



DOCUMENTO DE IDONEIDAD TÉCNICA: N.º 576R /24

Publicación emitida por el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. Prohibida su reproducción sin autorización.

Área genérica / Uso previsto:

Sistema de mejora o refuerzo de terrenos

Nombre comercial:

MIXPILE®

Beneficiario:

MIXAN MIX ANDALUCÍA, S.L.

Sede social:

C/ Puerto n.º 14.
Planta 4.ª, Oficina 8
29016 Málaga
Tel. (+34) 952 226 313
E-mail: tecnicos@mixan.es

**Validez. Desde:
Hasta:**

28 de junio de 2024
28 de junio de 2029
(Condicionada a seguimiento anual)

Este Documento consta de 19 páginas y 1 Anexo de 8 páginas



MIEMBRO DE:

UNIÓN EUROPEA PARA LA EVALUACIÓN DE LA IDONEIDAD TÉCNICA EN CONSTRUCCIÓN
UNION EUROPEENNE POUR L'AGREMENT TECHNIQUE DANS LA CONSTRUCTION
EUROPEAN UNION FOR TECHNICAL APPROVAL IN CONSTRUCTION
EUROPÄISCHE UNION FÜR DAS AGREMENT IN BAUWESEN



MUY IMPORTANTE

El DOCUMENTO DE IDONEIDAD TÉCNICA constituye, por definición, una apreciación técnica favorable por parte del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, de la aptitud de empleo en construcción de materiales, sistemas y procedimientos no tradicionales destinados a un uso determinado y específico. No tiene, por sí mismo, ningún efecto administrativo, ni representa autorización de uso, ni garantía. La responsabilidad del IETcc no alcanza a los aspectos relacionados con la Propiedad Intelectual o la Propiedad Industrial ni a los derechos de patente del producto, sistema o procedimientos de fabricación o instalación que aparecen en el DIT. Antes de utilizar el material, sistema o procedimiento al que se refiere, es preciso el conocimiento íntegro del Documento, por lo que este deberá ser suministrado, por el titular del mismo, en su totalidad. La modificación de las características de los productos o el no respetar las condiciones de utilización, así como las observaciones de la Comisión de Expertos, invalida la presente evaluación técnica.

C.D.U.: 624.138.23

Mejora de suelo por mezcla con diversos materiales de construcción. Estabilización de suelos con cemento.

Soil improvenent with a binding agent. Stabilization of soils with cement.

Amélioration du sol parquet par mélange avec divers matériaux de construction. Stabilisation des sols avec ciment.

DECISIÓN NÚM. 576R/ 24

EL DIRECTOR DEL INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA CONSTRUCCIÓN EDUARDO TORROJA,

- en virtud del Decreto n.º 3652/1963, de 26 de diciembre, de la Presidencia del Gobierno, por el que se faculta al Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, para extender el DOCUMENTO DE IDONEIDAD TÉCNICA de los materiales, sistemas y procedimientos no tradicionales de construcción utilizados en la edificación y obras públicas, y de la Orden n.º 1265/1988, de 23 de diciembre, del Ministerio de Relaciones con las Cortes y de la Secretaría del Gobierno, por la que se regula su concesión,
- considerando el artículo 5.2, apartado 5, del Código Técnico de la Edificación (en adelante CTE) sobre conformidad con el CTE de los productos, equipos y sistemas innovadores, que establece que un sistema constructivo es conforme con el CTE si dispone de una evaluación técnica favorable de su idoneidad para el uso previsto,
- considerando las especificaciones establecidas en el Reglamento para el Seguimiento del DIT del 28 de octubre de 1998,
- en virtud de los vigentes Estatutos de l'Union Européenne pour l'Agrément technique dans la construction (UEAtc),
- considerando la solicitud formulada por la Sociedad MIXAN MIX ANDALUCIA, S.L., para la RENOVACIÓN del DOCUMENTO DE IDONEIDAD TÉCNICA n.º 576R/ 17 al Sistema de mejora o refuerzo de terrenos MIXPILE[®],
- teniendo en cuenta los informes de visitas a obras realizadas por representantes del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, los informes de los ensayos realizados en el IETcc o en otros laboratorios, así como las observaciones formuladas por la Comisión de Expertos, establecida conforme al Reglamento del DIT,

DECIDE:

Conceder el DOCUMENTO DE IDONEIDAD TÉCNICA número 576R/ 24, al **Sistema de mejora o refuerzo de terrenos MIXPILE[®]**, considerando que,

La evaluación técnica realizada permite concluir que el Sistema es **CONFORME CON EL CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN**, siempre que se respete el contenido completo del presente documento y en particular las siguientes condiciones:



CONDICIONES GENERALES

El presente DOCUMENTO DE IDONEIDAD TÉCNICA evalúa exclusivamente el Sistema constructivo propuesto por el beneficiario y tal y como se describe en el presente Documento, debiendo para cada caso, de acuerdo con la normativa vigente, acompañarse del correspondiente proyecto técnico y llevarse a término mediante la dirección de obra correspondiente.

Para el desarrollo del proyecto técnico citado anteriormente, MIXAN MIX ANDALUCÍA, S.L. realizará un informe técnico en el que se justificará el cumplimiento de la normativa en vigor, aportando la correspondiente memoria de cálculo con los parámetros del comportamiento mecánico del terreno mejorado o reforzado, toda la información necesaria de cada uno de los componentes, especificaciones de los materiales a emplear y la documentación gráfica en la que se detallen el diámetro y longitud de las «columnas» y distancia entre ellas, cotas, etc., definidas en función del tipo de terreno y de las características y cargas del edificio u obra a implantar.

CONDICIONES DE CÁLCULO

En cada caso, y en función del tipo de terreno, el beneficiario comprobará, de acuerdo con las condiciones de cálculo indicadas en el Informe Técnico de este Documento, que los coeficientes de seguridad que garantizan la capacidad portante y estabilidad global del terreno, son las definidas en este Documento, de acuerdo con el Código Técnico de Edificación.

CONDICIONES DE FABRICACIÓN Y CONTROL

El fabricante deberá mantener el autocontrol que en la actualidad realiza sobre las materias primas, el proceso de fabricación y el producto acabado, conforme a las indicaciones que se dan en el apartado 6 del presente Documento, que no será menor del prescrito en la reglamentación vigente.

CONDICIONES DE UTILIZACIÓN Y PUESTA EN OBRA

La puesta en obra del sistema debe ser realizada por el beneficiario del DIT o por empresas especializadas y cualificadas, reconocidas por este, con su asistencia técnica. Dichas empresas garantizarán que la puesta en obra del Sistema se efectúa en las condiciones y campos de aplicación cubiertos por el presente Documento, respetando las observaciones formuladas por la Comisión de Expertos.

De acuerdo con lo anterior, el presente documento ampara exclusivamente aquellas obras que hayan sido realizadas por empresas reconocidas en el ámbito de este DIT.

Se adoptarán todas las disposiciones necesarias relativas a la estabilidad de las construcciones durante el montaje, a los riesgos de caída a distinto nivel, de protección de personas y, en general, se tendrán en cuenta las disposiciones contenidas en los reglamentos vigentes de Seguridad y Salud en el Trabajo.

VALIDEZ

El presente Documento de Idoneidad Técnica número 576R/ 24 sustituye y anula al documento n.º 576R/ 17 y es válido durante un período de cinco años a condición de:

- que el fabricante no modifique ninguna de las características del producto indicadas en el presente Documento de Idoneidad Técnica,
- que el fabricante realice un autocontrol sistemático de la producción tal y como se indica en el Informe Técnico,
- que anualmente se realice un seguimiento, por parte del Instituto, que constate el cumplimiento de las condiciones anteriores, visitando, si lo considera oportuno, alguna de las obras realizadas.

Con el resultado favorable del seguimiento, el IETcc emitirá anualmente un certificado que deberá acompañar al DIT, para darle validez.

Este Documento deberá, por tanto, renovarse antes del 28 de junio de 2029.

Madrid, 28 de junio de 2024.

Ángel Castillo Talavera

EL DIRECTOR DEL INSTITUTO DE CIENCIAS
DE LA CONSTRUCCIÓN EDUARDO TORROJA



INFORME TÉCNICO

1. OBJETO

El sistema de mejora o refuerzo de terrenos Mixpile® consiste en la mezcla del terreno natural con lechada de cemento, que pueden llegar a generar unas columnas de resistencia adecuada sobre las que se apoya la cimentación.

De este modo, se consigue atravesar las capas de terreno que no resulten idóneas para apoyar sobre ellas una cimentación, a la vez que se mejoran sus características geomecánicas tales como la estabilidad, la resistencia al corte, la capacidad portante, la compresibilidad, etc.

La gama de aplicaciones del Sistema abarca, para proyectos de obra nueva, desde la cimentación de todo tipo de edificaciones donde haya que reforzar o mejorar los parámetros resistentes, hasta la estabilización de laderas y ejecución de terraplenes de carreteras y ferrocarriles.

En los casos en que en las columnas Mixpile® trabajen a flexión, la resistencia al corte de la columna podrá conseguirse mediante el hincado de perfiles metálicos en ella mientras la lechada de cemento está fresca. Esta aplicación no ha sido evaluada para el presente documento.

Según las definiciones incluidas en el CTE DB SE-C, el campo de aplicación previsto se podría delimitar dentro de su capítulo 8: «Mejora o refuerzo del terreno», al tratarse de mezclas del terreno con conglomerantes, que generan columnas de escasa capacidad portante individual situados regularmente espaciados y destinados a reducir asentamientos o a mejorar la seguridad frente a hundimiento de las cimentaciones.

Los objetivos de la mejora del terreno pueden ser:

- Incremento de la rigidez para la mejora de la aptitud al servicio con la reducción de asentamientos.
- Mejora de su capacidad portante y resistencia al corte.
- Homogeneización del terreno.

2. PRINCIPIO Y DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El sistema de refuerzo o mejora del terreno Mixpile® realizado mediante el mezclado profundo del suelo existente con lechada de cemento inyectada, puede disminuir la compresibilidad del mismo, provocando una reducción de los asentamientos en la cimentación, un aumento de la presión admisible y de su rigidez. Por tanto, incrementa la resistencia al corte del terreno, mejorando su capacidad portante y aptitud al servicio y en consecuencia la de los elementos de cimentación y de contención situados sobre él.

En adelante, en este documento, se denominará Mixpile® tanto al sistema de refuerzo o mejora de terreno como a cada una de las columnas obtenidas por este procedimiento.

Este sistema está indicado para el grupo de terrenos intermedios, rellenos, blandos o

colapsables (T-2 o T-3), según la descripción de la Tabla 3.2 del DB-SE-C, sin perjuicio de que cada proyecto de mejora debe ser estudiado con las características concretas del terreno a reforzar.

Las columnas de Mixpile® se disponen formando una malla más o menos uniforme sobre la que suele colocarse un elemento de reparto que producirá la transferencia de carga hasta las inclusiones. Véanse figuras 1 y 2.

El replanteo de las columnas de terreno mejorado Mixpile® puede realizarse siguiendo diferentes formas y configuraciones tales como:

- Cuadrícula
- Tresbolillo
- Solapadas

Los elementos de reparto pueden ser tanto elementos rígidos (tales como soleras, losas de cimentación o zapatas arriostradas) como una capa granular o una combinación de ambos, en todos los casos, de espesores adecuados. En ningún caso deberá haber conexión estructural entre las inclusiones y la losa o solera.

Los parámetros habituales del replanteo de las columnas de suelo mejorado con la lechada de cemento y de la instalación y la mezcla están parametrizados para columnas de diámetro 450 mm (si bien podría ajustarse, justificando los criterios de cálculo, para otros diámetros en casos particulares) y son los siguientes:

- Velocidad de rotación: 5 ~ 25 r.p.m.

Dicha velocidad se fija principalmente en función de la granulometría y de la compacidad/dureza del terreno, así como del límite líquido e índice de plasticidad.

- Cantidad de cemento: 350 ~ 650 kg/m³ de suelo mezclado.

La cantidad de cemento que se consume es función de lo que admita el terreno y depende principalmente del índice de huecos y de la naturaleza granular o coherente del terreno. Los consumos habituales aparecen reflejados en la tabla 1.

El consumo de cemento es por m³ de columna tratada, incluyendo el volumen del terreno original. Para las columnas estándar de 45 cm de diámetro, esto se traduce en unos consumos de entre 55 y 105 kg/m.

Tanto el control de parámetros, como el control de la cantidad de sacos de cemento empleado, permite confirmar la cantidad de cemento consumida.

La rotura de probetas a compresión simple permite comprobar que la cantidad de cemento inyectada constituye, junto con el terreno, un material con las características de resistencia necesarias.

- Longitud de columna: Hasta 25 m.



- Diámetro habitual de columna: 450 mm.

Si bien el diámetro de columna común es 450 mm, puede utilizarse para proyectos concretos diámetros mayores, hasta 900 mm, ajustando y justificando convenientemente el resto de parámetros.

En los terrenos coherentes, el diámetro de la columna coincide con el de la perforación, pudiendo ser algo mayor en el caso de los terrenos granulares o rellenos.

- Separación máxima entre ejes: 3 m

Para columnas en el borde o fuera de la malla esta separación será menor y se definirá según lo indicado en el apartado 6.3 del presente Informe Técnico.

Los parámetros reales empleados en cada ejecución quedan recogidos en el control de parámetros.

El Mixpile® se desarrollará de acuerdo a la norma UNE-EN 14679: 2008⁽¹⁾.

3. MATERIALES Y COMPONENTES DEL SISTEMA

3.1 Terreno

Una de sus ventajas es el amplio ámbito de aplicación, tanto en función del tipo de suelo como en función del tipo de estructura.

Las columnas se pueden aplicar a una gran variedad de tipos de suelo tales como rellenos, depósitos de residuos, fangos o suelos naturales:

- Coherentes o suelos de grano fino (ML, CL, OL, MH, CH, OH):
 - Arcillas blandas
 - Fangos
 - Limos blandos
- Granulares o de grano grueso sueltos (GW, GP, GM, GC, SW, SP, SM, SC).
- Suelos con elevado contenido de materia orgánica, sulfatos o sal.

Las propiedades de resistencia del terreno natural sobre el que se realiza la mejora oscilan habitualmente entre:

q_u : 0 ~ 75 kPa (terrenos coherentes)

N_{SPT} : 0 ~ 25 (terrenos granulares)

El consumo habitual de cemento y las propiedades del terreno tratado se indican en la tabla siguiente:

Tabla 1. Consumos de cemento

Tipo de terreno	Consumo cemento (kg/m ³) *	Resistencia a compresión simple (MPa) **
Granular	500 ~ 650	8 ~ 15
Coherente	350 ~ 500	5 ~ 10

* Consumo sobre volumen de suelo antes del tratamiento: para una columna de 0,45 m de diámetro, el volumen por metro de profundidad es 0,16 m³. Con un consumo central de 500 kg/m³, suponen 80 kg de cemento por metro de profundidad de columna.

** Según los registros de control de ejecución, aportados por el fabricante, en proyectos en los que se han empleado este, algunos de los cuales se relacionan en el apartado 7.

3.2 Cemento

Se realiza una lechada de cemento con una relación agua/cemento comprendida entre 0,60 a 0,75 en peso. La relación agua/cemento tiene que ajustarse en función de la humedad natural del terreno: en presencia de agua, la relación a/c se reduce de 0,75 a 0,7 ~ 0,65.

Los cementos utilizados cumplirán con el Real Decreto 256/2016, de 10 de junio, por el que se aprueba la Instrucción para la recepción de cementos (RC-16) y contarán con Declaración de Prestaciones (marcado CE) según la Norma UNE-EN 197-1:2011⁽²⁾.

Según la tabla A6.3.1 del Código Estructural, los cementos recomendados para cimentaciones de hormigón en masa son los cementos comunes tipo CEM IV/B con excepción del CEM II/A-Q, CEM II/B-Q, CEM II/A-W, CEM II/B-W, CEM II/A-T, CEM II/B-T y CEM III/C.

En todos los casos es recomendable la característica adicional de bajo calor de hidratación (LH). Cuando corresponda, es necesario cumplir las prescripciones relativas al empleo de la característica adicional de resistencia al agua de mar (MR) o a sulfatos (SR o SRC). En este último caso, los cementos deberán poseer la característica adicional de resistencia a sulfatos, especificada en UNE 80303-1:2017⁽³⁾, siempre que el contenido de sulfatos, expresado como SO₃, sea igual o mayor que 600 mg/L en el caso de aguas o 3000 mg/kg en el caso de suelos.

Hay que tener en cuenta que la resistencia al corte del suelo mejorado puede variar en función del tipo de cemento, por lo que se recomienda usar un solo tipo para un mismo proyecto.

El tipo de cemento se elegirá en base a los resultados del Estudio Geotécnico y las condiciones de agresividad del terreno.

⁽¹⁾ UNE-EN 14679:2008. Ejecución de trabajos geotécnicos especiales. Mezclado profundo.

⁽²⁾ UNE-EN 197-1:2011. Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes.

⁽³⁾ UNE 80303-1:2017. Cementos con características adicionales. Parte 1: Cementos resistentes a los sulfatos.



3.3 Aditivos

En situaciones particulares donde haya que conseguir la homogeneización de la mezcla suelo-cemento u otras características específicas, pueden utilizarse determinados aditivos fluidificantes. Con ello se consigue reducir la cantidad de agua de amasado, alargar el estado de fluidez, disminuir la retracción, aumentar la resistencia y durabilidad y mejora el bombeo y la penetración en pequeños huecos.

Los aditivos se emplearán siguiendo la forma de aplicación y dosificación indicada por el fabricante, siendo habitual una cantidad del 0,5 ~ 1 % en peso del cemento.

Deben cumplir las prescripciones marcadas en el Código Estructural y—contar con Declaración de Prestaciones (marcado CE) según la norma UNE-EN 934-2:2010+A1:2012⁽⁴⁾.

3.4 Agua

El agua utilizada deberá cumplir las prescripciones fijadas en el Código Estructural.

4. PUESTA EN OBRA

Antes de la ejecución de los trabajos, debe definirse la situación de las líneas de la malla principal para el replanteo, que se obtiene de los datos siguientes:

- Las condiciones de las estructuras, carreteras, servicios, etc. adyacentes a la obra.
- La geometría del emplazamiento.
- Las estructuras subterráneas existentes, canalizaciones de servicios, contaminación y limitaciones de infraestructuras urbanas o arqueológicas conocidas.
- La distribución y entidad de las solicitaciones de las edificaciones, contenciones y otros elementos constructivos a soportar.

Además, según proceda, se deberá saber también:

- Restricciones ambientales.
- Las actividades de construcción en ejecución o futuras.
- La experiencia previa en obras adyacentes al emplazamiento.
- La contaminación subterránea o riesgos que puedan afectar al método de ejecución, la seguridad del trabajo o la eliminación del material de excavación del emplazamiento.

La preparación del emplazamiento debe llevarse a cabo de acuerdo con las especificaciones de diseño y las condiciones ambientales específicas.

Esta debe incluir accesos adecuados para la entrada y desplazamiento de la maquinaria y colocación de los elementos auxiliares, tales como los útiles de mezclado de la lechada, los acopios de material necesarios, etc., excavación, limpieza y nivelación de la plataforma de trabajo que garantice la suficiente

⁽⁴⁾ UNE-EN 934-2:2010+A1:2012. Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 2: Aditivos para hormigones. Definiciones, requisitos, conformidad, marcado y etiquetado.

capacidad portante para los equipos, recepción, control de calidad y almacenaje del material.

El equipo y los útiles de mezclado deben ser compatibles con el procedimiento de ejecución, la profundidad del suelo a tratar y las tolerancias de ejecución especificadas en el diseño.

En función del equipo de perforación podrán alcanzarse mayores o menores profundidades de columna, que dependerán de la altura del mástil y prolongadores en su caso.

Habrà que tener en cuenta también, a la hora de elegir el equipo, las limitaciones en cuanto al peso y condiciones de accesibilidad, ya que los equipos más pequeños alcanzan menores profundidades, pero, a cambio, presentan ventajas en este aspecto.

Los útiles deben adaptarse al tipo de terreno a perforar como, por ejemplo, útiles de vidia para terreno más duros o cola de pez en arcillas.

La ejecución se realizará según lo prescrito en la norma UNE-EN 14679:2008⁽⁵⁾.

La ejecución del proceso de mejora del terreno comienza con el posicionamiento correcto del útil de mezclado según el replanteo previo.

A continuación, se introduce un tubo que soporta, en el primer metro del extremo inferior, unas paletas de mezclado que cortan y disgregan el suelo hasta la profundidad de tratamiento deseada.

Durante la introducción o extracción del tubo en el terreno, se inyecta la lechada de cemento en el suelo con un flujo constante, mezclando el suelo con la lechada.

La operación de subida y bajada del tubo se realiza varias veces para garantizar la homogeneidad de la mezcla, evitando variaciones de las características de las columnas en función de la profundidad.

Al suelo natural se le aporta una lechada de cemento inyectada que produce un doble efecto; por una parte, densifica dicho suelo y por otra, origina unas columnas (suelo/cemento) en masa, con resistencias a compresión simple que oscilan entre 5 y 15 MPa, según los registros de control de ejecución en proyectos en los que se han empleado estas columnas, algunos de los cuales se relacionan en el apartado 7.

Al no extraer ninguna fracción del terreno durante el proceso y mezclarlo con la lechada de cemento, el material se densifica y no se generan residuos, tan solo una pequeña cantidad de residuo (que puede ser algo mayor en el caso de los terrenos coherentes) que forma un pequeño cráter alrededor de la columna, pero que se retira al finalizar los trabajos.

⁽⁵⁾ UNE-EN 14679:2008. Ejecución de trabajos geotécnicos especiales. Mezclado profundo.



No se producen, tampoco, vibraciones que puedan perjudicar edificaciones o construcciones cercanas.

La velocidad de rotación del útil de mezclado del equipo y su ritmo de penetración y extracción se debe ajustar para producir un suelo tratado lo suficientemente homogéneo.

Los parámetros que condicionan la velocidad de ejecución y el número de pasadas, tal y como se ha indicado anteriormente, son el tipo de material, dureza/compacidad del mismo, presencia de agua... Si bien todas estas características del terreno influyen en el proceso de ejecución, lo hacen de manera cualitativa, dando una idea a priori de los condicionantes a tener en cuenta. Sin embargo, el resultado final depende de la interacción de todas ellas por lo que debe ser el operario de la empresa especializada en la instalación quien adapte el procedimiento de ejecución a cada caso particular.

En cualquier caso, tanto el control durante la ejecución como los controles de producto terminado, son los que permiten comprobar que se han obtenido las características exigidas.

Debe suministrarse la lechada durante el mezclado bombeando un flujo continuo en el suelo a tratar.

El bombeo de la lechada debe adaptarse a la admisión del terreno y al procedimiento de perforación. Los consumos medios, que dependerán de cada caso particular, aparecen recogidos en la Tabla 1.

El proceso se puede interrumpir con la condición de que la lechada no haya empezado a fraguar (según el tiempo mínimo de fraguado del cemento empleado) y que el útil de mezclado empiece a trabajar 0,5 m por debajo del suelo ya tratado.

Cuando se utilicen columnas de Mixpile® como elementos sometidos a esfuerzos horizontales deben instalarse refuerzos estructurales en las columnas mientras permanezcan frescas, consistentes en el hincado de perfiles de acero, con una longitud de empotramiento en función de las solicitaciones del proyecto. En este caso, el cemento tiene que cumplir las condiciones de agresividad del hormigón armado.

La maquinaria utilizada consiste en un equipo de pilotaje CF-3, E300, E6050 o equivalente y un equipo de inyección de lechada o mortero.

Las condiciones típicas de mezclado se muestran a continuación.

Tabla 2. Detalles de ejecución de una columna Mixpile®

Equipo de mezclado	N.º de tuberías	1
	Diámetro útiles mezclado	0,45 a 0,9 m
	Posición de la salida de la lechada	Barra de perforación
	Presión de inyección	200 a 1000 kPa
Planta dosificadora	Cantidad de lechada almacenada	0,25 m³
	Capacidad de suministro	3 m³ /hora

Como referencia, para la columna habitual de Mixpile® de 450 mm de diámetro, se tienen los siguientes valores:

Tabla 3. Parámetros de ejecución de una columna Mixpile®

Velocidad de penetración	0,5 a 1,5 m/min
Velocidad extracción	3 a 5 m/min
Velocidad de rotación	5 ~ 25 r.p.m
Cantidad de cemento	350 ~ 650 kg/m³
Fase de inyección	Durante la penetración o extracción

Los parámetros correspondientes a un proyecto concreto se establecerán en base al estudio previo y manual de ejecución de MIXAN MIX.

Todos los materiales y productos que se entreguen deben identificarse y revisarse de acuerdo con las especificaciones de proyecto.

Todas las materias primas son suministradas por empresas con certificado de Control de Producción en fábrica según la norma de producto correspondiente. Estas empresas deberán garantizar la trazabilidad de sus productos.

La puesta en obra del sistema debe ser realizada por el fabricante o por empresas cualificadas y especializadas, reconocidas por MIXAN MIX ANDALUCÍA, S.L., bajo su control y asistencia técnica, de acuerdo con las especificaciones de este documento.

En cualquier caso, MIXAN MIX ANDALUCÍA, S.L. facilita todos los datos necesarios para realizar el proyecto de refuerzo y mejora del terreno; debiendo proporcionar, si así se solicita, asistencia técnica durante las fases de proyecto y ejecución, incluyendo la resolución de los puntos singulares.

5. CONTROL DE CALIDAD

MIXAN MIX ANDALUCÍA, S.L., tendrá registrados los controles y certificados que a continuación se indican para garantizar la calidad y trazabilidad de los productos. Estos estarán a disposición del IETcc.

En las especificaciones de diseño se deberá definir el alcance de los ensayos y el control.

Antes del comienzo de los trabajos, se deben establecer los procedimientos para la verificación, control y aceptación.

5.1 Controles de recepción de materias primas o componentes

- **Cemento:**

Se controla que el cemento tenga las características demandadas para el tipo de terreno en cuestión, en especial de si se trata de un cemento ordinario o sulforresistente. Para ello, se solicita el certificado de calidad de la materia prima.



El cemento contará con Declaración de Prestaciones (marcado CE) según la norma correspondiente.

El cemento debe protegerse de la humedad o del aire, que podría afectar perjudicialmente su uso o función.

- Aditivos:

Se controla que tenga las características de la ficha técnica. Se comprobará que dispone de Declaración de Prestaciones (marcado CE).

5.2 Control de maquinaria

Se exigirá que tenga marcado CE.

Se realizará un plan de mantenimiento y revisiones periódicas según las condiciones requeridas por el fabricante.

5.3 Mano de obra

Debe estar a cargo de la ejecución personal cualificado y con experiencia en la técnica para asegurar que la construcción cumple con el diseño y otros documentos del contrato.

Cuando se encuentren condiciones imprevistas o se disponga de nueva información, debe informarse inmediatamente de acuerdo con los procedimientos previstos

El personal será especializado y cada grupo estará formado por el maquinista y uno o dos especialistas, para ayuda del sondista y para operaciones de inyección.

5.4 Control de puesta en obra del sistema

Como se indica en las Condiciones Generales de este Documento, las obras deberán llevarse a término sometidas a la preceptiva Dirección de obra.

No obstante, el fabricante del Sistema realizará un control de la puesta en obra de acuerdo con las especificaciones técnicas contenidas en este documento.

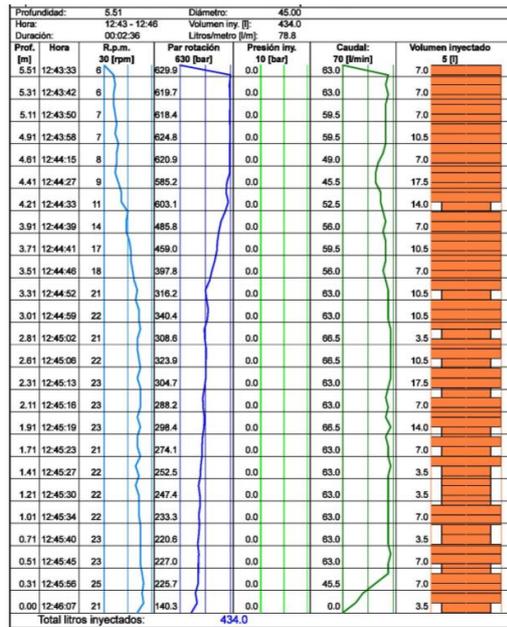
Los documentos de control de puesta en obra son la **Ficha de control de tareas y responsables de puesta en obra** y los **Planos de replanteo de las columnas**.

Durante la ejecución se deben controlar los siguientes parámetros:

- Fecha y hora.
- Número de referencia de la columna.
- Velocidad de penetración.
- Velocidad de rotación.
- Relación a/c. Densidad de la lechada.
- Cantidad de lechada por metro de profundidad.
- Cota de apoyo.

Esta información queda reflejada en la **Ficha diaria de puesta en obra** o en el fichero informático de control de parámetros de la máquina.

Gráfico 1. Ejemplo control de parámetros durante el tratamiento del terreno



5.5 Control de producto terminado

En el proyecto se establecerán las especificaciones de los materiales a emplear, las propiedades del terreno tras su mejora y las condiciones constructivas y de control.

Los criterios de aceptación, fijados en el proyecto para el método que pueda adoptarse de mejora del terreno, consistirán en unos valores mínimos de determinadas propiedades, a saber: tensión admisible y coeficiente de balasto (superiores a las obtenidas por cálculo), resistencia a compresión de probetas de terreno mejorado y asiento de la inclusión (debe cumplir lo expuesto más adelante).

La consecución de estos valores o de valores superiores a los mínimos, tras el proceso de mejora debe contrastarse adecuadamente según los resultados de los siguientes ensayos, que deberá realizar un laboratorio acreditado por ENAC o inscrito en el Registro General de Código Técnico de Edificación para la realización de dichos ensayos (RD 410/2010).

5.5.1 Ensayos sobre la mezcla de suelo/cemento

La toma de muestras de la mezcla de suelo cemento se realizará con una herramienta adecuada, antes de que transcurran 30 minutos desde la finalización del mismo, de manera que no haya comenzado aún el proceso de fraguado. Para ello, se bajará el tomamuestras hasta la profundidad deseada (en general 2 metros, salvo que se haya definido y previsto anteriormente la conveniencia de obtener estas muestras húmedas a otra profundidad), para extraer la muestra a la superficie, donde se procesará el material y se colocará en probetas para su ensayo.



El número mínimo de lotes se establecerá previamente a la actuación por la Dirección de Obra. En general, puede resultar apropiado considerar que un lote corresponde a 100 m³ de terreno tratado (625 metros de inclusión de 450 mm de diámetro).

Cada lote estará compuesto por:

6 probetas cilíndricas de 15 x 30 cm

- 2 probetas para rotura a 7 días.
- 2 probetas para rotura a 28 días.
- 2 probetas de reserva, para verificaciones a edades más tardías, en función de la naturaleza del terreno, en caso de ser necesario.

Si la lechada contiene aditivos aceleradores o retardadores de fraguado o el terreno es orgánico, el período puede modificarse de acuerdo con las especificaciones del aditivo empleado o las características particulares del terreno orgánico, en su caso.

Los valores obtenidos en los ensayos de rotura de probetas deben ser tales que el f_{cd} obtenido según la formulación incluida a pie de página⁽⁶⁾, sea mayor que el utilizado en proyecto.

5.5.2 Pruebas de carga

Sobre las columnas Mixpile® se pueden realizar pruebas de carga. Estas pruebas de carga son de dos tipos:

- Prueba de carga con placa para comprobar asientos⁽⁷⁾.
- Prueba de carga completa para determinar capacidad portante.

Las pruebas a realizar para cada proyecto concreto quedarán establecidas en la **Memoria de cálculo**

correspondiente elaborada por MIXAN MIX ANDALUCÍA, S.L.

Las pruebas de carga con placa se realizan con los medios habituales usados para el ensayo de carga en suelos mediante placa⁽⁸⁾, pero sin limitarse al procedimiento de carga previsto para ensayos en suelos, ya que cuando se emplea en columnas la carga de prueba es mayor. De forma orientativa, se tratará de alcanzar al menos el 40 % de la tensión en servicio prevista para la columna.

El número mínimo de ensayos de placa de carga sobre las columnas será de, al menos:

- en obras de hasta 2500 m de columna ejecutada: 1 prueba por cada 500 m de Mixpile®;
- en obras de más de 2500 m de columna ejecutada: 1 prueba por cada 500 m de Mixpile® (hasta 2500 m de columna ejecutada) y 1 por cada 1000 m de Mixpile® ejecutados en adelante.

Sin embargo, por debajo de una medición de 500 m, se puede estudiar la recomendación de la ejecución de dicha prueba en función del tipo de edificación, del terreno de apoyo y de las condiciones de accesibilidad del solar, considerando, en este caso unos valores de resistencia más conservadores.

Las pruebas de carga completas son similares a una prueba de carga sobre pilotes, y siguen los procedimientos de las normas ASTM D 1143-07⁽⁹⁾ o UNE-EN ISO 22477-1:2019⁽¹⁰⁾.

La frecuencia de estas pruebas en cada proyecto será la recogida en la siguiente tabla. Simultáneamente MIXAN MIX ANDALUCÍA, S.L. realiza un mínimo de 2 pruebas al año entre todas las obras ejecutadas⁽¹¹⁾.

⁽⁶⁾ En base a la formulación del Proyecto ASIRI, el BBRI Soil Mix Handbook y los Eurocódigos, se utiliza la siguiente formulación para los valores de la resistencia de cálculo:

$$f_{cd} = k \cdot f_{ck} / (\gamma_m)$$

$$f_{ck} = \alpha_t \cdot \alpha_c \cdot \min(q_{min}; 0,5 \cdot q_{28}; 12 \text{ MPa})$$

Siendo:

q_{min} = Valor mínimo de las resistencias a compresión simple de las probetas suelo-cemento

q_{28} = Media de las resistencias a compresión simple de las probetas suelo-cemento

α_t = Factor que depende del tiempo. Su valor es 1 para resistencias a 28 días

α_c = Factor de minoración por efecto a largo plazo. 0,85

γ_m = Factor de minoración por materiales. Su valor es 1,5

k = Al tratarse un Mixpile de un material heterogéneo, se incluye un coeficiente adicional de minoración que dependerá de la realización o no de ensayos de carga con placa.

0,65 (Sin pruebas de carga)

0,90 (Con pruebas de carga)

El conjunto de todos estos coeficientes representa un valor de 5,4 o 4, según corresponda entre la q_{28} media de todas las probetas y el f_{cd} .

En caso de incumplimiento se puede optar por meter unidades adicionales de columnas hasta que cumpla con los criterios de proyecto o justificar otras soluciones.

⁽⁷⁾ En el caso de terreno intermedio tipo relleno o similar, no se cuenta con su aportación y la mejora se estudia de manera que la totalidad de las cargas se las lleve los Mixpile y, por tanto, el terreno intermedio está descargado.

Si puede contarse con la aportación del terreno intermedio, se emplea el método de Pradtl para establecer el reparto de cargas. La mayor parte de dichas cargas siguen soportándolas las columnas por lo que, controlando los Mixpile, se controla la mejora.

En cualquier caso, el asiento en el terreno intermedio puede estudiarse con las formulaciones típicas de asiento tales como Steinbrenner y las características de los materiales dadas en el estudio geotécnico.

⁽⁸⁾ UNE 103808:2006. Ensayo de carga vertical de suelos mediante placa estática.

⁽⁹⁾ ASTM D 1143-07: *Standard Test Method for Piles Under Static Axial Compressive Load*.

⁽¹⁰⁾ UNE-EN ISO 22477-1:2019. Investigación y ensayos geotécnicos. Ensayos de estructuras geotécnicas. Parte 1: Ensayos de pilotes: Prueba de carga estática de pilotes por compresión axial.

⁽¹¹⁾ A priori no se justifican placas de asiento o extensómetros para obras de edificación residencial, aunque podría definirse desde la fase de proyecto y control de calidad de esta unidad de obra para actuaciones de mayor envergadura (presas, obras ferroviarias, etc.).



Tabla 4. Frecuencia de pruebas de carga en proyectos ejecutados con columnas Mixpile®

Medición	N.º de ensayos
< 2000 m	No aplica ⁽¹²⁾
Entre 2000 y 4000 m	opcional
Entre 4000 y 6000 m	1 cada 2000 m
> 6000 m	1 cada 4000 m

En caso de que la obra presente zonas claramente diferenciadas por la naturaleza de los suelos que se estén tratando, deberá aplicarse este criterio de lotificación ensayos en cada una de dichas zonas.

Salvo indicación contraria del proyecto, el criterio de aceptación en una prueba completa es que, llevada la columna a la carga de diseño, el asiento máximo admisible sea el 1% del diámetro de la columna.

5.5.3 Otras consideraciones

Para obras habituales de edificación no suele ser necesario el empleo de drenes verticales o drenajes superficiales para resolver el posible problema de asiento diferido en el tiempo del suelo entre columnas. En obra civil u obras singulares que necesiten esa consolidación previa, deberá estudiarse el empleo de dichos elementos dentro del planteamiento global del proyecto.

6. MEMORIA DE CÁLCULO / DE PROYECTO

La elección de este sistema para el refuerzo o mejora del terreno habrá sido determinada tras la realización de un estudio geotécnico que determine las condiciones iniciales de dicho terreno.

Dicho informe geotécnico se realizará según lo indicado en el capítulo 3 del DB-SE-C del CTE, debiendo aportar, al menos, los valores de los siguientes parámetros:

- Estratigrafía del terreno y profundidad de las aguas freáticas y, en su caso, las oscilaciones de las mismas.
- Valores de SPT, en el caso de realizar este ensayo in situ en un sondeo.
- Ensayos de penetración dinámica, en su caso.
- Clasificación del suelo.
- Distribución granulométrica.
- Límites de plasticidad e Índice de plasticidad.
- Peso específico seco y natural.

⁽¹²⁾ Las pruebas de carga completas no están previstas en actuaciones de menos de 2000 m de columna, excepto que esté requerido en el proyecto o en las condiciones de contratación o en el control de calidad en la obra. Igualmente podría estar prescrita la necesidad de tomar testigos de mezcla de suelo y lechada para análisis de la mezcla seca.

- Parámetros esenciales para determinar la resistencia de cada unidad geotécnica, tales como densidad, ángulo de rozamiento interno, cohesión efectiva, y los de deformabilidad, expansividad y colapso, en su caso.
- Parámetros de agresividad de agua y terreno.
- Contenido de materia orgánica, pH, contenido de sal y sulfatos.

La identificación y la clasificación del suelo debe cumplir las normas UNE-EN ISO 14688-1:2019⁽¹³⁾ y UNE-EN ISO 14688-2:2019⁽¹⁴⁾.

Además, el informe debe contener la siguiente información con respecto a las condiciones del terreno en el que se van a ejecutar las columnas Mixpile®:

- La composición, extensión lateral, espesor y resistencia del estrato superficial, raíces de árboles, rellenos,...
- La presencia de cantos o bloques, capas cementadas o rocas subyacentes que puedan causar dificultades en la ejecución.
- Presencia de suelo expansivo.
- Cavidades, huecos o fisuras.
- Los niveles piezométricos del agua subterránea.

En caso de considerarse necesario y útil, la información adicional podría completarse con:

- Medidas geofísicas relacionadas con tomografía eléctrica resistiva (ERT) o sísmica de refracción
- Permeabilidad del terreno.

Como condiciones previas, es necesario, además del estudio geotécnico, las solicitudes transmitidas a la cimentación, así como la distribución en planta de los distintos elementos constructivos tales como pilares, ascensores, aljibes, patios y demás elementos estructurales a tener en cuenta a la hora de diseñar la malla de columnas suelo-cemento.

Con ello pueden definirse las condiciones de la lechada a incorporar al terreno y el replanteo de las columnas de la mezcla, tanto en profundidad como en separación, así como las propiedades del material mejorado.

En función de la distribución, entidad y posición de las cargas se pueden hacer diversos diseños de reparto, ya que la distancia entre columnas condiciona la interacción de las columnas Mixpile®.

En el caso de confluencia con flujos de agua, se reducirá la relación a/c y se utilizará cemento de alta resistencia inicial.

⁽¹³⁾ UNE-EN ISO 14688-1:2019. Investigación y ensayos geotécnicos. Identificación y clasificación de suelos. Parte 1: Identificación y descripción. (ISO 14688-1: 2017).

⁽¹⁴⁾ UNE-EN ISO 14688-2:2019. Investigación y ensayos geotécnicos. Identificación y clasificación de suelos. Parte 2: Principios de clasificación. (ISO 14688-2:2017).



En cualquier caso, se comprobarán los asientos diferenciales y los esfuerzos que se producirán en la losa o solera, además de los esfuerzos en las inclusiones rígidas.

La profundidad mínima de las columnas será la que convenga al proyecto o la parte de proyecto en el que esta solución se elija como óptima. En general, la longitud mínima será de 6 diámetros de la columna. Si la longitud es menor, se justificará por cálculo (como cimentación superficial en caso de cimentaciones para edificación).

El cálculo se verificará según el planteamiento que más se ajuste al proyecto real y teniendo en cuenta el estado del arte, la reglamentación y la normativa vigente. En la experiencia real con este sistema de mejora de terrenos, las intervenciones se han diseñado teniendo en cuenta postulados del programa ASIRI, el CTE o los programas de cálculo numérico (por ejemplo, PLAXIS). Cuando entren en vigor normas europeas (Eurocódigo) que incluyan en su alcance este tipo de soluciones, deberá justificarse la solución teniendo en cuenta los postulados y coeficientes de dichas normas.

En el apartado 7 de Referencias de utilización se recogen distintas obras ejecutadas con el sistema. En el apartado 8 se recogen los valores de control del terreno consolidado comprobados mediante ensayos de muestras frescas o placas de carga para alguna de dichas referencias, así como los valores esperados según una aproximación a la normativa de referencia en cada momento (ver desarrollo en **Anexo I**).

7. REFERENCIAS DE UTILIZACIÓN

La empresa MIXAN MIX ANDALUCÍA S.L., lleva trabajando desde el 2001. El fabricante aporta como referencia las siguientes obras, todas ellas con un diámetro de columna de 450 mm.

- Centro deportivo en Jaén. 2418 m. Terreno coherente. Año 2014.
- Nave industrial en Alcantarilla (Murcia). 4875 m. Terreno coherente. Año 2016.
- 50 viviendas Urb. La Noria, Mijas (Málaga). 3458,5 m. Terreno granular. Año 2016
- EDAR El Bobar, Almería. 814 m. Terreno granular. Año 2017.
- Fábrica Cervezas Victoria, Málaga. 1207,50 m. Terreno coherente. Año 2017.
- Ampliación fábrica Famadesa, Málaga. 2867 m. Rellenos/arcillas. Año 2017.
- Terraplén para plataforma ferroviaria en el Nudo La Encina-Mogente (Valencia) 19 543 m. Profundidad media 10 m. Relleno terraplén y terreno natural. Año 2018.
- Nave Nuestra Señora de la Muela y la Paz, Corral de Almaguer (Toledo). 2350 m. Profundidad media 4 m. Relleno y arcilla dura. Año 2018

- Nave industrial en C/ Mercadante, Málaga. 1921 m. Profundidad media 6 m. Relleno y arcilla. Año 2018
- Nave almacén El Pozo Alhama de Murcia. 2288 m. Profundidad media 8 m. Rellenos (hasta 5 m) y arcillas medias (hasta 8 m). Año 2019
- Edificio plurifamiliar en C/ Pagés del Corro, Sevilla. 4100 m. Profundidad media 10 m. Arcilla fangosa. Año 2019.
- Parcela R-7 La Alcaidesa en La Línea de la Concepción (Cádiz). 3100 m. Profundidad media 4,5 m. Rellenos. Año 2019.
- Nave para almacén de grano en Puerto de Huelva. 11 500 m. Profundidad media 12 m. Rellenos y arena limosa floja. Año 2020
- Nave en Dolores (Alicante). 13 370 m. Profundidad media 14 m. Arcilla fangosa y media. Año 2020.
- Fábrica de Lumon en Antequera (Málaga). 5100 m. Profundidad media 6 m. Rellenos y arcillas duras. Año 2021.
- 206 Viviendas en Colinas del Limonar (Málaga). 13 000 m. Profundidad media 18 m. Rellenos (hasta 14 m), filitas (hasta 18 m). Año 2022.
- Centro logístico Murcia. 19.130 m. Rellenos y arcillas blandas. Año 2022.
- Centro logístico Illescas (Toledo). 18 413 m. Profundidad media 7 m. Rellenos arcillosos (hasta 6 m) y arcillas. Año 2022.
- Centro logístico Murcia. 12 600 m. Profundidad media 8 m. Rellenos y arcillas blandas (hasta 7 m) y margas. Año 2022.
- Campo de fútbol Pizarra (Málaga). 4400 m. Profundidad media 6 m. Rellenos (hasta 6 m) y arcillas limosas. Año 2022.

El IETcc ha realizado diversas visitas a obras verificando que la puesta en obra es conforme a lo especificado en este documento.

Las visitas cursadas por el IETcc no tienen por objeto comprobar la medición real de la columna ejecutada ni las características de las mismas, sino constatar que se cumplen las condiciones de puesta en obra del sistema, es decir tanto su correcta viabilidad constructiva como posibles incidencias en su ejecución de distintos ejecutores, tipologías de terreno y obras, etc.

8. ENSAYOS

8.1 Ensayos de identificación de los materiales

Las empresas suministradoras de los materiales o componentes aportaron, mediante certificación, los valores característicos de los mismos.



8.2 Ensayos de caracterización de la mezcla suelo/cemento

El peticionario aporta los siguientes datos de ensayos de caracterización de la mezcla del terreno con la lechada:

8.2.1 Ensayos con muestras tomadas tras la mezcla en fresco

Tabla 6. Caracterización de la mezcla en columnas Mixpile® en obras

Obra	Terreno	Qu (MPa)	E (GPa)
ABC Plaza, Estepona	Relleno granular	16,9	9,33
Las Balinasas, Fuengirola	Relleno coherente	18,1	9,97
EFA El Soto, Chauchina	Coherente	17,1	10,34
Lo Cea, Rincón de la Victoria	Relleno granular	15,3	11,62
Duque de Rivas, Málaga	Relleno coherente	11,6	9,32
Las Joyas, Estepona	Relleno granular	17,1	13,1

8.2.2 Ensayos en testigos extraídos de las columnas

Tabla 7. Resultados de resistencia a compresión en testigos extraídos de las columnas en el proyecto Secadero para El Pozo, Jabugo (Huelva)

Testigo	Profundidad (m)	Terreno	Rotura (MPa)
1"	0,80-0,94	Filitas	8,41
1'	2,00-2,14	Filitas	5,88
2"	3,20-3,34	Filitas	21,78
2'	4,17-4,31	Filitas	13,78
3"	6,60-6,74	Limos	6,91
3'	8,40-8,54	Limos	7,02
4"	9,16-9,30	Limos	6,94
4'	10,52-10,66	Limos	23,43
5"	12,00-12,14	Limos	35,13
5'	12,80-12,94	Limos	18,61

Tabla 8. Resultados de resistencia a compresión en testigos extraídos de las columnas en el proyecto Nave para almacén de grano en el Puerto de Huelva

Testigo	Profundidad (m)	Terreno	Rotura (MPa)
SP-1	2,00-2,15	Relleno granular	25,2
SP-1	4,10-4,33	Relleno granular	18,8
SP-1	11,05-11,29	Arenas limosas	24,3
SP-2	1,20-1,50	Relleno granular	34,2
SP-2	4,40-4,90	Relleno granular	16,5
SP-2	11,80-12,00	Arenas limosas	33,4

(15) UNE-EN 13948:2008. Láminas flexibles para impermeabilización. Láminas bituminosas, plásticas y de caucho

Se verifica que se supera la carga teórica objetivo de la mejora del terreno (axil máximo previsto en el proyecto eran 340 kN, lo que equivale a 2,125 MPa), teniendo en cuenta que el valor de comprobación f_{cd} es 6,12 MPa, según la formulación seguida para el proyecto de esta mejora –que es la recogida en la nota a pie de página 6– tomando como valor de $k=0.9$ –al haberse realizado placa de carga– y $f_{ck}= 12\text{MPa}$).

8.3 Ensayos de aptitud de empleo

8.3.1 Ensayos de comportamiento mecánico

Estos ensayos se han realizado en el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc). La descripción detallada y resultados de los mismos se reflejan en el informe 19 313-01.

Se extraen doce probetas de terreno mejorado en dos tipos de suelo distintos, las primeras correspondientes a la obra del centro sociocultural de Cangas (Pontevedra) y las segundas de una obra de una nave polivalente en el Polígono Industrial Casabermeja (Málaga).

El suelo de partida de la obra de Cangas se trata de un terreno granular y el suelo de partida de la obra en P.I. Casabermeja es un terreno coherente.

Las probetas son cilíndricas de 15 x 30 cm refrentadas con mortero de azufre. Tres probetas son ensayadas a 7 días en obra. Tres probetas son ensayadas a 60 días en el IETcc.

Seis probetas de las doce de cada obra se entierran en contenedores y se exponen a raíces en unas condiciones específicas según norma UNE-EN 13948:2008⁽¹⁵⁾ y se ensayan a 90 y a 270 días.

Se realizan ensayos a compresión. Se exponen a continuación los resultados de los ensayos realizados en el IETcc:

8.3.1.1 Terreno granular (Cangas)

De los ensayos realizados en el IETcc se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 9. Resultados de ensayos de comportamiento mecánico a probetas de terreno granular

Id. muestra	Edad (días)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)
Cangas 1-1	60	223,0	12,6
Cangas 1-2	60	313,9	17,8
Cangas 1-3	60	386,3	21,9
Cangas 2-1	90*	226,6	12,8
Cangas 2-2	90*	167,6	9,5
Cangas 2-3	90*	141,4	8,00
Cangas 3-1	270*	222,4	12,6
Cangas 3-2	270*	201,4	11,4
Cangas 3-3	270*	257,5	14,6

* probeta expuesta a penetración de raíces⁽¹⁵⁾

para impermeabilización de cubiertas. Determinación de la resistencia a la penetración de raíces.



8.3.1.2 Terreno coherente (Casabermeja)

Tabla 10. Resultados de ensayos de comportamiento mecánico a probetas de terreno coherente

Id. muestra	Edad (días)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)
Casabermeja 1-1	60	297,1	16,8
Casabermeja 1-2	60	286,7	16,2
Casabermeja 1-3	60	215,6	12,2
Casabermeja 2-1	90*	301,5	17,1
Casabermeja 2-2	90*	328,9	18,6
Casabermeja 2-3	90*	417,1	23,6
Casabermeja 3-1	270*	282,6	16,0
Casabermeja 3-2	270*	302,3	17,1
Casabermeja 3-3	270*	187,1	10,6

* probeta expuesta a penetración de raíces⁽¹⁵⁾

8.3.2 Prueba de carga con placa NLT-357/98

Este ensayo fue realizado por el laboratorio ENYPSA en junio de 2011. El método de ensayo y resultados del mismo se describen en el informe 9181/1/3 de dicho laboratorio, conforme a la norma NLT-357/98⁽¹⁶⁾.

Previo nivelado de las desigualdades del terreno en la zona donde se realiza la placa, mediante la extensión de una capa de arena seca de granulometría media, se sometió al terreno a sucesivas cargas a fin de medir los asentamientos producidos por las mismas mediante una placa circular de diámetro 30 cm con un gato hidráulico.

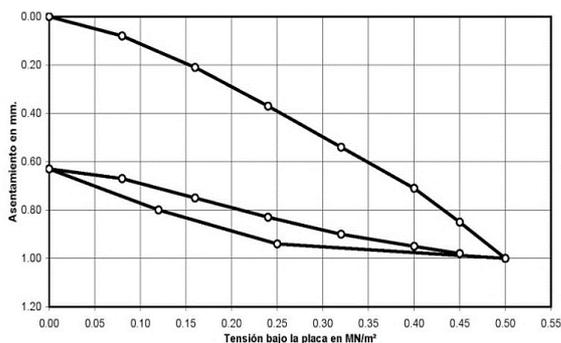
Los asentamientos se han medido utilizando 3 comparadores con apreciación de 0,01 mm, colocados sobre la placa formando triángulo equilátero. El asentamiento en cada escalón, es la media aritmética de los tres comparadores.

Módulo de compresibilidad

El Módulo de Compresibilidad E en cada ciclo se determinó entre las presiones $0,3 \sigma_{m\acute{a}x}$ y $0,7 \sigma_{m\acute{a}x}$.

Ciclo 1 $E_1 = 109,8 \text{ MN/m}^2$. Relación de módulos:
Ciclo 2 $E_2 = 250,0 \text{ MN/m}^2$. $E_1/E_2 = 2,28$.

Gráfico 2. Diagrama carga-asiento ensayo 9181/1/3



⁽¹⁶⁾ NLT 357: Ensayo de carga con placa.

⁽¹⁷⁾ ASTM D 1143-07: Standard Test Method for Piles Under Static Axial Compressive Load.

8.3.3 Pruebas de carga con placa ASTM D 1143-07

Ensayo 1

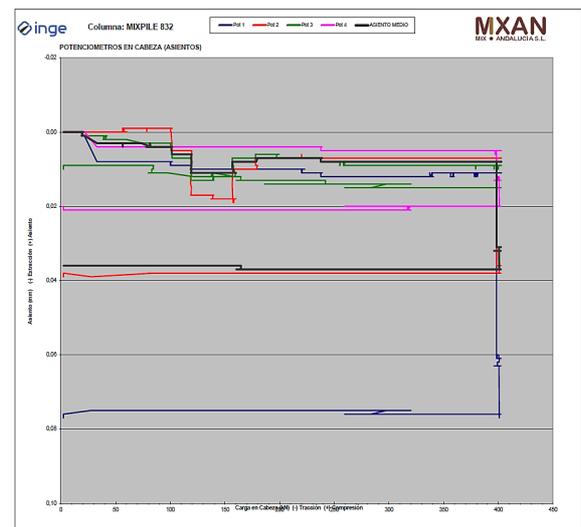
Este ensayo ha sido realizado por INGE en noviembre de 2020. El método de ensayo y resultados del mismo se describen en el informe IF-20-072.

Este ensayo está realizado conforme a la norma ASTM D 1143-07⁽¹⁷⁾. Los escalones de carga y descarga, los tiempos de lectura y los criterios de estabilización se realizaron tomando como base ASIRI⁽¹⁸⁾, capítulo 8. Apartado 2.2.4.

La carga de prueba se aplicó mediante un cilindro hidráulico de doble efecto actuando sobre la cabeza de la columna de MIXPILE® de 450 mm de diámetro y 11,5 m de longitud y sobre el chasis de la máquina de obra utilizada como sistema de reacción, lo que hace que se produzca el asiento de la columna.

Los asentamientos se han medido utilizando cuatro medidores potenciométricos de desplazamiento lineal de 75 mm de rango, 0,1 mm de precisión garantizada y 0,01 mm de resolución.

Gráfico 3. Diagrama carga-asiento ensayo IF-20-072



⁽¹⁸⁾ IREX (2012): *Projet national ASIRI. Recommandations pour la conception, le dimensionnement, l'exécution et le contrôle de l'amélioration des sols de fondation par inclusions rigides.* Presses des Ponts. France.



Tabla 11. Extracto de adquisición de datos tiempo – carga – asientos ensayo IF-20-072

Columna: MIXPILE 832

12/11/2020

Reformular



12/11/20 13:59	13
12/11/20 17:12	2329

Canal Analógico
Posición
Rango

CARGA	POTENCIOMETROS EN CABEZA (ASIENTO mm)				ASIENTO MEDIO
	13-14 CR	1 CR	2 CR	3 CR	
Gato	Pot 1	Pot 2	Pot 3	Pot 4	
1000 Bar	75 mm	75 mm	75 mm	75 mm	



Fecha Hora	Equipo	Observaciones	kN	mm	mm	mm	mm	mm
12/11/20 16:26		ESCALÓN 20 (400 KN)	396,2	0,06	0,04	0,02	0,01	0,03
12/11/20 16:26			396,1	0,06	0,04	0,02	0,01	0,03
12/11/20 16:26			402,2	0,06	0,04	0,02	0,01	0,03
12/11/20 16:26			401,6	0,06	0,04	0,02	0,01	0,03
12/11/20 16:26			401,4	0,06	0,04	0,02	0,01	0,03
12/11/20 16:26			401,2	0,06	0,04	0,02	0,01	0,03
12/11/20 16:26			401,1	0,06	0,04	0,02	0,01	0,03
12/11/20 16:26			400,9	0,06	0,04	0,02	0,01	0,03
12/11/20 16:26			400,8	0,06	0,04	0,02	0,01	0,03
12/11/20 16:27			400,7	0,06	0,04	0,02	0,01	0,03
12/11/20 16:27			400,6	0,06	0,04	0,02	0,01	0,03
12/11/20 16:27			400,5	0,06	0,04	0,02	0,01	0,03
12/11/20 16:27		400,5	0,06	0,04	0,02	0,01	0,03	
12/11/20 16:27		400,8	0,08	0,04	0,02	0,02	0,04	
12/11/20 16:27		400,7	0,08	0,04	0,02	0,02	0,04	
12/11/20 16:27		400,6	0,08	0,04	0,02	0,02	0,04	
12/11/20 16:27		400,5	0,08	0,04	0,02	0,02	0,04	
12/11/20 16:27		400,5	0,08	0,04	0,02	0,02	0,04	
12/11/20 16:27		402,2	0,08	0,04	0,02	0,02	0,04	
12/11/20 16:27		401,6	0,08	0,04	0,02	0,02	0,04	
12/11/20 16:27		401,4	0,08	0,04	0,02	0,02	0,04	
12/11/20 16:27		401,2	0,08	0,04	0,02	0,02	0,04	
12/11/20 16:28		400,5	0,08	0,04	0,02	0,02	0,04	
12/11/20 16:28		400,8	0,08	0,04	0,02	0,02	0,04	
12/11/20 16:28		400,8	0,08	0,04	0,02	0,02	0,04	
12/11/20 16:28		400,8	0,08	0,04	0,02	0,02	0,04	
12/11/20 16:28		396,4	0,08	0,04	0,02	0,02	0,04	
12/11/20 16:28		396,7	0,08	0,04	0,02	0,02	0,04	
12/11/20 16:28		396,6	0,08	0,04	0,02	0,02	0,04	
12/11/20 16:28		285,9	0,08	0,04	0,02	0,02	0,04	
12/11/20 16:28		302,6	0,08	0,04	0,02	0,02	0,04	
12/11/20 16:28		313,7	0,08	0,04	0,02	0,02	0,04	
12/11/20 16:28		318,7	0,08	0,04	0,02	0,02	0,04	
12/11/20 16:28		320,0	0,08	0,04	0,02	0,02	0,04	
12/11/20 16:29		318,8	0,08	0,04	0,02	0,02	0,04	
12/11/20 16:29		ESCALÓN 21 (320 KN)	317,9	0,08	0,04	0,02	0,02	0,04
12/11/20 16:29			317,3	0,08	0,04	0,02	0,02	0,04
12/11/20 16:29			316,7	0,08	0,04	0,02	0,02	0,04
12/11/20 16:29			316,2	0,08	0,04	0,02	0,02	0,04
12/11/20 16:29			315,9	0,08	0,04	0,02	0,02	0,04
12/11/20 16:29			315,5	0,08	0,04	0,02	0,02	0,04
12/11/20 16:29			320,6	0,08	0,04	0,02	0,02	0,04
12/11/20 16:29			319,7	0,08	0,04	0,02	0,02	0,04
12/11/20 16:29			319,3	0,08	0,04	0,02	0,02	0,04
12/11/20 16:29			319,0	0,08	0,04	0,02	0,02	0,04
12/11/20 16:29			303,8	0,08	0,04	0,02	0,02	0,04
12/11/20 16:30			259,5	0,08	0,04	0,02	0,02	0,04
12/11/20 16:30			265,7	0,08	0,04	0,02	0,02	0,04
12/11/20 16:30			283,6	0,08	0,04	0,02	0,02	0,04
12/11/20 16:30			297,6	0,08	0,04	0,01	0,02	0,04
12/11/20 16:30			316,4	0,08	0,04	0,01	0,02	0,04
12/11/20 16:30			319,0	0,08	0,04	0,01	0,02	0,04

Tal y como se puede apreciar en las tablas numéricas, el salto de 0,01-0,02 mm se produce en el tiempo de transición entre la carga máxima y la descarga (zona blanca del extracto de la tabla de adquisición de datos). De hecho, tiene lugar precisamente cuando la carga aumenta hasta 400,8 KN. A partir de ese momento, no se produce aumento de asientos.

Del ensayo, por tanto, se desprende que los asientos obtenidos son coherentes e incluso menores a los esperados de la aplicación del modelo de cálculo a la obra concreta.



Ensayo 2

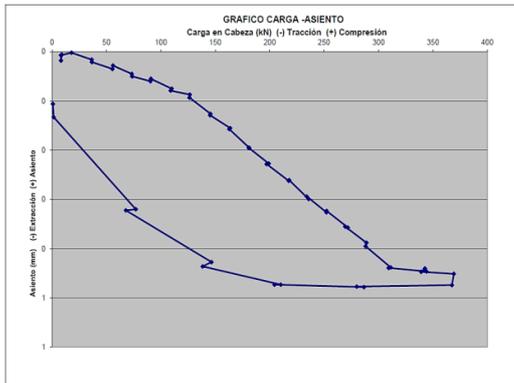
Este ensayo ha sido realizado por INGE en julio de 2022. El método de ensayo y resultados del mismo se describen en el informe IF-22-043.

Este ensayo está realizado conforme a la norma ASTM D 1143-07⁽¹⁹⁾. Los escalones de carga y descarga, los tiempos de lectura y los criterios de estabilización se realizaron tomando como base ASIRI⁽²⁰⁾.

La carga de prueba se aplicó mediante un cilindro hidráulico de doble efecto actuando sobre la cabeza de la columna de MIXPILE® de 450 mm de diámetro y 9,7 m de longitud y sobre el chasis de la máquina de obra utilizada como sistema de reacción, lo que hace que se produzca el asiento de la columna.

Los asentamientos se midieron mediante cuatro potenciómetros de desplazamiento lineal de 75 mm de recorrido y 0,01 mm de precisión sujetos mediante brazos magnéticos a dos vigas metálicas de referencia de 3 metros de longitud, colocadas paralelamente a las orugas de la máquina de obra utilizada como elemento de reacción.

Gráfico 4. Diagrama carga-asiento ensayo IF-22-043



Del ensayo se desprende que los asentamientos obtenidos son coherentes e incluso menores a los esperados de la aplicación del modelo de cálculo a la obra concreta, siendo el asiento máximo inferior a 1 mm para una carga aplicada un 20% mayor a la de servicio.

9. EVALUACIÓN DE LA APTITUD DE EMPLEO

El Sistema, tal y como se describe en este Documento, es apto para el fin de refuerzo y mejora de terrenos al que se destina.

9.1 Cumplimiento de la normativa nacional

9.1.1 SE - Seguridad estructural

La presente evaluación técnica, los ensayos realizados y la documentación de las referencias de

⁽¹⁹⁾ ASTM D 1143-07: Standard Test Method for Piles Under Static Axial Compressive Load.

utilización, han permitido comprobar que, para cada uno de los ensayos o proyectos, el cálculo específico de la solución de mejora y las propiedades esperadas o estimadas tras la actuación era coherentes

Antes de decidir o implementar cualquier tipo de mejora o refuerzo del terreno deben establecerse adecuadamente las condiciones iniciales del terreno mediante el oportuno estudio geotécnico (DB-SE-C).

Será necesario un proyecto en el cual se establecerán las especificaciones de los materiales a emplear, las propiedades del terreno tras su mejora y las condiciones constructivas y de control.

El cálculo se verificará según el planteamiento que más se ajuste al proyecto real y teniendo en cuenta el estado del arte en cada momento. Cuando entren en vigor normas europeas (Eurocódigo) que incluyan en su alcance este tipo de soluciones, deberá justificarse la solución teniendo en cuenta los postulados y coeficientes de dichas normas.

Los criterios de aceptación, fijados en el proyecto para el método de cálculo que pueda adoptarse de mejora del terreno, consistirán en unos valores mínimos de determinadas propiedades del terreno tras su mejora. La consecución de estos valores o de valores superiores a los mínimos, tras el proceso de mejora, debe ser adecuadamente contrastada.

9.1.2 SI - Seguridad en caso de incendio

No procede.

9.1.3 SUA - Seguridad de utilización y accesibilidad

No procede.

9.1.4 HS - Salubridad

Los componentes del Sistema, una vez instalado, según declara el fabricante del mismo, no contienen ni liberan sustancias peligrosas de acuerdo a la legislación nacional y europea.

9.1.5 HR - Protección frente al ruido

No procede.

9.1.6 HE - Ahorro de energía

No procede.

⁽²⁰⁾ IREX (2012): *Projet national ASIRI. Recommandations pour la conception, le dimensionnement, l'exécution et le contrôle de l'amélioration des sols de fondation par inclusions rigides.* Presses des Ponts. France.



9.2 **Utilización del producto. Puesta en obra y limitaciones de uso**

9.2.1 *Puesta en obra*

Se deberá tener en cuenta el informe geotécnico las condiciones de las construcciones, carreteras, servicios, etc., adyacentes a la obra, las estructuras y canalizaciones de servicios subterráneas existentes, y limitaciones de infraestructuras urbanas o arqueológicas conocidas.

Asimismo, se deberá tener en cuenta la contaminación subterránea o riesgos que puedan afectar al método de ejecución, la seguridad del trabajo o la eliminación del material de excavación del emplazamiento.

Se aconseja estudiar en cada caso la colocación de un colchón de grava o zahorra compactada en función de la separación entre pilares, espesor de la losa, la separación entre columnas de Mixpile® y tipo de terreno para conseguir una mayor uniformidad en la transmisión de cargas.

9.2.2 *Limitaciones de uso*

La presente evaluación técnica cubre únicamente las aplicaciones del sistema recogidas en este documento en el apartado 1.

Las precauciones a adoptar frente a riesgos debidos a agentes externos (viento, agua - superficial o nivel freático-, etc.) son las comunes a cualquier proyecto que presente un colchón granular. Los riesgos frente a estos agentes serían similares a los asociados a pilotes o micropilotes, aún menos si cabe ya que, al presentar una malla de tratamiento densa, estabiliza el terreno y dificulta que se produzcan dichos fenómenos.

9.3 **Gestión de residuos**

Se seguirán las especificaciones del Real Decreto 105/2008 por el que se regula la Producción y Gestión de los Residuos de Construcción y Demolición, así como las reglamentaciones autonómicas y locales que sean de aplicación.

10. CONCLUSIONES

Considerando

- que MIXAN MIX ANDALUCÍA S.L. realiza un control de calidad que comprende un sistema de autocontrol por el cual el fabricante comprueba, con medios propios y por laboratorios externos acreditados, la idoneidad de las materias primas y del producto final;
- que los valores esperados en los suelos tras su tratamiento en las referencias de obras aportadas han sido verificados en cada caso mediante ensayos
- que los resultados han podido verificarse en el tiempo con visitas a obras;
- que el proceso de puesta en obra está suficientemente contrastado por la práctica,

se estima favorablemente, con las observaciones de la Comisión de Expertos en este DIT, la idoneidad de empleo del Sistema propuesto por el peticionario.



11. OBSERVACIONES DE LA COMISIÓN DE EXPERTOS⁽²¹⁾

Las principales observaciones de la Comisión de Expertos⁽²²⁾, fueron las siguientes:

- Para asegurar la viabilidad del Sistema será preciso la realización de un Estudio Geotécnico para caracterizar las propiedades iniciales del terreno, para la obra concreta y de acuerdo con las indicaciones del capítulo 3 del CTE DB-SE-C. Se definirán los parámetros del sistema teniendo en cuenta los resultados obtenidos en dicho Estudio Geotécnico y las características y cargas del edificio u obra a implantar. Particularmente se tendrá en cuenta el nivel freático, especialmente cuando se prevean corrientes de agua subterránea y terrenos granulares.
- Para terrenos en los que pueda haber licuefacción y zonas de alta sismicidad se deberá realizar un estudio más específico.
- Debe verificarse que el terreno de apoyo del sistema de columnas Mixpile[®] soporta el incremento de cargas producido por el conjunto de la estructura y el propio sistema.
- Debe tenerse en cuenta al ejecutar el sistema la interrelación del proceso con las edificaciones e infraestructuras colindantes.
- La separación entre unidades Mixpile[®] debe asegurar que el terreno se comporta homogéneamente.
- La losa debe ser lo suficientemente rígida para garantizar un reparto uniforme de las cargas.
- El empleo de zapatas arriostradas como elementos rígidos de reparto se recomienda exclusivamente para naves industriales y siempre que, del estudio adicional específico de los asientos diferenciales, se infiera que estos no comprometen la estructura.
- Se recomienda que una copia del presente Documento de Idoneidad Técnica se incorpore al Libro del Edificio.

⁽²¹⁾ La Comisión de Expertos de acuerdo con el Reglamento de concesión del DIT (O.M. de 23/12/1988), tiene como función, asesorar sobre el plan de ensayos y el procedimiento a seguir para la evaluación técnica propuestos por el IETcc. Los comentarios y observaciones realizadas por los miembros de la Comisión, no suponen en sí mismos aval técnico o recomendación de uso preferente del sistema evaluado. La responsabilidad de la Comisión de Expertos no alcanza los siguientes aspectos:
Propiedad intelectual o derechos de patente del producto o sistema.
Derechos de comercialización del producto o sistema.
Obras ejecutadas o en ejecución en las cuales el producto o sistema se haya instalado, utilizado o mantenido, ni tampoco sobre su diseño, métodos de construcción ni capacitación de operarios intervinientes.

⁽²²⁾ Las Comisiones de Expertos estuvieron integradas por representantes de los siguientes Organismos y Entidades:
- ACCIONA INFRAESTRUCTURAS. DIR. INGENIERÍA.

- ANDIMAT (Asociación Nacional de Fabricantes de Materiales Aislantes).
- Asociación para el Fomento de la Investigación y la Tecnología de la Seguridad contra Incendios (AFITI)
- Avintia Grupo.
- Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid (UPM).
- Escuela Técnica Superior de Edificación (UPM).
- Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas (UPM).
- Escuela Técnica Superior de Ingeniería Civil (UPM).
- FCC Construcción S.A.
- Grupo CPV
- InGeAp
- Ministerio de Defensa – Dirección Infraestructuras Ejército de Tierra.
- Oficina Española de Patentes y Marcas (OEPM).
- Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc).



FIGURAS

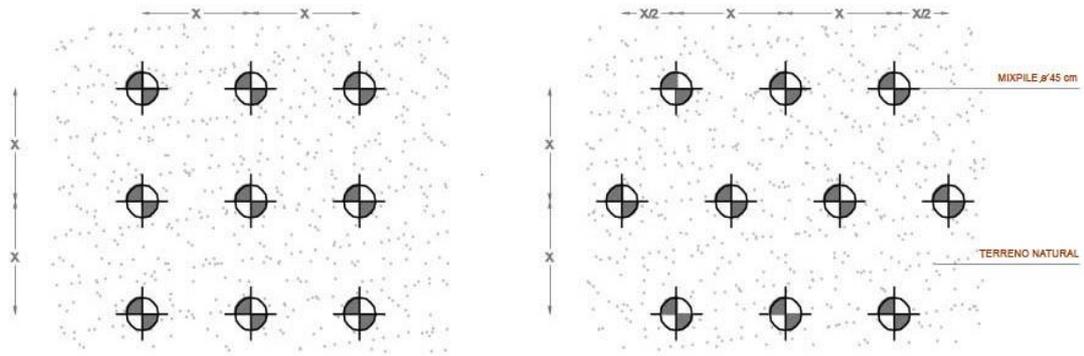


Figura 1: Distribución en malla de las columnas Mixpile®

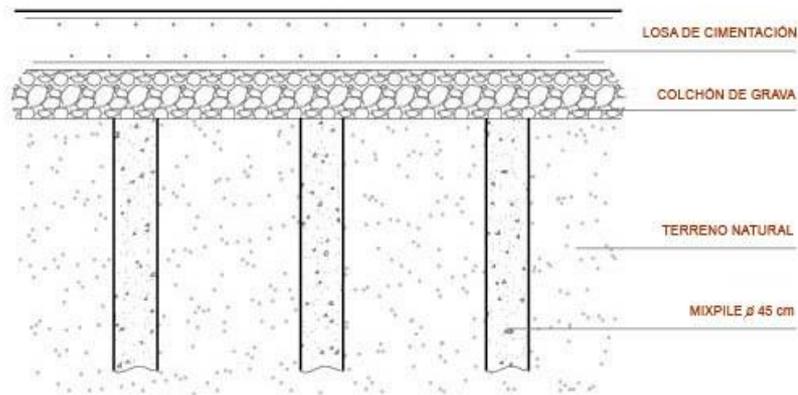
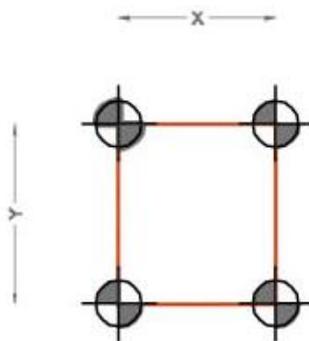


Figura 2: Losa de cimentación apoyada en columnas Mixpile®

El colchón de grava o zahorra compactada no forma parte del sistema. Se colocará posteriormente en caso de considerarse necesario y su espesor (20 - 60 cm) será función del tipo de terreno, separación entre Mixpile®, espesor de la losa y localización de las cargas.



$$\rho = \frac{A_{col}}{A_{total}}$$

Figura 3: Parámetro rho de relación entre áreas



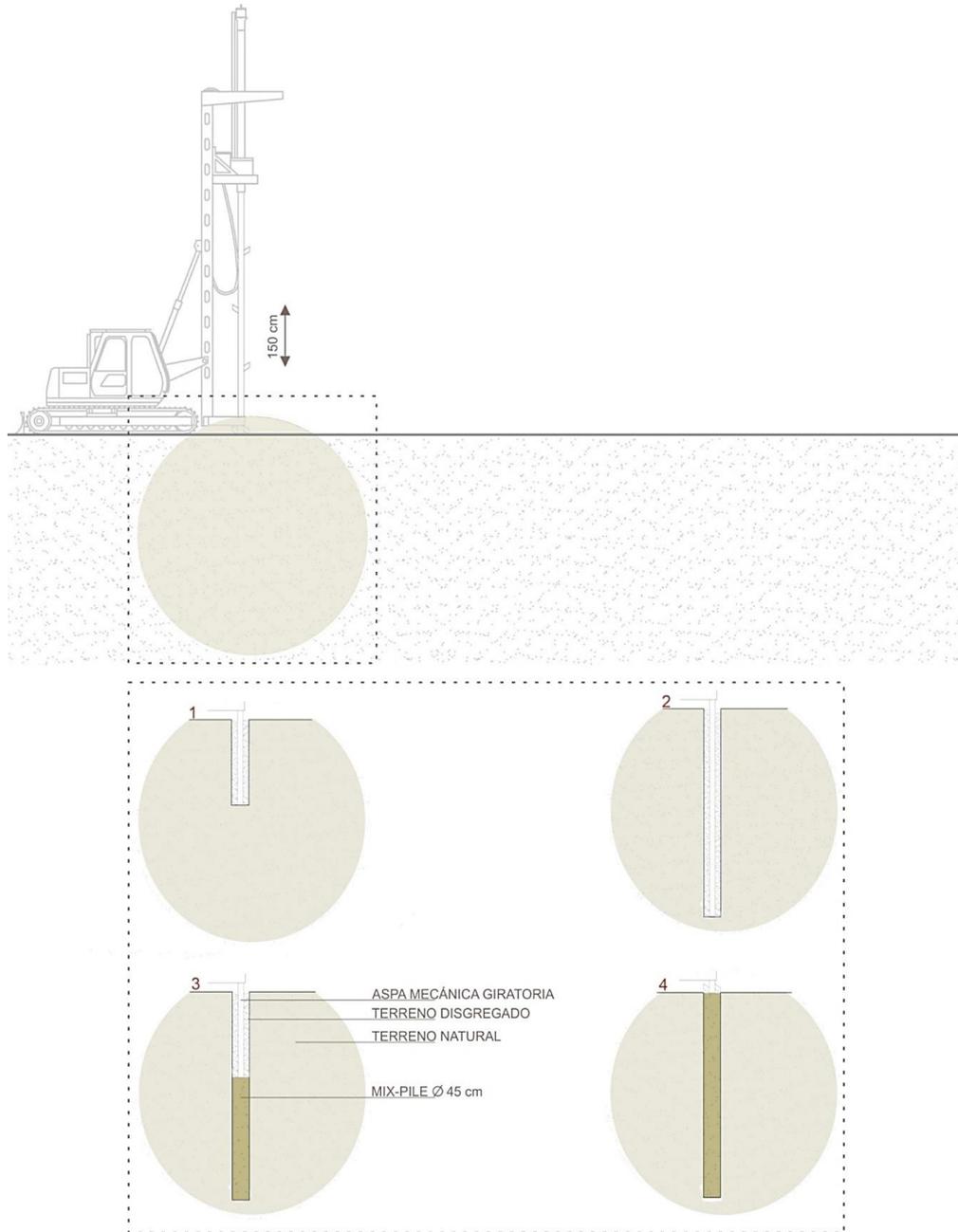


Figura 4: Proceso ejecución de columnas Mixpile®

1. Posicionamiento correcto del útil de mezclado y comienzo de la disgregación del terreno.
2. La tubería del útil de mezclado penetra hasta la profundidad de tratamiento deseada, con la disgregación simultánea del suelo. Si es necesario para disgregar mejor el terreno, se inyectará también durante la perforación.
3. Tras alcanzar la profundidad deseada, la tubería se levanta y, al mismo tiempo, se inyecta la lechada de cemento en el suelo. A medida que se levanta la tubería, se suelen hacer varias pasadas de bajada/subida con el fin de homogeneizar la mezcla.
4. El útil de mezclado rota en un plano horizontal y, junto con la operación de subida y bajada, se mezcla el suelo con la lechada.



Anexo I. Consideraciones de cálculo propuestas para el dimensionado y planificación de algunas de las actuaciones referenciadas en el Apartado 7.

Las siguientes comprobaciones no son alternativas sino, en general, sucesivas.

1. Comprobación a hundimiento de las columnas

Esta fase de comprobación propone considerar las columnas con una metodología de cálculo que se ajusta a la justificación de resistencia por punta y fuste.

La resistencia característica al hundimiento de un pilote se considerará dividida en dos partes: resistencia por punta y resistencia por fuste:

$$R_{ck} = R_{pk} + R_{fk} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

R_{ck} Resistencia frente a la carga vertical que produce el hundimiento.

R_{pk} La parte de la resistencia que se supone soportada por la punta.

R_{fk} La parte de la resistencia que se supone soportada por el contacto columna-terreno en el fuste.

La resistencia de cálculo de un pilote, R_{cd} , se obtendría a partir de la resistencia característica al hundimiento, R_{ck} , aplicando los coeficientes parciales de seguridad contenidos en la tabla 2.1 del CTE DB-SE-C.

La zona de influencia de la punta se puede dividir en:

- Zona pasiva: 6D por encima de la cota de apoyo.
- Zona activa: 3D por debajo de la cota de apoyo.

El cálculo se realizaría según lo indicado en el anejo F.2 del DB-SE-C.

El rozamiento negativo suele producirse en las inclusiones, especialmente en los casos con capas granulares de reparto y en terraplenes, siendo entonces necesario el cálculo del plano neutro.

Si en las condiciones de proyecto se confirma que interviene el rozamiento negativo, este se calculará según lo indicado en el apartado 5.2.2. del DB-SE-C del CTE.

La elección del número de columnas o unidades Mixpile® se haría en función de las cargas totales del edificio a soportar, que serán iguales a las transmitidas por el edificio más el peso de la losa de cimentación y de las condiciones de proximidad de las columnas, ya que habrá que tener en cuenta la interacción entre las columnas, según el artículo 5.3.4.1.4 del CTE DB SE-C de consideración del efecto de grupo, y aplicando un coeficiente de eficiencia que tendrá un valor de 0,7 si las columnas se encuentran tangentes (separación entre ejes de 1 Diámetro) y un valor de 1 si la separación entre ejes es de 3 Diámetros. Para situaciones intermedias se interpola.

De esta forma:

$$N = \frac{C_{total}}{R_{cd} \eta}$$

siendo:

N N.º de unidades de columnas Mixpile®

C_{total} (kN) Carga total.

R_{cd} (kN) Resistencia cálculo frente al hundimiento de un pilote de Mixpile®.

η Coeficiente de eficiencia.

Sin embargo, existen multitud de situaciones en las que, si bien este criterio queda del lado de la seguridad, resulta sobredimensionado y podría optimizarse el diseño tratando los Mixpile® como un caso particular de inclusiones rígidas y considerando la aportación del terreno.

Para poder optimizar el diseño de la mejora de terreno resulta imprescindible el empleo de una plataforma de transferencia de carga (LPT), ya que la distribución de carga entre los Mixpile® y el terreno natural dependerá del espesor y naturaleza de la misma, así como del elemento situado sobre este.

A continuación, se describen los mecanismos de funcionamiento según se trate de un terraplén o de una losa de cimentación o zapatas.



- Cono de cizallamiento

Para el caso de un terraplén, la transferencia de carga se realiza a través de un cono de cizallamiento que parte de la cabeza del Mixpile® y forma un ángulo respecto de la vertical igual al ángulo de rozamiento del material que compone la plataforma de transferencia.

Se define un espesor mínimo, H_c , del colchón de reparto de manera que se produzca dentro del mismo la igualdad de asientos.

Dicho espesor depende tanto de la separación entre los Mixpile® como de las características mecánicas de la plataforma de transferencia de carga.

$$H_c = \frac{R - r_p}{\tan(\varphi')}$$

Si $H_M < H_c$

$$q_p^+ = \frac{H_M}{3} \left(\frac{R_c^2}{r_p^2} + 1 + \frac{R_c}{r_p} \right) \gamma + q_o \frac{R_c^2}{r_p^2}$$

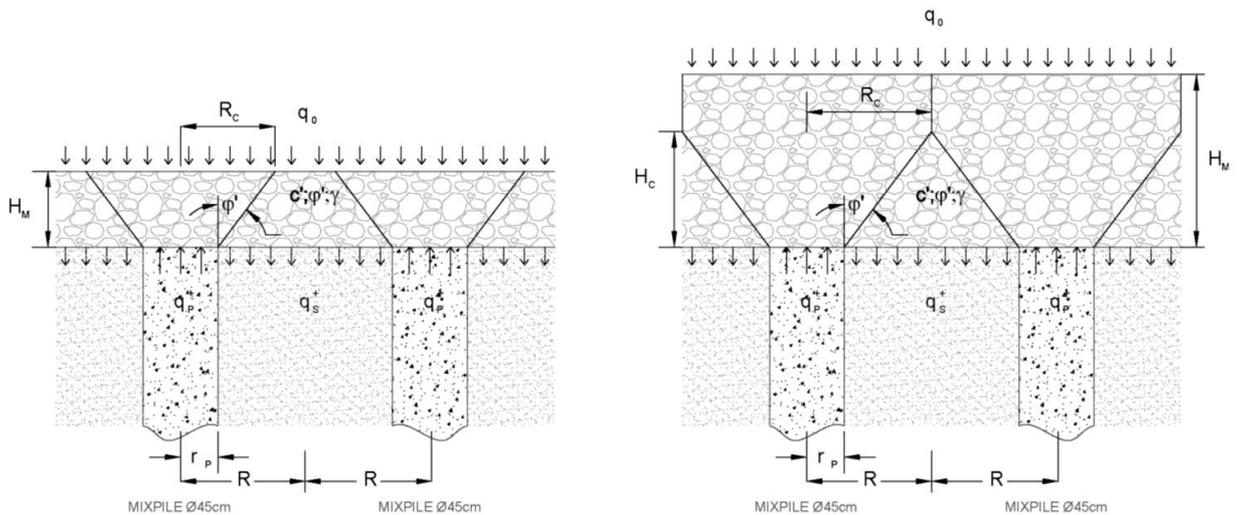
$$R_c = H_M \cdot \tan(\varphi') + r_p$$

Si $H_M > H_c$

$$q_p^+ = \left[\frac{H_c}{3} \left(\frac{R^2}{r_p^2} + 1 + \frac{R}{r_p} \right) + (H_M - H_c) \frac{R^2}{r_p^2} \right] \gamma + q_o \frac{R^2}{r_p^2}$$

Siendo:

- R_c Radio del cono
- r_p Radio del Mixpile®
- s Separación entre ejes de Mixpile®
- H_c Espesor mínimo del colchón de reparto para el solape de conos
- H_M Espesor del colchón de reparto
- φ' Ángulo rozamiento interno del colchón de reparto
- γ Peso específico del colchón de reparto
- q_o Tensión transmitida



$$R = \frac{s}{\sqrt{\pi}}$$

- q_p^+ Tensión en la cabeza del Mixpile®
- q_s^+ Tensión residual en el terreno

Véase figuras A.1

Figura A.1: Diagramas de fallo según cono de corte en la plataforma de transferencia de carga

Para $H_M > H_c$, los conos de corte de las inclusiones adyacentes se solapan y el área de influencia del Mixpile® sigue siendo igual a s^2 .

El mecanismo de transferencia de carga mediante cono de cizallamiento se produciría en aquellas plataformas de transferencia de carga que no están cubiertas por ningún elemento estructural rígido. Es el caso, por ejemplo, de un terraplén de carretera.



- Mecanismo de Prandtl

Cuando el colchón de reparto se encuentra cubierto por un elemento estructural rígido, es la propia losa o cimentación superficial la que, a través de su rigidez, tiende a uniformar los asientos, a la vez que provoca una transferencia de carga significativa hacia las columnas.

Las ecuaciones que expresan la conservación de la carga son:

$$q_p^+ \cdot \rho + (1 - \rho) \cdot q_s^+ = (q_0 + H_M \gamma)$$

siendo:
$$\rho = \frac{A_{col}}{A_{total}}$$

Véase figura A.2

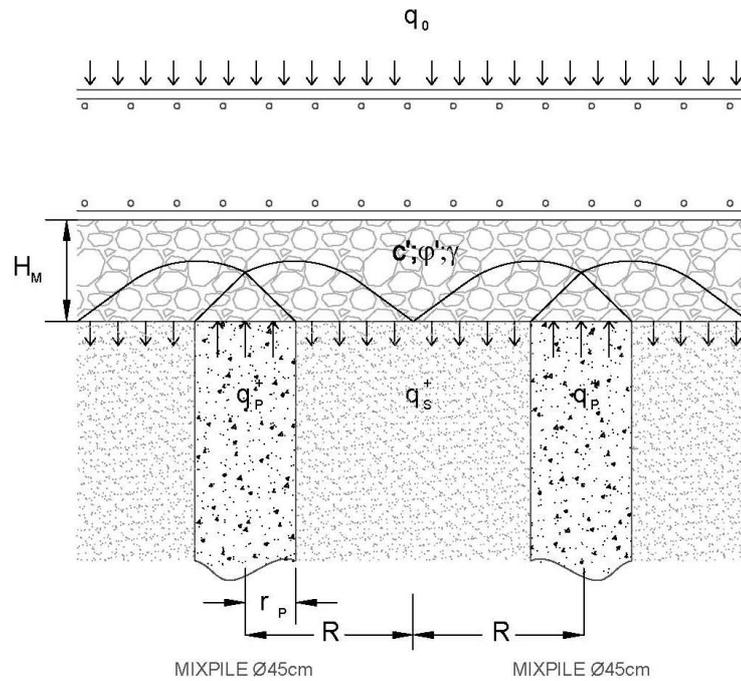


Figura A.2: Diagrama de fallo según Prandtl en la plataforma de transferencia de carga

La tensión límite en la cabeza del Mixpile®, q_p^+ , puede determinarse, para el caso de refuerzos con un elemento rígido de reparto, a partir de la tensión aplicada en el suelo, q_s^+ , el conjunto de parámetros intrínsecos de la plataforma de transferencia de carga y la siguiente fórmula, según el mecanismo de Prandtl:

$$q_p^+ = N_q \cdot q_s^+$$

$$N_q = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi'}{2} \right) \cdot e^{\pi \tan(\phi')}$$

La tensión límite q_p^+ , así como la tensión residual q_s^+ que llega al terreno intermedio sin mejora deben cumplir las siguientes condiciones:

$$q_p^+ \cdot A \leq R_{cd}^{23}$$

Se considera, del lado de la seguridad, que la tensión admisible del terreno intermedio sin mejora es la original indicada por el estudio geotécnico. $q_s^+ \leq \sigma_{adm, terreno sin mejora}$

Se establece un tope estructural de la columna Mixpile de 2,5 MPa.

⁽²³⁾ Siendo $R_{cd} = \frac{R_{ck}}{\gamma_R}$ (Tabla 2.1 del CTE DB-SE-C)



2. Comprobación de tensión admisible por hundimiento y asientos del terreno mejorado

Este método se basa en la interacción entre las columnas y el suelo natural no mejorado en la zona de influencia de los mismos, generando un suelo equivalente homogéneo.

Las características del terreno equivalente dependen del coeficiente de tratamiento ρ , esto es, de la relación de áreas que representa el suelo mejorado respecto al área total del terreno no mejorado (Figura 4):

$$\rho = \frac{A_{col}}{A_{total}}$$

Los parámetros geomecánicos más importantes del diseño son la resistencia al corte sin drenaje y el módulo de deformación del suelo natural y de las columnas. La resistencia al corte sin drenaje se obtiene:

$$c_{u,equi} = c_{u,suelo}(1 - \rho) + c_{u,mixpile}\rho$$

Donde:

- $c_{u,equi}$ Resistencia al corte sin drenaje del suelo equivalente.
- $c_{u,suelo}$ Resistencia al corte sin drenaje del suelo natural, obtenido del Estudio geotécnico.
- $c_{u,mixpile}$ Resistencia a corte-sin drenaje del pilote Mixpile®. Se puede obtener a partir de los valores de resistencia a compresión simple mediante la siguiente expresión:

Se propone el cálculo según Topolnicki para este último parámetro:

$$c_{u,mixpile} = 0,2 \cdot Q_{u,mixpile}; \text{ para } Q_u > 4 \text{ MPa}$$

El módulo de deformación del suelo equivalente se obtiene con la siguiente expresión:

$$E_{equi} = E_{suelo}(1 - \rho) + E_{mixpile} / \beta \cdot \rho$$

Donde:

- E_{equi} Módulo de deformación del suelo equivalente.
- E_{suelo} Módulo de deformación del suelo natural, obtenido de Estudio Geotécnico o por correlaciones en la tabla D.23 del CTE DB-SE-C.
- $E_{mixpile}$ Módulo de deformación del pilote Mixpile®. Fliz y Navin (2006) aconsejan la correlación $E = 300 \cdot q_u$, pero puede variar entre $150 \sim 1000 \cdot q_u$.
- β : Coeficiente de corrección. Debido al diferencial de deslizamiento en la interfaz suelo/inclusión, se requiere la introducción de un coeficiente de corrección.

En simulaciones de distintos escenarios con programas de análisis de elementos finitos dentro del ámbito de la ingeniería geotécnica aportados por MIXAN MIX, se ha considerado que, dentro del rango de valores habituales de los módulos de deformación del Mixpile®, el coeficiente de minoración β varía entre 3 y 5. Los valores comprobados de esta relación entre el módulo del terreno original y las columnas mejoradas en los proyectos referenciados en el apartado 7 del documento, permiten proponer, de manera simplificada, los siguientes valores coeficiente β , que deberá ser, no obstante, verificado en cada proyecto:

Tabla A.1. Coeficiente de corrección β en el rango de valores habituales del Mixpile®*

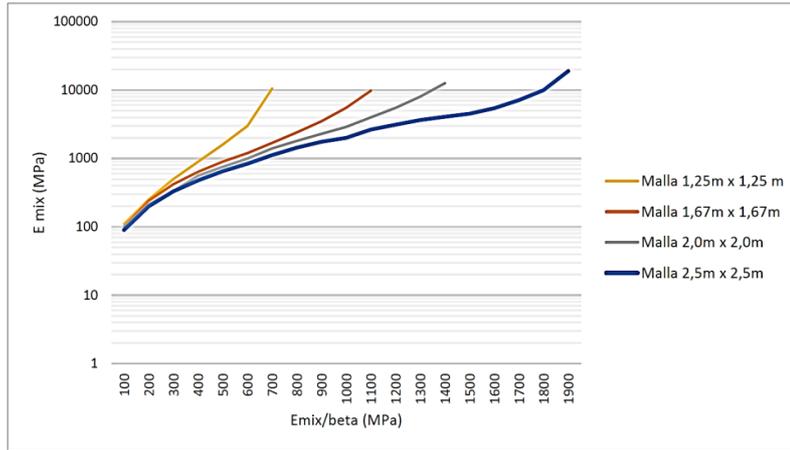
ρ – tasa de sustitución	Malla (m)	$E_{mix}= 1500$ MPa	$E_{mix}= 3000$ MPa
0,1	1,25 x 1,25	3	5
0,057	1,67 x 1,67	3	4
0,04	2,0 x 2,0	3	3
$\leq 0,025$	$\geq 2,5 \times 2,5$	3	3

* Los cálculos y comprobaciones se han hecho también para mallas superiores a $2,5 \times 2,5$ m, obteniéndose valores inferiores del coeficiente β , por lo que se asigna el valor mínimo de 3 para cualquier disposición de mallas mayor de $2,5 \times 2,5$ m.



Para Emix superiores a 3000 MPa se propone emplear los siguientes gráficos:

Gráfico A.1. Módulo Emix corregido con el coeficiente β para módulos Emix superiores a 3000 MPa



Para valores de Emix cercanos a los 10 000 MPa, este coeficiente β se vuelve fácilmente mayor de 10, tal y como ocurre en otros tipos de inclusiones rígidas, según se indica el Capítulo 3, Apartado 5.1 del Proyecto ASIRI.

Los módulos de deformación del Mixpile deben minorarse con dicho coeficiente (β) en el caso de querer emplear el método del terreno equivalente. En el caso de emplear métodos numéricos como Plaxis o similar, se empleará directamente el valor real del Emix.

El asiento global del modelo de suelo equivalente, vendrá definido por la expresión:

$$S_{equi} = \sum \frac{\Delta h \cdot q'_b}{E_{equi}}$$

Siendo:

S_{equi} (m) asiento equivalente.

q'_b (kN/m²) la presión efectiva bruta en la base de apoyo de la losa. Se puede utilizar la presión efectiva neta, q'_{neta} , a criterio del proyectista, según el artículo 4.4.2 del CTE DB-SE-C si la cimentación es parcialmente compensada.

Δh (m) la altura del estrato en que se considera el asiento.

Profundizando más en este tema, la comprobación de asientos se puede abordar también con el modelo matemático de multicapa elástica sobre base rígida.

Empleando el método aproximado de Steinbrenner, donde el asiento de cada capa viene dado por la expresión: $S_i = S_o - S_z$, siendo S_o y S_z el asiento a techo y muro de la capa, calculado mediante la siguiente ecuación (para el asiento medio de la losa):

$$S_z = \frac{q'_b B}{2E} (M\phi_1 - N\phi_2)$$

Donde:

S_z Asiento a la profundidad z.

q'_b (kN/m²) Presión efectiva bruta uniforme sobre el terreno (kN/m²). Se puede utilizar la presión efectiva neta, q'_{neta} , a criterio del proyectista, según el artículo 4.4.2 del CTE DB-SE-C si la cimentación es parcialmente compensada.

B (m) Ancho de la losa (m).

E (kN/m²) Módulo de deformación de cada capa.

M $1 - \nu^2$.

N $1 - \nu - 2\nu^2$.



ν Coeficiente de Poisson.

\emptyset_1 y \emptyset_2 Coeficientes de influencia en función de la forma de la placa y de la profundidad (z), obtenidos en la tabla de coeficientes correspondiente⁽²⁴⁾.

El asiento total (S) se obtiene sumando los asientos de cada capa. En cada estrato se emplea los valores concretos de coeficiente de Poisson, profundidad, módulo de deformación.

La carga de hundimiento para el caso de los terrenos coherentes se calculará mediante la expresión 4.8 del CTE DB-SE-C en el apartado 4.3.2.1.

Habitualmente el cálculo se realiza en situación de corto plazo o sin drenaje, por tanto, la expresión se transforma y se reduce a:

$$q_h = c_{u,equi} \cdot N_c d_c s_c i_c t_c + q'_{ok} N_q d_q s_q i_q t_q$$

$c_{u,equi}$ = Resistencia al corte sin drenaje del suelo equivalente.

Coeficientes de capacidad de carga:

$$N_c = 5,14$$

$$N_q = 1$$

Coeficientes correctores de influencia de la profundidad:

q_{ok} = sobrecarga de tierras a la profundidad de la cimentación.

$$d_c = 1 + 0,34 (\arctag D/B^*)$$

$$d_q = 1$$

Coeficientes correctores de influencia de la forma:

$$s_c = 1 + 0,2 B^*/L^*$$

$$s_q = 1$$

Además, los coeficientes de influencia de inclinación de la carga o de proximidad a un talud, se encuentran en el apartado F.1.1.1 del CTE DB-SE-C.

i_c, i_q, i_γ = coeficientes de inclinación de carga. En otro caso, 1.

t_c, t_q, t_γ = coeficientes de proximidad a un talud. En otro caso, 1.

$$s_{(z)} = \frac{q \cdot b}{2 \cdot E} \cdot (A \cdot \phi_{1(A,B,Z)} - B \cdot \phi_{2(A,B,Z)})$$

$$A = 1 - \nu^2$$

$$B = 1 - \nu - 2 \cdot \nu^2$$

$$\phi_1 = \frac{1}{\pi} \left[L n \frac{\sqrt{1+n^2+m^2}+n}{\sqrt{1+n^2+m^2}-n} + n \cdot L n \frac{\sqrt{1+n^2+m^2}+1}{\sqrt{1+n^2+m^2}-1} \right]$$

$$\phi_2 = \frac{m}{\pi} \cdot \arctag \frac{n}{m \cdot \sqrt{1+n^2+m^2}}$$

$$m = z / b$$

$$n = a / b$$

a = largo cimentación
 b = ancho cimentación
 q = presión unitaria aplicada

(24) E = módulo elástico



Hay que indicar que, en el caso de los terrenos granulares, la presión admisible suele estar limitada por los asentamientos por lo que para calcularla se empleará la siguiente fórmula indicada en el anexo E.5 del CTE DB-SE Cimientos:

$$K_s = \frac{q}{s}$$

Donde:

q Presión (kN/m²).

s Asiento producido (m).

De la cual se deduce lo siguiente:

$$K_s \text{ (kN/m}^3\text{)} = N \cdot f \cdot q_{adm} \text{ (kPa)}$$

Donde:

f Factor de seguridad empleado para minorar la presión.

N Factor que depende del asiento máximo admisible. (N = 1/s (m)).

K_s Módulo de balasto, para una cimentación de ancho b.

q_{adm} Presión admisible.

Hallamos K_s, según las fórmulas de Terzaghi:

Para terreno Granular, en cimentaciones cuadradas:

$$K_s = K_{30} \cdot \left(\frac{b + 0,3}{2b} \right)^2 \text{ (kN/m}^3\text{)}$$

Siendo b el lado menor de la losa.

Para cimentaciones rectangulares, aplica la siguiente formulación (apartado E.5 del DB-SE-C):

$$K_{sBL} = K_{sB} \left(1 + \frac{B}{2L} \right)$$

El K₃₀, módulo de balasto para una placa de ancho 30 cm, en el caso de tener una mezcla de suelos será el siguiente:

$$K_{30, equi} = K_{30, suelo} (1 - \rho) + K_{30, mixpile} \rho$$

Por lo que la presión admisible será:

$$q_{adm} = \frac{K_s \cdot s}{f} \text{ (kN/m}^2\text{)}$$



3. Consideraciones de cálculo en disposiciones singulares

3.1 Columnas en el borde o fuera de la malla

Para columnas en el borde o fuera de la malla, se seguirá la orientación sobre la separación entre centros y la formulación recogidas en el apartado 4.2.3.4 del Capítulo 5 del Proyecto ASIRI:

$$q_{p,i}^+ = q_p^+(P)$$

Donde:

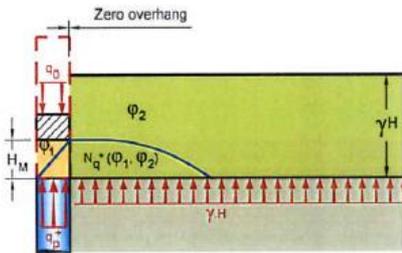
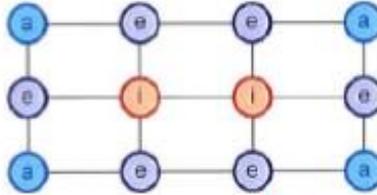
$$q_{p,a}^+ = \frac{7}{12} q_p^+(P) + \frac{5}{12} q_p^+(L)$$

$$q_p^+(P) = q_p^+(L_{max})$$

(Calculada según el apartado 6.1 del DIT)

$$q_p^+(L = 0) = N_q^+ \cdot \gamma \cdot H$$

$$q_{p,e}^+ = \frac{5}{6} q_p^+(P) + \frac{1}{6} q_p^+(L)$$



L TP \$\phi_1\$	\$N_q^+(\phi_1)\$	Suelo \$\phi_2=\$	Suelo \$\phi_2=\$	Suelo \$\phi_2=\$	Suelo \$\phi_2=\$
		15°	20°	25°	30°
		\$N_q^+\$	\$N_q^+\$	\$N_q^+\$	\$N_q^+\$
30	18.4	6.98	9.45	13.08	18.43
33	26.1	7.86	10.64	14.71	20.88
35	33.3	8.52	11.53	16.01	22.67
38	48.9	9.68	13.05	18.11	25.80
40	64.2	10.54	14.29	19.71	28.04

3.2 Ausencia de colchón granular de reparto

En el caso de ausencia de colchón granular de reparto bajo elementos rígidos, en ciertos casos podrá considerarse que todas las cargas se transfieren a los Mixpile, diseñados de manera que no sobrepasen los 25 kg/cm² de tensión.

En cualquier caso, habrá de considerarse la posición de las inclusiones en el diseño de la losa de cimentación, así como comprobar la losa a punzonamiento y la formación de «puntos duros» que pueden condicionar la ley de momentos de la cimentación.

