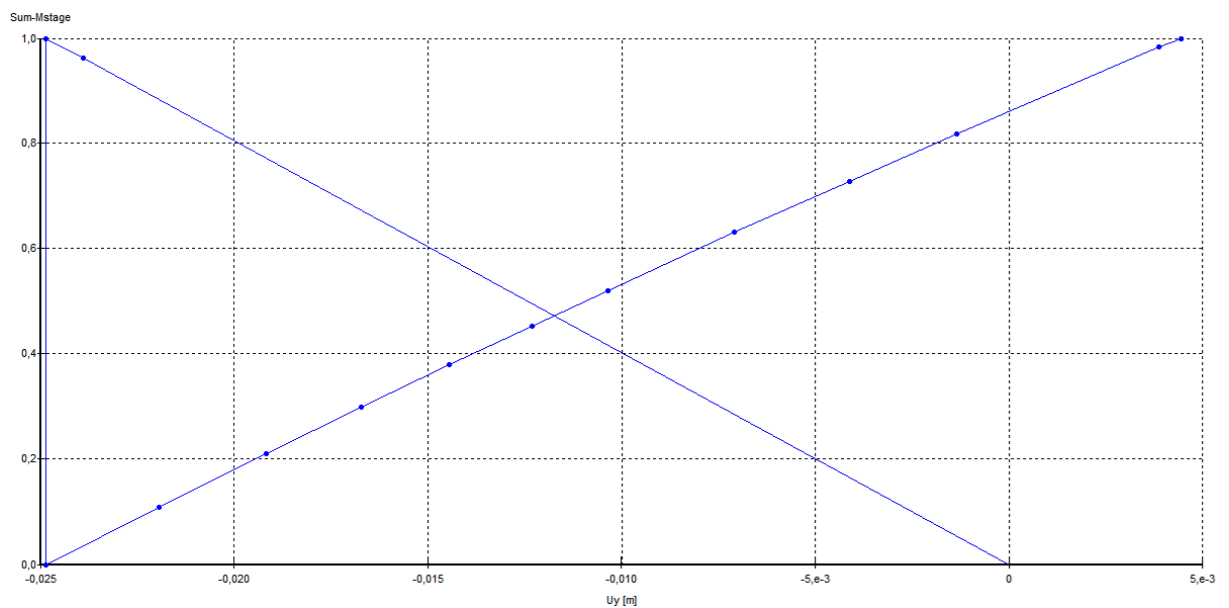


Presión de expansión



Puntos señalados en el borde de la cavidad

Calculamos. Obtenemos lo siguientes resultados:

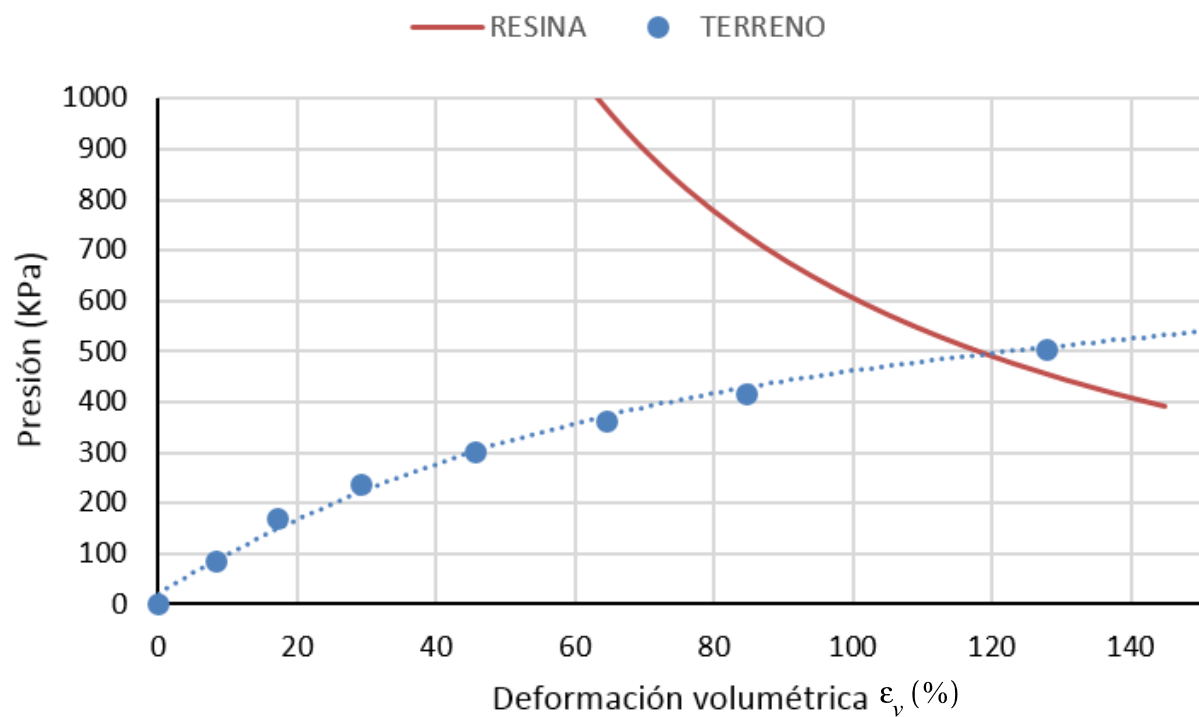

Curva presión-levantamiento δ de la zapata

Vemos en la figura cómo efectivamente hay un levantamiento positivo de la zapata: hay una recuperación de asiento. Parte de cero a un desplazamiento negativo y luego con la expansión de la cavidad, la zapata asciende. Sea δ éste levantamiento.

P (KPa)	u_A (mm)	u_B (mm)	u_C (mm)	ΔR (mm)	ϵ_v (%)	δ (mm)
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
88	8,1	10,6	6,5	8,4	8,3	2,9
169	15,0	21,8	13,3	16,7	17,1	5,7

P (KPa)	u_A (mm)	u_B (mm)	u_C (mm)	ΔR (mm)	ϵ_v (%)	δ (mm)
239	26,1	33,0	23,9	27,6	29,2	8,1
303	39,8	44,6	39,5	41,3	45,5	10,4
362	53,1	56,3	58,6	56,0	64,6	12,5
416	65,5	67,7	77,6	70,3	84,6	14,5
505	89,5	88,4	115,8	97,9	127,8	17,8
583	112,0	108,1	153,9	124,7	175,6	20,7
655	130,6	127,4	192,1	150,0	226,7	23,5
786	164,0	166,2	268,4	199,5	344,1	28,7
800	167,8	170,8	276,4	205,0	358,5	29,3

Con el valor de presión y deformación volumétrica podemos graficar la curva presión-deformación del terreno y hallar el equilibrio a través del punto de corte con la curva de comportamiento de la resina.



Para calcular el punto de corte, aproximamos la curva del terreno con una expresión polinómica de cuarto grado: $R^2 = 0.998$ (representada por la línea de trazo discontinuo).

$$P(KPa) = -2.5 \cdot 10^{-7} \cdot \epsilon_v^4(\%) + 2.0 \cdot 10^{-4} \cdot \epsilon_v^3(\%) - 5.7 \cdot 10^{-2} \cdot \epsilon_v^2(\%) + 8.4 \cdot \epsilon_v(\%) + 2.1 \cdot 10$$

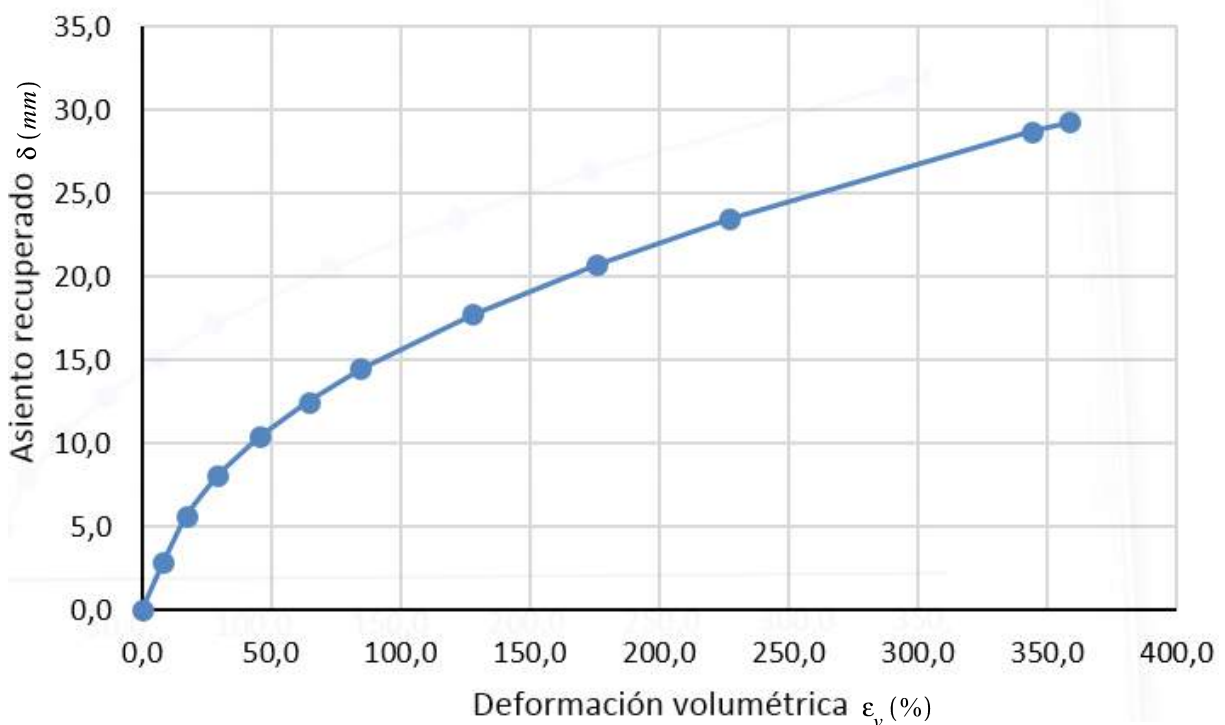
Igualando esta expresión a la ley de comportamiento de la resina, tenemos el equilibrio.

$$P \text{ (MPa)} = \exp \left[0.23 \cdot \left(\frac{10.5}{\frac{\varepsilon_v(\%)}{100 \cdot 0.3} + 1} - 0.36 \right) \right] - 1 \quad (\text{Ley de comportamiento de la resina})$$

$P_{eq} \text{ (KPa)}$	$\varepsilon_{v, eq} (\%)$
499,5	118,5

En la figura siguiente se representan las dos últimas columnas de la tabla anterior de resultados, teniendo la curva que relaciona el levantamiento de la zapata en función de la deformación volumétrica de la cavidad. Interpolamos entre los valores de la tabla para hallar la recuperación de asiento real: la alcanzada en el punto de equilibrio, esto es, la correspondiente a una deformación del 118,5 %.

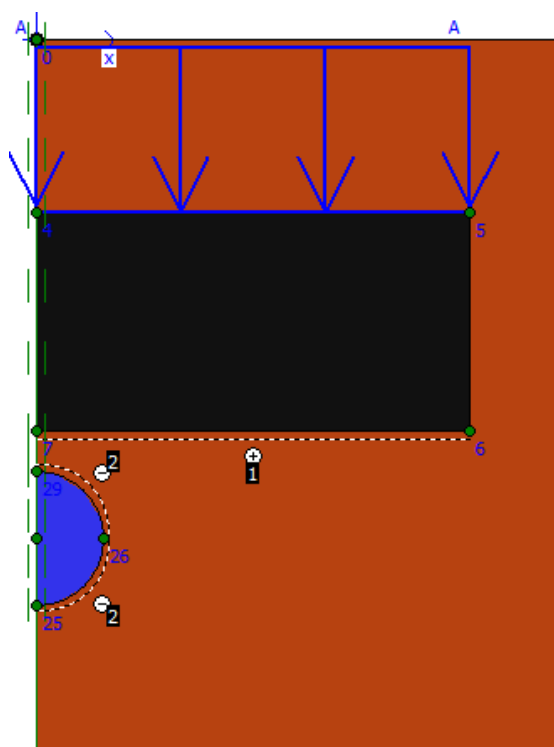
$$\delta_{eq} = 14.5 + \frac{17.8 - 14.5}{127.8 - 84.6} \cdot (118.5 - 84.6) = 17.1 \text{ mm}$$



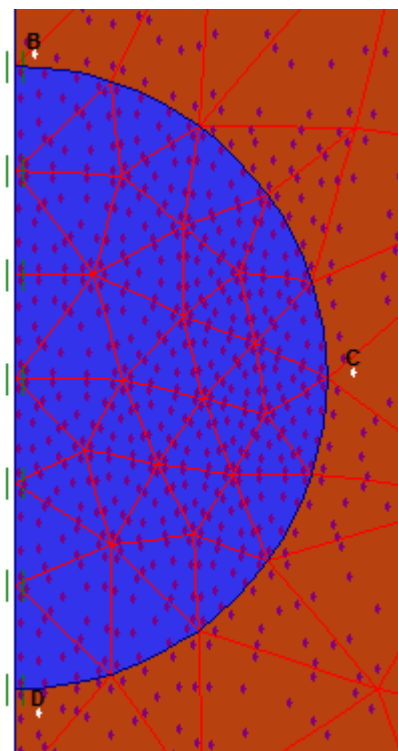
El equilibrio se alcanza para una deformación volumétrica del 119 % y una presión de expansión igual a 500 KPa. Finalmente, buscamos el levantamiento producido en la superficie para este valor de presión. El valor del asiento recuperado es 17 mm. El valor obtenido no es el resultado que buscábamos. Debemos proponer otra solución.

MODELADO DE LA INYECCIÓN CON CIRCUNFERENCIA Y DEFORMACIÓN IMPUESTA

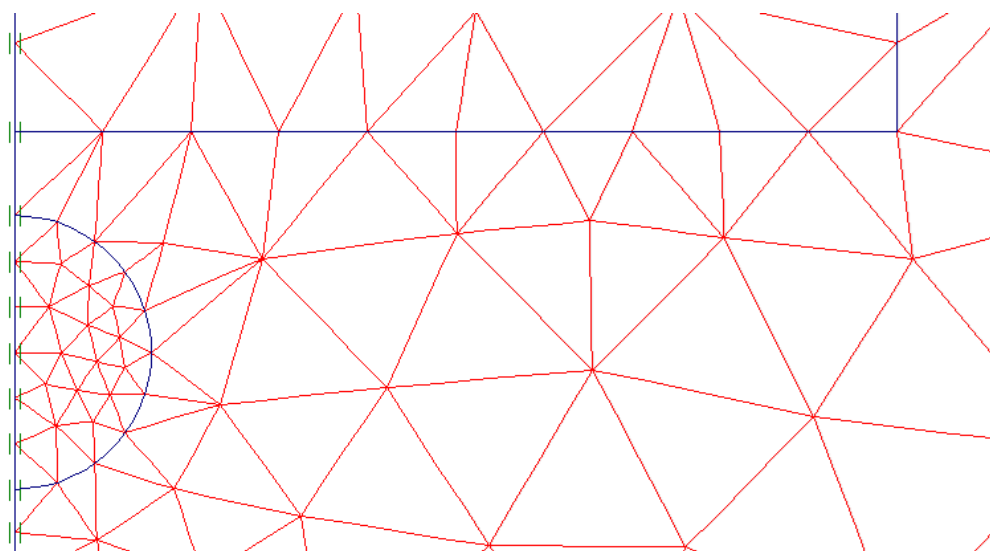
La cavidad la modelizamos con una esfera y le imponemos una deformación. Señalamos en el contorno varios puntos de tensión para graficar la curva presión-deformación del terreno.



Detalle de la cavidad bajo la zapata



Puntos elegidos para calcular la presión

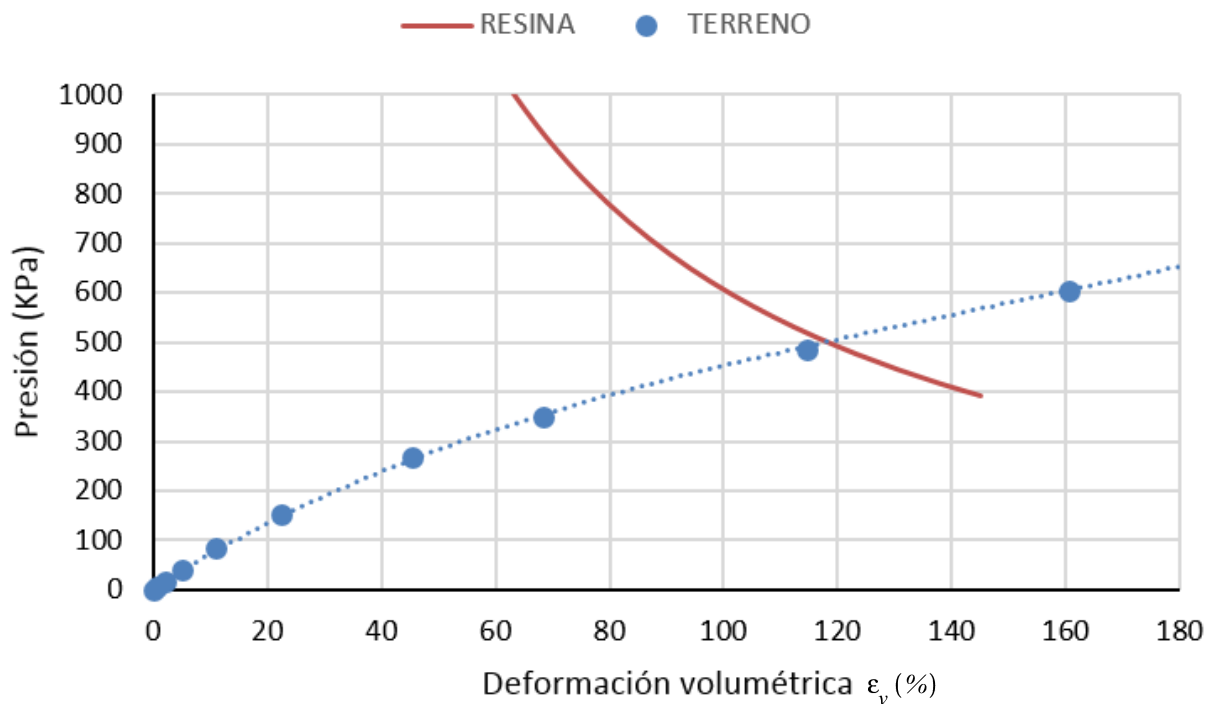


Detalle mallado del modelo

En este caso imponemos un valor de deformación. Queremos comparar las dos formas de proceder: imponiendo carga o deformación. Para facilitar esta comparación, como antes

elegimos 800 KPa, ahora imponemos deformación del 360 % porque es el que le corresponde según los resultados anteriores.

$\epsilon_v (\%)$	$P (KPa)$	$\delta (mm)$
0	0	0,0
1	6	0,0
2	17	0,1
5	39	0,2
11	85	0,4
22	153	0,8
45	269	1,5
68	351	2,3
114	484	3,9
161	603	5,4
207	729	7,1
253	853	8,9
299	966	10,8
345	1059	12,9
360	1082	13,6



Para calcular el punto de corte, aproximamos la curva del terreno con una expresión polinómica de cuarto grado: $R^2 = 0.9998$ (representada por la línea de trazo discontinuo).

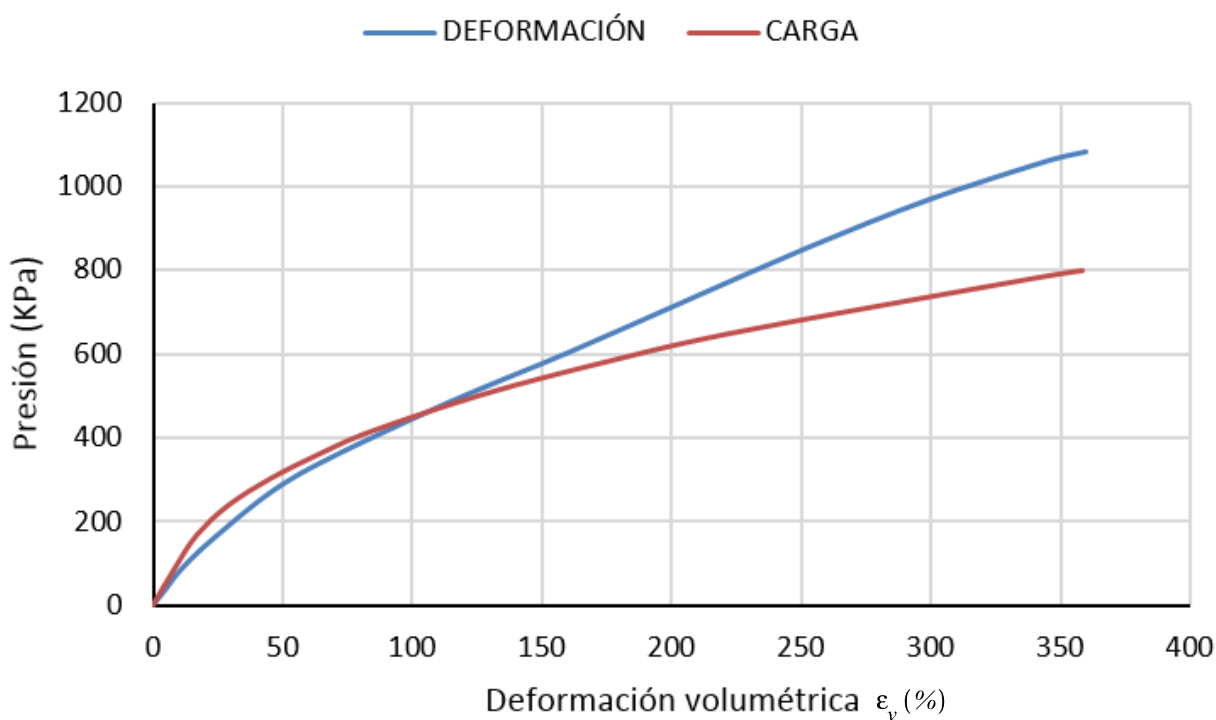
$$P(KPa) = -1.780 \cdot 10^{-7} \cdot \epsilon_v^4 (\%) + 1.429 \cdot 10^{-4} \cdot \epsilon_v^3 (\%) - 4.029 \cdot 10^{-2} \cdot \epsilon_v^2 (\%) + 7.269 \cdot \epsilon_v (\%) + 3.847$$

Igualando esta expresión a la ley de comportamiento de la resina, tenemos el equilibrio.

$$P \text{ (MPa)} = \exp \left[0.23 \cdot \left(\frac{10.5}{\frac{\varepsilon_v(\%)}{100 \cdot 0.3} + 1} - 0.36 \right) \right] - 1 \quad (\text{Ley de comportamiento de la resina})$$

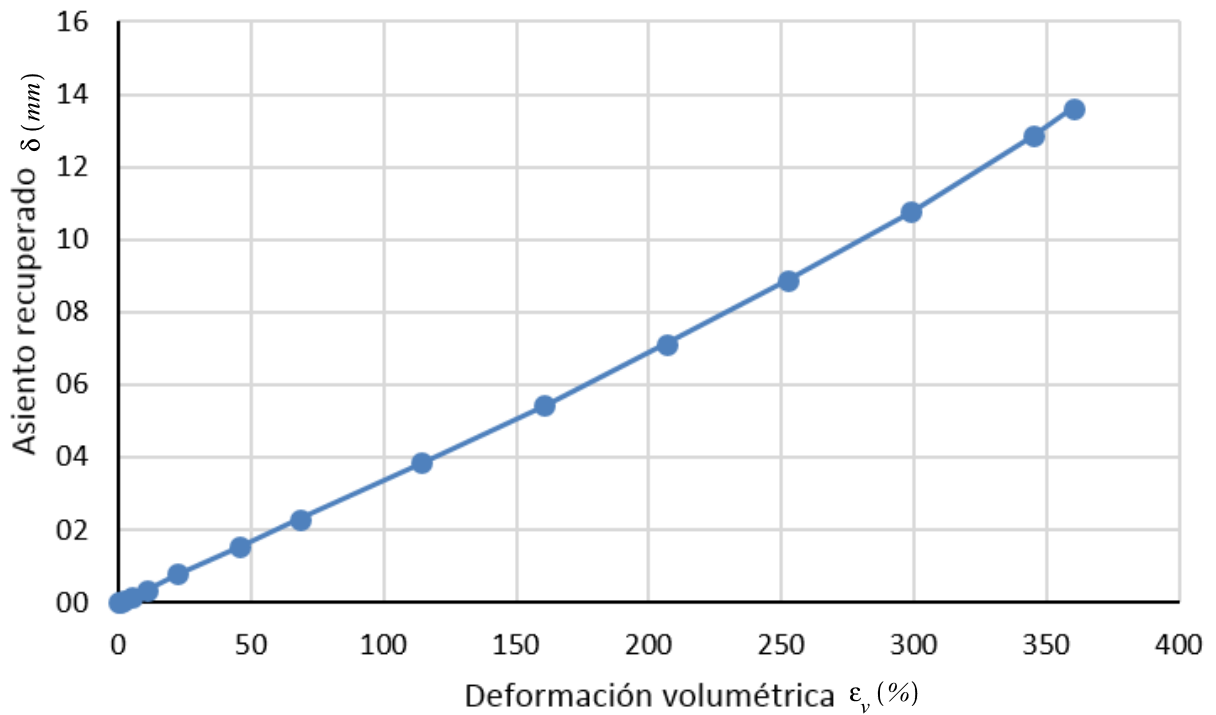
$P_{eq} \text{ (KPa)}$	$\varepsilon_{v, eq} (\%)$
501,2	118,1

En la siguiente figura comparamos las curvas presión-deformación del terreno obtenidas por ambos métodos. Se observa que los resultados son muy parecidos hasta deformaciones del 150 %. Efectivamente hemos obtenido valores de equilibrio casi idénticos. Si, por el contrario, el punto de equilibrio hubiera estado más allá del 150 % deberíamos pensar detenidamente cuál de las dos formas es la más acertada.

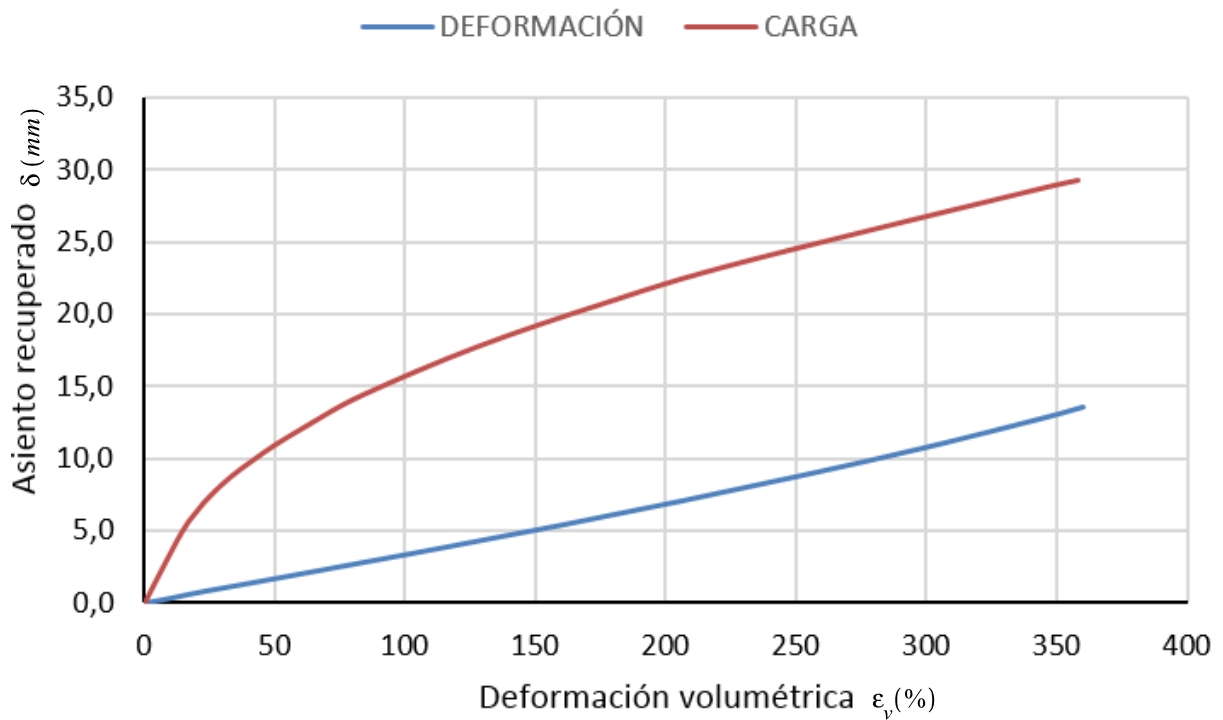


Buscamos ahora el asiento recuperado. Con los valores de la tabla, interpolamos para hallar el levantamiento correspondiente a 118,1 %:

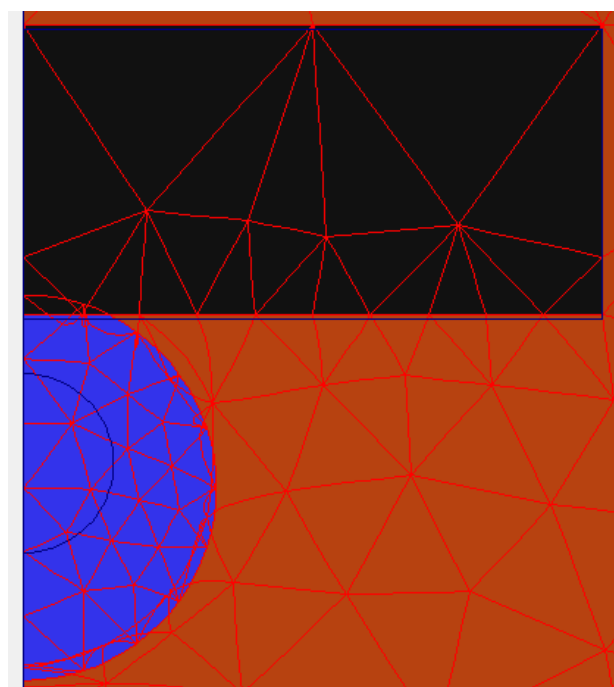
$$\delta = 3.9 + \frac{5.4 - 3.9}{161 - 114} \cdot (118.1 - 114) = 4 \text{ mm}$$



Si la ley de comportamiento del terreno era la misma independientemente de cómo la obtuviéramos, no ocurre igual con la curva de asiento recuperado. Los resultados no tienen nada que ver. Comparamos ambas curvas:



La diferencia de resultados se debe a que en realidad PLAXIS no trabaja bien cuando se imponen grandes deformaciones a una cavidad. Por ejemplo, no tiene en cuenta el contacto que pudiera darse en este caso entre la resina de la cavidad y el hormigón de la zapata. En este modelo, cavidad y zapata están separadas 20 cm. Introduciendo una elevada deformación, por ejemplo del 350 % obtenemos lo siguiente (se muestra a escala real):



La resina "atraviesa" el hormigón a deformaciones suficientemente elevadas.

Además, parece que ignora el terreno existente en esos 20 cm que separan ambos materiales. Para pequeñas deformaciones pueden ser válidos los resultados obtenidos al imponer una deformación volumétrica a una cavidad, pero no es así para grandes deformaciones. Debemos utilizar la carga distribuida. El principal inconveniente de esta opción es que no se puede aplicar sobre una línea curva. Lo podemos solucionar creando una poligonal o aproximar la cavidad mediante algún tipo de sección rectangular.

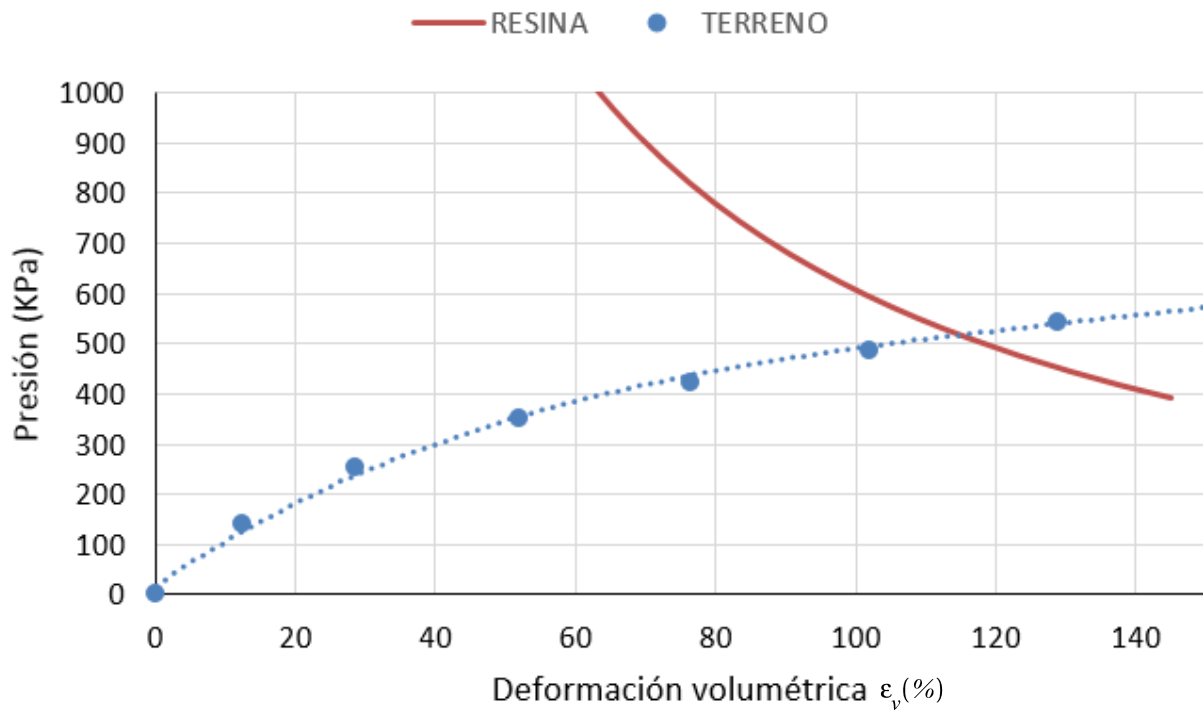
La expansión de la resina hay que modelarla mediante la aplicación de una fuerza distribuida en el contorno de la cavidad. No es válido, debido a las grandes deformaciones, crear una cavidad circular e imponerle una deformación. Aparte, tomando válido el resultado obtenido de aplicar la carga distribuida, el levantamiento recuperado se estima en 17 mm. No es adecuado (buscamos entre 40 y 45 mm), por lo que debemos planificar las inyecciones de otra forma.

3.4.1.2. INYECCIÓN DE 60 Kg

Si inyectamos mayor cantidad de resina, esperamos un mayor levantamiento de la zapata. Probamos a inyectar 60 Kg. Entonces, el radio inicial del bulbo de resina-terreno es:

$$R_0 = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot M_0 \cdot g}{4 \cdot \pi \cdot n \cdot \gamma_0}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 60 \cdot 9.81}{4 \cdot \pi \cdot 0.3 \cdot 10.5 \cdot 10^3}} = 0.355 \text{ m}$$

P (KPa)	u_A (mm)	u_B (mm)	u_C (mm)	ΔR (mm)	ϵ_v (%)	δ (mm)
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
141	10,2	20,2	12,0	14,1	12,4	5,0
255	22,3	40,5	30,2	31,0	28,6	9,1
351	37,0	60,8	61,9	53,2	52,1	12,8
424	49,8	78,0	93,8	73,9	76,3	15,6
488	61,7	94,2	125,7	93,8	102,1	18,2
544	71,7	109,3	157,5	112,8	128,9	20,5
645	87,3	139,1	221,3	149,2	186,5	24,8
740	101,7	169,3	285,0	185,3	252,6	29,0
800	111,4	189,5	324,5	208,5	299,9	31,8



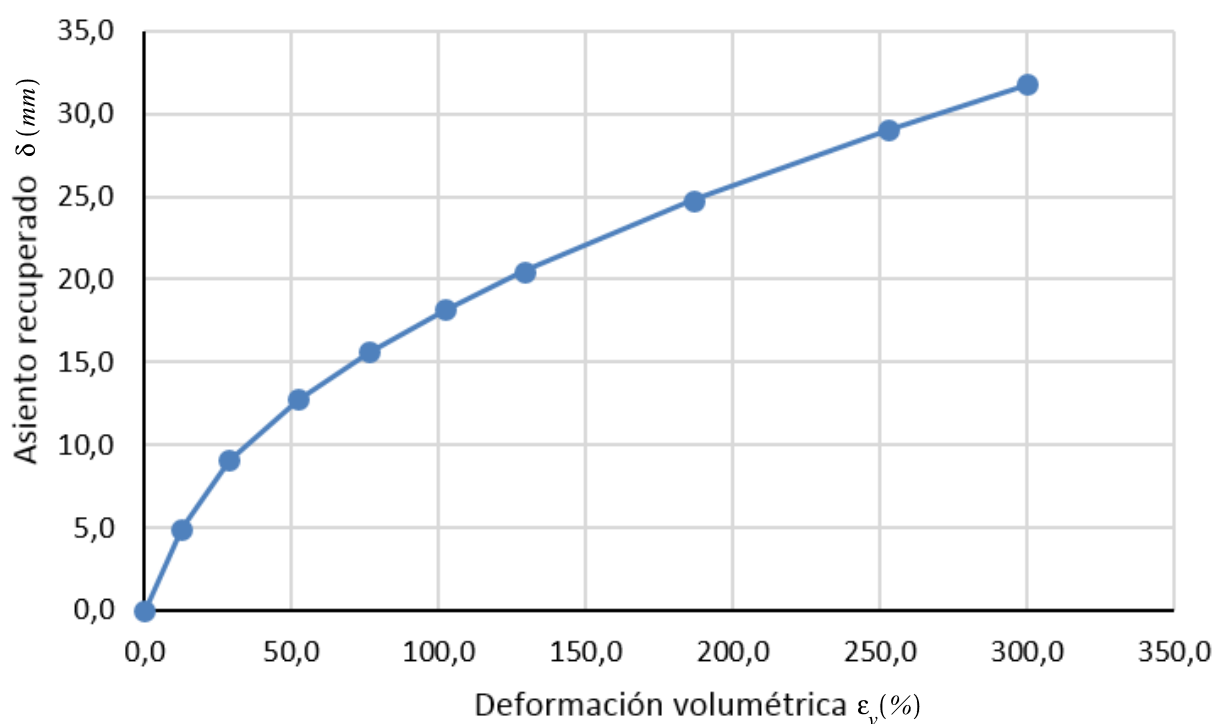
Aproximamos la curva del terreno con una expresión polinómica de 4 grado obteniendo:
 $R^2 = 0.9976$

$$P(KPa) = -3.83 \cdot 10^{-7} \cdot \epsilon_v^4(\%) + 2.77 \cdot 10^{-4} \cdot \epsilon_v^3(\%) - 7.19 \cdot 10^{-2} \cdot \epsilon_v^2(\%) + 9.53 \cdot \epsilon_v(\%) + 1.80 \cdot 10^1$$

La intersección con la curva de la resina es el punto de equilibrio:

$P_{eq} (KPa)$	$\epsilon_{v, eq}(\%)$
517,3	115,0

En el punto de equilibrio la recuperación de asiento es (interpolamos los valores de la tabla de resultados): 19,3 mm. No es suficiente y debemos plantear otra propuesta de solución.

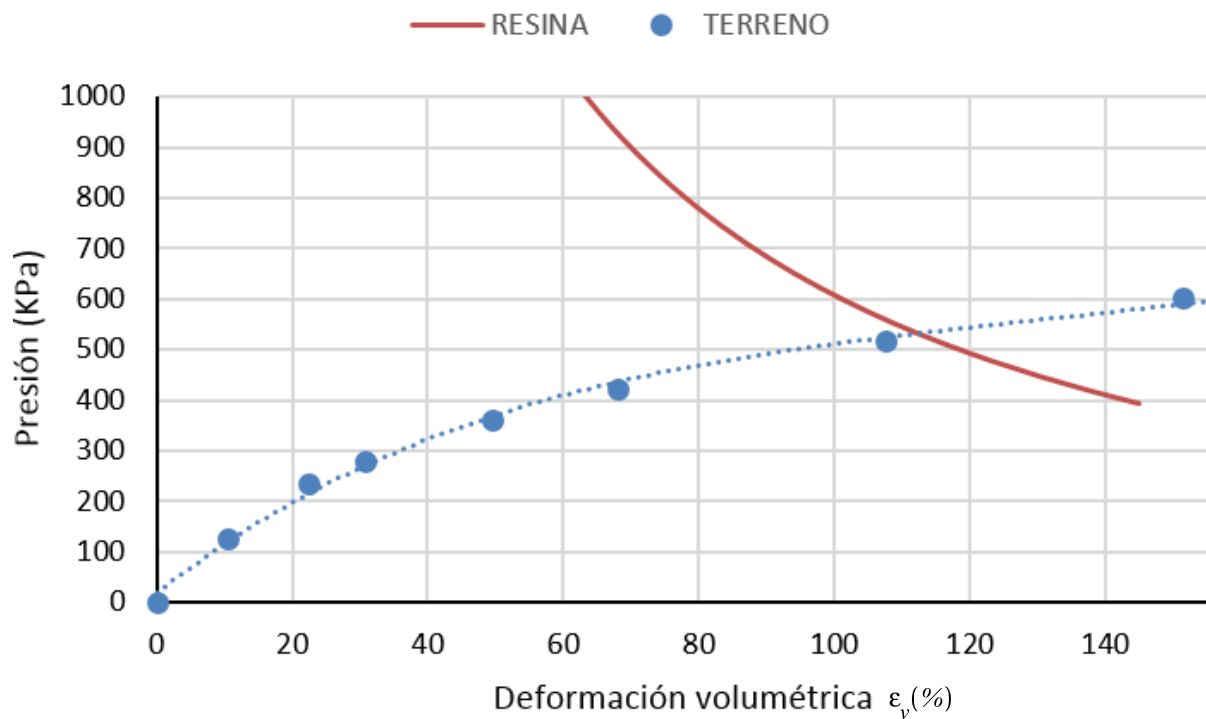


3.4.1.3. INYECCIÓN DE 90 Kg

Con una inyección de 90 Kg tenemos un bulbo esférico de radio 406 mm.

$$R_0 = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot M_0 \cdot g}{4 \cdot \pi \cdot n \cdot \gamma_0}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 90 \cdot 9.81}{4 \cdot \pi \cdot 0.3 \cdot 10.5 \cdot 10^3}} = 0.406 \text{ m}$$

P (KPa)	u_A (mm)	u_B (mm)	u_C (mm)	ΔR (mm)	ϵ_v (%)	δ (mm)
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
128	7,9	20,4	12,8	13,7	10,5	4,8
234	16,0	40,9	27,9	28,3	22,4	8,9
280	20,1	51,1	42,7	38,0	30,8	10,8
362	28,2	70,9	75,7	58,3	49,5	14,2
421	34,5	86,4	108,9	76,6	67,9	16,7
517	45,6	114,4	175,3	111,8	107,4	21,1
602	55,7	140,8	241,7	146,1	151,4	25,1
682	66,0	167,8	308,0	180,6	201,6	29,1
725	71,7	183,2	341,1	198,7	230,3	31,4
768	77,5	198,9	374,2	216,8	261,0	33,7
800	81,7	211,3	398,7	230,6	285,5	35,6



Para calcular el punto de corte y así hallar cuándo se alcanza el equilibrio, aproximamos la curva de comportamiento del terreno con una expresión polinómica de cuarto grado obteniendo: $R^2 = 0.9980$

$$P(KPa) = -4.91 \cdot 10^{-7} \cdot \epsilon_v^4(\%) + 3.43 \cdot 10^{-4} \cdot \epsilon_v^3(\%) - 8.50 \cdot 10^{-2} \cdot \epsilon_v^2(\%) + 1.05 \cdot 10^1 \cdot \epsilon_v(\%) + 1.84 \cdot 10^1$$

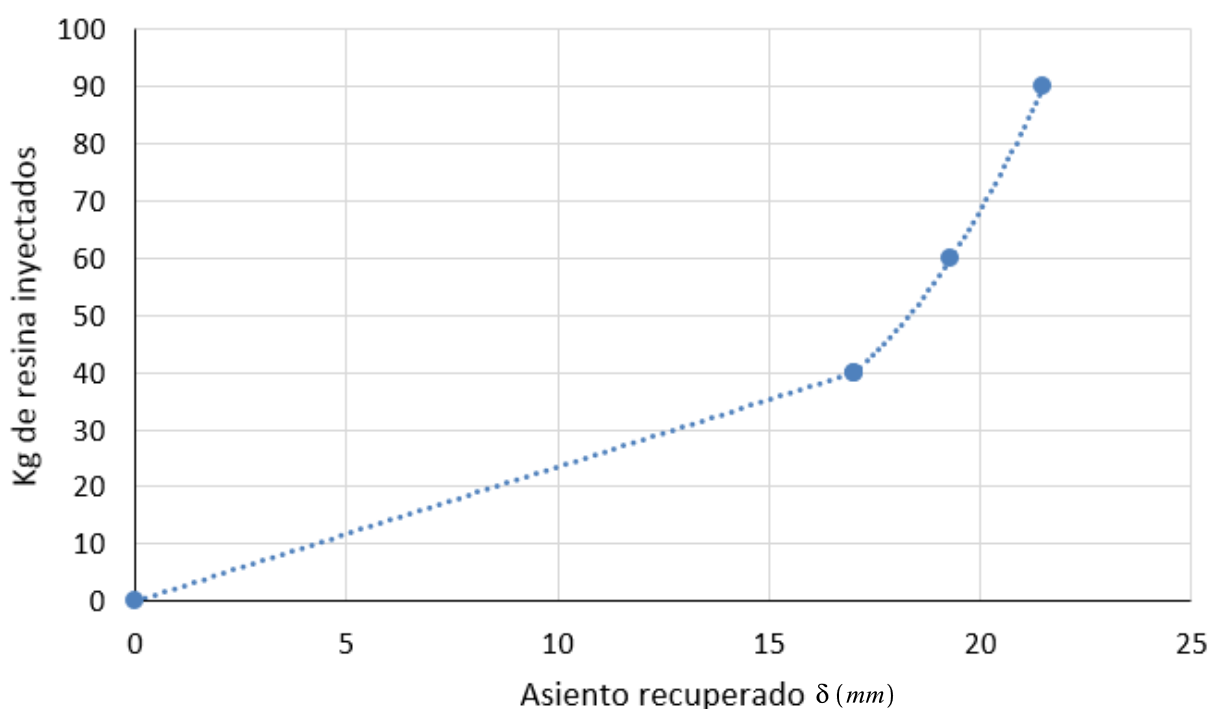
P_{eq} (KPa)	$\epsilon_{v, eq}$ (%)
532,9	112,1

Interpolamos con los valores de la tabla anterior de resultados para hallar el levantamiento correspondiente al punto de equilibrio: 21,5 mm. No es suficiente y debemos plantear otra propuesta de solución.

3.4.1.4. RESULTADOS

Con estos resultados podemos estimar la relación entre cantidad de resina inyectada y recuperación del asiento.

Kg resina	δ (mm)
0	0
40	17
60	19,3
90	21,5



Interpolamos los resultados. La interpolación de los tres puntos calculados se ha hecho con un polinomio de segundo grado. Para los valores menores, podemos aproximar la relación entre asiento recuperado y cantidad de resina inyectada con una expresión lineal asumiendo que si no inyectamos resina no se recupera asiento. Sin embargo, esta interpolación lineal de los valores menores a los calculados no es necesaria porque el valor que se quiere conseguir va

más allá de los resultados obtenidos. La expresión de la interpolación ($R^2 = 1$) queda de la siguiente forma:

$$Resina (Kg) = \begin{cases} 2.3529 \cdot \delta (mm) & \delta < 17 mm \\ 1.10 \cdot \delta^2 (mm) - 3.12 \cdot 10 \cdot \delta (mm) + 2.52 \cdot 10^2 & \delta > 17 mm \end{cases}$$

La cantidad de resina que es necesario inyectar para conseguir el levantamiento buscado (entre 40 y 45 mm) se estima en:

$$764 Kg < Resina total < 1076 Kg$$

Cantidad muy lejos del rango normal de cantidades por inyección. No se puede inyectar tanta resina de una vez en un punto. Este elevado valor indica es que esta propuesta de solución no es adecuada. Vamos a probar a aumentar el número de puntos de inyección.

3.4.2. SEGUNDA PROPUESTA DE SOLUCIÓN

Estudiaremos el resultado de realizar 3 inyecciones en 3 niveles de profundidad. La primera inyección será a la misma profundidad que en el apartado anterior: 2,3 m (50 cm por debajo de la zapata) y el resto se separarán 70 cm entre puntos de inyección. La primera inyección se realiza a 2,3 m, la segunda a 3 m y la tercera a 3,7 m de profundidad. En este caso, estudiaremos inyecciones de 30, 60 y 90 kg. Recordamos que por cada inyección se forma en el terreno un bulbo aproximadamente esférico de radio:

$$R_0 = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot M_0 \cdot g}{4 \cdot \pi \cdot n \cdot \gamma_0}}$$

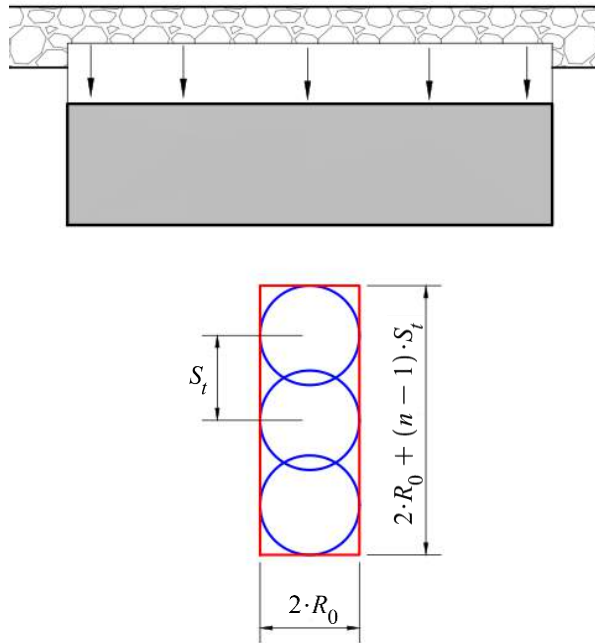
M_0 la masa de resina líquida inyectada.

g la aceleración de la gravedad.

n la porosidad del terreno.

γ_0 el peso específico inicial de la resina líquida.

Para simplificar los cálculos, como las inyecciones se sitúan muy próximas unas de otras, estudiaremos el comportamiento de los tres bulbos como un único bulbo cilíndrico de radio igual al radio de la cavidad y largo igual a la longitud ocupada por las tres inyecciones. Sea R_0 el radio inicial de la cavidad y S_t la separación entre las n inyecciones. Entonces el cilindro equivalente es de radio R_0 y altura $2 \cdot R_0 + (n - 1) \cdot S_t$



Columna de inyecciones bajo la zapata

En PLAXIS introducimos el cilindro “envolvente”. Vemos que es buena aproximación el tomar el cilindro envolvente para una columna de varias inyecciones: simplifica el problema y permite aplicar carga distribuida fácilmente. La deformación volumétrica que experimente deberíamos corregirla porque todo el volumen del cilindro envolvente no va a ser el mismo que el volumen de resina inyectada. Usamos la siguiente relación sabiendo que el incremento de volumen se debe solamente a la resina. Sea $\epsilon_{v, cil}$ la deformación volumétrica del cilindro (valor que vamos a obtener del programa) y ϵ_v la deformación volumétrica de la resina (el valor que realmente nos interesa). Sea n el número de inyecciones.

$$\epsilon_{v, cil} = \frac{\Delta V}{V_{cil}} \quad \epsilon_v = \frac{\Delta V}{V_0}$$

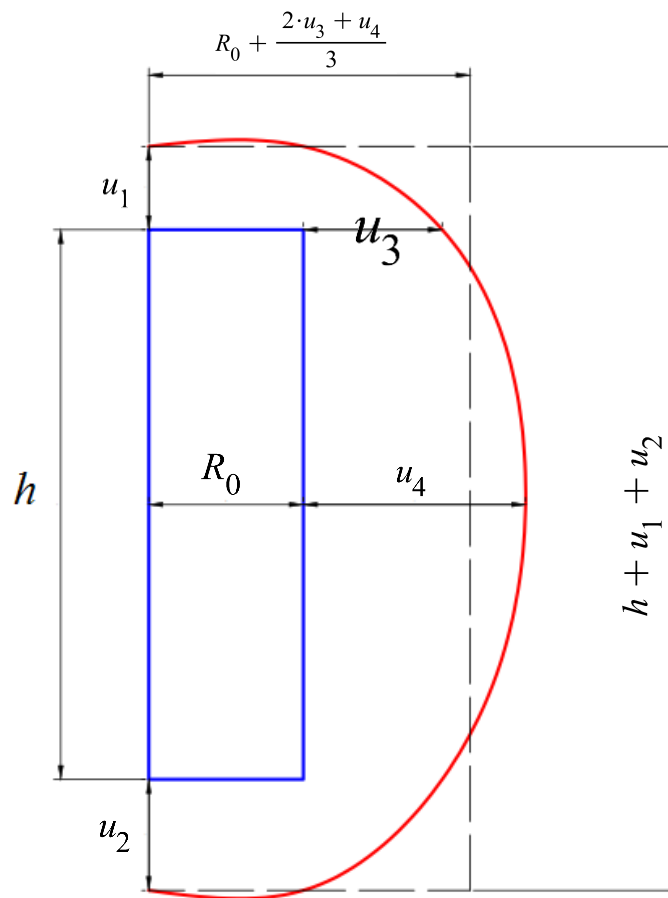
$$V_{cil} = \pi \cdot R_0^2 \cdot (2 \cdot R_0 + (n-1) \cdot S_t) \quad V_0 = n \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R_0^3$$

$$\epsilon_v = \frac{V_{cil}}{V_0} \cdot \epsilon_{v, cil} = \frac{3}{4} \cdot \frac{2 \cdot R_0 + (n-1) \cdot S_t}{n \cdot R_0} \cdot \epsilon_{v, cil} = \frac{3}{4} \cdot \frac{h}{n \cdot R_0} = k \cdot \epsilon_{v, cil} \quad k = \frac{3}{4} \cdot \frac{h}{n \cdot R_0}$$

Necesitamos obtener la deformación volumétrica del cilindro. La deformada de la cavidad se va aproximar a un cilindro de las siguientes dimensiones:

$$V_0 = \pi \cdot R_0^2 \cdot h \quad V_f = \pi \cdot (R_0 + \Delta R)^2 \cdot (h + \Delta h)$$

$$\Delta R = \frac{2 \cdot u_3 + u_4}{3} \quad \Delta h = u_1 + u_2$$



La deformación de la cavidad es: $\epsilon_{v, cil} = \frac{V_f}{V_0} - 1$

La deformación de la resina es: $\epsilon_v = k \cdot \epsilon_{v, cil}$

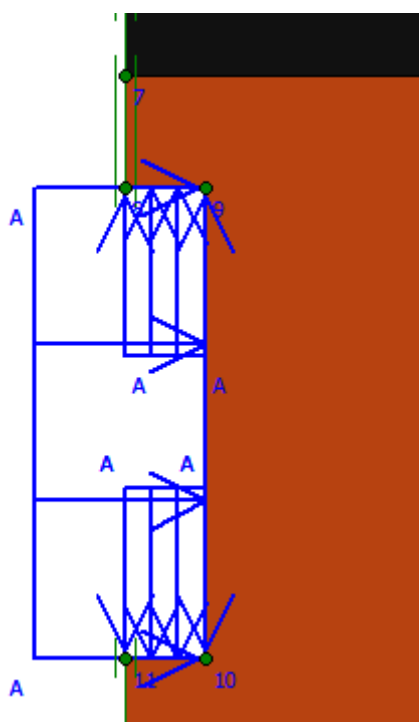
3.4.2.1. 30 Kg DE RESINA POR INYECCIÓN

Estas tres inyecciones de 30 kg de resina cada una forman un cilindro equivalente de 280 mm de radio y 1960 mm de altura. El factor corrector de deformación es 1,75. Aplicamos 800 KPa para garantizar que se alcanza el equilibrio.

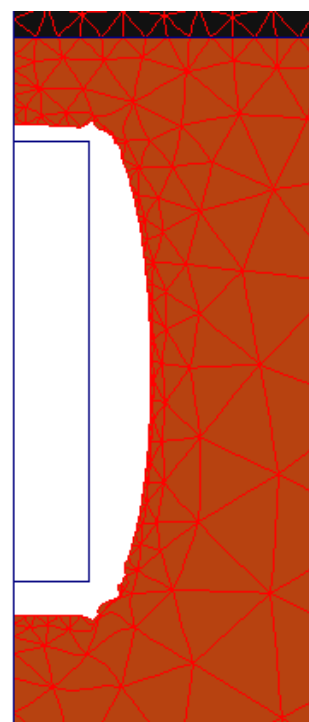
$$R_0 = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot M_0 \cdot g}{4 \cdot \pi \cdot n \cdot \gamma_0}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 30 \cdot 9.81}{4 \cdot \pi \cdot 0.3 \cdot 10.5 \cdot 10^3}} = 0.281 \text{ m}$$

$$h = 2 \cdot R_0 + (n - 1) \cdot S_t = 2 \cdot 281 + (3 - 1) \cdot 700 = 1962 \text{ mm}$$

$$k = \frac{3}{4} \cdot \frac{h}{n \cdot R_0} = \frac{3}{4} \cdot \frac{1962}{3 \cdot 280} = 1.75$$



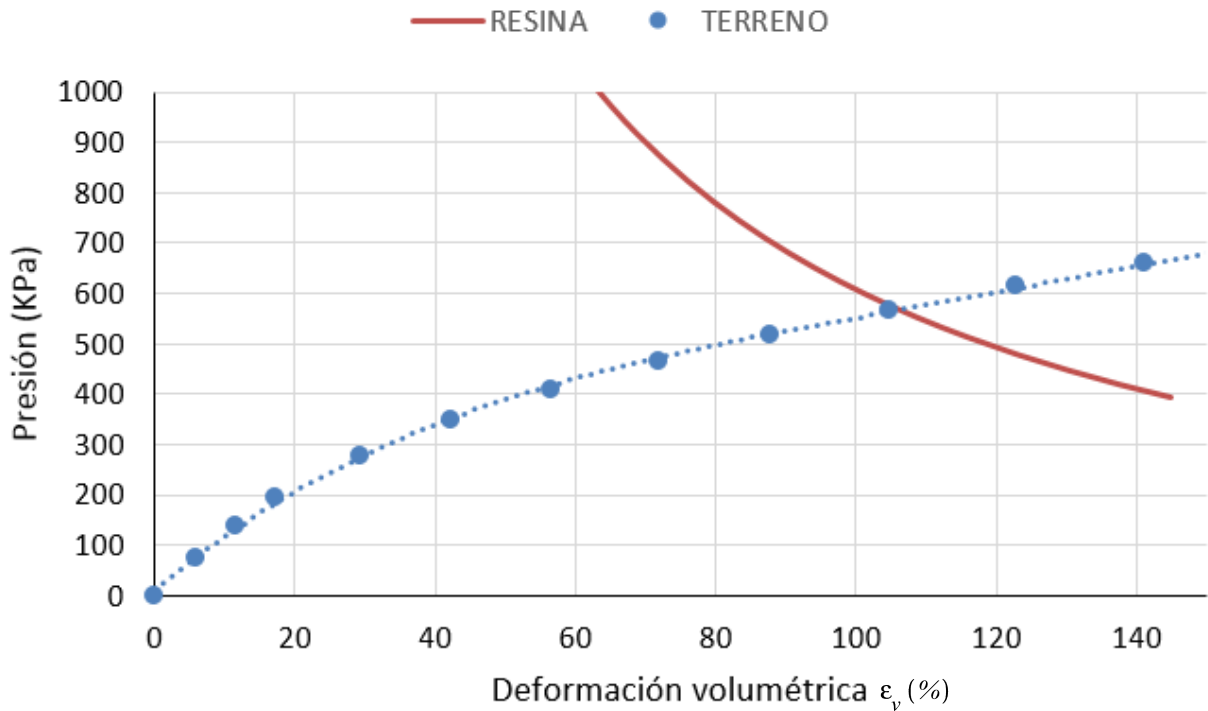
Detalle del cilindro equivalente bajo la zapata



Deformada de la cavidad

P (KPa)	u_1 (mm)	u_2 (mm)	u_3 (mm)	u_4 (mm)	V_f (m ³)	$\epsilon_{v, cil}$ (%)	ϵ_v (%)	δ (mm)
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4827	0,0	0,0	0,0
75	12,3	12,5	11,8	16,0	0,4987	3,3	5,8	0,8
137	23,5	23,8	23,6	32,2	0,5148	6,6	11,6	1,7
193	34,1	34,9	35,7	48,5	0,5305	9,9	17,3	2,7
278	50,9	53,2	59,2	81,3	0,5634	16,7	29,2	4,6
348	64,8	70,5	81,7	114,3	0,5993	24,1	42,2	6,3
410	77,2	87,8	103,2	147,2	0,6388	32,3	56,6	8,0
466	89,0	106,2	124,5	180,3	0,6811	41,1	71,9	9,6
519	100,5	125,6	146,0	213,3	0,7251	50,2	87,9	11,3
568	111,9	146,1	167,1	246,4	0,7721	59,9	104,9	12,9
615	123,2	167,4	188,3	279,6	0,8214	70,2	122,8	14,5
660	134,0	188,5	209,6	312,7	0,8721	80,6	141,1	16,2
704	144,5	208,9	231,1	345,9	0,9237	91,3	159,8	17,9
746	154,5	228,6	252,8	379,1	0,9764	102,3	179,0	19,6
787	164,2	247,7	274,8	412,3	1,0296	113,3	198,2	21,3
800	167,2	253,7	282,0	423,1	1,0468	116,8	204,5	21,9

La primera columna frente a la penúltima forma la curva de comportamiento de la cavidad en el terreno. La comparamos con la ley de la resina para hallar el equilibrio.

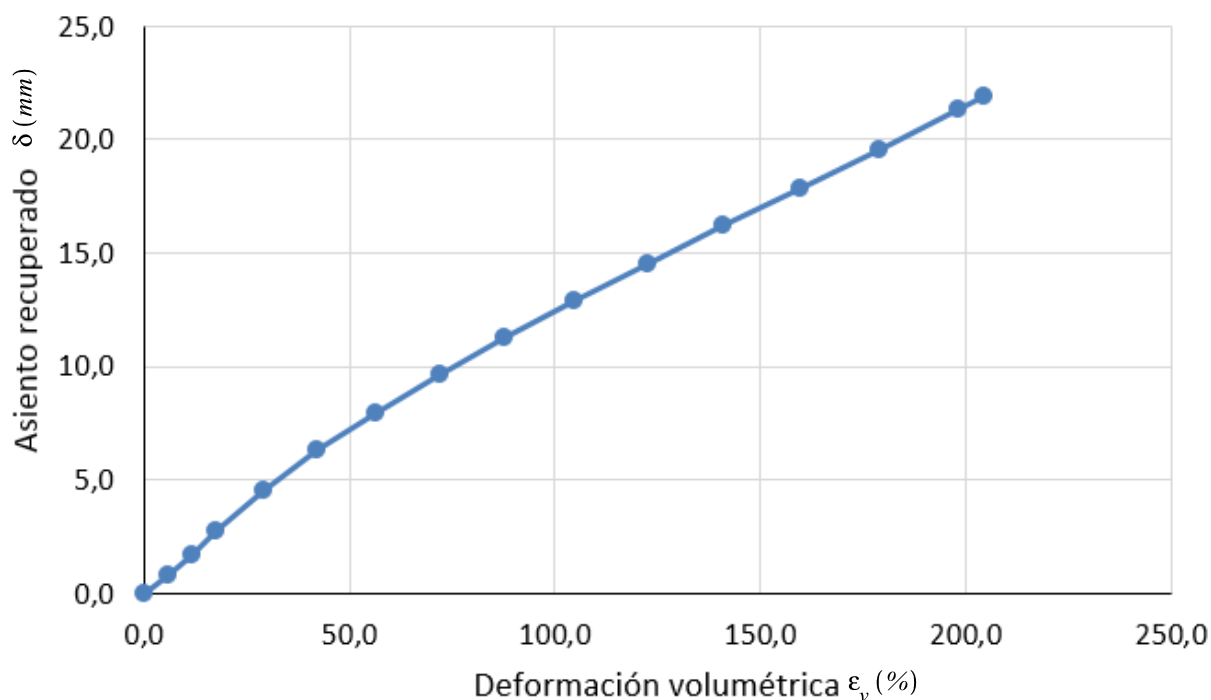


Hallamos el punto de corte con una expresión de cuarto grado de interpolación de la curva. Conseguimos un $R^2 = 0.9996$

$$P(KPa) = -1.11 \cdot 10^{-6} \cdot \epsilon_v^4(\%) + 5.79 \cdot 10^{-4} \cdot \epsilon_v^3(\%) - 1.11 \cdot 10^{-1} \cdot \epsilon_v^2(\%) + 1.18 \cdot 10 \cdot \epsilon_v(\%) + 9.06$$

$P_{eq}(KPa)$	$\epsilon_{v,eq}(\%)$
563,9	106,7

Con estos valores en el equilibrio podemos interpolar los valores de la tabla de resultados para calcular el asiento recuperado: 13,1 mm. No es suficiente, por lo que debemos proponer otra solución.



3.4.2.2. 60 Kg DE RESINA POR INYECCIÓN

En vez de inyectar 30 Kg de resina en cada punto, subiremos la cantidad a 60 Kg. El radio de la cavidad es 355 mm y el cilindro equivalente es de radio 360 mm y altura 2110 mm. La deformación de la resina es 1,46 veces la deformación de la cavidad.

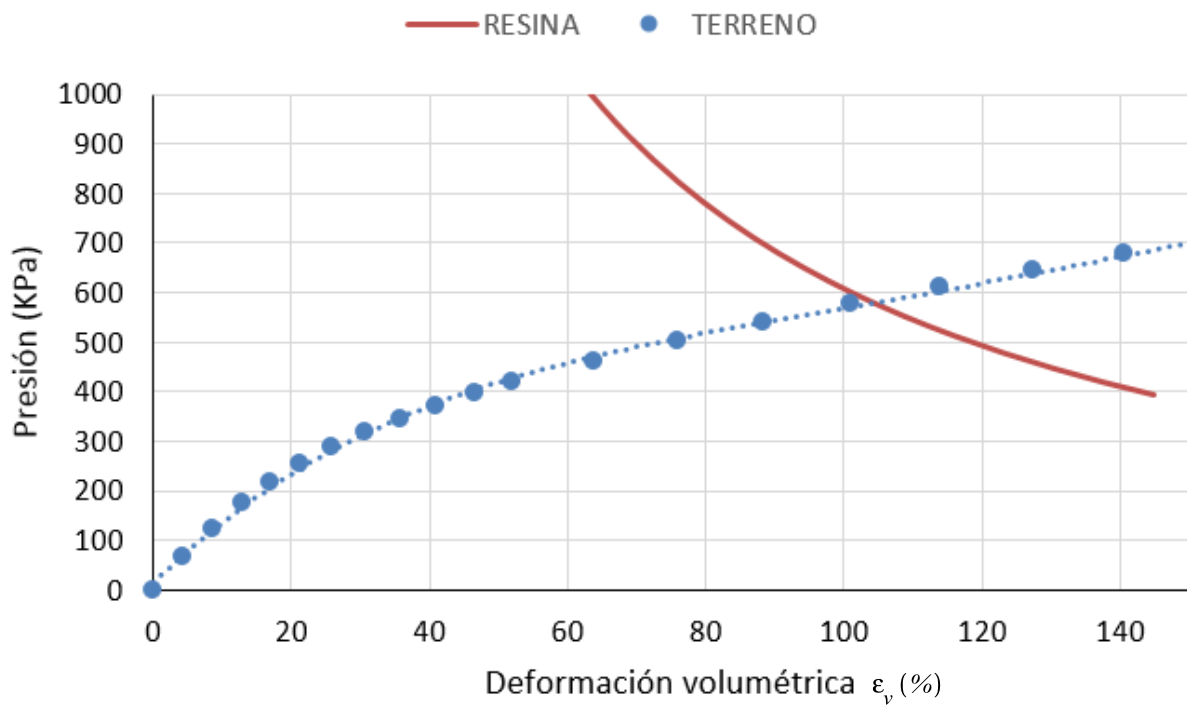
$$R_0 = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot M_0 \cdot g}{4 \cdot \pi \cdot n \cdot \gamma_0}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 60 \cdot 9,81}{4 \cdot \pi \cdot 0,3 \cdot 10,5 \cdot 10^3}} = 0,355 \text{ m}$$

$$h = 2 \cdot R_0 + (n - 1) \cdot S_t = 2 \cdot 355 + (3 - 1) \cdot 700 = 2110 \text{ mm}$$

$$k = \frac{3}{4} \cdot \frac{h}{n \cdot R_0} = \frac{3}{4} \cdot \frac{2110}{3 \cdot 355} = 1,46$$

P (KPa)	u_1 (mm)	u_2 (mm)	u_3 (mm)	u_4 (mm)	V_f (m ³)	$\epsilon_{v, cil}$ (%)	ϵ_v (%)	δ (mm)
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8632	0,0	0,0	0,0
66	13,1	14,0	12,9	17,3	0,8887	3,0	4,3	1,2
122	25,1	26,9	25,8	34,8	0,9142	5,9	8,6	2,5
174	36,6	39,6	38,9	52,4	0,9395	8,8	12,9	4,0
218	46,5	51,1	52,1	70,1	0,9640	11,7	17,1	5,4
255	55,0	61,1	64,9	87,8	0,9894	14,6	21,4	6,7
288	62,5	70,3	77,3	105,6	1,0161	17,7	25,9	7,9
317	69,3	79,5	89,2	123,5	1,0446	21,0	30,7	9,1
345	75,6	88,8	100,9	141,3	1,0744	24,5	35,7	10,2
371	81,5	98,7	112,4	159,2	1,1057	28,1	41,0	11,3
396	87,1	109,1	123,9	177,1	1,1380	31,8	46,5	12,4

P (KPa)	u_1 (mm)	u_2 (mm)	u_3 (mm)	u_4 (mm)	V_f (m ³)	$\epsilon_{v, cil}$ (%)	ϵ_v (%)	δ (mm)
419	92,6	119,4	135,3	195,0	1,1711	35,7	52,1	13,5
462	103,2	139,6	157,8	230,9	1,2402	43,7	63,8	15,6
502	113,3	159,5	180,3	266,9	1,3117	52,0	75,9	17,6
540	122,9	178,7	202,8	302,9	1,3852	60,5	88,3	19,6
577	132,1	197,2	225,4	339,0	1,4605	69,2	101,0	21,7
611	140,9	215,5	248,3	375,1	1,5370	78,1	114,0	23,7
645	149,4	234,4	271,4	411,2	1,6158	87,2	127,3	25,8
678	157,8	253,6	294,8	447,4	1,6952	96,4	140,7	27,9
709	166,0	272,6	318,6	483,6	1,7754	105,7	154,3	30,0
740	174,0	291,5	342,7	519,8	1,8563	115,1	168,0	32,1
755	178,0	301,1	355,1	537,9	1,8963	119,7	174,8	33,2
784	185,8	320,5	379,9	574,2	1,9771	129,1	188,4	35,4
800	190,1	331,2	393,9	594,3	2,0213	134,2	195,9	36,6

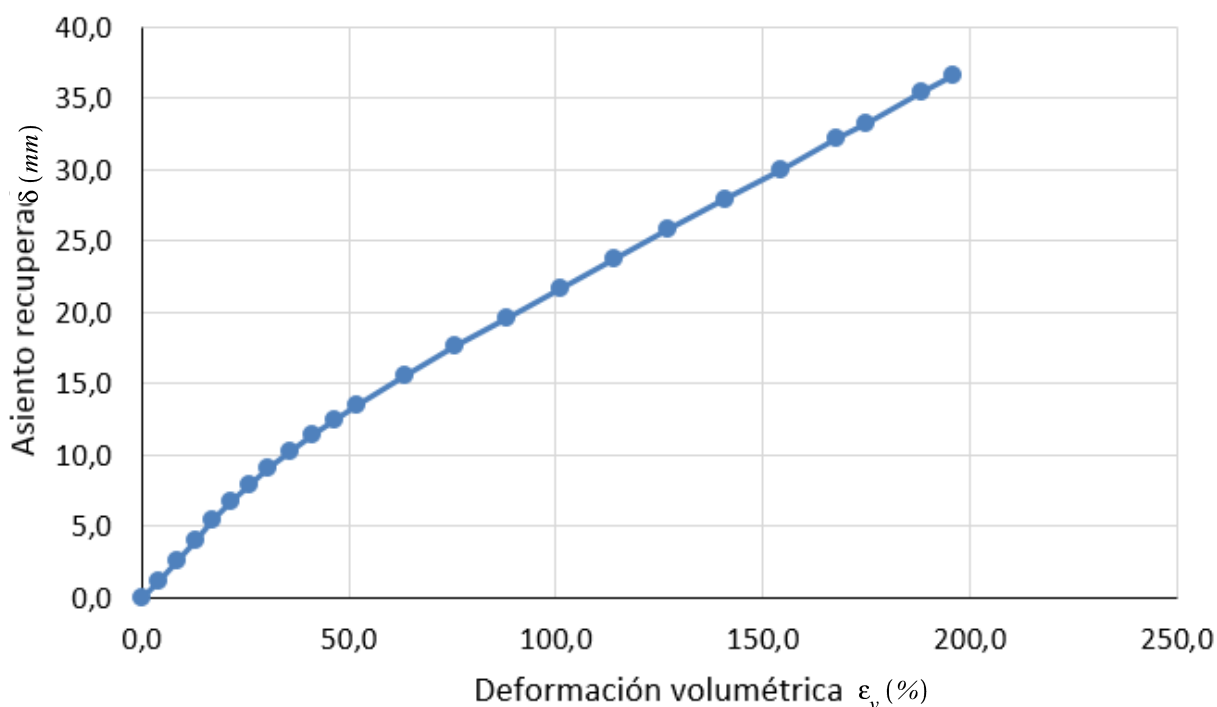


Interpolamos la curva de comportamiento del terreno con una expresión polinómica de cuarto grado. Obtenemos $R^2 = 0.9991$

$$P(KPa) = -1.72 \cdot 10^{-6} \cdot \epsilon_v^4(\%) + 8.35 \cdot 10^{-4} \cdot \epsilon_v^3(\%) - 1.46 \cdot 10^{-1} \cdot \epsilon_v^2(\%) + 1.35 \cdot 10 \cdot \epsilon_v(\%) + 1.42 \cdot 10$$

P_{eq} (KPa)	$\epsilon_{v, eq}$ (%)
578,1	104,4

Interpolando linealmente los valores de la tabla de resultados hallamos la recuperación de asiento: 22,2 mm. No es suficiente y debemos plantear otra solución.



3.4.2.3. 90 Kg DE RESINA POR INYECCIÓN

Aumentamos la cantidad inyectada a 90 Kg de resina por punto de inyección. El cilindro equivalente tiene radio 406 mm y una altura de 2212 mm. Hay que corregir la deformación de la cavidad por un factor igual a 1,36 para obtener la deformación volumétrica de la resina.

$$R_0 = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot M_0 \cdot g}{4 \cdot \pi \cdot n \cdot \gamma_0}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 90 \cdot 9,81}{4 \cdot \pi \cdot 0,3 \cdot 10,5 \cdot 10^3}} = 0,406 \text{ m}$$

$$h = 2 \cdot R_0 + (n - 1) \cdot S_t = 2 \cdot 406 + (3 - 1) \cdot 700 = 2212 \text{ mm}$$

$$k = \frac{3}{4} \cdot \frac{h}{n \cdot R_0} = \frac{3}{4} \cdot \frac{2212}{3 \cdot 406} = 1,36$$

P (KPa)	u_1 (mm)	u_2 (mm)	u_3 (mm)	u_4 (mm)	V_f (m ³)	$\epsilon_{v, cil}$ (%)	ϵ_v (%)	δ (mm)
0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1455	0,0	0,0	0,0
57	12,3	13,6	11,2	16,5	1,1793	3,0	4,0	1,4
107	23,6	26,2	22,5	33,2	1,2127	5,9	8,0	2,8
153	34,5	38,7	34,1	49,9	1,2455	8,7	11,9	4,5
194	44,6	50,9	46,0	66,9	1,2784	11,6	15,8	6,1

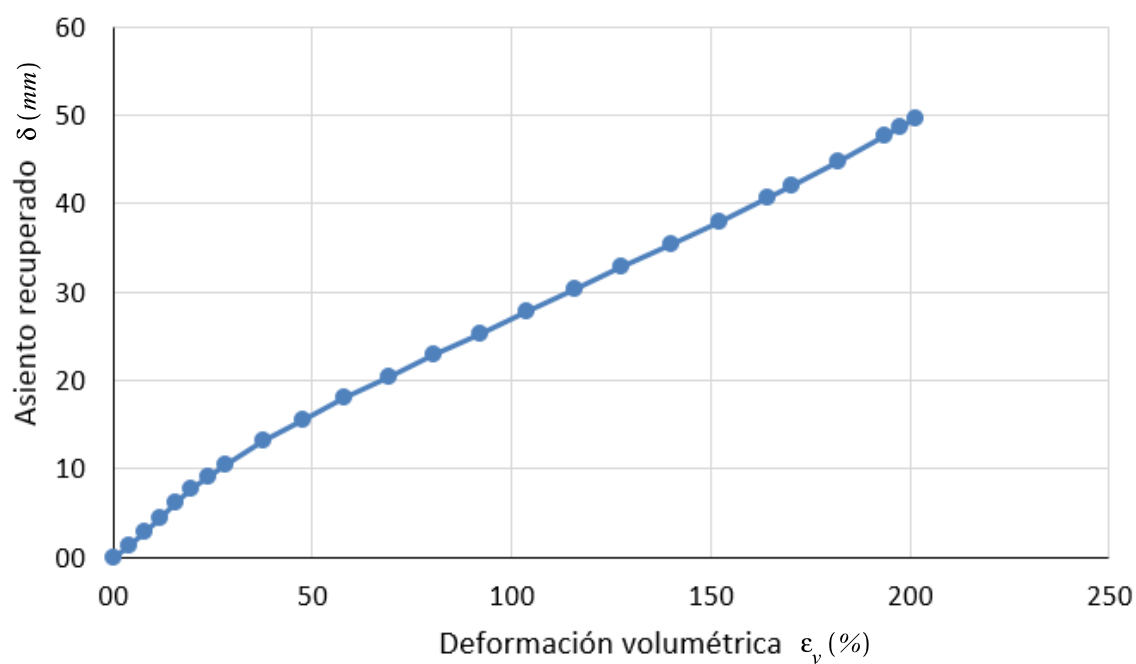
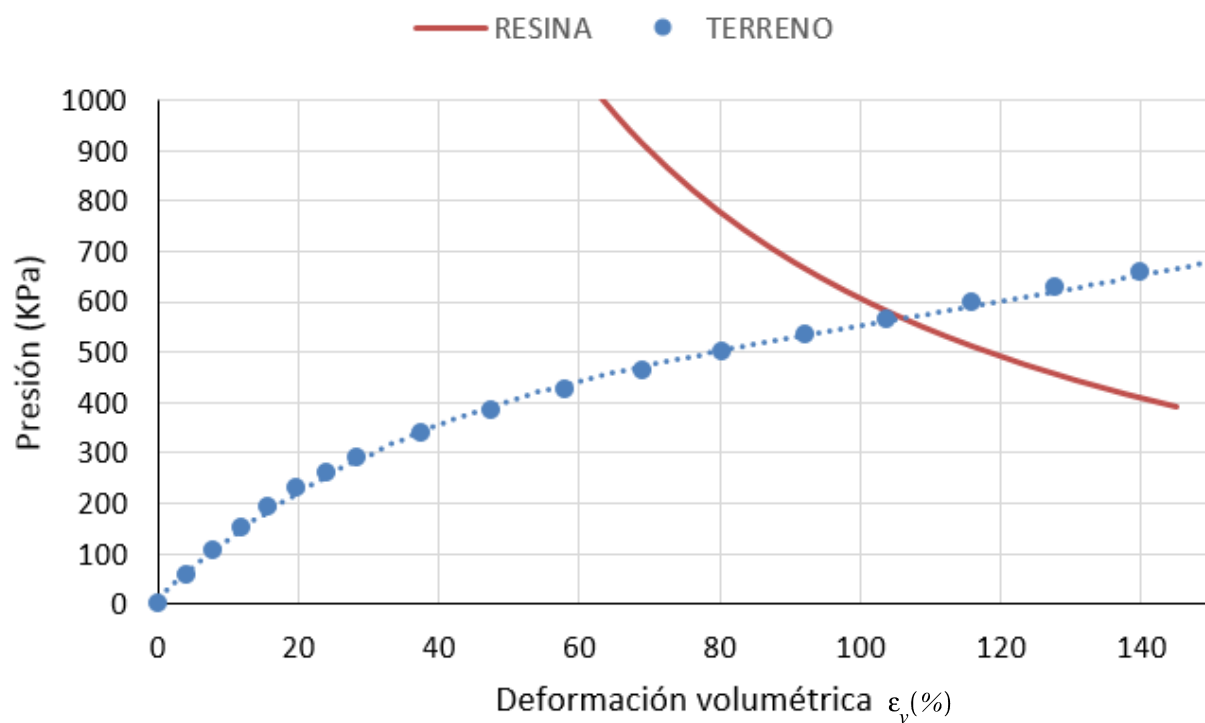
P (KPa)	u_1 (mm)	u_2 (mm)	u_3 (mm)	u_4 (mm)	V_f (m ³)	$\epsilon_{v, cil}$ (%)	ϵ_v (%)	δ (mm)
230	53,3	61,7	57,4	83,9	1,3120	14,5	19,8	7,7
261	61,1	71,4	68,5	101,0	1,3472	17,6	23,9	9,1
290	68,0	80,5	79,1	118,1	1,3839	20,8	28,3	10,5
340	80,2	98,5	99,6	152,5	1,4626	27,7	37,7	13,1
384	91,3	118,3	119,8	187,0	1,5459	35,0	47,5	15,6
425	101,6	140,0	139,9	221,5	1,6340	42,7	58,0	18,1
463	111,3	162,9	159,7	256,1	1,7274	50,8	69,1	20,5
499	120,7	185,3	179,7	290,8	1,8230	59,2	80,4	22,9
533	129,7	207,4	199,8	325,5	1,9211	67,7	92,1	25,4
566	138,5	228,6	220,3	360,2	2,0202	76,4	103,9	27,8
597	147,1	248,7	240,9	395,0	2,1207	85,1	115,8	30,3
628	155,5	268,4	261,9	429,8	2,2214	93,9	127,7	32,8
658	163,9	288,1	283,2	464,6	2,3239	102,9	139,9	35,3
686	172,2	307,8	304,9	499,5	2,4275	111,9	152,2	37,9
714	180,5	327,4	327,1	534,4	2,5306	120,9	164,5	40,6
728	184,7	337,2	338,7	551,8	2,5799	125,2	170,3	42,0
755	192,9	356,5	362,2	586,7	2,6784	133,8	182,0	44,8
782	201,0	375,9	386,5	621,6	2,7749	142,2	193,5	47,6
792	204,1	383,3	396,1	635,2	2,8111	145,4	197,8	48,7
800	206,7	389,4	404,4	646,7	2,8416	148,1	201,4	49,6

Para calcular el punto de equilibrio hemos aproximado la curva del terreno con una expresión polinómica de cuarto grado obteniendo: $R^2 = 0.9993$

$$P(KPa) = -1.47 \cdot 10^{-6} \cdot \epsilon_v^4(\%) + 7.38 \cdot 10^{-4} \cdot \epsilon_v^3(\%) - 1.34 \cdot 10^{-1} \cdot \epsilon_v^2(\%) + 1.28 \cdot 10 \cdot \epsilon_v(\%) + 1.24 \cdot 10^1$$

P_{eq} (KPa)	$\epsilon_{v, eq}$ (%)
560,0	107,3

Interpolamos los valores de la tabla de resultados para hallar la recuperación de asiento: 28,5 mm. No es suficiente y debemos plantear otra propuesta de solución.



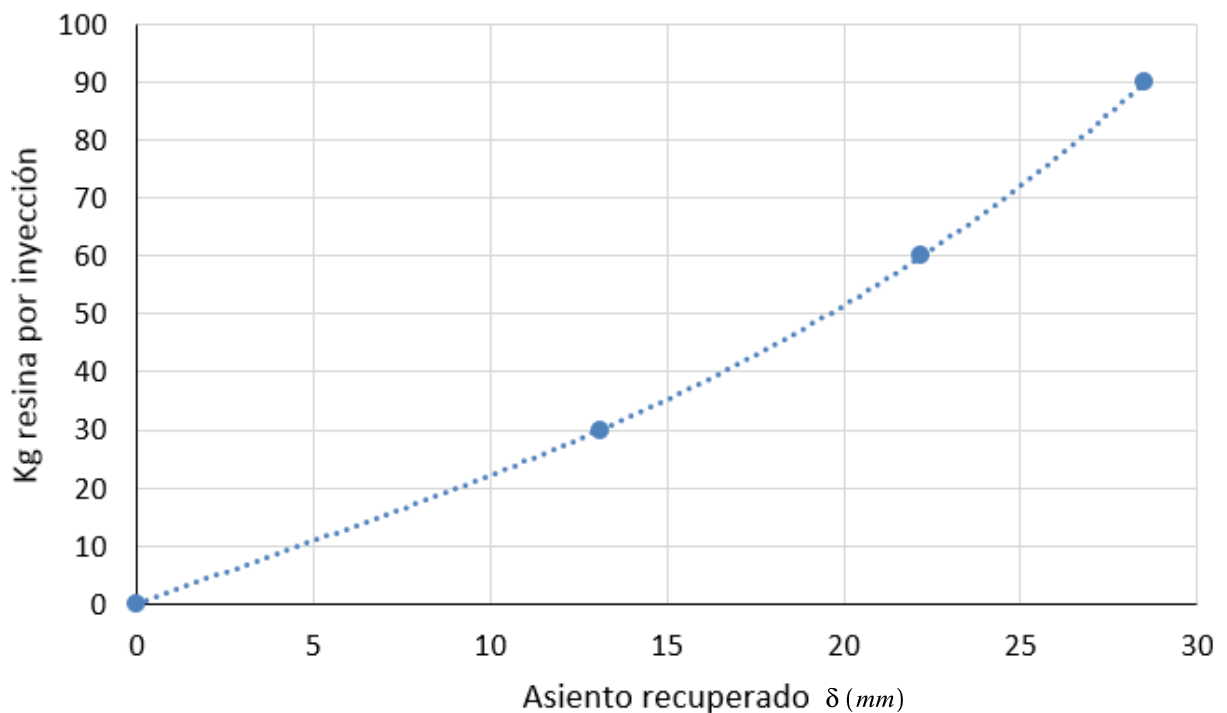
3.4.2.4. RESULTADOS

Con estos resultados podemos estimar la relación entre cantidad de resina inyectada y recuperación del asiento.

Kg resina	δ (mm)
0	0
30	13,1
60	22,2
90	28,5

Interpolamos los valores de esta tabla con una expresión polinómica de tercer grado obteniendo: $R^2 = 1$

$$Resina (Kg) = 1.75 \cdot 10^{-3} \cdot \delta^3 (mm) - 1.63 \cdot 10^{-2} \cdot \delta^2 (mm) + 2.20 \cdot \delta (mm)$$



Si queremos tener un orden de la cantidad de resina que habría que inyectar con esta propuesta de solución para recuperar los 40-45 mm que nos son necesarios, evaluamos la expresión en esos valores.

$$174 \text{ Kg} < \frac{\text{Resina}}{\text{Inyección}} < 225 \text{ Kg}$$

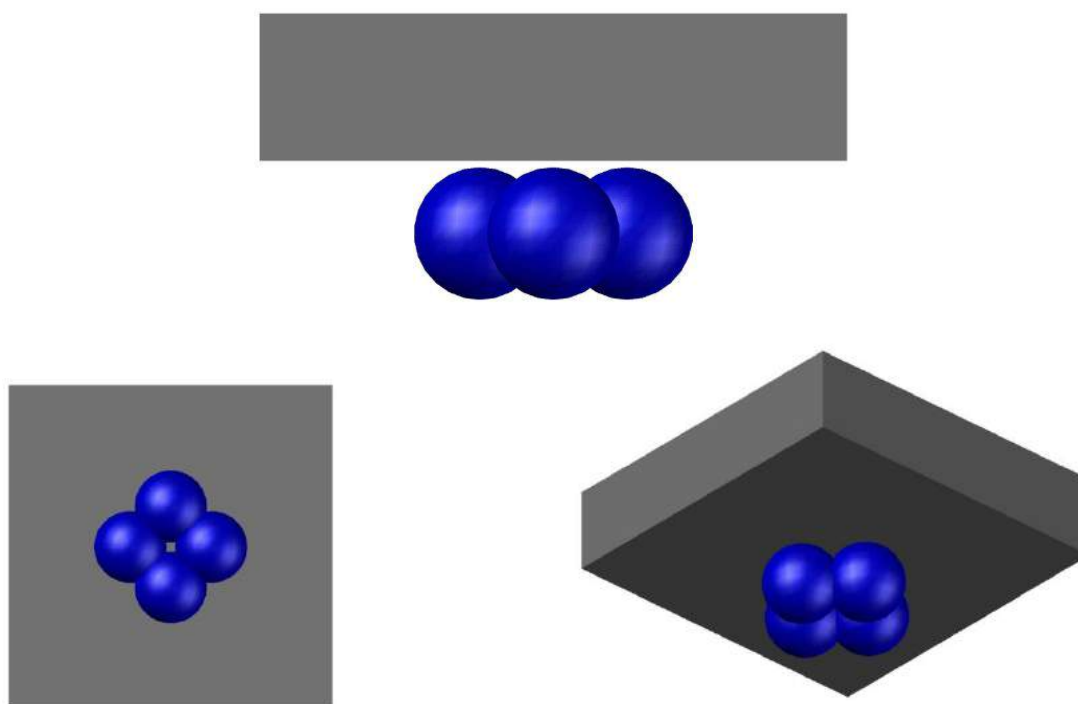
Como son tres inyecciones, la cantidad total de resina empleada se estima en:

$$522 \text{ Kg} < \text{Resina total} < 675 \text{ Kg}$$

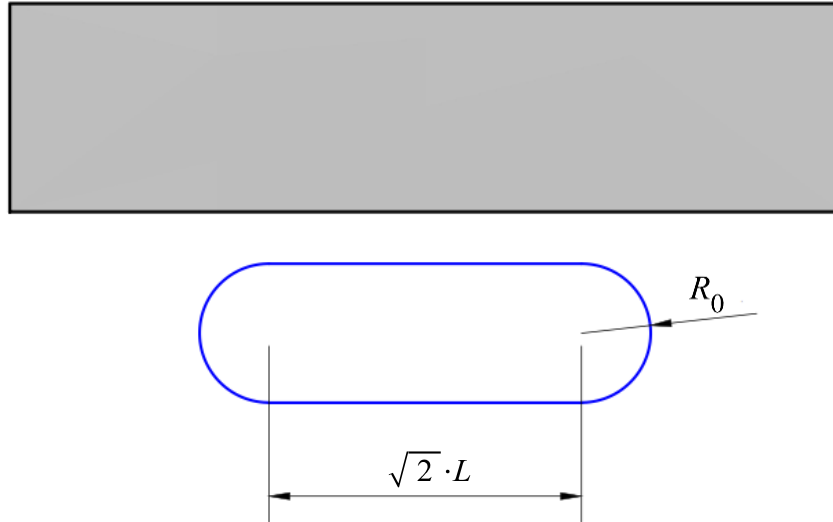
Unos 200 Kg de resina por cada punto de inyección es un valor elevado. Estudiaremos el caso de varios puntos de inyección, pero situados a la misma profundidad esperando que se consiga más levantamiento para la misma cantidad de resina inyectada.

3.4.3. TERCERA PROPUESTA DE SOLUCIÓN

Analizaremos los resultados realizando otra configuración de inyecciones. Se realizarán 4 inyecciones a la misma profundidad bajo la zapata. Buscamos averiguar si varias inyecciones recuperan una mayor cantidad de asiento si se disponen a la misma profundidad que si es a distinta. La resina la modelizaremos en el programa a través de su envolvente y luego corregimos el valor de la deformación para adecuarlo al volumen real de resina. Si las inyecciones están separados unas de otras una distancia L , los puntos de inyección forman un cuadrado de lado L . La envolvente tiene las dimensiones mostradas en la figura. En este caso tomaremos L igual a 700 mm.

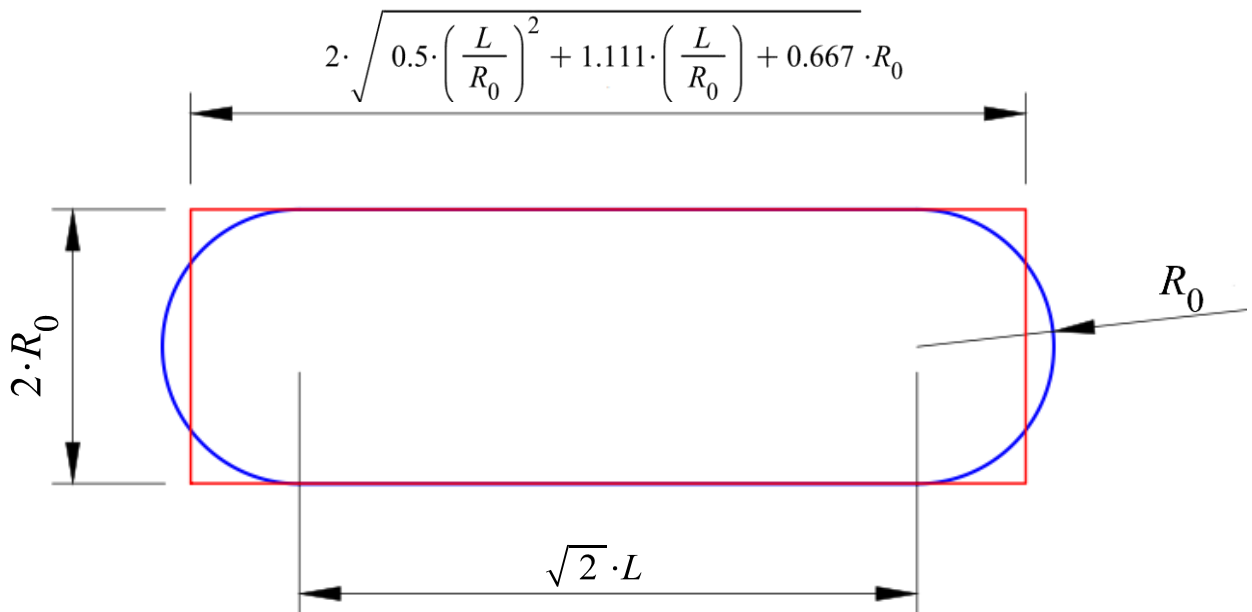


Vistas en 3D de las inyecciones (azul)
bajo la zapata (gris)



Dimensiones de la envolvente a las inyecciones

Esta envolvente la aproximamos por un cilindro para tener líneas rectas y poder aplicar carga distribuida. Las dimensiones del cilindro de aproximación (radio B y altura H) serán aquellas que mantengan el volumen.



Aplicando las mismas relaciones que en el caso anterior para corregir el valor de la deformación volumétrica:

$$\epsilon_v = \frac{\Delta V}{V_0}$$

$$\epsilon_{v, env} = \frac{\Delta V}{V_{env}}$$

$$\Delta V = V_{env} \cdot \epsilon_{v, env}$$

$$\epsilon_v = \frac{V_{env}}{V_0} \cdot \epsilon_{v, env}$$

$$V_0 = 4 \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R_0^3$$

$$V_{env} = \pi \cdot B^2 \cdot H$$

$$\varepsilon_v = \frac{\pi \cdot B^2 \cdot H}{4 \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R_0^3} \cdot \varepsilon_{v, env} = k \cdot \varepsilon_{v, env}$$

Utilizando las siguientes expresiones, tenemos que el coeficiente k es:

$$B = \sqrt{0.5 \cdot \left(\frac{L}{R_0}\right)^2 + 1.111 \cdot \left(\frac{L}{R_0}\right) + 0.667 \cdot R_0} \quad H = 2 \cdot R_0$$

$$k = 0.188 \cdot \left(\frac{L}{R_0}\right)^2 + 0.417 \cdot \left(\frac{L}{R_0}\right) + 0.25$$

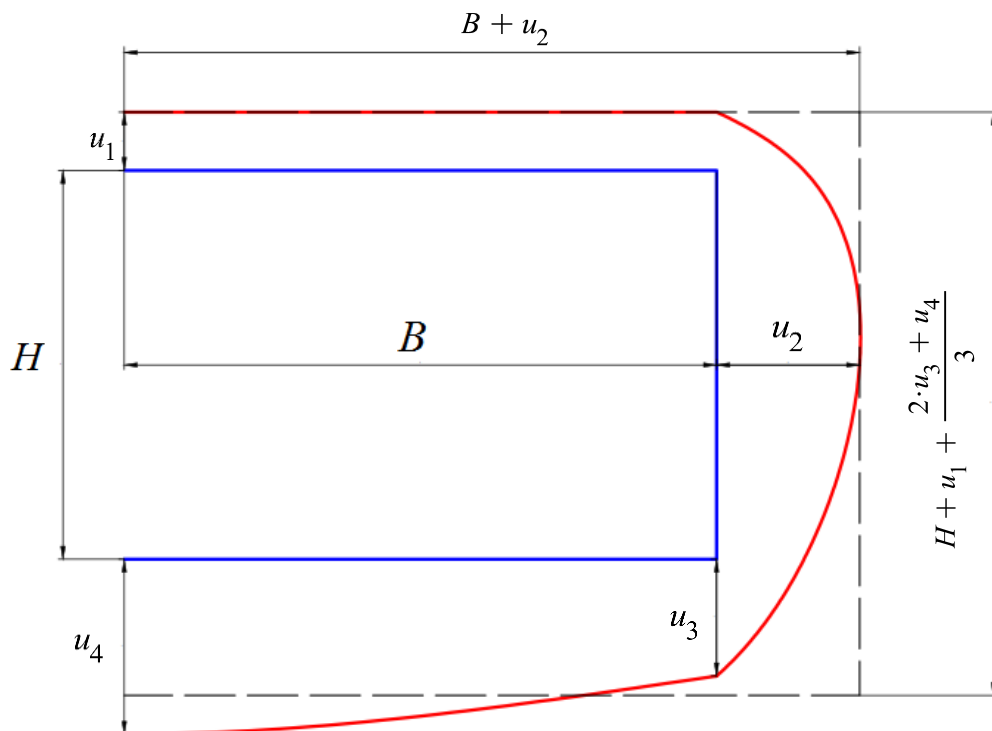
La deformación de la envolvente la calculamos de esta manera:

$$V_0 = \pi \cdot B^2 \cdot H \quad V_f = \pi \cdot (B + \Delta B)^2 \cdot (H + \Delta H)$$

$$\Delta B = u_2 \quad \Delta H = u_1 + \frac{2 \cdot u_3 + u_4}{3}$$

Entonces, la deformación de la envolvente es: $\varepsilon_{env} = \frac{V_f}{V_0} - 1$

Y la deformación de la resina es: $\varepsilon_v = k \cdot \varepsilon_{env}$



3.4.3.1. 30 Kg DE RESINA POR INYECCIÓN

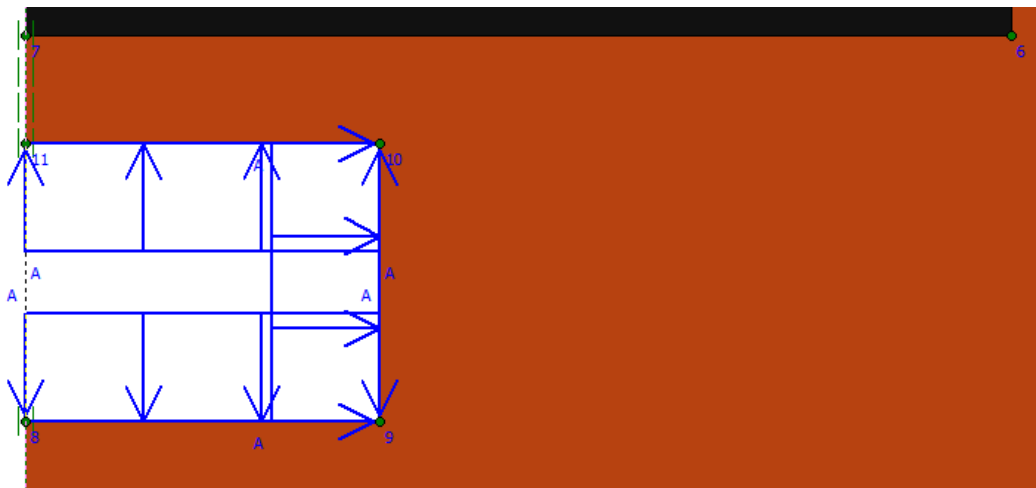
Inyectando 30 Kg de resina en cada punto tenemos 4 bulbos esféricos de radio 281 mm. La envolvente cilíndrica tiene radio B igual a 718 mm y altura H igual a 562 mm. El coeficiente corrector es 2,46.

$$R_0 = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot M_0 \cdot g}{4 \cdot \pi \cdot n \cdot \gamma_0}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 30 \cdot 9.81}{4 \cdot \pi \cdot 0.3 \cdot 10.5 \cdot 10^3}} = 0.281 \text{ m}$$

$$B = \sqrt{0.5 \cdot \left(\frac{L}{R_0}\right)^2 + 1.111 \cdot \left(\frac{L}{R_0}\right) + 0.667 \cdot R_0} = \sqrt{0.5 \cdot \left(\frac{700}{281}\right)^2 + 1.111 \cdot \left(\frac{700}{281}\right) + 0.667 \cdot 281} = 718 \text{ mm}$$

$$H = 2 \cdot R_0 = 2 \cdot 281 = 562 \text{ mm}$$

$$k = 0.188 \cdot \left(\frac{L}{R_0}\right)^2 + 0.417 \cdot \left(\frac{L}{R_0}\right) + 0.25 = 0.188 \cdot \left(\frac{700}{281}\right)^2 + 0.417 \cdot \frac{700}{281} + 0.25 = 2.46$$



Cavidad bajo la zapata



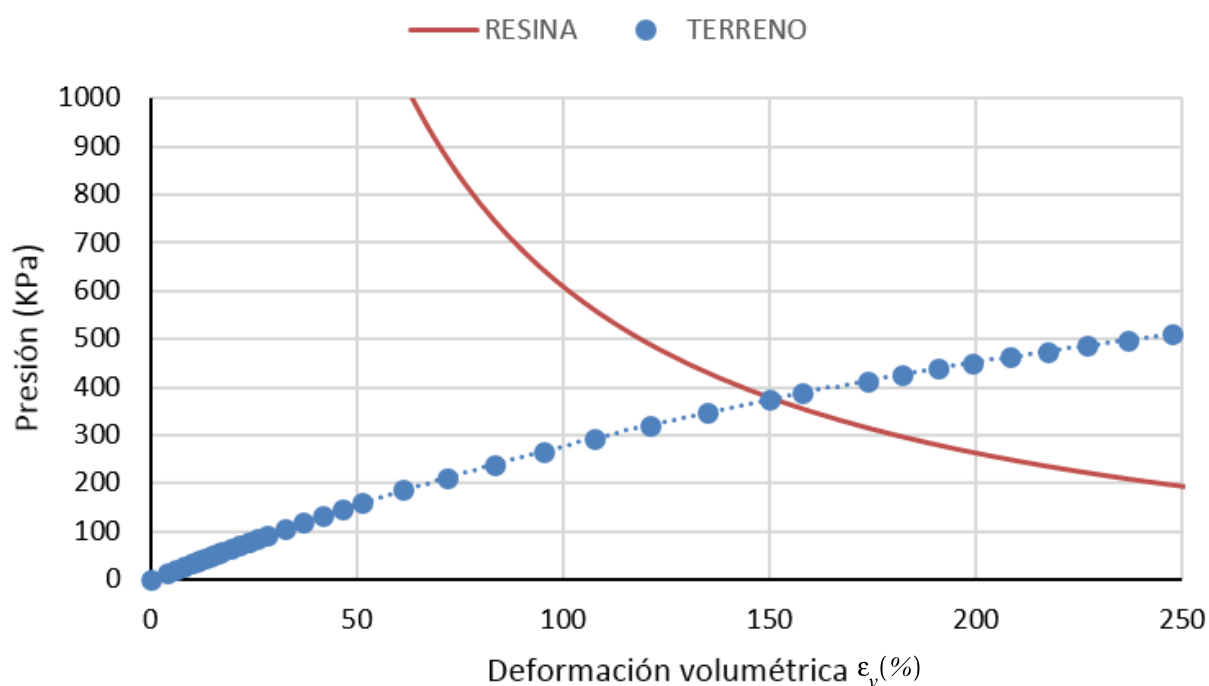
Deformada

Obtenemos los siguientes resultados:

P (KPa)	u_1 (mm)	u_2 (mm)	u_3 (mm)	u_4 (mm)	V_f (m ³)	$\epsilon_{v, cil}$ (%)	ϵ_v (%)	δ (mm)
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,911	0,0	0,0	0,0
13	1,6	3,0	1,3	5,9	0,926	1,6	4,0	0,5
20	2,4	4,6	1,8	8,9	0,934	2,5	6,0	0,7
27	3,2	6,1	2,2	12,0	0,941	3,3	8,1	1,0
34	4,0	7,7	2,6	15,0	0,949	4,1	10,1	1,2
37	4,4	8,5	2,7	16,6	0,953	4,5	11,1	1,3
40	4,8	9,4	2,7	18,2	0,956	4,9	12,1	1,5
44	5,2	10,2	2,8	19,8	0,960	5,4	13,1	1,6
47	5,6	11,0	2,8	21,4	0,964	5,8	14,2	1,7
51	6,0	11,9	2,8	23,0	0,968	6,2	15,2	1,9
54	6,4	12,7	2,9	24,6	0,972	6,6	16,3	2,0
57	6,8	13,6	3,0	26,2	0,976	7,0	17,3	2,2
64	7,6	15,2	3,1	29,4	0,983	7,9	19,4	2,4
71	8,5	17,0	3,2	32,6	0,991	8,8	21,6	2,7
78	9,3	18,7	3,3	35,8	0,999	9,7	23,7	3,0
84	10,1	20,4	3,4	39,1	1,007	10,5	25,9	3,3
91	10,9	22,2	3,4	42,4	1,016	11,4	28,1	3,6
105	12,6	25,7	3,5	49,0	1,032	13,3	32,5	4,2
118	14,3	29,3	3,5	55,7	1,049	15,1	37,1	4,8
132	16,0	32,9	3,5	62,5	1,066	17,0	41,7	5,4
145	17,8	36,6	3,5	69,3	1,084	18,9	46,5	6,1
159	19,5	40,3	3,5	76,1	1,102	20,9	51,3	6,7
186	23,0	47,8	3,5	89,9	1,139	25,0	61,3	8,1
213	26,7	55,8	3,5	103,9	1,178	29,3	71,9	9,6
240	30,4	64,2	3,6	118,0	1,220	33,9	83,2	11,1
267	34,2	72,9	3,6	132,3	1,264	38,7	95,1	12,8
294	38,0	81,9	3,7	146,7	1,311	43,8	107,6	14,5
320	42,0	91,1	4,1	161,3	1,360	49,2	120,8	16,3
347	46,0	100,6	5,2	176,0	1,412	55,0	135,0	18,1
374	50,1	110,4	6,9	191,1	1,468	61,1	150,1	20,1
388	52,2	115,2	8,1	198,6	1,497	64,3	157,9	21,1
413	56,3	125,0	10,4	213,8	1,557	70,8	173,9	23,2
426	58,4	130,0	11,8	221,4	1,588	74,2	182,2	24,3
438	60,5	134,9	13,1	229,0	1,619	77,6	190,6	25,4
450	62,6	139,9	14,5	236,6	1,651	81,1	199,2	26,5
463	64,8	145,1	15,8	244,2	1,684	84,8	208,1	27,7
475	67,0	150,3	17,4	251,8	1,718	88,5	217,4	29,0
487	69,3	155,7	19,2	259,4	1,754	92,4	227,0	30,3
499	71,6	161,1	21,2	267,0	1,791	96,5	236,9	31,7
510	74,1	166,6	23,5	274,6	1,829	100,7	247,3	33,2
522	76,8	172,3	26,1	282,2	1,870	105,2	258,4	34,9
534	79,5	178,2	29,0	289,8	1,913	109,9	269,9	36,8
545	82,5	184,2	32,1	297,4	1,958	114,9	282,1	38,8

P (KPa)	u_1 (mm)	u_2 (mm)	u_3 (mm)	u_4 (mm)	V_f (m ³)	$\epsilon_{v, cil}$ (%)	ϵ_v (%)	δ (mm)
557	85,5	190,3	35,5	305,0	2,005	120,0	294,7	40,9
568	88,7	196,5	39,1	312,7	2,054	125,4	307,8	43,2
574	90,3	199,7	41,1	316,5	2,080	128,2	314,7	44,4
585	93,7	206,2	45,2	324,1	2,132	133,9	328,9	46,8
596	97,2	212,7	49,3	331,7	2,186	139,9	343,5	49,4
608	100,7	219,4	53,5	339,3	2,242	146,0	358,6	52,1
619	104,4	226,1	57,8	346,9	2,300	152,4	374,2	54,8
630	108,1	233,0	62,2	354,6	2,360	158,9	390,2	57,7
641	112,0	239,9	66,7	362,2	2,422	165,7	406,9	60,6
652	116,0	247,0	71,2	369,8	2,485	172,7	424,0	63,7
663	120,0	254,1	75,8	377,4	2,551	179,9	441,7	66,9
674	124,2	261,5	80,4	385,1	2,619	187,4	460,1	70,3
684	128,5	268,9	85,1	392,7	2,690	195,1	479,1	73,7
695	132,9	276,5	89,8	400,3	2,763	203,1	498,8	77,2
706	137,4	284,3	94,5	408,0	2,838	211,4	519,0	80,9
716	142,1	292,1	99,0	415,6	2,915	219,9	539,9	84,7
727	146,8	300,2	103,4	423,2	2,995	228,6	561,4	88,6
737	151,6	308,3	107,7	430,9	3,077	237,6	583,5	92,6
748	156,6	316,6	111,8	438,5	3,162	246,9	606,2	96,7
758	161,6	325,1	115,7	446,1	3,249	256,5	629,8	100,9
768	166,8	333,9	119,5	453,8	3,339	266,4	654,1	105,3
779	172,1	342,9	123,3	461,4	3,433	276,7	679,4	109,7
784	174,9	347,5	125,1	465,2	3,482	282,0	692,5	112,1
794	180,4	356,8	128,5	472,9	3,581	292,9	719,1	116,8
800	183,8	362,6	130,6	477,5	3,643	299,7	735,8	119,7

Dibujamos la curva presión-deformación de la cavidad en el terreno y la cortamos con la ley de comportamiento de la resina para hallar el equilibrio.

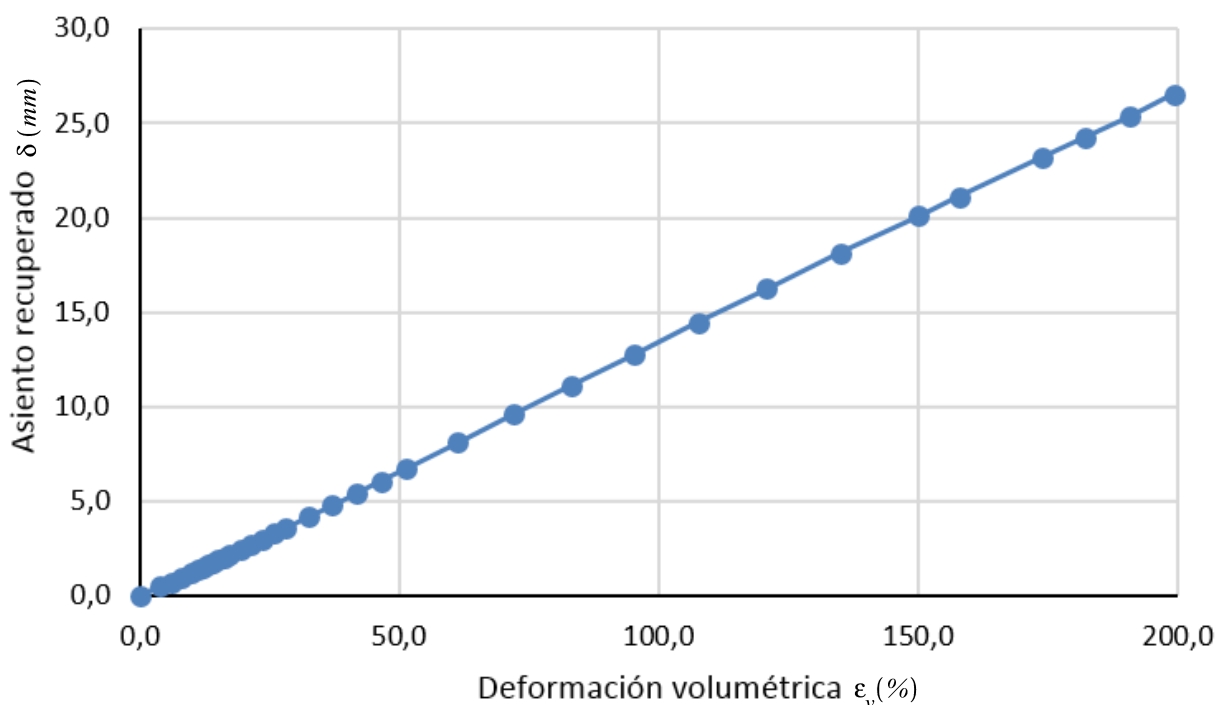


Aproximamos la curva del terreno con una expresión polinómica de cuarto grado. El grado de la aproximación que se tiene es $R^2 = 0.999996$

$$P(KPa) = -4.13 \cdot 10^{-9} \cdot \epsilon_v^4(\%) + 8.92 \cdot 10^{-6} \cdot \epsilon_v^3(\%) - 7.53 \cdot 10^{-3} \cdot \epsilon_v^2(\%) + 3.44 \cdot \epsilon_v(\%) + 1.06 \cdot 10^{-1}$$

$P_{eq} (KPa)$	$\epsilon_{v, eq}(\%)$
375,4	150,4

Interpolando linealmente los valores de la tabla de resultados hallamos el asiento recuperado: 20,1 mm.



3.4.3.2. 60 Kg DE RESINA POR INYECCIÓN

Inyectando 60 Kg de resina en cada punto tenemos 4 bulbos esféricos de radio 355 mm. La envolvente cilíndrica tiene radio B igual a 778 mm y altura H igual a 710 mm. El coeficiente corrector es 1,80.

$$R_0 = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot M_0 \cdot g}{4 \cdot \pi \cdot n \cdot \gamma_0}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 60 \cdot 9.81}{4 \cdot \pi \cdot 0.3 \cdot 10.5 \cdot 10^3}} = 0.355 \text{ m}$$

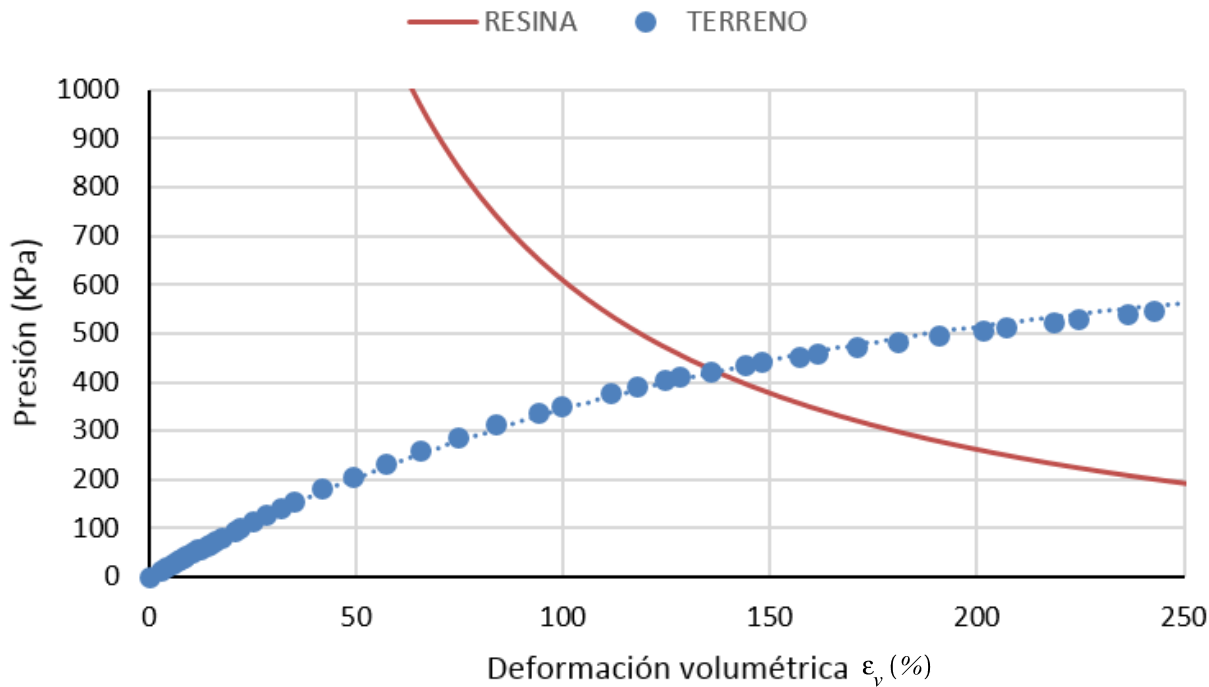
$$B = \sqrt{0.5 \cdot \left(\frac{L}{R_0}\right)^2 + 1.111 \cdot \left(\frac{L}{R_0}\right) + 0.667} \cdot R_0 = \sqrt{0.5 \cdot \left(\frac{700}{355}\right)^2 + 1.111 \cdot \left(\frac{700}{355}\right) + 0.667} \cdot 355 = 778 \text{ mm}$$

$$H = 2 \cdot R_0 = 2 \cdot 355 = 710 \text{ mm}$$

$$k = 0.188 \cdot \left(\frac{L}{R_0} \right)^2 + 0.417 \cdot \left(\frac{L}{R_0} \right) + 0.25 = 0.188 \cdot \left(\frac{700}{355} \right)^2 + 0.417 \cdot \frac{700}{355} + 0.25 = 1.80$$

P (KPa)	u_1 (mm)	u_2 (mm)	u_3 (mm)	u_4 (mm)	V_f (m ³)	$\epsilon_{v, cil}$ (%)	ϵ_v (%)	δ (mm)
0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,350	0,0	0,0	0,0
13	1,3	3,4	1,3	6,2	1,370	1,5	2,7	0,6
20	2,0	5,2	1,8	9,4	1,380	2,2	4,0	0,9
26	2,6	6,9	2,3	12,6	1,390	3,0	5,4	1,3
33	3,3	8,7	2,7	15,8	1,400	3,8	6,8	1,6
36	3,7	9,6	2,9	17,4	1,406	4,1	7,5	1,8
40	4,0	10,6	2,9	19,1	1,411	4,5	8,1	1,9
43	4,3	11,5	3,0	20,7	1,416	4,9	8,8	2,1
49	5,0	13,3	3,1	24,1	1,426	5,7	10,2	2,4
56	5,7	15,2	3,3	27,4	1,437	6,4	11,6	2,8
59	6,1	16,1	3,3	29,1	1,442	6,8	12,3	3,0
66	6,8	18,0	3,4	32,5	1,453	7,6	13,7	3,3
69	7,1	19,0	3,5	34,2	1,458	8,0	14,5	3,5
76	7,8	20,9	3,6	37,6	1,469	8,8	15,9	3,9
82	8,6	22,9	3,7	41,1	1,480	9,7	17,4	4,3
95	10,0	26,8	4,0	48,0	1,503	11,3	20,4	5,0
102	10,8	28,8	4,1	51,5	1,514	12,2	22,0	5,4
115	12,2	32,8	4,5	58,5	1,538	13,9	25,1	6,2
128	13,8	36,8	4,8	65,6	1,562	15,7	28,3	7,0
142	15,3	40,9	5,2	72,7	1,586	17,5	31,6	7,9
155	16,9	45,0	5,7	79,9	1,611	19,4	34,9	8,8
181	20,1	53,3	6,7	94,5	1,663	23,2	41,8	10,6
207	23,3	62,1	7,8	109,1	1,718	27,3	49,2	12,5
234	26,7	71,4	9,1	123,9	1,777	31,6	57,1	14,5
260	30,3	81,1	10,5	138,9	1,840	36,3	65,5	16,7
286	33,9	91,2	12,1	154,1	1,907	41,2	74,4	19,0
313	37,8	101,7	13,7	169,4	1,977	46,5	83,8	21,5
339	41,9	112,6	16,0	184,8	2,053	52,1	93,9	24,2
352	44,0	118,3	17,8	192,7	2,095	55,2	99,5	25,7
379	48,6	130,1	22,1	208,9	2,183	61,8	111,4	28,9
392	51,1	136,2	25,1	216,9	2,232	65,3	117,8	30,6
404	53,6	142,4	28,7	225,0	2,282	69,1	124,5	32,5
410	55,0	145,5	31,0	229,1	2,309	71,1	128,2	33,6
423	57,9	152,0	35,9	237,2	2,366	75,3	135,7	35,9
435	61,1	158,7	41,2	245,3	2,426	79,8	143,8	38,4
441	62,8	162,2	44,1	249,4	2,458	82,1	148,1	39,7
454	66,2	169,3	50,1	257,5	2,524	87,0	156,9	42,6
460	68,1	172,9	53,2	261,5	2,558	89,5	161,5	44,1
472	71,8	180,2	59,7	269,6	2,629	94,8	170,9	47,3
484	75,7	187,6	66,5	277,7	2,702	100,2	180,7	50,5

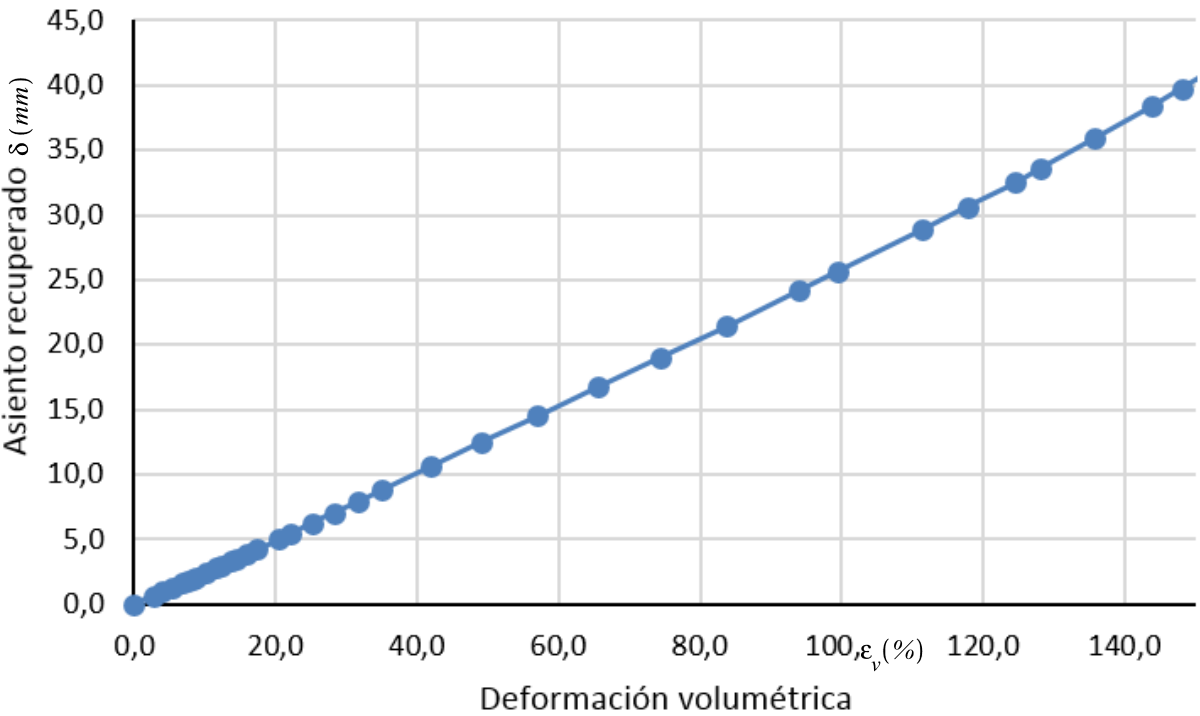
P (KPa)	u_1 (mm)	u_2 (mm)	u_3 (mm)	u_4 (mm)	V_f (m ³)	$\epsilon_{v, cil}$ (%)	ϵ_v (%)	δ (mm)
495	79,8	195,1	73,5	285,8	2,778	105,8	190,8	54,0
507	84,0	202,8	80,7	294,0	2,858	111,7	201,5	57,6
513	86,2	206,8	84,4	298,0	2,899	114,8	207,0	59,5
525	90,7	214,7	92,0	306,1	2,984	121,1	218,4	63,4
530	93,1	218,9	95,9	310,2	3,029	124,4	224,3	65,4
542	97,8	227,2	103,8	318,3	3,120	131,1	236,5	69,5
548	100,2	231,5	107,8	322,4	3,167	134,6	242,8	71,6
559	105,1	239,9	115,9	330,5	3,263	141,7	255,6	75,9
570	110,0	248,5	124,0	338,6	3,361	149,0	268,7	80,3
581	115,1	257,1	132,4	346,7	3,463	156,6	282,3	84,8
592	120,3	265,8	140,8	354,9	3,568	164,3	296,3	89,5
597	123,0	270,3	145,0	358,9	3,622	168,4	303,6	91,9
603	125,8	274,9	149,1	363,0	3,678	172,5	311,0	94,3
609	128,6	279,5	153,2	367,1	3,734	176,7	318,6	96,8
620	134,3	288,9	161,3	375,2	3,850	185,2	334,0	102,0
631	140,1	298,4	169,5	383,3	3,970	194,1	350,1	107,2
642	146,1	308,1	177,8	391,4	4,094	203,3	366,7	112,6
653	152,2	318,0	186,2	399,5	4,224	212,9	384,0	118,2
664	158,6	328,0	194,7	407,6	4,358	222,9	401,9	123,9
669	161,8	333,1	199,0	411,7	4,428	228,0	411,2	126,9
680	168,5	343,4	207,6	419,8	4,570	238,5	430,1	133,0
685	171,8	348,6	212,1	423,9	4,643	244,0	440,0	136,1
695	178,7	359,2	221,1	432,0	4,793	255,1	460,0	142,4
701	182,2	364,5	225,6	436,1	4,871	260,9	470,4	145,7
711	189,4	375,4	234,4	444,2	5,031	272,7	491,7	152,3
716	193,2	381,1	238,8	448,3	5,114	278,9	502,9	155,8
722	197,0	386,9	243,1	452,3	5,200	285,2	514,3	159,4
727	201,0	392,8	247,4	456,4	5,288	291,8	526,1	163,0
732	205,0	398,9	251,8	460,4	5,379	298,5	538,2	166,8
737	209,1	405,1	256,1	464,5	5,472	305,4	550,7	170,6
743	213,3	411,4	260,4	468,6	5,568	312,5	563,5	174,5
748	217,5	417,8	264,8	472,6	5,667	319,8	576,7	178,5
753	221,9	424,3	269,3	476,7	5,768	327,3	590,3	182,6
758	226,2	430,9	273,9	480,7	5,872	335,0	604,1	186,6
763	230,5	437,5	278,6	484,8	5,977	342,8	618,2	190,6
768	234,8	444,1	283,4	488,9	6,083	350,7	632,4	194,7
773	239,0	450,7	288,2	492,9	6,191	358,6	646,7	198,7
778	243,3	457,3	292,9	497,0	6,300	366,7	661,3	202,7
783	247,6	464,1	297,6	501,1	6,412	375,0	676,2	206,7
788	252,0	471,0	302,4	505,1	6,526	383,5	691,6	210,8
791	254,2	474,4	304,9	507,1	6,585	387,8	699,4	212,9
796	258,8	481,3	309,9	511,2	6,703	396,6	715,2	217,2
800	262,4	486,6	313,6	514,3	6,796	403,5	727,6	220,7



Para calcular el punto de equilibrio que alcanza el sistema, aproximamos la curva del terreno con una expresión polinómica de cuarto grado. Se tiene un $R^2 = 0.9995$.

$$P(KPa) = -1.16 \cdot 10^{-8} \cdot \epsilon_v^4(\%) + 2.09 \cdot 10^{-5} \cdot \epsilon_v^3(\%) - 1.39 \cdot 10^{-2} \cdot \epsilon_v^2(\%) + 4.57 \cdot \epsilon_v(\%) + 7.00$$

P_{eq} (KPa)	$\epsilon_{v, eq}$ (%)
421,4	136,7



Interpolando los valores de la tabla de resultados calculamos la recuperación de asiento: 36,2 mm.

3.4.3.3. 90 Kg DE RESINA POR INYECCIÓN

Injectando 90 Kg de resina en cada punto tenemos 4 bulbos esféricos de radio 406 mm. La envoltente cilíndrica tiene radio B igual a 819 mm y altura H igual a 812 mm. El coeficiente corrector es 1,53.

$$R_0 = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot M_0 \cdot g}{4 \cdot \pi \cdot n \cdot \gamma_0}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 90 \cdot 9.81}{4 \cdot \pi \cdot 0.3 \cdot 10.5 \cdot 10^3}} = 0.406 \text{ m}$$

$$B = \sqrt{0.5 \cdot \left(\frac{L}{R_0}\right)^2 + 1.111 \cdot \left(\frac{L}{R_0}\right) + 0.667 \cdot R_0} = \sqrt{0.5 \cdot \left(\frac{700}{406}\right)^2 + 1.111 \cdot \left(\frac{700}{406}\right) + 0.667 \cdot 406} = 819 \text{ mm}$$

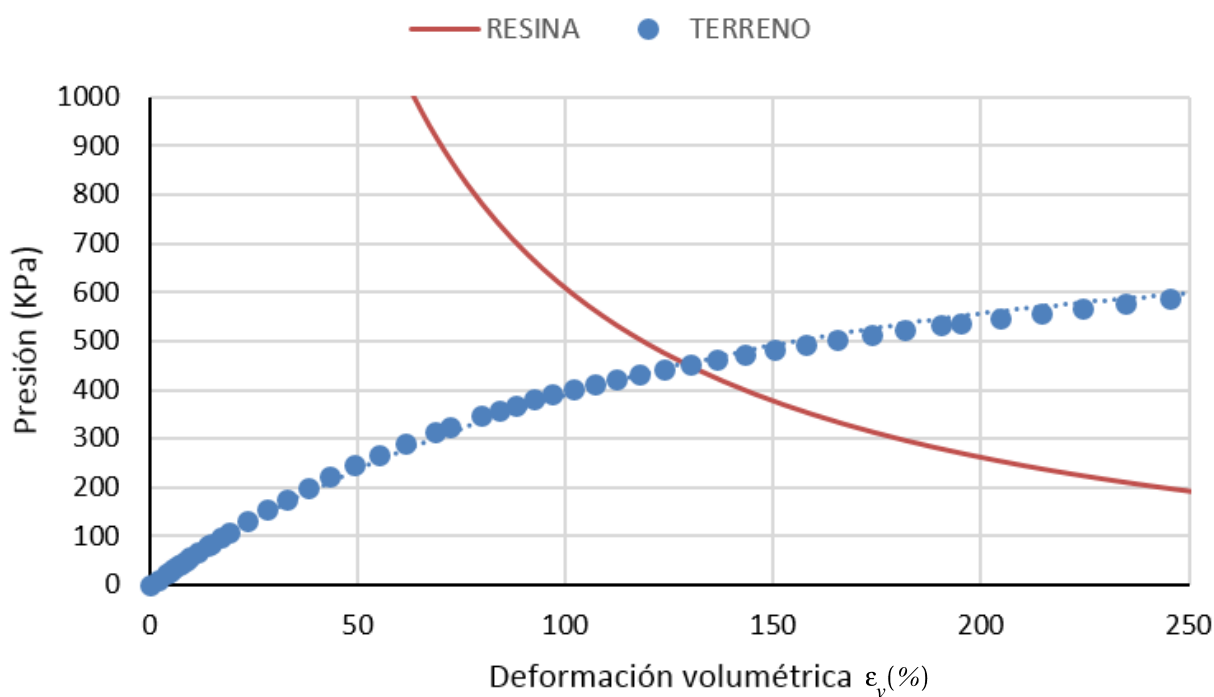
$$H = 2 \cdot R_0 = 2 \cdot 406 = 812 \text{ mm}$$

$$k = 0.188 \cdot \left(\frac{L}{R_0}\right)^2 + 0.417 \cdot \left(\frac{L}{R_0}\right) + 0.25 = 0.188 \cdot \left(\frac{700}{406}\right)^2 + 0.417 \cdot \frac{700}{406} + 0.25 = 1.53$$

P (KPa)	u_1 (mm)	u_2 (mm)	u_3 (mm)	u_4 (mm)	V_f (m ³)	$\epsilon_{v, cil}$ (%)	ϵ_v (%)	δ (mm)
0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,711	0,0	0,0	0,0
11	1,0	3,2	1,1	5,7	1,732	1,2	1,9	0,6
23	2,1	6,4	2,1	11,3	1,753	2,5	3,8	1,3
28	2,6	8,1	2,4	14,2	1,764	3,1	4,7	1,6
34	3,1	9,7	2,7	17,2	1,775	3,7	5,7	2,0
40	3,7	11,4	2,9	20,1	1,785	4,4	6,7	2,3
46	4,2	13,1	3,1	23,1	1,796	5,0	7,6	2,7
51	4,8	14,8	3,2	26,1	1,807	5,6	8,6	3,0
57	5,3	16,5	3,3	29,2	1,819	6,3	9,6	3,4
68	6,4	20,0	3,5	35,3	1,841	7,6	11,6	4,1
80	7,6	23,6	3,7	41,5	1,864	9,0	13,7	4,9
85	8,2	25,4	3,9	44,6	1,876	9,6	14,7	5,3
97	9,3	29,0	4,1	50,9	1,900	11,0	16,9	6,1
108	10,5	32,6	4,3	57,2	1,924	12,5	19,0	6,9
131	13,0	40,0	4,8	70,0	1,974	15,4	23,5	8,6
154	15,5	47,6	5,4	82,9	2,026	18,4	28,1	10,4
177	18,2	55,2	5,9	96,0	2,079	21,5	32,9	12,2
199	20,9	63,2	6,5	109,3	2,136	24,8	38,0	14,2
222	23,8	71,7	7,2	122,7	2,197	28,4	43,4	16,3
245	26,8	80,5	8,0	136,2	2,261	32,2	49,1	18,5
268	30,0	89,8	8,7	149,9	2,329	36,1	55,2	20,9
291	33,3	99,3	9,3	163,6	2,400	40,3	61,6	23,5
313	36,9	109,5	9,8	177,6	2,477	44,8	68,4	26,4
325	38,9	114,8	10,1	184,7	2,518	47,2	72,1	28,0

P (KPa)	u_1 (mm)	u_2 (mm)	u_3 (mm)	u_4 (mm)	V_f (m ³)	$\epsilon_{v, cil}$ (%)	ϵ_v (%)	δ (mm)
348	43,1	125,9	10,5	199,2	2,604	52,2	79,8	31,4
359	45,5	131,6	10,9	206,4	2,650	54,9	83,9	33,4
369	48,0	137,4	11,3	213,7	2,697	57,6	88,1	35,6
380	50,7	143,3	11,4	221,0	2,746	60,5	92,4	37,9
391	53,5	149,3	11,6	228,3	2,796	63,4	96,9	40,4
401	56,6	155,6	12,0	235,6	2,850	66,6	101,7	43,1
412	60,0	162,2	12,7	242,9	2,908	69,9	106,9	46,1
423	63,5	168,9	13,6	250,1	2,968	73,5	112,3	49,3
433	67,2	175,8	15,0	257,4	3,031	77,2	117,9	52,6
444	71,0	182,8	16,7	264,7	3,097	81,0	123,8	56,0
454	74,9	190,0	18,5	272,0	3,166	85,0	129,9	59,6
464	79,0	197,3	21,0	279,2	3,238	89,3	136,4	63,3
474	83,2	204,8	24,1	286,5	3,315	93,7	143,2	67,2
485	87,6	212,4	27,7	293,8	3,395	98,4	150,4	71,3
494	92,1	220,1	31,6	301,1	3,479	103,3	157,9	75,4
504	96,7	227,9	35,7	308,4	3,564	108,3	165,5	79,7
514	101,4	235,8	40,0	315,7	3,654	113,6	173,5	84,1
524	106,2	243,9	44,6	323,0	3,746	119,0	181,8	88,6
533	111,3	252,2	49,5	330,3	3,844	124,7	190,5	93,4
538	114,1	256,6	52,0	333,9	3,896	127,7	195,1	95,9
548	119,6	265,3	57,3	341,2	4,002	133,9	204,6	101,1
558	125,2	274,2	62,6	348,5	4,111	140,3	214,3	106,4
568	130,9	283,0	68,1	355,8	4,223	146,8	224,3	111,7
578	136,7	292,0	73,6	363,0	4,338	153,6	234,6	117,2
587	142,7	301,5	79,2	370,3	4,460	160,7	245,5	122,9
597	149,0	311,1	85,0	377,6	4,588	168,1	256,9	128,9
606	155,4	320,9	90,9	384,9	4,720	175,9	268,7	135,0
616	162,0	330,8	96,8	392,2	4,856	183,8	280,9	141,3
625	168,8	340,9	102,6	399,5	4,997	192,1	293,5	147,7
634	175,8	351,3	108,4	406,8	5,144	200,7	306,6	154,4
644	182,9	361,9	114,2	414,1	5,297	209,6	320,2	161,2
653	190,2	372,6	119,9	421,3	5,453	218,7	334,2	168,2
662	197,7	383,5	125,6	428,6	5,615	228,2	348,6	175,3
672	205,3	394,5	131,0	435,9	5,783	238,0	363,6	182,7
681	213,3	405,9	136,4	443,2	5,957	248,2	379,2	190,3
690	221,4	417,5	141,9	450,4	6,139	258,8	395,4	198,1
699	229,8	429,4	147,6	457,7	6,329	269,9	412,4	206,2
709	238,5	441,6	153,3	465,0	6,528	281,5	430,1	214,6
713	243,1	448,0	156,1	468,6	6,633	287,7	439,5	219,1
722	252,6	461,2	161,5	475,9	6,852	300,5	459,1	228,3
731	262,5	474,6	167,0	483,2	7,081	313,9	479,5	237,8
739	272,4	488,1	172,5	490,3	7,315	327,5	500,4	247,5
748	282,4	501,6	177,9	497,2	7,553	341,5	521,7	257,2
756	292,3	515,1	183,5	504,2	7,798	355,8	543,6	266,8
761	297,3	521,9	186,4	507,7	7,923	363,1	554,7	271,7
769	307,3	535,4	192,1	514,6	8,176	377,9	577,4	281,3

P (KPa)	u_1 (mm)	u_2 (mm)	u_3 (mm)	u_4 (mm)	V_f (m ³)	$\epsilon_{v, cil}$ (%)	ϵ_v (%)	δ (mm)
773	312,3	542,2	194,8	517,8	8,304	385,3	588,7	286,2
780	322,4	555,7	199,9	524,0	8,562	400,4	611,8	296,1
784	327,5	562,4	202,2	526,9	8,692	408,0	623,4	301,1
787	332,7	569,1	204,5	529,6	8,823	415,7	635,1	306,2
790	337,9	575,9	206,8	532,3	8,955	423,4	646,9	311,2
794	343,1	582,6	209,0	535,0	9,089	431,2	658,9	316,3
797	348,3	589,4	211,4	537,8	9,225	439,2	671,0	321,4
800	353,6	596,1	213,8	540,4	9,362	447,2	683,2	326,6

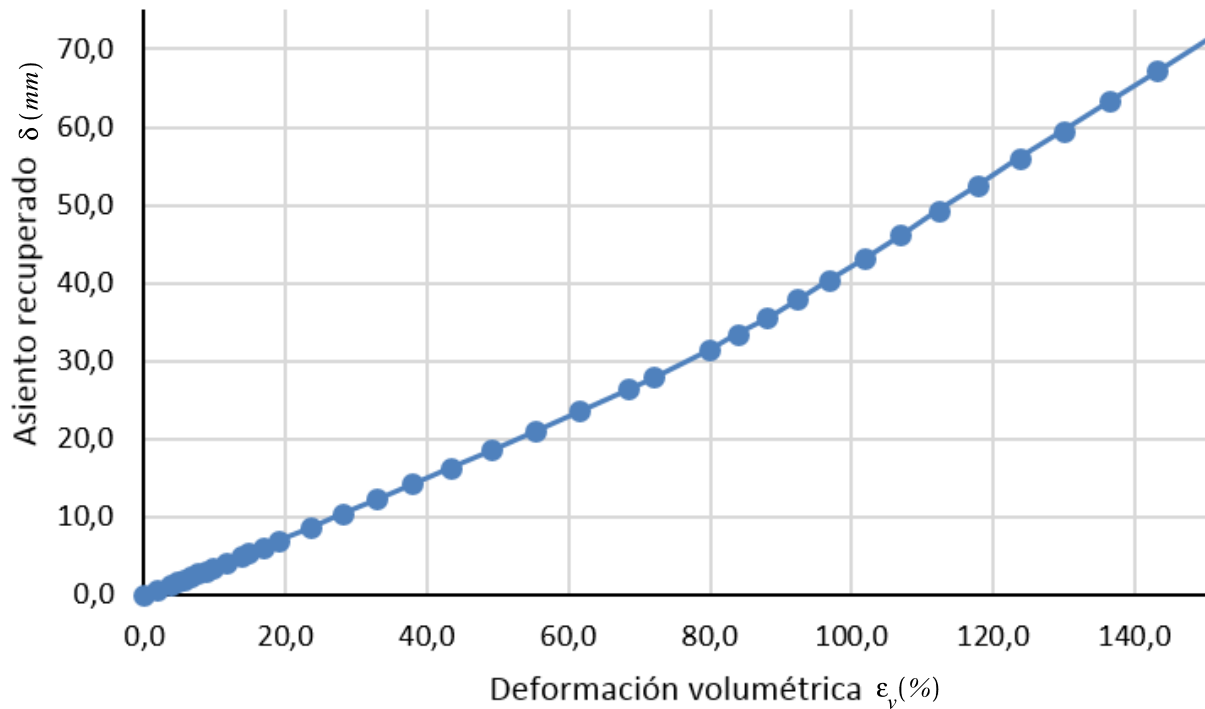


El equilibrio del sistema terreno-resina se alcanza en la intersección de ambas curvas. Para hallar este punto, aproximamos la curva del terreno con una expresión polinómica de cuarto grado obteniendo $R^2 = 0.9988$.

$$P(KPa) = -1.86 \cdot 10^{-8} \cdot \epsilon_v^4(\%) + 3.08 \cdot 10^{-5} \cdot \epsilon_v^3(\%) - 1.85 \cdot 10^{-2} \cdot \epsilon_v^2(\%) + 5.34 \cdot \epsilon_v(\%) + 1.20 \cdot 10^1$$

P_{eq} (KPa)	$\epsilon_{v, eq}$ (%)
453,3	128,7

Interpolando linealmente los valores de la tabla de resultados calculamos el levantamiento correspondiente al punto de equilibrio: 59,5 mm.



3.4.3.4. RESULTADOS

Con estos resultados podemos estimar la relación entre cantidad de resina inyectada y recuperación del asiento.

Kg resina	$\delta (mm)$
0	0
30	20,1
60	36,2
90	59,5

La recuperación de asiento que buscábamos (entre 40 y 45 mm) se ha alcanzado en el intervalo de estudio. Debido a que se ha alcanzado el valor en el intervalo y que la aproximación es buena ($R^2 = 0.9954$), aproximamos linealmente la relación entre recuperación de asiento y cantidad de resina inyectada en cada punto.

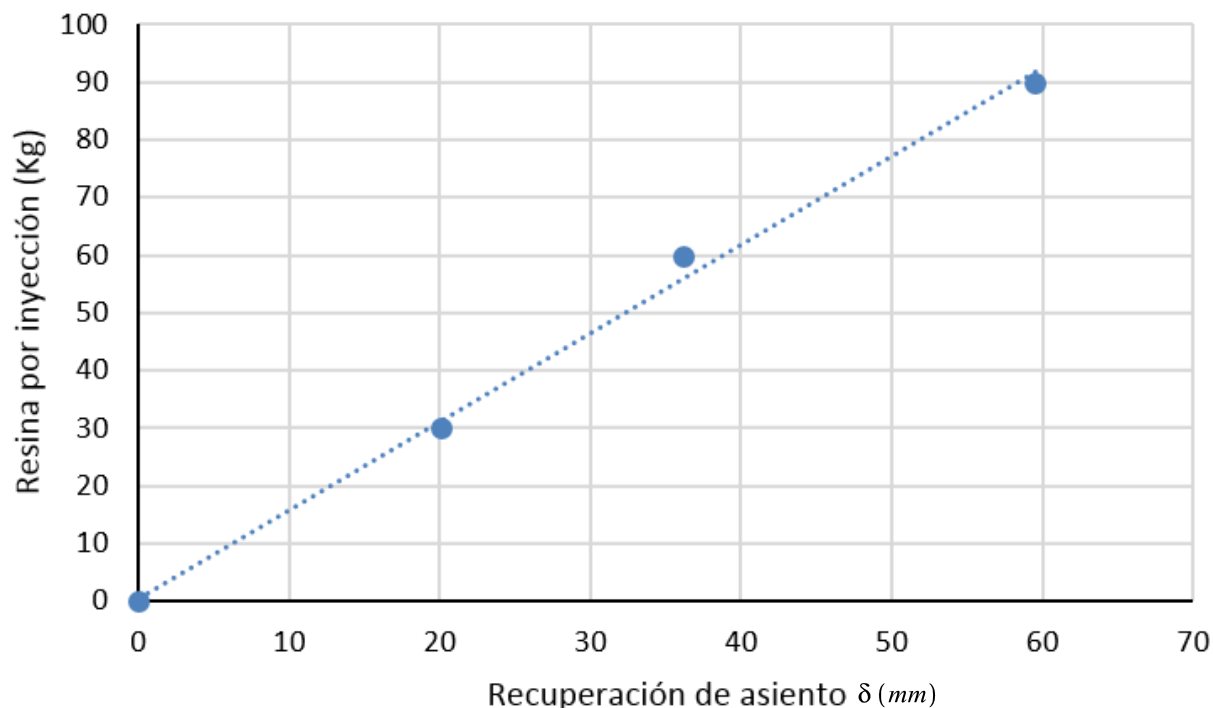
$$Resina (Kg) = 1.53 \cdot \delta(mm) + 0.58$$

Evaluando la expresión, tenemos que hay que inyectar en cada punto la siguiente cantidad de resina para conseguir el levantamiento buscado:

$$62 \text{ Kg} < \frac{Resina}{Inyección} < 69 \text{ Kg}$$

Como se trata de cuatro puntos de inyección, la cantidad total de resina utilizada se estima en:

$$248 \text{ Kg} < \text{Resina total} < 276 \text{ Kg}$$



3.4.4. CONCLUSIONES

En este capítulo hemos aplicado la teoría estudiada en capítulos anteriores a un problema tipo de inyección de desplazamiento en el que queríamos recuperar entre 40 y 45 mm de asiento de una zapata. Hemos tomado un suelo igual al caracterizado en el primer ejemplo de caracterización. Como solamente disponemos de licencia para PLAXIS 2D, ha sido necesario formular el problema de acuerdo a las hipótesis de axisimetría. Hemos ido probando distintas posibilidades de puntos de inyección y cantidad de resina inyectada para ver cuál es la más adecuada a nuestro fin.

La primera solución propuesta ha sido simplemente un único punto de inyección bajo el centro de la zapata. A priori esperábamos que no fuera suficiente, como efectivamente ha resultado, pero nos sirve para tomar consciencia de los órdenes de magnitud del asiento recuperado. La resina en el terreno se ha tomado que forma un bulbo esférico porque el terreno es granular. Recordamos que el planteamiento en suelo puramente cohesivo es totalmente distinto. Del capítulo anterior se dedujo que podría ser adecuado modelar la expansión de la cavidad circular con una sección rígida a la que se le impone una deformación volumétrica de expansión. Es más cómodo y fácil de modelar, sin embargo, para grandes deformaciones no da buenos resultados: hay efectos de borde que disparan las tensiones cerca del contorno de la cavidad, PLAXIS expande la cavidad tal que siempre se mantenga perfectamente esférica (lo

cual no es real) y PLAXIS no modela el contacto entre la resina y la zapata. Hemos visto cómo para deformaciones lo suficientemente grandes la cavidad va más allá del hormigón de la zapata. Como si lo traspasara: no hay compatibilidad de deformaciones.

Así que optamos por modelar la cavidad mediante una poligonal y aplicar carga distribuida. Se tarda un poco más en ir introduciendo los puntos, pero luego vemos que no hay problemas en calcular la presión que se está ejerciendo en todo el borde de la cavidad, la deformada irregular se parece más a lo que realmente ocurriría y efectivamente hay compatibilidad en deformaciones en la cavidad, el suelo entre la zapata y la cavidad y la zapata.

Una vez que deducimos que tomar una sección circular e imponerle deformación no es adecuado, seguimos modelando las inyecciones mediante líneas rectas y aplicando carga distribuida.

Cuando obtenemos el levantamiento correspondiente a esta única inyección, continuamos por ir aumentando la cantidad de resina. De 40 a 90 Kg de resina inyectada, apenas aumenta el levantamiento en un 25%. Además, graficando los resultados vemos cómo para mayores recuperaciones de asiento, en más cantidad de resina es necesario incrementar la inyección para conseguirlo. La expresión de interpolación devuelve unos valores muy elevados. No mostramos los valores como un dato. No pretendemos decir que esa es la cantidad de resina que hay que inyectar para conseguir el levantamiento buscado. Ese número no tiene precisión porque se aleja del intervalo estudiado. Lo que concluimos es que para levantar 40 mm una zapata hace falta varios puntos de inyección. Podemos deducir que cuando se pretendan realizar levantamientos de sobre un par de centímetros, se pruebe a estudiar esta opción, pero más allá que ni se plantee porque no va a resultar suficiente.

Entonces, proponemos una segunda solución con varios puntos de inyección. Estudiamos el caso de que se coloquen a varias profundidades bajo el centro de la zapata para conseguir, además de la recuperación de asiento, un mayor aumento de la rigidez del terreno en profundidad por compactación. No hemos medido el aumento de rigidez. Podría abrirse una nueva línea de investigación por esta rama. Nuevamente, vamos aumentando la cantidad de resina para ver la evolución del asiento recuperado.

Modelar varias cavidades circulares con poligonales resulta una operación muy lenta. Además, va a ser necesario manejar mucha cantidad de datos para evaluar la expansión volumétrica cada paso de carga. Como las inyecciones están próximas entre sí y una encima de otra sobre la misma vertical, aproximamos estos bulbos esféricos a un bulbo cilíndrico (y resulta que ahora aplicar la carga sobre línea recta es inmediato), corrigiendo con un factor k la deformación volumétrica porque volumen de cilindro y resina no son iguales. Se parecen, pero no son iguales. En el apartado de resultados vemos cómo ocurre lo mismo que con la primera propuesta de solución: los valores de resina por inyección resultan muy elevados, no tanto como en el primer caso, pero siguen siendo demasiado altos. Esto indica que aumentar los puntos de inyección ha mejorado los resultados, aunque no lo suficiente. Como no buscamos un aumento

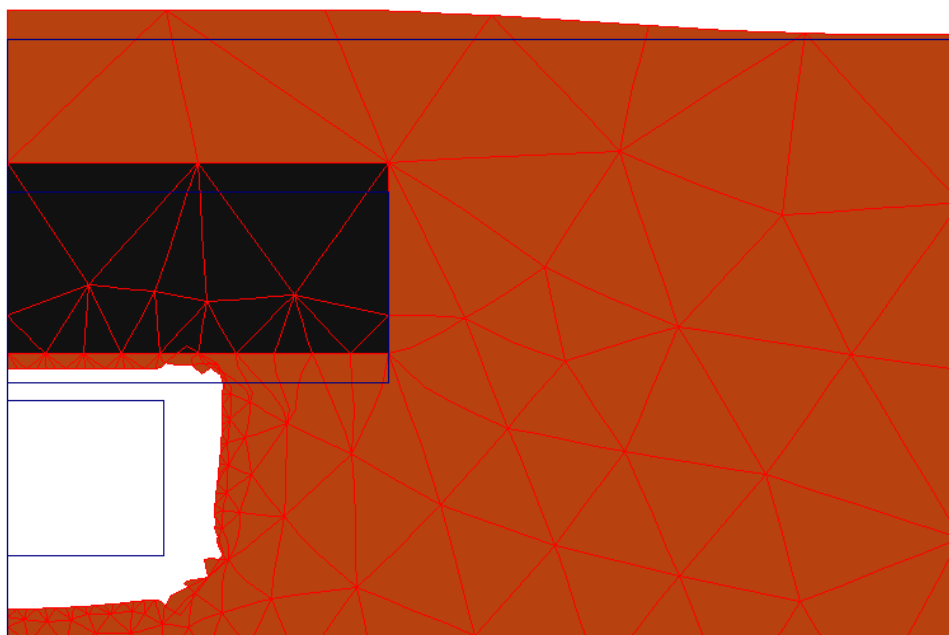
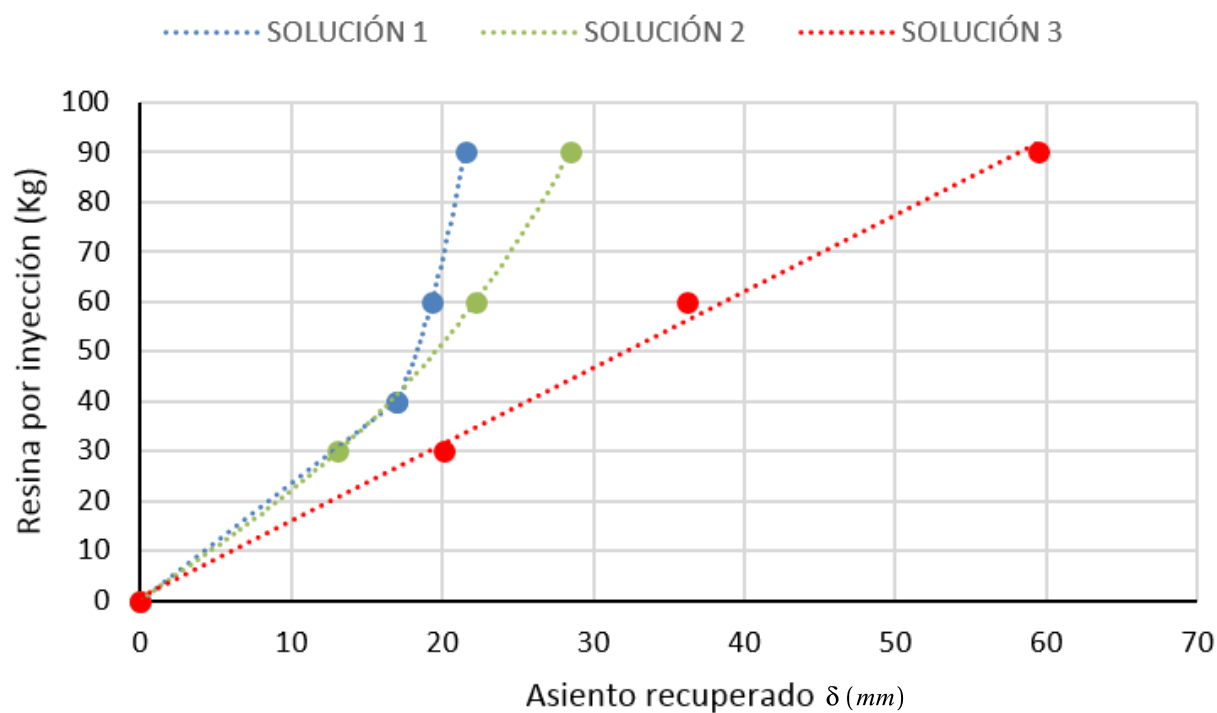
de rigidez en profundidad, probamos en la tercera propuesta de solución a inyectar varios puntos a la misma profundidad bajo la zapata.

Un conjunto de inyecciones a la misma profundidad bajo la zapata no cumple las condiciones de axisimetría. Sin embargo, hemos buscado las aproximaciones necesarias para poder estudiar un problema axisimétrico. Lo primero es que las inyecciones estén equiespaciadas y a la misma distancia de la zapata. Cumpliendo esta condición, cuanto mayor sea el número de inyecciones, mejor será la aproximación a un problema axisimétrico. Hemos optado por cuatro inyecciones. La envolvente tomada sí cumple las condiciones de axisimetría, pero tiene dos líneas curvas que no permiten aplicar carga distribuida. En vez de optar por trazar esas líneas con poligonales, volvemos a aproximar la envolvente con un cilindro de tal forma que se mantenga el volumen inicial. Lo que se mantiene es el volumen inicial de la envolvente, con lo que la deformación de la resina hay que corregirla porque no va a ser la misma que la del cilindro. La deformación de la resina siempre va a ser algo mayor puesto que el volumen inicial es algo menor. En las deformadas de las cavidades, en todas las propuestas de solución, vemos por qué es más adecuado imponer carga distribuida a imponer deformación: la deformada tiene las irregularidades propias que van a ocurrir en realidad. Si se impone una deformación, PLAXIS expande la cavidad manteniendo la forma y eso no se da en la práctica.

En el apartado de resultados de esta propuesta de solución vemos cómo es de acertada esta tercera propuesta: no es que solamente consigamos mayores recuperaciones de asiento, sino que sobrepasamos el valor buscado. Como el intervalo estudiado contiene el valor buscado, hemos aproximado la relación entre cantidad de resina y asiento recuperado con una recta porque no es necesario extrapolar los valores con la expresión, como sí ocurría en las dos propuestas de solución anteriores. Concluimos de estas tres soluciones, la tercera es la más acertada para lo que se quiere conseguir. Esta aplicación no deja de ser un problema tipo. Si de verdad fuera necesario aplicarlo a un problema real, ahora habría que profundizar el estudio en esta tercera solución: probar con cinco o seis puntos de inyección, realizarlos con más o menos separación, etc. Pero hasta aquí es suficiente para los objetivos de este trabajo. Se concluye que en un terreno arenoso, para levantar una zapata entre 40 y 45 mm va a ser necesario entorno a cuatro puntos de inyección de unos 65 Kg cada uno situados bajo la zapata a la misma profundidad.

En la figura comparamos la relación entre resina inyectada y cantidad de asiento recuperado de las tres propuestas de solución. Era de esperar que las dos primeras propuestas se parecieran, sobre todo para pequeños valores de recuperación de asiento. Se parecen porque la resina de mayor profundidad se expande desplazando suelo que tiene debajo, así que esa expansión no provoca levantamiento de la zapata. Podemos concluir que para recalces donde se busque reducido levantamiento (sobre 20 mm) no tiene mayor efecto el inyectar a varios niveles de profundidad más que la compactación del terreno: el levantamiento no se va distinguir del conseguido con una única inyección.

La gráfica comparativa pone de manifiesto la efectividad en cuanto a inyección de desplazamiento se refiere de inyectar varios puntos a la misma profundidad. Para recuperaciones de asiento más allá de 20 mm recomendamos optar por soluciones parecidas a la tercera propuesta de solución.



Levantamiento del terreno tras la expansión de la resina

4. CONCLUSIONES

Las empresas comerciales de este sector no elaboran un predimensionamiento de sus ejecuciones, sino que disponen de los instrumentos necesarios para tener controlado instantáneamente el desplazamiento del terreno y parar la inyección cuando se alcanza el valor buscado.

Se han descrito las herramientas teóricas y numéricas y la metodología necesarias para poder abordar con un aceptable grado de seguridad y precisión en los resultados el problema de predimensionar inyecciones de resina expansiva para recuperación de asientos (inyecciones de desplazamiento).

Ante la necesidad de obtener el valor de los parámetros geotécnicos del suelo para introducirlos en el programa informático hemos propuesto una metodología rápida, eficaz y, sobre todo, formal de caracterización de suelos mediante el ensayo presiométrico. Se ha optado por este ensayo principalmente por dos razones. La primera es que se emplea poco tiempo en realizar, así que concuerda con una de las ventajas más importantes del recalce con inyecciones de resinas expansivas: su rapidez. Y la segunda, que es el ensayo normalizado que mejor reproduce el comportamiento de una cavidad en expansión en el terreno. Para la caracterización con el ensayo presiométrico hemos ido ajustando el valor de los parámetros de un modo iterativo hasta conseguir que los resultados devueltos por el programa informático se parezcan a los del ensayo. Sin embargo, proponemos que también se realice un ensayo de triaxial para comparar en particular la resistencia al corte, ya que es el parámetro que más influye en el tramo plástico.

En el último capítulo toda la teoría vista en el documento la aplicamos a un problema tipo: no es un problema real, sino una aplicación pragmática sobre cómo proponemos que se realicen los predimensionamientos de recalces con inyecciones de resinas expansivas para recuperación de asientos. Contemplamos varias posibles soluciones y se deduce que la forma más eficaz de levantar estructuras con la menor cantidad de resina es inyectar varios puntos a la misma profundidad cerca de la cimentación. Con tres cantidades distintas de resina inyectada por punto de inyección, hemos interpolado linealmente los resultados para tener que con cuatro inyecciones de unos 65 Kg de resina cada uno podemos levantar una zapata cuadrada de 4 m de lado y 1 m de canto cargada a su presión admisible entre 40 y 45 mm. En todo caso, si se tratara de una aplicación a un problema real habría que estudiar detalladamente la inyección de esta cantidad estimada con el objetivo de asegurarse si efectivamente genera el levantamiento previsto.

Concluimos que se han cumplido los objetivos de este Trabajo de Fin de Grado: introducir al lector a esta nueva técnica de recalce, elaborar una metodología cuantitativa de predimensionamiento y con ello una metodología formal de caracterización de suelo mediante el ensayo presiométrico para tener los valores de los parámetros geotécnicos necesarios para el predimensionamiento.

5. NUEVAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

A lo largo de este documento nos hemos ido encontrando con algunas incógnitas a las que no hemos encontrado solución y bien o no se han estudiado porque se salían de los objetivos de este trabajo o se han tomado simplificaciones para poder seguir avanzando en la investigación. La solución a estas dudas las proponemos como posibles nuevas líneas de investigación que se deducen de este trabajo.

En la caracterización de suelo mediante ensayo presiométrico, hemos tomado el modelo de comportamiento Mohr-Coulomb. Además hemos asumido que la combinación de valores de los parámetros geotécnicos del suelo será aquella que genere resultados parecidos a los del acta de resultados. Sin embargo, una vez alcanzado el parecido razonable de resultados se nos plantea la duda de si habrá otra combinación de valores que también generen ese parecido. O incluso otras combinaciones que se parezcan más en un tramo de los resultados que en otro. Para resolverlo, proponemos realizar el ensayo en un terreno que ya esté caracterizado y aplicar la metodología propuesta para ver si los parámetros efectivamente se parecen con los que ya se tenían. O también, en un suelo cualquiera realizar el ensayo presiométrico y además otros que también sirvan para caracterizar el terreno (como el ensayo de triaxial) para comprobar la efectividad de la caracterización con el presiómetro en función de la similitud entre los resultados.

En este trabajo se ha comprobado que el modelo Mohr-Coulomb es adecuado para resolver el problema de la expansión de una cavidad en el terreno. Proponemos resolver el problema con otros modelos de comportamiento de suelo más avanzado.

Cuando hemos aplicado la teoría a un problema de recalce, lo primero que hay que hacer es modelar la geometría en el programa informático. Una estructura tiene tres dimensiones y el entorno en general no tendrá ningún tipo de simetría que permita resolver el problema mediante uno equivalente bidimensional. En este trabajo hemos resuelto problemas sencillos bidimensionales. Para mayor variedad de situaciones que se puedan resolver proponemos aplicar la metodología de predimensionamiento de recalces con PLAXIS 3D.

Las inyecciones de resina expansiva se pueden enfocar tanto a levantar una estructura como a mejorar las propiedades mecánicas del terreno. En este trabajo se han aplicado los conocimientos a los problemas de recuperación de asientos, pero resultaría interesante investigar en la mejora del terreno con estas inyecciones, por ejemplo en cuantificar el aumento de rigidez debido a la compacidad que se produce por el desplazamiento que genera la expansión de la resina. Para cuantificar el aumento de rigidez hacen falta modelos de comportamiento más avanzados. También se puede investigar en problemas de consolidación ya que aplicadas de forma adecuada, estas inyecciones pueden provocar que el suelo expulse agua intersticial por la reducción de índice de poros al aumentar la compacidad.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] JIMÉNEZ SALAS, J. A.; DE JUSTO ALPAÑÉS, J.L. (1975). *Geotecnia y Cimientos I*. MADRID. EDITORIAL: RUEDA. 2ª ED.
- [2] JIMÉNEZ SALAS, J. A.; DE JUSTO ALPAÑÉS, J.L. (1981). *Geotecnia y Cimientos II*. MADRID. EDITORIAL: RUEDA.
- [3] JIMÉNEZ SALAS, J. A.; DE JUSTO ALPAÑÉS, J.L. (1980). *Geotecnia y Cimientos III*. MADRID. EDITORIAL: RUEDA.
- [4] BAUZÁ CASTELLÓ, J. D. (2016). *Auscultación geotécnica*. Temario de la asignatura de Obras geotécnicas del grado en Ingeniería Civil de la Universidad de Sevilla.
- [5] SÁNCHEZ LANGEER, J. M. (2016). *Micropilotes y anclajes*. Temario de la asignatura de Obras geotécnicas del grado en Ingeniería Civil de la Universidad de Sevilla.
- [6] PÉREZ VALCÁRCEL, J. *Inspección y recalces de cimentaciones*. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de La Coruña.
- [7] ERA POLIMERS. *Company brochures*. "Era Polimers" es una empresa especializada en el campo de la química del poliuretano.
- [8] DOMINIJANNI, A.; MANASSERO, M. (2016). *Consolidación de terrenos con resinas expansivas. Guía de proyecto*. Redactado por el ámbito de proyecto de investigación URETEK-POLITÉCNICO DE TURÍN. URETEK.
- [9] PÉREZ PÉREZ, J. M. (2004). *Poliuretanos*. Temario de la asignatura de Química y Tecnología de Macromoléculas de la Universidad de Valladolid.
- [10] LODDO, F.; OCCHI, M. (2014). *Il metodo della tomografia di resistività elettrica*. Cuaderno 1 de la consolidación con inyección de resina expansiva. GEOSEC. 2ª ED.
- [11] FISCHANGER, F.; OCCHI, M. (2014). *La tomografia della resistività elettrica nei consolidamenti con resine espandenti*. Cuaderno 2 de la consolidación con inyección de resina expansiva. GEOSEC. 2ª ED.
- [12] D'ATTOLI, M. (2014). *Tecnica dello stato fessurativo deformativo del costruito*. Cuaderno 3 de la consolidación con inyección de resina expansiva. GEOSEC. 2ª ED.
- [13] OCCHI, M. (2014). *Resina Maxima ® per il consolidamento dei terreni di fondazione*. Cuaderno 4 de la consolidación con inyección de resina expansiva. GEOSEC. 2ª ED.

- [14] OCCHI, M.; APUANI, T. (2011). *Consolidación del terreno con resina expansiva: evaluación de la eficiencia*. Traducido del italiano por LEAL MENÉNDEZ, M. Cuaderno 5 de la consolidación con inyección de resina expansiva. GEOSEC.
- [15] OCCHI, M. (2015). *Cedimenti del terreno di fondazione: azioni preventive e protettive, semplici regole per preservare la stabilità del fabbricato*. Cuaderno 6 de la consolidación con inyección de resina expansiva. GEOSEC.
- [16] CARTER, J. P. et. al. (1986). *Cavity expansion in cohesive frictional soils*. Artículo en Geotechnique, Enero 1986.
- [17] YU, H. S. (1990). *Cavity expansion Theory and its application to the analysis of pressuremeters. A thesis submitted for the degree of doctor of Philosophy*. Universidad de Oxford.
- [18] RODRÍGUEZ PONS-ESPARVER, R. (1998). *Metodología de estimación automática de parámetros de suelos arenosos en ensayos presiométricos*. Tesis doctoral dirigida por ELORZA TENREIRO, F. J. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid.
- [19] PARÍS, F. (2000). *Teoría de la Elasticidad*. Editorial: Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales. 3ª ED. Universidad de Sevilla.
- [20] CANO LINARES, H. (2009). *El ensayo presiométrico en el proyecto geotécnico. Obtención de parámetros geotécnicos mediante el presiómetro*. U.P.C. CEDEX.
- [21] CELADA, B. et. al. *Ensayos de deformabilidad para la caracterización del terreno in situ*.
- [22] JIMÉNEZ DUARTE, P. (2010). *Implantación y calibración del presiómetro de Ménard para estimación de la capacidad de soporte y deformabilidad de suelos en cimentaciones de proyectos ICE*. Proyecto final de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción. ICO TEC. Instituto tecnológico de Costa Rica.
- [23] ORTEGA, J. I. et. al. *Experiencia en presiometría para el cálculo de cimentaciones en los suelos detríticos de Madrid*. Universidad politécnica de Cataluña.
- [24] BUZZI, O. et. al. (2010). *Use of expanding polyurethane resin to remediate expansive soil foundations*. Editorial: NRC Research Press.
- [25] Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias (ROM). Capítulo II: Investigación geotécnica.

