

PROYECTO DE ESTRUCTURAS GEOTÉCNICAS DE ACUERDO AL FUTURO EUROCÓDIGO 7

Design of geotechnical structures according to future Eurocode 7

José Estaire^a, Andrew J. Bond^b

^a Laboratorio de Geotecnia – CEDEX, España.

^b Director, Geocentrix Ltd, UK; Past-Chairman TC250/SC7 Eurocode 7

RESUMEN – Este trabajo constituye una guía breve para la elaboración de los proyectos de las estructuras geotécnicas para cumplir los requerimientos y recomendaciones de seguridad, nivel de servicio, robustez y durabilidad a los que se deben ajustar dichos proyectos, de acuerdo a lo indicado en los futuros Eurocódigo 0 y Eurocódigo 7 que previsiblemente estarán aprobados alrededor de 2025.

La guía se basa en unos diagramas de flujo para cada una de las cinco tareas que comprende el proyecto de una estructura geotécnica: a) Procedimientos de fiabilidad, b) Modelización del terreno, c) Verificaciones de proyecto, d) Implementación del proyecto durante la ejecución y e) Realización de informes.

Dichos diagramas permiten explicar los procedimientos para a) determinar la Categoría Geotécnica de la estructura geotécnica en estudio, b) desarrollar el Modelo del Terreno y el Modelo del Proyecto Geotécnico, c) verificar los estados límites últimos y de servicio, mediante la aplicación de los factores parciales indicados en los diferentes Casos de Diseño, d) realizar diferentes planes que aseguren la seguridad y calidad de las estructuras geotécnicas durante su ejecución y e) elaborar diferentes informes durante el proyecto y ejecución de la estructura geotécnica.

SYNOPSIS – This paper is a brief guide for the design of geotechnical structures to fulfil the requirements for the safety, serviceability, robustness and durability of these designs, according to the future Eurocode 0 and Eurocode 7, initially scheduled for 2025.

This guide is based on flow charts for each of the five tasks which include the geotechnical structure design: a) Reliability management, b) Ground modelling, c) Design verification, d) Design implementation during execution and e) Reporting.

These flowcharts allow to explain the procedures to: a) determine the Geotechnical Category of a geotechnical structure, b) develop the Ground Model and the Geotechnical Design Model, c) verify the ultimate and serviceability limit states, by partial factor method for each Design Case, d) carry out different plans to ensure the safety and the quality of geotechnical structures during its execution and e) prepare different reports during the design and execution of the geotechnical structure.

Palabras Clave – Proyecto, estructuras geotécnicas, Eurocódigo 7

Keywords – Design, geotechnical structures, Eurocode 7

1 – INTRODUCCIÓN

En noviembre de 2004, el Comité Europeo de Normalización (CEN) publicó, como norma europea EN1997, el Eurocódigo 7: Proyecto Geotécnico, dentro del conjunto de Eurocódigos. Sólo seis años después, en 2010, la Comisión Europea inicia el proceso de evolución del Sistema de

E-mails: jose.estaire@cedex.es (J. Estaire), andrew.bond@geocentrix.co.uk (A. Bond)

Eurocódigos, incorporando posibles nuevos Eurocódigos y revisando los ya existentes para lo cual: invita al CEN a liderar el proceso; en 2012 emite el Mandato 515 (M/515); y en 2015 aprueba la financiación correspondiente con un importe de 11,5 millones de euros. En la Figura 1 se resumen los puntos clave de este proceso.

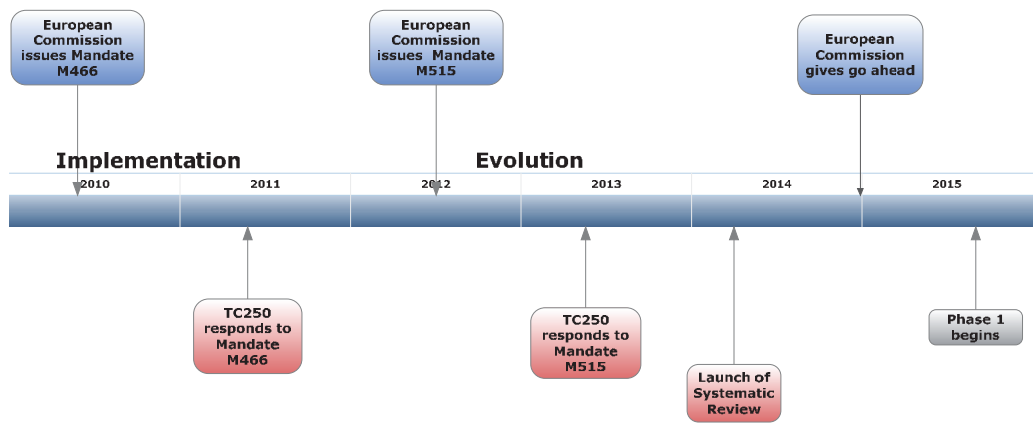


Fig. 1 – Hitos del proceso de la aprobación de la segunda generación de Eurocódigos (Bond 2017).

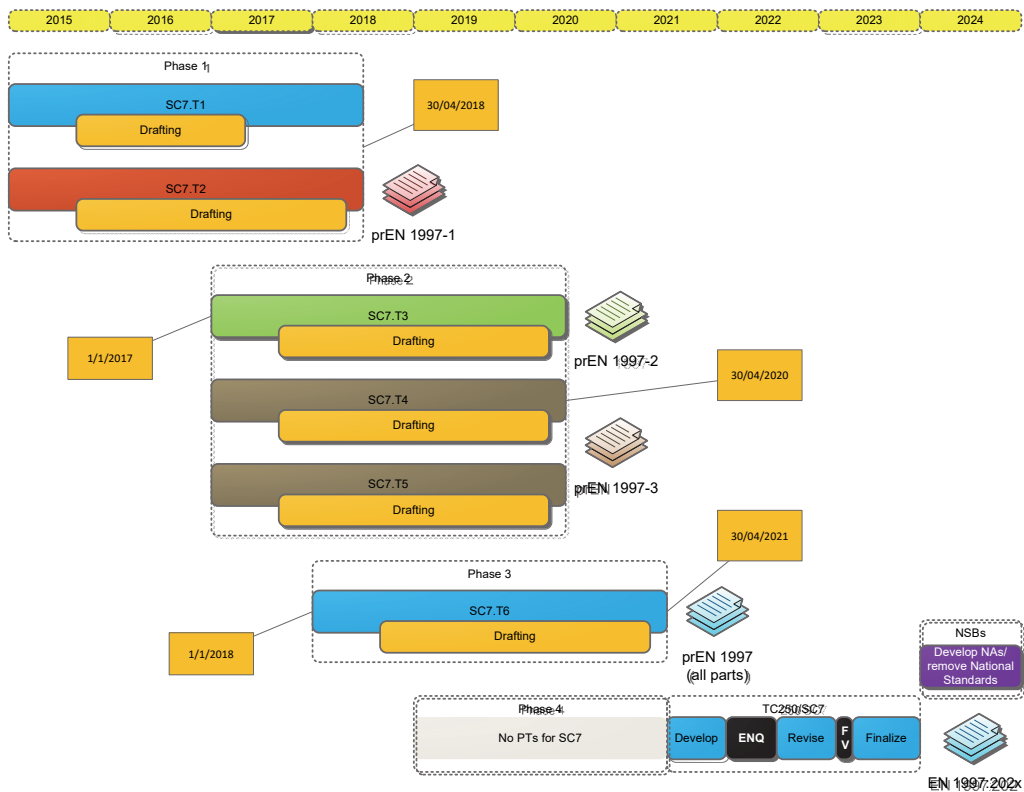


Fig. 2 – Hitos del proceso de elaboración de la segunda generación de Eurocódigos, Bond 2019)

La Figura 2 muestra el calendario de actividades seguido a partir de 2015. En las tres primeras fases del M/515 se crearon los seis Equipos Redactores (“Project Teams”, en su terminología inglesa; SC/T*, en la figura) responsables de elaboración de las tres partes de las que constará el futuro Eurocódigo 7 (EC7). Estos equipos redactores han ido entregando paulatinamente sus borradores definitivos, siendo Abril de 2021 la fecha de finalización de estas tres primeras fases. A partir de ese momento comienza la Fase 4 en la que se revisarán los documentos por parte del subcomité TC250-SC7 (Comité Técnico del CEN responsable del Eurocódigo 7) y de los Organismos Nacionales de Normalización (NSB, en su terminología inglesa) y se procederá a las votaciones correspondientes (ENQ y FV, en la figura).

A pesar de las incertidumbres de futuro inherentes a todo proceso de normalización, se espera que para 2025 la nueva generación de Eurocódigos se haya aprobado formalmente y comience la utilización del futuro Eurocódigo 7 como código de proyecto de las estructuras geotécnicas. Dicho proyecto debe hacerse cumpliendo también los requisitos recogidos en el Eurocódigo 0, denominado “Bases del proyecto estructural y geotécnico” ya que establece unas bases de proyecto comunes para todos los Eurocódigos. Es importante resaltar que, como indica el título, por primera vez, se pone a la misma altura conceptual el proyecto de estructuras y el proyecto geotécnico.

A este respecto y en este contexto, una estructura geotécnica es toda estructura que tenga relación con el terreno. Como ejemplos de estructuras geotécnicas cabe citar los desmontes y terraplenes; las cimentaciones superficiales y profundas; las estructuras de contención de tierras; los anclajes y las técnicas de refuerzo y mejora del terreno. El proyecto de cada una de estas estructuras geotécnicas se desarrolla específicamente en los diferentes capítulos de la Parte 3 del futuro Eurocódigo 7 (prEN1997-3).

En este texto se dan una serie de pautas y guías para usar adecuadamente y de forma conjunta los Eurocódigos 0 (prEN 1990) y 7 (prEN1997) con el objetivo final de cumplir con los requisitos y recomendaciones que sirven para garantizar la seguridad, el nivel de servicio, la robustez y la durabilidad de las estructuras geotécnicas.

2 – EL NUEVO EUROCÓDIGO 7

Una parte importante del trabajo de redacción de la segunda generación del Eurocódigo 7 ha sido la reorganización de la estructura del documento para facilitar una clara diferenciación entre requisitos (de obligado cumplimiento), recomendaciones y permisos, así como hacer más fácil el uso del documento.

El contenido de la actual Parte 1 del Eurocódigo 7 (EN1997-1:2004) “Reglas generales” se ha dividido en tres partes, como se muestra en la Figura 3:

- Las bases del proyecto geotécnico se han trasladado al Eurocódigo 0 (prEN1990:202x);
- las reglas generales que afectan a todo el proyecto geotécnico se mantienen en la Parte 1 del futuro EC7 (prEN1997-1:202x) y
- las reglas específicas para las diferentes estructuras geotécnicas se han incluido en la Parte 3 del futuro EC7 (prEN1997-3:202x).

Por su parte, el contenido de la Parte 2 del EC7 actual (EN1997-2:2007) “Reconocimiento y ensayos del terreno” también se ha revisado para que la nueva Parte 2 esté enfocada y estructurada fundamentalmente para la determinación de los parámetros geotécnicos de las distintas unidades geotécnicas a utilizar en el proyecto. Con objeto de incidir en esta idea, el nombre de la nueva Parte 2 se ha transformado a “Propiedades del Terreno”. Los modelos de cálculo existentes en la actual Parte 2 se han trasladado a la nueva Parte 3, donde se desarrollan los requisitos y recomendaciones específicos para distintas estructuras geotécnicas.

Los artículos de G.Franzén et al (2019), D. Norbury et al (2019) y A. Bond et al (2019) analizan, respectivamente, los contenidos de las Partes 1, 2 y 3 del futuro Eurocódigo 7 y comentan los principales cambios introducidos.

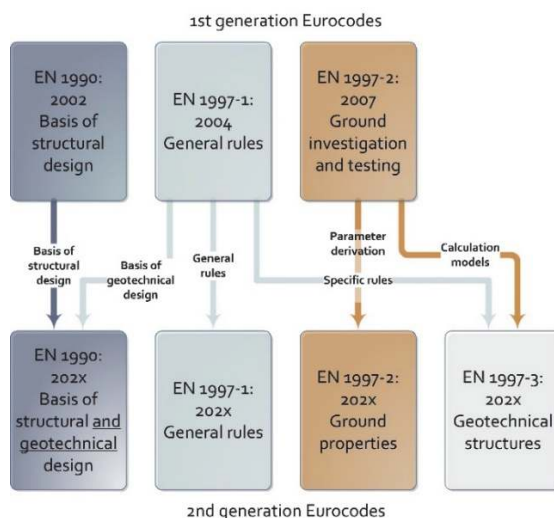


Fig. 3 – Redistribución de las Partes 1 y 2 del actual Eurocódigo 7 (EN1997-1:2004 y EN1997-2:2007) en los nuevos Eurocódigos 0 (prEN1990) y 7 (prEN1997) [Bond, 2019]

3 – PROYECTO DE UNA ESTRUCTURA GEOTÉCNICA

3.1 – Esquema general

El proyecto de una estructura geotécnica, teniendo en cuenta lo indicado por el futuro EC7 (prEN1997), comprende cinco tareas principales, tal y como se muestra en la Figura 4:

- Procedimientos de fiabilidad: consistente en una serie de clasificaciones de la estructura y el terreno que se combinan entre sí para determinar la “Categoría Geotécnica” de la estructura geotécnica en estudio.
- Modelización del terreno: cuya principal función es la representación del terreno y del agua existente en el emplazamiento, en el denominado “Modelo del Terreno” (Ground model, en su versión inglesa), y la obtención de los “valores derivados” de los parámetros geotécnicos de las distintas unidades geotécnicas, definidos en el apartado 3.3.
- Verificaciones de proyecto: cubre todos los procedimientos que se deben utilizar para verificar que no se exceden los estados límites en ninguna situación de proyecto a la que pueda estar sometida la estructura durante su vida útil.
- Implementación del proyecto durante la ejecución: en esta fase, mientras se lleven a cabo los trabajos de ejecución de la estructura geotécnica se debe verificar que se cumplen las hipótesis de proyecto mediante el cumplimiento de una serie de planes desarrollados en el proyecto (Planes de supervisión, inspección, auscultación y mantenimiento).
- Realización de informes: todos los trabajos llevados a cabo durante la redacción del proyecto y de la ejecución de las obras se deben documentar mediante la realización de los siguientes informes:
 - Informe de Reconocimiento Geotécnico (GIR – Geotechnical Investigation Report),
 - Informe del Proyecto Geotécnico (GDR – Geotechnical Design Report) y
 - Registro de la construcción de la estructura geotécnica (GCR – Geotechnical Construction Record).

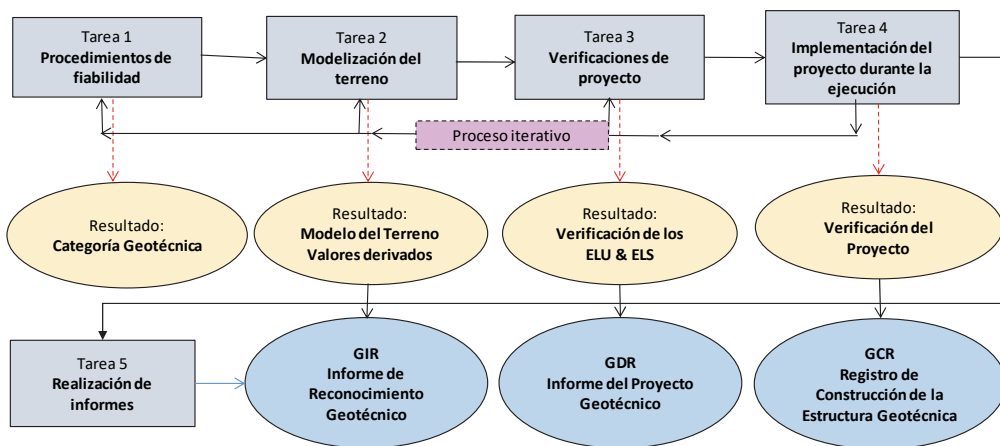


Fig. 4 – Tareas a realizar en el proyecto de una estructura geotécnica

3.2 – Tarea 1: Procedimientos de fiabilidad del proyecto

El procedimiento para asegurar la fiabilidad del proyecto desarrollado en el EC7 (prEN1997) tiene varios componentes, como se muestra en la Figura 5.

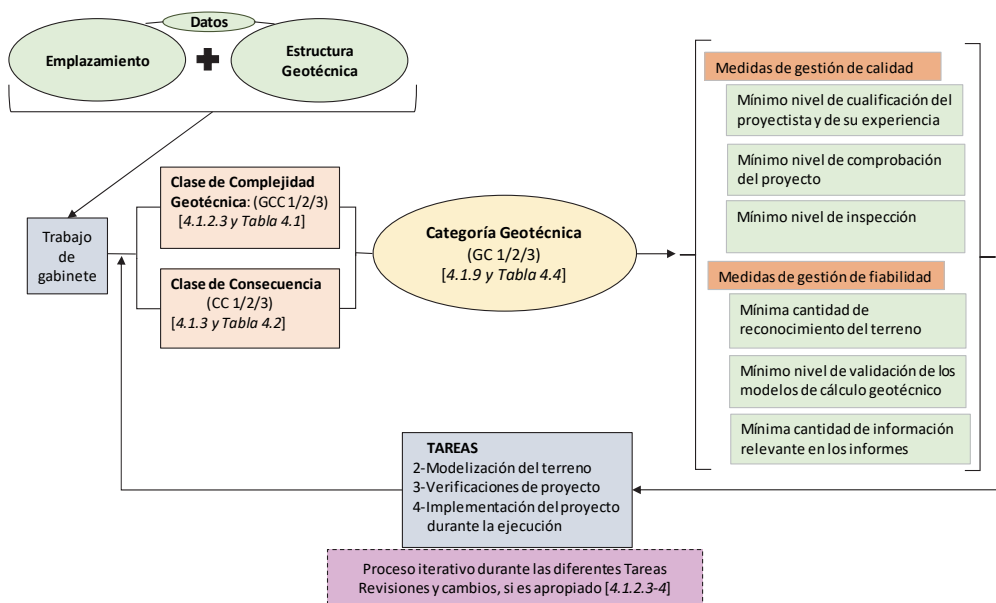


Fig. 5 – Componentes del procedimiento de fiabilidad

Una vez conocido el emplazamiento y determinadas las características de la estructura geotécnica, el primer paso es realizar un trabajo de gabinete (Desk study, en su versión inglesa), en el que se recopila y analiza la documentación existente del emplazamiento, con el objetivo de:

- establecer una Clase de Complejidad Geotécnica inicial (GCC) para el terreno, utilizando los criterios indicados en la Tabla 1, tomada del prEN1997-1, y

- clasificar las consecuencias del posible fallo de la estructura geotécnica en una de las cinco Clases de Consecuencias (CC) – Muy baja, Baja, Normal, Alta o Muy alta –, de acuerdo a los criterios de la Tabla 2, tomada del prEN1990. Por su parte, la Tabla 3, tomada prEN1997-1, recoge ejemplos de posibles estructuras geotécnicas que podrían encuadrarse en las diferentes Clases de Consecuencias (CC).

Es de destacar que estas tres tablas se configuran como “Parámetros de Determinación Nacional” (NDPs, en su terminología inglesa), lo que significa que su contenido puede ser modificado por cada país en su correspondiente Anejo Nacional.

Tabla 1. Selección de la Clase de Complejidad Geotécnica [Tomada de prEN1997-1:202x]

Geotechnical Complexity Class	Complexity	General features causing uncertainty
GCC3	Higher	Any of the following apply: <ul style="list-style-type: none"> • considerable uncertainty regarding ground conditions, • highly variable or difficult ground conditions, • significant sensitivity to groundwater conditions • significant complexity of the ground-structure interaction
GCC2	Normal	It covers everything not contained in the features of GCC1 and GCC2
GCC1	Lower	All the following conditions apply: <ul style="list-style-type: none"> • negligible uncertainty regarding the ground conditions • uniform ground conditions • low sensitivity to groundwater conditions, • low complexity of the ground-structure-interaction
<small>Note 8. The terms “considerable”, “significant”, “highly” etc. are relative to any comparable experience that exists for the particular geotechnical structure and design situation</small>		

Tabla 2. Criterios para determinar la Clase de Consecuencia de las estructuras [Tomada de prEN1990:202x]

Consequence class	Indicative qualification of consequences	
	Loss of human life or personal injury^a	Economic, social or environmental consequences^a
CC4 – Highest	Extreme	Huge
CC3 – Higher	High	Very great
CC2 – Normal	Medium	Considerable
CC1 – Lower	Low	Small
CC0 – Lowest	Very low	Insignificant
^a The consequence class is chosen based on the more severe of these two columns		

Tabla 3. Ejemplos de estructuras geotécnicas en diferentes Clases de Consecuencias
[Tomada de prEN1997-1:202x]

Consequence class	Description of consequence	Examples
CC4	Highest	Geotechnical constructions whose integrity is of vital importance for civil protection, e.g. underground power plants, road/railway embankments with fundamental role in the event of natural disasters, earth dams connected to aqueducts and energy plants, levees, tailing dams and earth dams with extreme consequences upon failure (very high risk-exposure), etc. In case with <u>significant landslide hazards</u>
CC3	Higher	Retaining walls and foundations supporting public buildings, with high exposure. Man-made slopes and cuts, retaining structures with high exposure. Major road/railway embankments, bridge foundations that can cause interruption of service in emergency situations. Underground constructions with large occupancy (e.g. <u>underground parking</u>).
CC2	Normal	All geotechnical structures not classified as CC1 or CC3 or CC4
CC1	Lower	Retaining walls and foundations supporting buildings with low occupancy. Man-made slopes and cuts, in areas where a failures eill have low impact on the society. Minor road embankments nor vital for the society. Underground constructions with occasional occupancy.
CC0	Lowest	Not applicable for geotechnical structures

El segundo paso es la clasificación de la estructura geotécnica en una de las Categorías Geotécnicas (GC1, GC2 ó GC3) usando las relaciones establecidas en la Tabla 4, tomada del prEN1997-1. La Categoría Geotécnica combina las consecuencias de fallo de la estructura, representada por su Clase de Consecuencia (CC), y la complejidad del terreno, representada por la Clase de Complejidad Geotécnica, (GCC). Hay que destacar que el futuro EC7 (prEN1997) obliga a una revisión de la Clase de Complejidad Geotécnica del terreno en cada fase del proceso del proyecto y ejecución y, si se considera apropiado, su modificación.

Tabla 4. Obtención de la Categoría Geotécnica (CG) a partir de la Clase de Consecuencia (CC) y de la Clase de Complejidad Geotécnica (GCC) [Tomada de prEN1997-1:202x]

Consequence class	Geotechnical Complexity Class (GCC)		
	Lower (GCC1)	Normal (GCC2)	Higher (GCC3)
Highest (CC4)	GC3	GC3	GC3
Higher (CC3)	GC2	GC3	GC3
Normal (CC2)	GC2	GC2	GC3
Lower (CC1)	GC1	GC2	GC2

La clasificación de la estructura geotécnica en una de las Categorías Geotécnicas permite determinar los siguientes requisitos mínimos para la gestión de la calidad y de la fiabilidad del proyecto:

- Para la gestión de la calidad:
 - Mínimo nivel de la cualificación del proyectista y de su experiencia (DQL);
 - Mínimo nivel de las comprobaciones de proyecto (DCL);
 - Mínimo nivel de inspección (IL).
- Para la gestión de la fiabilidad:
 - Mínima cantidad de reconocimiento del terreno;
 - Mínimo nivel de validación de los modelos de cálculo geotécnico;
 - Mínima cantidad de información relevante en los informes.

La relación entre la Categoría Geotécnica y las medidas para la gestión de la calidad se muestra en la Tabla 5, tomada del prEN1997-1, mientras que en la Tabla 6 se especifican dichas medidas. Por su parte, las medidas para la gestión de la fiabilidad se comentarán posteriormente en los capítulos correspondientes.

Tabla 5. Relación entre las Categorías Geotécnicas y las medidas de la gestión de la calidad [Tomada de prEN1997-1:202x]

Geotechnical Category (GC)	Minimum Design Check level (DCL)	Minimum Design Qualification Level and Experience Level (DQL)	Minimum Inspection Level (IL)
GC3	DCL3	DQL3	IL3
GC2	DCL2	DQL2	IL2
GC1	DCL1	DQL1	IL1

Tabla 6. Medidas para la gestión de la calidad, dependiendo de la Categoría Geotécnica

Concepto	Categoría Geotécnica		
	GC1	GC2	GC3
Mínimo nivel de la cualificación del proyectista y de su experiencia (DQL)	DQL1 Permite la realización de proyectos simples	DQL2 Permite la realización de proyectos avanzados	DQL3 Permite la realización de proyectos complejos
Mínimo nivel de las comprobaciones de proyecto (DCL)	DCL1 Auto comprobación	DCL2 Comprobación independiente normal	DCL3 Comprobación independiente extendida
Mínimo nivel de inspección (IL)	IL1 Auto inspección	IL2 Inspección de acuerdo al procedimiento de la propia organización	IL3 Inspección por una organización independiente

3.3 – Tarea 2: Modelización del terreno

La Parte 2 del futuro EC7 (prEN1997-2) desarrolla el reconocimiento geotécnico que se debe realizar para el proyecto de una estructura geotécnica. La norma identifica las siguientes etapas de las que puede constar dicho reconocimiento, tal como se muestra en la Figura 6:

- Trabajos de gabinete;
- Inspección visual del emplazamiento;
- Reconocimiento preliminar;
- Reconocimiento para el proyecto y ejecución, que incluye los ensayos de campo y laboratorio; y
- Auscultación y reconocimientos de conformidad.

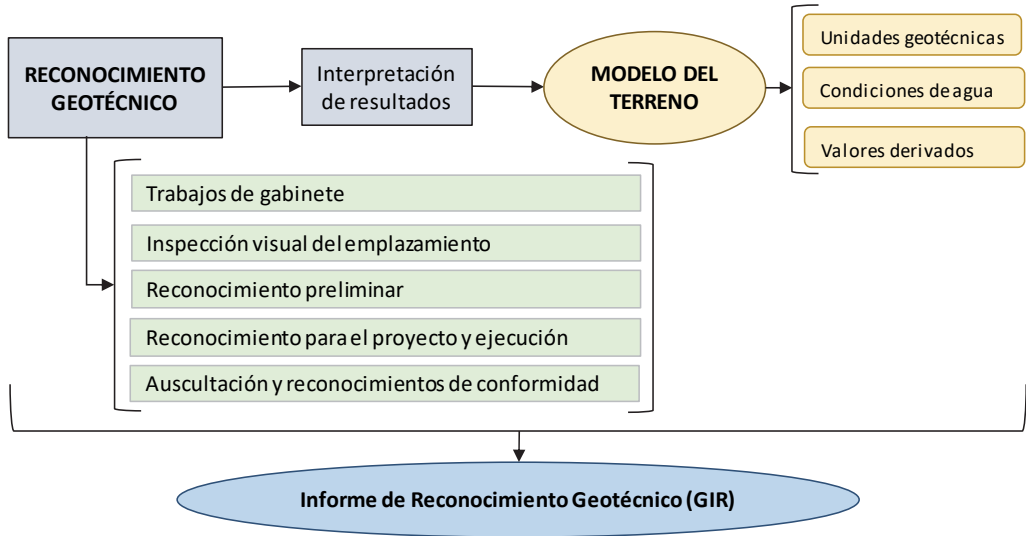


Fig. 6 – Pasos para la Modelización del Terreno

Como se ve en la figura anterior, los resultados e interpretación de dichos trabajos de reconocimiento tienen como objetivo establecer un “Modelo del Terreno” (Ground Model, en su versión inglesa) que incluye:

- Un esquema de las distintas “unidades geotécnicas” que componen el terreno en la zona de estudio. En este contexto, se entiende por unidad geotécnica “...una capa de terreno que está identificada como un material único...” por tanto con propiedades únicas para toda la unidad.
- Un análisis de las condiciones del agua en la zona de estudio.
- Los denominados “valores derivados” de los diferentes parámetros geotécnicos de las distintas unidades geotécnicas que componen el “Modelo del Terreno”.

Los “valores derivados” son valores de las propiedades geotécnicas obtenidas mediante la aplicación de teorías o correlaciones empíricas a los resultados de ensayos de campo o laboratorio o a las medidas de auscultación, de acuerdo a la definición dada en prEN1997-1. Fundamentalmente, los “valores derivados” proceden de la interpretación de los ensayos de campo y laboratorio aunque también pueden obtenerse del análisis de la documentación previa y de la auscultación de la estructura geotécnica durante su ejecución, vida útil e incluso en su caso, en las etapas posteriores a su fallo. El conjunto de “valores derivados” de un parámetro geotécnico de una unidad geotécnica será utilizado posteriormente en otra fase del estudio para la determinación del “valor representativo” a utilizar en los cálculos (como se desarrolla en 4.4 de este texto).

Por último, se debe indicar que todos los trabajos del reconocimiento geotécnico se deben recopilar en el “Informe de Reconocimiento Geotécnico” (GIR, acrónimo de Ground Investigation Report).

Por otra parte, como se decía anteriormente, la gestión de la fiabilidad en el marco del EC7 implica un mínimo de reconocimientos del terreno en función de la Categoría Geotécnica de la estructura geotécnica. La Tabla 7, tomada del prEN1997-1, da unas pautas generales para cumplir dichos requisitos de fiabilidad, aunque en la Parte 3 del futuro EC7 (prEN1997-3) se recogen especificaciones más concretas para las distintas estructuras geotécnicas desarrolladas en dicha Parte 3.

Tabla 7. – Mínima cantidad de reconocimiento del terreno en función de la Categoría Geotécnica [Tomada de prEN1997-1:202x]

Geotechnical Category	Minimum amount of ground investigation
GC3	All items given below for GC2 and, in addition: <ul style="list-style-type: none">- sufficient investigations to evaluate the variability of critical ground parameters for all critical geotechnical units at all locations;- measures to ensure high quality sampling and testing procedures.
GC2	All items given below for GC1 and, in addition: <ul style="list-style-type: none">- additional investigations of ground conditions by methods described in EN 1997-2;- sufficient investigation points so that all critical geotechnical units that need to be described in the Geotechnical Design Model are recognized at various locations;- determination of relevant ground parameters using more than one ground investigation method
GC1	All items given below: <ul style="list-style-type: none">- desk study of the site, review of comparable experience;- site inspection.

3.4 – Tarea 3: Verificaciones de los estados límite en el proyecto

El primer paso en la verificación de proyecto, como se muestra en la Figura 7, es el análisis conjunto del Modelo del Terreno, previamente definido, y de las condiciones bajo las cuales la estructura tiene que cumplir sus requisitos de proyecto. Los objetivos de esta etapa son:

- Definir las Situaciones de Proyecto (Design situation, en su versión inglesa) que describen “las condiciones físicas que podrían ocurrir durante un cierto periodo de tiempo para el cual se debe demostrar, con la suficiente fiabilidad, que no se supera ningún estado límite”.
Es de destacar que los documentos normativos españoles ya utilizan este concepto, entendiéndolo como representación simplificada de la realidad de la obra que sea susceptible de análisis, por lo que debe incluir datos geométricos, tanto del terreno como de la estructura geotécnica, las características del terreno y las acciones actuantes.
- Desarrollar un Modelo de Proyecto Geotécnico (Geotechnical Design Model, en su versión inglesa) a partir del “Modelo del Terreno” que debe contener toda la información necesaria para verificar un estado límite particular de una situación de proyecto determinada. Es de destacar que el Modelo de Proyecto Geotécnico debe incluir los valores representativos (ver 4.4) de las diferentes unidades geotécnicas identificadas. Conceptualmente, se puede decir que habría tantos Modelos de Proyecto Geotécnico como estados límite a verificar aunque obviamente, en la práctica habitual, muchos de ellos coincidirán por lo que normalmente con un único modelo será suficiente.

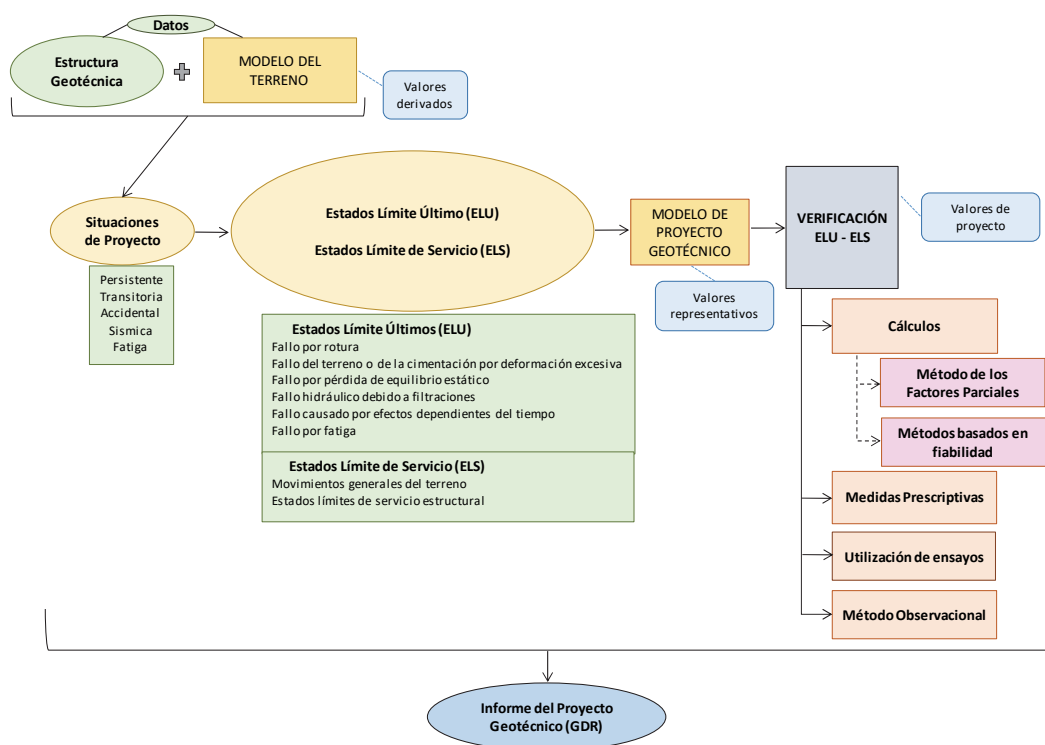


Fig. 7 – Procedimiento para las verificaciones de proyecto

Las Situaciones de Proyecto se clasifican como persistentes, transitorias, accidentales, sísmicas y de fatiga. Para cada situación de proyecto se deben identificar los estados límites últimos (ELU) y de servicio (ELS) que deben verificarse. A este respecto, en la Parte 1 del futuro EC7 (prEN1997-1) se especifican los siguientes tipos de ELU: fallo por rotura, fallo del terreno o de la cimentación por deformación excesiva, fallo por pérdida de equilibrio estático, fallo hidráulico debido a filtraciones, fallo causado por efectos dependientes del tiempo, fallo por fatiga y fallo por cualquier efecto inducido por acciones sísmicas. Los diferentes tipos de ELS se refieren a movimientos generales del terreno y estados límites de servicio estructural.

La verificación de que los estados límites no son superados por las estructuras geotécnicas puede realizarse por alguno de los siguientes métodos:

- Cálculo, mediante la aplicación del Método de los Factores Parciales o mediante métodos probabilísticos de fiabilidad,
- Aplicación de medidas prescriptivas, entendidas como reglas de proyecto, de carácter conservador, basadas en la experiencia y generalmente prescritas por la Autoridad Nacional, en algún documento normativo, o por la propiedad del proyecto, en el pliego de prescripciones del propio proyecto.
- Utilización de ensayos, como suele ser el caso en el proyecto de anclajes y pilotes.
- Aplicación del Método Observacional.

Por último, toda la documentación generada durante el proceso de verificación y proyecto se debe recopilar en un Informe de Proyecto Geotécnico (GDR, acrónimo de Geotechnical Design Report).

El método de cálculo basado en la aplicación del Método de los Factores Parciales es el más utilizado por lo que se desarrolla pormenorizadamente en el Apartado 4 de este texto.

3.5 – Tarea 4: Implementación del proyecto durante la ejecución de los trabajos

Con objeto de que el proyecto, la ejecución y el mantenimiento de la estructura geotécnica durante su vida útil posterior sean parte de un mismo proceso y que haya una continuidad en su desarrollo, el futuro EC7 (prEN1997-1) indica que se deben cumplir, durante la ejecución de los trabajos, los planes indicados en la Figura 8, los cuales deben estar contenidos en el propio proyecto.

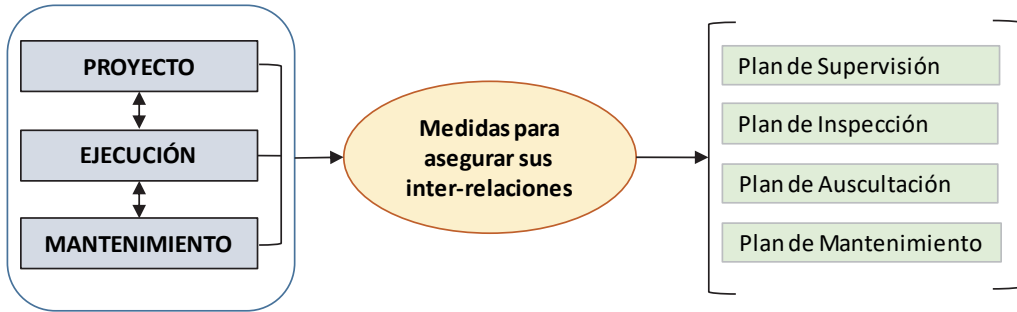


Fig. 8 – Planes a cumplir durante la ejecución de los trabajos

- *Plan de supervisión:* el objetivo es a) comprobar la validez de las hipótesis de proyecto teniendo en cuenta las condiciones reales encontradas en el emplazamiento, b) verificar las condiciones del terreno y del agua del terreno, c) comprobar la idoneidad de los procedimientos de ejecución adoptados en el proyecto y d) comparar el comportamiento real de la estructura con el esperado en el proyecto.
- *Plan de inspección:* el objetivo es comprobar que la ejecución se realiza de acuerdo al proyecto y, complementariamente, asegurar un entorno seguro de trabajo y un impacto medioambiental limitado.
- *Plan de auscultación:* el objetivo es comprobar la validez del Modelo de Proyecto Geotécnico y de las predicciones de comportamiento de la estructura realizadas durante el proyecto, de tal manera que se compruebe que dicha estructura continuará funcionando como se requiere tras la finalización de las obras.
- *Plan de mantenimiento:* el objetivo es describir las tareas de mantenimiento necesarias para asegurar la seguridad y el nivel de servicio de la estructura durante su vida útil proyectada.

Es de destacar que el nivel de complejidad y detalle de estos planes está relacionado con la Categoría Geotécnica de la estructura. Este nivel de complejidad se traduce en un determinado número de actuaciones de supervisión e inspección; una determinada cantidad de medidas in-situ y ensayos a realizar; y en el conjunto de tareas de mantenimiento necesarias.

3.6 – Tarea 5: Realización de informes

Todos los trabajos llevados a cabo durante la redacción del proyecto y de la ejecución de las obras se deben documentar mediante la realización de los siguientes informes, como se ha ido indicando en la descripción de las tareas previas:

- Informe de Reconocimiento Geotécnico (GIR - Geotechnical Investigation Report),
- Informe del Proyecto Geotécnico (GDR - Geotechnical Design Report) y

4.2 – Valor de proyecto de los efectos de las acciones (E_d)

El primer paso en la determinación de los valores de proyecto de los efectos de las acciones (E_d) es seleccionar el correspondiente Caso de Proyecto (Design Case, en su versión inglesa) como se muestra en la Tabla 8. Esta selección es función del estado límite que se esté verificando y del Enfoque de Factor que se vaya utilizar en la determinación del valor de proyecto de la resistencia. Este concepto de “Enfoque de Factor” que aparece por primera vez aquí en este texto se desarrolla pormenorizadamente en el siguiente apartado.

Tabla 8. Selección de los Casos de Proyecto en función del tipo de ELU y del Enfoque de Factor

Estado límite Último (ELU)	Enfoque de Factor de ⁽¹⁾	
	Material (MFA)	Resistencias (RFA)
Aplicables a estructuras geotécnicas específicas		
Estabilidad global (todas las estructuras geotécnicas)	DC3	--
Capacidad portante (cimentaciones superficiales)	(DC1 y DC3) ó DC1	DC1
Resistencia al deslizamiento (cimentaciones superficiales)	(DC1 y DC3) ó DC1	DC1
Resistencia axial a compresión (pilote individual)	---	DC1 ó DC3
Resistencia axial a tracción (pilote individual)	---	DC1 ó DC3
Resistencia transversal (pilote individual)	DC4 y DC3	---
Resistencia axial a compresión (grupo de pilotes y losas pilotadas)	DC4 y DC3	DC1 ó DC3
Resistencia transversal (grupo de pilotes y losas pilotadas)	DC4 y DC3	---
Resistencia rotacional y capacidad portante (pantallas)	DC4 y DC3	DC4
Todos los ELU de estructuras de suelo reforzado	DC4 y DC3	DC4
Resistencia axial a compresión (mejoras del terreno “difusas”)	DC1 y DC3	
Resistencia axial a compresión (inclusiones rígidas discretas)	---	DC1 ó DC3
Resistencia transversal (mejoras del terreno “difusas” y “discretas)	DC4 y DC3	---
Aplicables a todas las estructuras geotécnicas		
Fallo debido a deformaciones excesivas	DC1 ó DC3 ó DC4	
Pérdida de equilibrio rotacional	DC2	
Pérdida de equilibrio vertical debido a fuerzas ascensionales	DC2	
Efectos dependientes del tiempo	DC1 ó DC3 ó DC4	
Nota ⁽¹⁾: El Anejo Nacional especificará para cada estado límite el Enfoque de Factor a utilizar (MFA o RFA). Además, cuando existan alternativas en cada Enfoque de Factor, el Anejo Nacional también especificará cuál de ellas utilizar		

La selección del Caso de Proyecto permite determinar:

- El método de cálculo de E_d , mediante la factorización (mayoración, en este caso) del valor característico de las acciones o los efectos de las acciones, como se muestra en la Tabla 9, a través de los factores parciales (γ_F o γ_E). A este respecto, hay que indicar que el valor de la acción que se factoriza es el valor característico que puede ser un valor medio,

Tabla 9. Determinación del valor de proyecto del efecto de las acciones, dependiendo del Caso de Proyecto

Caso de Proyecto (DC)	Factores aplicados a	Expresiones
DC1, DC2(a), DC2(b) & DC3	Acciones	$E_d = E \left\{ \sum (\gamma_F \psi F_k); a_d; X_{Rd} \right\}$
DC4	Efecto de las acciones	$E_d = \gamma_E E \left\{ \sum (\psi F_k); a_d; X_{Rd} \right\}$
E_d : valor de proyecto de las acciones o del efecto de las acciones $E\{\dots\}$ significa el efecto combinado de las variables incluidas en el corchete; $\Sigma(\dots)$ significa la combinación de acciones; γ_F es un factor parcial aplicable a las acciones; γ_E es un factor parcial aplicable a los efectos de las acciones; ψ son factores de combinación para acciones permanentes y variables, definidos en prEN1990; F_k es el valor característico de una acción; a_d son los valores de proyecto de los parámetros geométricos; X_{Rd} son los valores de las propiedades geotécnicas de los materiales usados para determinar R_d .		

Tabla 10. Factores parciales aplicables a las acciones o a los efectos de las acciones para situaciones de proyecto persistentes y transitorias [Tomada de prEN1990:2019]

Action or effect				Partial factors γ_F and γ_E for Design Cases 1 to 4				
Type	Group	Symbol	Resulting effect	Structural resistance	Static equilibrium and uplift		Geotechnical design	
Design case				DC1 ^a	DC2(a) ^b	DC2(b) ^b	DC3 ^c	DC4 ^d
Formula				(8.4)	(8.4)		(8.4)	(8.5)
Permanent action (G_k)	All ^f	γ_G	Unfavourable/destabilizing	$1,35K_F$	$1,35K_F$	1,0	1,0	G_k is not factored
	Water	$\gamma_{G,w}$	Stabilizing ^g	$1,2K_F$	$1,2K_F$	1,0	1,0	
	All ^f	$\gamma_{G,stb}$		not used	$1,15^e$	1,0	not used	
	Water ⁱ	$\gamma_{G,w,stb}$			$1,0^e$	1,0		
	All	$\gamma_{G,fav}$	Favourable ^h	1,0	1,0	1,0	1,0	
Prestress (P_k)		γ_p^k						
Variable action (Q_k)	All ^f	γ_Q	Unfavourable	$1,5K_F$	$1,5K_F$	$1,5K_F$	1,3	$\gamma_{Q,1}/\gamma_{G,1}^j$
	Water ⁱ	$\gamma_{Q,w}$		$1,35K_F$	$1,35K_F$	$1,35K_F$	1,15	1,0
	All	$\gamma_{Q,fav}$	Favourable ^h	0				
Effects of actions (E)		γ_E	Unfavourable	effects are not factored				$1,35K_F$
		$\gamma_{E,fav}$	Favourable ^h					1,0
^a Design Case 1 (DC1) is used both for structural and geotechnical design. ^b Design Case 2 (DC2) is used for the combined verification of strength and static equilibrium, when the structure is sensitive to variations in permanent action arising from a single-source. Values of γ_F are taken from columns (a) or (b), whichever gives the less favourable outcome. ^c Design Case 3 (DC3) is typically used for the design of slopes and embankments, spread foundations, and gravity retaining structures. See EN 1997 for details. ^d Design Case 4 (DC4) is typically used for the design of transversally loaded piles and embedded retaining walls and (in some countries) gravity retaining structures. See EN 1997 for details. ^e The values of $\gamma_{G,stb} = 1,15$ and $1,0$ are based on $\gamma_{G,inf} = 1,35\rho$ and $1,2\rho$ with $\rho=0,85$ ^f Applied to all actions except water pressures. ^g Applied to the stabilizing part of an action originating from a single source. ^h Applied to actions whose entire effect is favourable and independent of the unfavourable action. ^j $\gamma_{Q,1}$ =corresponding value of γ_Q from DC1 and $\gamma_{G,1}$ =corresponding value of γ_G from DC1. ^k See other relevant Eurocodes for the definition of γ_p where γ_p is materially dependent. ⁱ For water actions induced by waves and currents, see Annex A.6.								

un valor superior o inferior, o un valor nominal. A este respecto, como indica el Eurocódigo 0, el valor nominal es un valor no obtenido mediante un método estadístico, por lo que puede determinarse directamente por el proyectista en base a su experiencia o al conocimiento de las condiciones físicas del caso en estudio.

- Un conjunto de valores de los factores parciales a aplicar, como se detalla en la Tabla 10, tomada del prEN1990, en la que el factor parcial γ_F indicado anteriormente se desdobra en los factores γ_G , γ_Q , y γ_P .

Además de las acciones permanentes (G) y variables (Q), existen otras acciones que se clasifican en función de su variación en el tiempo como son las accidentales (A) y las sísmicas (A_E). Para estas acciones, los valores de proyecto se determinan directamente por el proyectista, sin la necesidad de aplicar factores parciales a sus valores característicos.

4.3 – Valor de proyecto de la resistencia (R_d)

El valor de proyecto de la resistencia geotécnica R_d debería calcularse usando modelos de cálculo, ya sean éstos analíticos o empíricos. Dichos modelos se proporcionan en la Parte 3 del futuro EC7 (prEN1997-3). Hay que tener en cuenta que para asegurar la fiabilidad del proyecto, los modelos que se usen deberían ser validados usando uno de los procedimientos indicados en la Tabla 11, tomada del prEN1997-1, seleccionado en función de la Categoría Geotécnica de la estructura geotécnica.

Tabla 11. Procedimientos para la validación de los modelos de cálculo usados en el proyecto geotécnico [Tomada de prEN1997-1:202x]

Geotechnical Category	Minimum validation of geotechnical calculation models
GC3	All the measures given below for GC2 and, in addition: - Calibration of the calculation model for the specific site against another suitable calculation model or site observations
GC2	All the measures given below for GC1 and, in addition: - Documentation showing that the assumptions for the calculation model used are relevant for the specific site and structure
GC1	All the measures given below: - Literature reference that the calculation model has been used for similar conditions - Local experience shows that the calculation model is suitable for the local conditions - When using calculation models contained in EN 1997-3, confirmation that the design falls within the limits of application stated in EN 1997-3

El futuro EC7 también permite el uso de modelos numéricos para verificar los estados límites, aunque con estos modelos los procedimientos de cálculo son diferentes de los descritos en este documento, como se indica en A. Lees (2019).

El uso de los modelos de cálculo, analíticos o empíricos, debería realizarse siguiendo uno de los enfoques mostrados en la Tabla 12:

- “Enfoque de Factor de Material” (MFA, acrónimo de Material Factor Approach), en el cual el valor de proyecto de la resistencia geotécnica se calcula a partir de los valores de proyecto de los parámetros geotécnicos de los materiales (X_d), obtenidos aplicando factores parciales de materiales (γ_M) a los valores representativos de dichos parámetros, como se indica en 4.4.

- “Enfoque de Factor de Resistencia” (RFA, acrónimo de Resistance Factor Approach), en el cual el valor de proyecto de la resistencia geotécnica se calcula a partir de los valores representativos de los parámetros geotécnicos de los materiales (X_{rep}) y aplicando factores parciales de resistencia (γ_R) a la resistencia así calculada.

Tabla 12. Determinación del valor de proyecto de resistencia dependiente del enfoque de cálculo

	Factores Parciales aplicados a	
	Materiales	Resistencias
Denominación	Enfoque de Factor de Material (MFA)	Enfoque de Factor de Resistencia (RFA)
Expresión	$R_d = R\{X_d; a_d; \Sigma F_{Ed}\}$	$R_d = \frac{R\{X_{rep}; a_d; \Sigma F_{Ed}\}}{\gamma_R}$
R_d es el valor de proyecto de una resistencia geotécnica; $R\{\dots\}$ significa el resultado del modelo de cálculo de resistencia; X_d es el valor de proyecto de una propiedad geotécnica de un material (véase 4.4); a_d significa el conjunto de valores de proyecto de los parámetros geométricos; ΣF_{ED} significa el conjunto de valores de proyecto de las acciones usadas en la determinación de E_d ; X_{rep} es el valor representativo de una propiedad geotécnica del terreno (véase 4.4); γ_R es un factor parcial de resistencias		

Los valores de los factores parciales de resistencia (γ_R) propuestos en la Parte 3 del futuro EC7 (prEN1997-3) se muestran en la Tabla 13, para los distintos ELU correspondientes a cada estructura geotécnica. Se debe indicar que estos valores pueden ser modificados en el Anejo Nacional de cada país.

Tabla 13. Valores de los factores parciales de resistencias para diferentes ELU

Estado límite ultimo (ELU)	Factor Parcial de Resistencias (γ_R) ⁽¹⁾
Estabilidad global (todas las estructuras geotécnicas)	Calculado por MFA
Capacidad portante (cimentaciones superficiales)	1,4
Resistencia al deslizamiento (cimentaciones superficiales)	1,1
Resistencia axial a compresión (pilote individual: punta y fuste)	1,1 a 1,2 ⁽²⁾
Resistencia axial a tracción (pilote individual)	1,15
Resistencia transversal (pilote individual)	Calculado por MFA
Resistencia axial a compresión (grupo de pilotes y losas pilotadas)	1,4
Resistencia transversal (grupo de pilotes y losas pilotadas)	Calculado por MFA
Empuje pasivo (pantallas)	1,4
Capacidad portante (pantallas)	1,4
Resistencia en la interfaz entre el terreno y el elemento de refuerzo	1,5
Resistencia axial a compresión (mejoras del terreno “difusas”)	Calculado por MFA
Resistencia axial a compresión (inclusiones rígidas discretas)	1,1 a 1,2
Resistencia transversal (mejoras del terreno “difusas” y “discretas”)	Calculado por MFA
Nota (1): Los valores de los factores parciales de resistencias recogidos en la tabla son los que aparecen en la Parte 3 del EC7. El Anejo Nacional establecerá los valores a aplicar en cada país.	
Nota (2): El valor depende del tipo de pilote	

Como se puede ver en las expresiones de la Tabla 12, en la determinación de las resistencias geotécnicas (R_d) aparecen los valores representativos (X_{rep}) y de proyecto (X_d) de las propiedades geotécnicas de los materiales, conceptos que se desarrollan en el apartado siguiente.

4.4 – Valor representativo (X_{rep}) y de proyecto (X_d) de las propiedades geotécnicas de los materiales

El valor de proyecto X_d de una propiedad geotécnica de un material debería calcularse mediante la Ecuación 2, que aparece en prEN1990:

$$X_d = \frac{X_{rep}}{\gamma_M} \quad (2)$$

donde:

- X_d es el valor de proyecto de una propiedad geotécnica de un material,
- X_{rep} es el valor representativo de una propiedad geotécnica de un material,
- γ_M es un factor parcial aplicable a una propiedad geotécnica de un material,

Por su parte, el valor representativo de una propiedad geotécnica de un material (X_{rep}) puede determinarse a partir de los “valores derivados”, por dos procedimientos.

- Seleccionando directamente el valor, basándose en el conocimiento del emplazamiento y la experiencia del proyectista en casos similares,
- Obteniendo el valor por métodos estadísticos.

Quando el valor se selecciona basándose en el conocimiento del emplazamiento y la experiencia del proyectista en casos similares, el valor obtenido se denominará “valor nominal” (X_{nom}). En estos casos el proyectista realizará “una estimación prudente del valor de la propiedad geotécnica del material terreno”, teniendo en cuenta los siguientes aspectos al seleccionar ese valor prudente:

- Los datos pre-existentes, incluidos en la información geológica y los datos de proyectos previos;
- la incertidumbre debida a la cantidad y calidad de los datos del emplazamiento;
- la incertidumbre debida a la variabilidad espacial de la propiedad medida; y
- la zona del terreno que se ve afectada por el estado límite considerado.

Quando se determine el valor por métodos estadísticos, el valor se denominará “valor característico” (X_k), con dos objetivos: a) distinguirlo del “valor nominal”, dado que se obtiene mediante un procedimiento diferente, y b) para alinearse más adecuadamente con la definición dada en el Eurocódigo 0 que relaciona el valor característico con un procedimiento estadístico para su determinación.

El valor característico (X_k) se puede determinar mediante la ecuación (3), cuando los valores derivados de la propiedad geotécnica sigan una distribución normal. Las ecuaciones correspondientes a otras distribuciones se recogen en un Anejo de la Parte 1 del futuro EC7 (prEN1997-1), donde también se indican las expresiones para evaluar los diferentes términos de la Ecuación 3.

$$X_k = X_{mean}[1 \pm k_n V_x] = X_{mean} \left[1 \pm \frac{k_n \sigma_x}{X_{mean}} \right] \quad (3)$$

donde:

- X_{mean} es el valor medio de una propiedad geotécnica de un material (X) obtenido a partir de un número (n) de valores derivados,
- V_X es el coeficiente de variación de una propiedad geotécnica del material X ,
- k_n es un coeficiente que depende del número de valores utilizados para obtener X_{mean} ,
- \pm implica que $k_n V_X$ se debe restar cuando un valor inferior de X_k es crítico y se debe sumar cuando un valor superior es crítico,
- σ_x es la desviación estándar de X .

El último paso de este procedimiento es obtener el valor representativo (X_{rep}), mediante las ecuaciones 4 y 5, “para convertir los resultados de los ensayos en valores que representen el comportamiento del material cuando es parte de la estructura geotécnica o del terreno”, como se establece en prEN1990:2019.

$$X_{rep} = \eta X_{nom} \tag{4}$$

$$X_{rep} = \eta X_k \tag{5}$$

El factor de conversión (η) tiene en cuenta el efecto escala, efectos de humedad y temperatura, de envejecimiento de los materiales y cualquier otro parámetro relevante, como se indica en prEN1990. Para los materiales geotécnicos, otros efectos relevantes pueden ser los derivados de la anisotropía, la trayectoria de esfuerzos y el nivel de deformación. Sin embargo, es destacar que en la práctica geotécnica habitual, el factor de conversión (η) tendrá normalmente valor 1.

Por último, en la Tabla 14 se recogen los valores del factor parcial de materiales (γ_M) para las situaciones de proyecto persistentes, transitorias y accidentales.

Tabla 14. Valores del factor parcial γ_M para situaciones de proyecto persistentes, transitorias y accidentales

Parámetro del terreno	Símbolo	Situaciones de proyecto persistentes y transitorias			Situaciones de proyecto accidentales		
		Conjunto ⁽¹⁾			Conjunto ⁽¹⁾		
		M1	M2	M3	M1	M2	M3
Resistencia al corte efectiva (τ_s)	γ_{ts}	1,0	1,25	1,25 K_M ⁽²⁾	1,0	1,1	1,1 K_M
Cohesión efectiva (c')	γ_c	1,0	1,25	1,25 K_M	1,0	1,1	1,1 K_M
Coeficiente de rozamiento interno ($\tan \varphi$)	$\gamma_{\tan \varphi}$	1,0	1,25	1,25 K_M	1,0	1,1	1,1 K_M
Coef. de rozamiento en la interfaz terreno/estructura ($\tan \delta$)	$\gamma_{\tan \delta}$	1,0	1,00	1,00 K_M	1,0	1,0	1,0 K_M
Resistencia al corte sin drenaje de un suelo (c_u)	γ_{cu}	1,0	1,40	1,40 K_M	1,0	1,2	1,2 K_M
Resistencia a compresión no confinada de una roca (q_u)	γ_{qu}	1,0	1,40	1,40 K_M	1,0	1,2	1,2 K_M
Nota (1): M1, M2 y M3 son tres conjuntos independientes de factores parciales de material. La norma prEN1997-3 especifica cual usar en función de la estructura geotécnica en estudio.							
Nota (2): Los valores de K_M se recogen en la Figura 18							

El análisis de la tabla permite indicar que los valores de γ_M para las situaciones accidentales son alrededor de un 15% menores (ratio 1,25/1,10 y ratio 1,40/1,20) que los correspondientes valores para las situaciones persistentes y transitorias.

Adicionalmente, como se indica en la Tabla 14, los valores de γ_M se pueden ajustar de acuerdo a las consecuencias de fallo, evaluadas a través de la Clase de Consecuencia (CC), usando el factor de consecuencia K_M , cuyos valores se dan en la Tabla 15, tomada del prEN1997-1.

Tabla 15. Valores del factor de consecuencia K_M para estructuras geotécnicas, dependiendo de la Clase de Consecuencia [Tomada de prEN1997-1:202x]

Consequence class (CC)	Description of consequences	Consequence factor K_M
CC3	Higher	1.1
CC2	Normal	1.0
CC1	Lower	0.9

5 – RESUMEN

Este artículo muestra cómo se combinan tres nuevos conceptos – ‘Casos de Proyecto (introducido en Eurocódigo 0), el “Modelo de Proyecto Geotécnico (Eurocódigo 7-Parte 1) y el “Modelo del Terreno” (Eurocódigo 7-Parte 2) para proporcionar un conjunto de reglas completas y flexibles para el proyecto específico de estructuras geotécnicas. El artículo presenta diagramas de flujo divididos entre: a) Procedimientos de fiabilidad, b) Modelización del terreno, c) Verificaciones de proyecto, d) Implementación del proyecto durante la ejecución y e) Realización de informes, que permiten el uso conjunto de los Eurocódigos 0 y 7.

6 – AGRADECIMIENTOS

El autor quiere agradecer a los colegas del Equipo de Proyecto SC7-TC6 (Sébastien Burlon, Gunilla Franzén, Guido Nuijten, Guiseppe Scarpelli & Adriaan van Seters) así como a Marcos Arroyo los comentarios críticos recibidos durante la elaboración de este texto.

7 – REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bond, A. (2017). *CEN-TC250-SC7 N1063 Chairman’s presentation 32nd Meeting of Oslo*

Bond, A. (2018). *Chairman’s opening remarks WGs Naples*, 2018.

Bond, A.; Formichi, P.; Spehl, P.; Van Seyeres, A.J. (2019). *Tomorrow’s geotechnical toolbox: EN 1990:202x. Basis of structural and geotechnical design*. XVII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Reykjavik, Iceland.

Bond, A.; Jenner, C.; Moormann, C. (2019). *Tomorrow’s geotechnical toolbox: EN 1997-3:202x. Geotechnical structures*. XVII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Reykjavik, Iceland.

Franzén, G.; Arroyo, M.; Lees, A.; Kavvadas, M.; Van Seters, A.; Walter, H.; Bond, A. (2019). *Tomorrow’s geotechnical toolbox: EN 1997-1:202x. General rules*. XVII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Reykjavik, Iceland.

Lees, A. (2019). *Tomorrow’s geotechnical toolbox: EN 1997-1:202x. Numerical models*. XVII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Reykjavik, Iceland.

Norbury, D.; Arroyo, M.; Foti, S.; Garin, H.; Reiffsteck, P.; Bond, A. (2019). *Tomorrow's geotechnical toolbox: EN 1997-2:202x. Ground investigation*. XVII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Reykjavik, Iceland.

prEN1990-2:202x (2020) prEN 1990-Sept-2020-Draft.

prEN1997-1:202x (2019) CEN-TC250-SC7_N1330_prEN_1997-1_Geotechnical_design-General.

prEN1997-2:202x (2020) CEN-TC250-SC7_N1376_prEN_1997-2_Geotechnical_design-Ground.

prEN1997-3:202x (2019) CEN-TC250-SC7_N1373_prEN_1997-3_Geotechnical_design-Geotec.