

Guía del hormigón tremie en cimentaciones profundas

Grupo de Trabajo Conjunto EFFC/DFI para el Hormigón



Tras la publicación de la primera edición de esta guía y su traducción, coordinada por AETESS (Asociación de Empresas de la Tecnología del Suelo y Subsuelo) y revisada por su Comité Técnico, una vez han concluido los trabajos de investigación y los ensayos de laboratorio e in-situ, el Grupo de Trabajo Conjunto para el Hormigón de la EFFC (European Federation of Foundation Contractors) y el DFI (Deep Foundations Institute, USA) ha publicado esta segunda edición actualizada con los resultados obtenidos para establecer definitivamente los métodos de ensayo y los rangos de aceptación de los parámetros de control del hormigón fresco para su puesta en obra con tubo tremie.

Dado el rigor, el nivel de detalle y la gran aplicabilidad de esta guía, que podrá servir de punto de partida para futuros textos normativos europeos y americanos, y que ya está en uso desde la primera edición por las empresas que utilizan hormigón tremie, AETESS ha asumido nuevamente la traducción de esta segunda edición para su difusión entre los profesionales de habla hispana.

Esta traducción, llevada a cabo con el correspondiente permiso de la EFFC, ha sido coordinada por AETESS y revisada por su Comité Técnico, siendo los cargos de la asociación y los vocales del comité las siguientes personas:

Presidente de AETESS: Rafael Casado Ortega

Vicepresidente de AETESS: José Candela González

Vocales del Comité Técnico:

Gerardo Marote (Grupo Terratest)
Eduardo Manzano (Grupo Terratest)
Gustavo Armijo (Geocisa)
Ernesto Hontoria (Geocisa)
Enmanuel Carvajal (Keller Cimentaciones)
Juan Secades (Keller Cimentaciones)
José Luis Arcos (Rodio-Kronsa)
Rafael Gil (Rodio-Kronsa)
José Polo (Site)
Javier Rojo (Site)
Juan Carlos Montejano (Menard España)
Eduardo Martínez (Menard España)

Este Comité Técnico ha participado activamente en el Grupo de Trabajo Conjunto EFFC-DFI redactor de esta guía, siendo miembro de dicho grupo nuestro vocal Gerardo Marote.

Esta traducción no constituye un documento oficial y en caso de errores, omisiones o discrepancia de contenido con la versión original en inglés prevalecerá el contenido de ésta, realizada por la EFFC (www.effc.org) y el DFI (www.dfi.org).



EUROPEAN FEDERATION OF FOUNDATION CONTRACTORS



MIEMBROS DEL GRUPO DE TRABAJO CONJUNTO

Karsten Beckhaus (Presidente) Bauer Spezialtiefbau, Contratista
Bartho Admiraal Volker Staal en Funderingen, Contratista
Andrew Bell Cementation Skanska, Contratista
Björn Böhle Keller Grundbau, Contratista
Michel Boutz SGS-Intron, Consultor
Dan Brown Dan Brown & Associates, Consultor
Sabine Darson-Balleur Soletanche Bachy, Contratista
Peter Faust Malcolm Drilling, Contratista
Raffaella Granata Trevi, Contratista
Chris Harnan Ceeecom Consult, Consultor
Duncan Moore Implenía, Contratista
Duncan Nicholson ARUP, Consultor
Alexander Rostert Züblin, Contratista

MIEMBROS POR CORRESPONDENCIA

Francesco Biasioli European Ready-Mixed Concrete Organization
Raymond Fassett Condon-Johnson and Associates, Contratista
Stephan Jefferis Environmental Geotechnics, Consultor
Martin Larisch Fletcher Construction, Contratista
Antonio Marinucci V2C Strategists, Consultor
Gerardo Marote Ramos Terratest, Contratista
Sarah Williamson Laing O'Rourke, Contratista

SOCIOS ACADÉMICOS

Jan van Dalen Universidad Técnica de Delft
Dimitri Feys Universidad de Ciencia y Tecnología de Missouri
Claudia Fierenkothen Universidad de Wuppertal
Kamal Khayat Universidad de Ciencia y Tecnología de Missouri
Thomas Kränkel Universidad Técnica de Múnich
Chenfeng Li Universidad de Swansea
Dirk Lowke Universidad Técnica de Braunschweig
Nicolas Rousset Instituto Francés de Ciencia y Tecnología del Transporte, Desarrollo y Redes
Daniel Weger Universidad Técnica de Múnich
Christopher Wilkes Universidad de Cambridge

PATROCINADO POR



Términos y definiciones	8
Lista de abreviaturas y símbolos	11
1. General	13
1.1 Antecedentes	14
1.2 Propósito y alcance	14
2. Consideraciones de diseño que influyen en el flujo del hormigón	16
2.1 General	17
2.2 Separación de armaduras	17
2.3 Recubrimiento de hormigón	18
3. Propiedades del hormigón tremie	19
3.1 General	20
3.2 Reología y trabajabilidad	21
3.3 Estabilidad del hormigón	22
4. Diseño de la mezcla de hormigón	25
4.1 Introducción	26
4.2 Consideraciones sobre el diseño de las mezclas	26
4.3 Componentes	27
4.4 Dosificación y consideraciones prácticas	29
5. Especificación y ensayo del hormigón y control de calidad de su producción	30
5.1 Nuevo enfoque para las especificaciones del hormigón fresco	31
5.2 Métodos de ensayo para caracterizar el hormigón fresco	31
5.3 Ensayos de Idoneidad, conformidad y aceptación	32
5.4 Control de la retención de la trabajabilidad	33
5.5 Control de calidad del proceso de fabricación del hormigón	34
6. Ejecución	36
6.1 General	37
6.2 Antes del hormigonado	37
6.3 Equipo tremie	38
6.4 Separación entre tremies	38
6.5 Colocación inicial del hormigón	38
6.6 Empotramiento del tremie	39
6.7 Patrones de flujo del hormigón	40
6.8 Flujo alrededor de las armaduras y los cajeados (box-outs)	42
6.9 Registro del hormigonado	42
7. Ensayos a escala real	43
8. Control de calidad de obras completadas	45
8.1 General	46
8.2 Métodos de ensayo posteriores a la construcción	46
9 Modelado numérico del flujo de hormigón	47
9.1 Introducción	48
9.2 Estudios realizados	48
9.3 Limitaciones	49

Apéndice A	Métodos de ensayo para caracterizar el hormigón fresco	50
Apéndice B	Conceptos de uso de las adiciones	58
Apéndice C	Métodos de ensayo en obras completadas	60
Apéndice D	Interpretación de las imperfecciones	62
Apéndice E	Información detallada sobre las consideraciones de diseño	66
Apéndice F	Selección de factores y efectos sobre el flujo del hormigón	75
Referencias		78

FIGURAS

Figura 1	Ejemplos de cimentaciones profundas	12
Figura 2	Evolución típica de las mezclas de hormigón	15
Figura 3	Recubrimiento de hormigón y separación entre barras en cimentaciones profundas (también aplicable a jaulas rectangulares)	18
Figura 4	Dependencia entre composición, reología y características relacionadas, y los requisitos generales	20
Figura 5	Comportamiento plástico de un fluido de Bingham (ej.: hormigón) y uno Newtoniano (ej.: agua)	21
Figura 6	Comparación cualitativa de la reología en diferentes tipos de hormigón	22
Figura 7	Tiempo de endurecimiento y de fraguado	22
Figura 8	Diagrama conceptual del proceso de exudación en pastas de cemento (basado en Mas-soussi et al, 2017), con posible interrupción de la exudación a causa del endurecimiento	23
Figura 9	Influencia del cemento y otros componentes sobre la reología (según Wallevik, 2003)	27
Figura 10	Distribución de tamaños de árido (granulometría) para un tamaño máximo de árido de 16 mm [$\frac{5}{8}$ pulg.], según el Anejo Nacional Alemán DIN 1045-2 a la norma EN 206-1	28
Figura 11	Curva de escurrimiento en relación a la tensión de fluencia y rango recomendado para hormigón tremie (ver <i>Apéndice A. 1.1</i> y <i>Figura 6</i>)	31
Figura 12	Curva de velocidad de escurrimiento en relación a la viscosidad, mostrando el rango recomendado de viscosidad media para hormigón tremie (ensayo véase <i>Apéndice A. 1.2</i>)	31
Figura 13	Ampliación del tiempo de trabajabilidad	33
Figura 14	Fondo reflejo de la geometría de la herramienta de excavación (ejemplo empleando una hidrofresa)	37
Figura 15	Fases de hormigonado tremie	39
Figura 16	Esquema de flujo abombado y flujo de tapón	40
Figura 17	Sección longitudinal de un pilote perforado, hormigonado con diferentes cargas de hormi-gón tremie teñido (Böhle y Pulsfort, 2014), indicando flujo abombado	41
Figura 18	Simulaciones que muestran el flujo de la masa de hormigón según isocurvas de velocidad (izquierda), y según hormigón teñido tras el izado del tubo tremie por fases (Li et al, 2018)	48
Figura 19	Simulaciones del flujo de la masa de hormigón en un cuarto de panel de muro pantalla, visto desde dentro (izq.) y desde fuera de un cuarto de panel, con inclusiones debidas a la concentración de armaduras (imágenes cortesía de Jan van Dalen)	49

TABLAS

Tabla 1	Ensayos apropiados para el hormigón tremie	32
Tabla 2	Recomendaciones para los ensayos del hormigón tremie	32

APÉNDICE A

Figura A.1	Equipo para los ensayos combinados de escurrimiento, velocidad de escurrimiento y VSI	51
Figura A.2	Ejemplos de clases de índice de estabilidad visual VSI	52
Figura A.3	Equipo (ejemplo) para el ensayo de flujo en cono modificado	53
Figura A.4	Dimensiones del eje y la celda del molinete de corte para el ensayo manual de corte con molinete (New Zealand Geotechnical Society, 2001)	54
Figura A.5	Montaje del ensayo de segregación estática según norma ASTM C1610	55
Figura A.6	Esquema de montaje para determinar la exudación por gravedad	56
Figura A.7	Montaje de ensayo para determinar la pérdida de agua del hormigón fresco a presión (Bauer)	56
Figura A.8	Montaje principal para determinar la filtración de agua del hormigón fresco a presión (según Merkblatt, Weiche Betone, 2009)	57
Tabla A.1	Clases de índice de estabilidad visual VSI (según la norma ASTM C1611)	52
Tabla A.2	Clasificación para el ensayo de índice de estabilidad visual con endurecimiento (HVSI)	55

APÉNDICE D

Figura D.1	Ejemplos de pilotes con surcos, sin afectar a su recubrimiento mínimo por durabilidad	63
Figura D.2	Ejemplos de inclusiones en un muro pantalla y un pilote (foto de pilote tomada de la Figura 9.14b, FHWA GEC10)	64
Figura D.3	Esquema de chimenea de hormigón debida a la pérdida de trabajabilidad en la mezcla durante el hormigonado tremie (según Figura 9.13, FHWA GEC10), donde puede quedar parcialmente atrapada una capa interfase y dar lugar a una inclusión.	64
Figura D.4	Ejemplos de canalizaciones que recorren la superficie de un pilote y un muro pantalla	65
Figura D.5	Acolchado en un pilote (izq.) y en un panel (dcha.)	65
Figura D.6	Esquema de distintos grados de acolchado	65

APÉNDICE E

Figura E.1	Recubrimiento de hormigón en pilotes perforados con revestimiento temporal (suplemento a la Figura 3)	73
Figura E.2	Detalle de unión de un pilote perforado como soporte de una columna de superestructura	74
Tabla E.1	Requisitos de armado comúnmente empleados en pilotes perforados y elementos portantes (barrettes)	68
Tabla E.2	Requisitos de armado comúnmente empleados en muros pantalla	70
Tabla E.3	Requisitos habituales de adherencia, anclaje, solapes y ancho de fisura	72

APÉNDICE F

Tabla F.1	Factores varios y sus posibles efectos sobre el flujo del hormigón y la calidad de las cimentaciones profundas	76
------------------	--	-----------

Términos y definiciones /según su utilización en esta guía

TÉRMINO	DEFINICIÓN
adiciones (filler y materiales puzolánicos suplementarios)	Material inorgánico finamente dividido, utilizado en el hormigón para mejorar ciertas propiedades o conseguir propiedades especiales. Comprenden dos tipos principales: Tipo I) Inerte o casi inerte («filler» o relleno). Por ejemplo, polvo de piedra caliza. Tipo II) Hidráulico latente o puzolánico (SCM). Por ejemplo, cenizas volantes o escoria granulada de horno alto.
aditivo	Componente añadido durante el proceso de mezcla en pequeñas cantidades, comparado con la masa de cemento, para modificar las propiedades del hormigón fresco o endurecido. También conocidos como aditivos químicos.
elemento portante (barrette)	Elemento de muro pantalla estructural hormigonado in situ (con o sin armadura), normalmente con una sección en I, H, L o T en planta. También se denomina cimentación profunda. Ver <i>Figura 1</i> .
bentonita	Arcilla que contiene mineral montmorillonita, usada en fluidos de soporte, bien como una suspensión de bentonita pura o añadida a una solución de polímeros. También se utiliza como componente en hormigón no estructural.
conglomerante (hidráulico)	Material inorgánico o una mezcla de materiales inorgánicos que, cuando se mezcla con agua, forma una pasta que fragua y se endurece por medio de reacciones y procesos de hidratación, y que, después del endurecimiento, conserva su resistencia y estabilidad incluso bajo el agua.
modelo de fluido de Bingham	Modelo reológico con dos parámetros de un fluido con tensión de fluencia (yield stress) distinta de cero y una viscosidad plástica constante.
exudación	Forma de segregación en la que una parte del agua de la mezcla tiende a subir a la superficie del hormigón recién colocado.
pilote perforado (pilote in situ)	Pilote realizado con o sin revestimiento de acero mediante la excavación o perforación de un agujero en el terreno que se llena de hormigón (con o sin armadura). También se denomina cimentación profunda. Ver <i>Figura 1</i> .
separación libre	Espacio mínimo entre barras aisladas de armadura o grupos de barras; es decir, el espacio a través del cual fluye el hormigón.
hormigón	Material generado a partir de la mezcla de conglomerante, áridos finos y gruesos, y agua, con o sin aditivos y adiciones, que obtiene sus propiedades de dureza a través de la hidratación.
consistencia*	Movilidad relativa, o capacidad del hormigón fresco para fluir; es decir, un indicador de su trabajabilidad.
recubrimiento	Distancia entre el exterior de la armadura y la superficie de hormigón más cercana; por ejemplo, la cara exterior de un elemento de cimentación profunda.
cimentación profunda	Tipo de cimentación que transfiere la carga estructural a través de capas de terreno débil a estratos de capacidad adecuada (pilotes y elementos portantes). En esta guía también se refiere a muros de contención especiales, tales como muros pantalla y pantallas de pilotes secantes.
muro pantalla	Muro de hormigón en masa o armado, que normalmente consiste en una serie de paneles independientes adyacentes. En esta guía también se trata como cimentación profunda. Ver <i>Figura 1</i> .
durabilidad	Capacidad de un material (por ejemplo, hormigón) para resistir la acción de la intemperie, el ataque químico, la abrasión, y otras condiciones de servicio.
finos	Suma de material sólido en el hormigón fresco con tamaño de partícula menor o igual a 0,125 mm.
capacidad de llenado	La capacidad del hormigón fresco para fluir y llenar todos los espacios en la excavación.
torta de filtrado (cake)	Formación de material filtrado, tal como bentonita y suelo excavado en suspensión, acumulado en la zona de transición a un medio permeable, por el drenaje del agua debido a la presión.
filtrado	Mecanismo de separación de sólidos y fluidos de un fluido portante o del hormigón que todavía no ha fraguado, donde el suelo permeable de alrededor, sometido a la presión hidrostática, actúa como un filtro, de forma análoga al filtrado en fluidos de soporte.
retención del flujo	(Ver retención de la trabajabilidad).
fluidez (capacidad para fluir)	Facilidad de flujo del hormigón fresco cuando no está confinado por un encofrado y/o armadura.

Términos y definiciones /según su utilización en esta guía

TÉRMINO	DEFINICIÓN
hormigón fresco	Hormigón que está totalmente mezclado, que conserva la capacidad de flujo, y todavía está en condiciones de ser puesto en obra mediante el método elegido. (Ver hormigón tremie).
capa interfase	Capa que se acumula entre el fluido de soporte y el hormigón, posiblemente formada a partir de material procedente de hormigón disgregado y/o fluido de soporte con partículas del terreno.
panel	Tramo de un muro pantalla hormigonado como una sola unidad. Puede ser lineal, en forma de T, en forma de L, o de otra configuración. (Ver <i>Figura 1</i>).
capacidad de paso	Capacidad del hormigón fresco para fluir a través de aberturas estrechas, como los espacios entre las barras de armadura de acero, sin segregación ni bloqueo.
pasta	Parte del hormigón generalmente denominada pasta de cemento, compuesta por finos, agua, adiciones, y aire, sin áridos.
viscosidad plástica	Viscosidad de un fluido de Bingham (con tensión de corte distinta de cero).
reología	La ciencia de la deformación y en particular, en esta guía, el flujo de sustancias sometidas a esfuerzos de corte.
solidez (del hormigón fresco)	Capacidad de la mezcla de hormigón de mantener sus propiedades en estado fresco pre y post-hormigonado a pesar de variaciones menores aceptables en la precisión de la dosificación y en las propiedades de las materias primas.
resistencia a la segregación	Capacidad del hormigón de mantener una composición homogénea en su estado fresco.
sensibilidad	Falta de solidez (véase solidez)
vida útil	Periodo en el que una estructura, o parte de ella, puede cumplir su función con previsión de mantenimiento, pero sin que resulte necesario llevar a cabo reparaciones extensas (definido como "vida útil de diseño" en EN 206).
escurrimiento (torta)	El resultado del ensayo llevado a cabo según las normas EN 12350-8 o ASTM C1611
retención del asentamiento	Véase retención de la trabajabilidad
especificación (para el hormigón)	Recopilación final de los requisitos técnicos documentados dados al suministrador de hormigón en términos de prestaciones o composición.
especificador	Persona u órgano que establece el pliego de condiciones para el hormigón fresco y el endurecido.
estabilidad	Resistencia del hormigón a la segregación, a la exudación y a la filtración.
junta	Encofrado, generalmente de acero u hormigón, colocado en el extremo o extremos de un panel para crear una junta; se puede incorporar un elemento de estanqueidad en la junta.
fluido de soporte	Fluido utilizado durante la excavación para soportar las paredes de una zanja o de un pilote (perforado). Véase también la Guía EFFC/DFI de Fluidos de Soporte.
tixotropía	Tendencia de un material a la pérdida progresiva de la fluidez cuando está en reposo pero que recupera su fluidez cuando se le aplica un esfuerzo de corte.
hormigón tremie	Hormigón con la capacidad de lograr la compactación completa debida al peso propio cuando se coloca con tubo tremie en una cimentación profunda, en condiciones sumergidas.
tubo tremie / tremie	Tubo en tramos con juntas impermeables, coronado por una tolva.
método tremie (hormigón sumergido o método de desplazamiento del lodo)	Método de colocación del hormigón mediante el uso de un tubo tremie, con el fin de evitar la segregación del hormigón y su contaminación por el fluido en el interior de la excavación, donde el tubo tremie, después de la colocación inicial, permanece sumergido en el hormigón previamente colocado y trabajable hasta la finalización del proceso de hormigonado.

TÉRMINO	DEFINICIÓN
viscosidad	Medida de la capacidad de un líquido para resistir la deformación por esfuerzos cortantes, en concreto la resistencia al flujo del hormigón fresco una vez que el flujo ha comenzado.
trabajabilidad*	Característica del hormigón recién mezclado que determina la facilidad con la que se puede mezclar, colocar, compactar, y acabar.
retención de la trabajabilidad	Mantenimiento de las propiedades especificadas del hormigón fresco, como el flujo y el asentamiento, por la duración especificada.
tensión de fluencia	Esfuerzo de corte necesario para llegar a iniciar el flujo. También denominado “tensión de fluencia estática”.

** Dentro de las normas europeas, la palabra “consistencia” ha reemplazado a la palabra “trabajabilidad”, pero no sucede lo mismo en EE.UU.. En esta guía se aplican las siguientes equivalencias:*

Consistencia: se mide a partir de ensayos como el de escurrimiento (EN 12350-8).

Trabajabilidad: conjunto de características del hormigón fresco, por ejemplo, la capacidad de flujo, de paso y de llenado, incluyendo la consistencia (véase Figura 4).

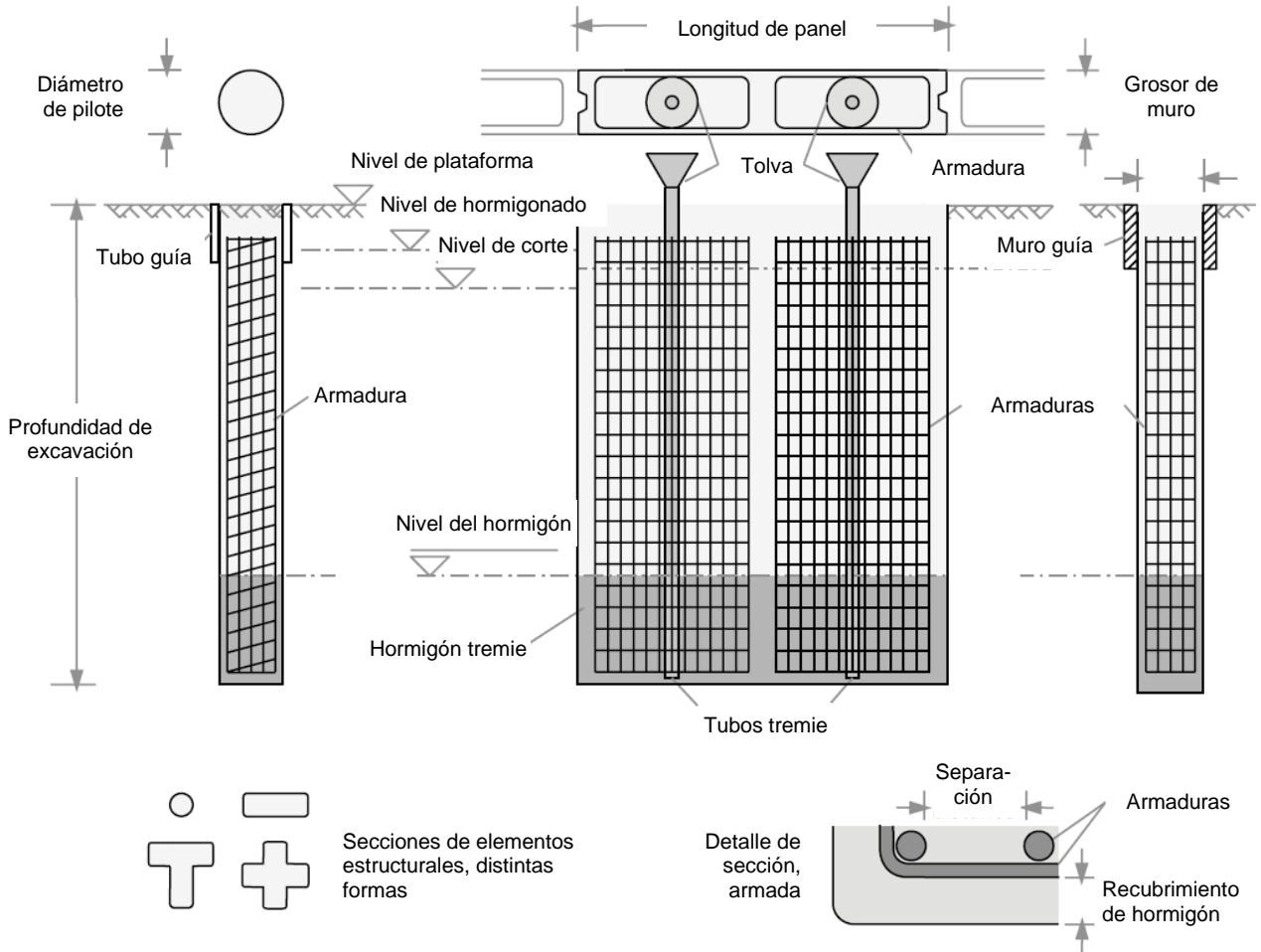
Lista de abreviaturas y símbolos

AASHTO	American Association of State and Highway Transportation Officials
ACI	Instituto Americano del Hormigón
ADSC-IAFD	Asociación Internacional de Perforación de Cimentaciones
AFNOR	Asociación Francesa de Normalización
API	Instituto Americano del Petróleo
ASTM	ASTM International
CEN	Comité Europeo de Normalización
CIA	Instituto Australiano del Hormigón
CIRIA	Asociación de Investigación e Información para la Industria de la Construcción (Organización de Reino Unido)
DAFStb	Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Comité Alemán del Hormigón Estructural)
DIN	Deutsches Institut für Normung (Instituto Alemán de Normalización)
DFI	Instituto de Cimentaciones Profundas
ECPC	Concepto de Prestación Equivalente del Hormigón
EFFC	Federación Europea de Contratistas de Cimentaciones
EN	Norma Europea
EPCC	Concepto de Prestación Equivalente de las Combinaciones
FHWA	Administración Federal de Autopistas
GGBS/GGBFS	Escoria de horno alto (Escoria granulada derivada de la combustión de un horno alto)
ICE	Instituto de Ingenieros Civiles (Cuerpo profesional del Reino Unido)
ISO	Organización Internacional para la Estandarización
ÖBV	Österreichische Bautechnik Vereinigung (Sociedad Austriaca para la Tecnología de la Construcción)
QA/QC	Garantía de Calidad/Control de Calidad
R & D	Investigación y Desarrollo
SCC	Hormigón autocompactante (HAC)
VSI	Índice de Estabilidad Visual
a	Separación libre mínima entre redondos
c_{min}	Recubrimiento mínimo de hormigón según la normativa estructural o de ejecución
c_{nom}	Recubrimiento nominal de hormigón = $c_{min} + \Delta c_{dev}$ (a considerar en el diseño)
Δc_{dev}	Margen en el diseño para tolerancias de construcción
Δd_c	Tolerancia adicional en diseño de armaduras para la colocación
d_{b-t}	Distancia desde el fondo de excavación hasta la apertura del tubo tremie
d_{sep.}	Dimensión horizontal del separador (perpendicular a la jaula de armadura)
D	Dimensión (diámetro o grosor) de la excavación o del elemento de hormigón
D_c	Dimensión exterior de jaula de armadura
D_{final}	Diámetro final de la torta de hormigón en el ensayo de escurrimiento
D_{max}	Tamaño nominal máximo del árido grueso
D_{nom}	Dimensión nominal de la excavación, definida por las dimensiones de las herramientas de excavación
D_s	Diámetro de barra de la armadura
D_{s,n}	Diámetro equivalente de un grupo de "n" barras de armado
D_T	Diámetro interno del tubo tremie
η	Viscosidad dinámica
h₁/h₂	Longitud del tubo tremie embebida en el hormigón antes (h ₁) y después (h ₂) de cortarlo
h_c	Nivel del hormigón en la excavación
h_{c,T}	Nivel del hormigón en el tubo tremie (= punto de equilibrio hidrostático)
h_F	Nivel del fluido en la excavación
K	Factor que toma en consideración la actividad de una adición de Tipo II
μ	Viscosidad plástica
p_T	Presión hidrostática dentro del tubo tremie
p_o/p_i	Presión hidrostática fuera (p _o) y dentro (p _i) de la excavación
s_T	Longitud del tramo de tubo tremie a cortar
t_{final}	Tiempo en que el hormigón alcanza su distribución final en el ensayo de escurrimiento
τ	Tensión de corte
τ_o	Tensión de fluencia
$\dot{\gamma}$	Velocidad de corte

Guía del hormigón tremie en cimentaciones profundas

FIGURA
01

EJEMPLOS DE CIMENTACIONES PROFUNDAS



Sección 1

General



1.1 Antecedentes

La tecnología del hormigón continúa avanzando rápidamente y las mezclas modernas con cinco componentes (cemento, adiciones, áridos, aditivos químicos y agua) a menudo tienen características que difieren significativamente de las mezclas más antiguas de tres componentes (cemento, áridos y agua). Las tendencias recientes han favorecido resistencias más altas y relaciones agua/cemento más bajas, resultando en una mayor dependencia de los aditivos químicos para compensar la trabajabilidad reducida y para satisfacer las demandas (a menudo en conflicto) de trabajabilidad del hormigón fresco y de tiempo de fraguado. La aplicación de métodos de ensayo que reflejen las verdaderas propiedades reológicas del hormigón no se ha desarrollado al mismo ritmo que las propias mezclas, y todavía no es infrecuente utilizar la trabajabilidad (ej.: medida por el asentamiento) como única propiedad para la aceptación del hormigón fresco.

Un examen conjunto de los problemas en pilotes perforados y muros pantalla ejecutados utilizando el método tremie, realizado por la Federación Europea de Contratistas de Cimentaciones (EFFC) y el Instituto de Cimentaciones Profundas de los Estados Unidos (DFI), identificó que un factor en un número significativo de casos era el uso de mezclas de hormigón con una trabajabilidad inadecuada, o una estabilidad o robustez insuficientes. También se identificaron otras causas, como especificaciones del hormigón y métodos de ensayo inadecuados. Las consecuencias de estos problemas suelen ser importantes, y se ha visto que, además de la selección de componentes y métodos de colocación adecuados, resulta esencial desarrollar mezclas robustas y apropiadas, así como desarrollar métodos de ensayo adecuados para garantizar su conformidad.

En 2014 se creó un grupo de trabajo conjunto entre la EFFC y el DFI para examinar esta cuestión, y esta guía es el resultado de este grupo de trabajo.

Un proyecto de investigación y desarrollo, financiado por los patrocinadores de esta guía, fue llevado a cabo entre 2015 y 2018 por la Universidad Técnica de Múnich, en colaboración con la Universidad de Missouri de Ciencia y Tecnología. Este proyecto incluyó estudios teóricos, pruebas de laboratorio y pruebas in situ en distintas obras en Europa y los EE.UU.. Asimismo, el grupo de trabajo ha revisado y evaluado métodos computacionales punteros para simular de forma numérica el flujo del hormigón en excavaciones profundas con socios académicos de varias universidades.

1.2 Propósito y alcance

El propósito principal de esta guía es orientar acerca de la caracterización del hormigón fresco en relación a su comportamiento, el proceso de diseño de la mezcla, y los métodos de ensayo empleados. Los principios de esta guía son de aplicación al hormigón tremie en cimentaciones profundas, pero también pueden aplicarse a otros tipos de cimentaciones profundas (por ejemplo, pilotes de hélice continua).

Esta guía trata las consideraciones de diseño, incluyendo la reología del hormigón, el diseño de mezclas, los detalles de armado, el recubrimiento de hormigón y las reglas de buena práctica para su puesta en obra. Se presenta un repaso de los métodos de ensayo de los diferentes elementos construidos, junto con recomendaciones sobre la identificación e interpretación de los resultados.

La *Figura 2* resume cómo deben considerarse a lo largo del desarrollo de la mezcla todos los requisitos, a veces contradictorios. Esta guía resalta los aspectos importantes que deben abordarse con cuidado para minimizar los potenciales riesgos, incluyendo los detalles estructurales apropiados y el uso de métodos de ejecución punteros.

La mejor manera de lograr la mezcla adecuada es a través de un enfoque conjunto entre el constructor, el calculista, y el proveedor de hormigón.

El Grupo de Trabajo ha llevado a cabo una evaluación detallada de las mejores prácticas e investigaciones actuales. Se espera que esta guía proporcione información para ser utilizada en futuras normas europeas y americanas.

Esta segunda edición de la Guía Tremie recomienda rangos de aceptación para el hormigón tremie fresco basándose en los métodos de ensayo propuestos. Asimismo, presenta detalles sobre los tipos de flujo del hormigón basados en pruebas en obra y estudios de modelado numérico. Esta segunda edición reemplaza a la primera.

La primera edición de la guía incluía los requisitos para fluidos de soporte. Los fluidos de soporte afectan directamente a la calidad e integridad del producto final. El hormigón y el fluido de soporte están unidos, por tanto, de forma inextricable.

Un Grupo de Trabajo Conjunto EFFC/DFI formado en 2017 está preparando una nueva Guía de Fluidos de Soporte que cubrirá todos los aspectos relacionados con los mismos y quedará publicada en 2019. Se han retirado de esta segunda edición, por tanto, los requisitos para los fluidos de soporte.

FIGURA
02

EVOLUCIÓN TÍPICA DE LAS MEZCLAS DE HORMIGÓN

CLIENTE: reglamentos y normas relevantes, vida útil, otros requisitos de servicio/operación relacionados...

DISEÑO ESTRUCTURAL: dimensiones, resistencia del hormigón, recubrimientos, detalles de armado, restricciones sobre el conglomerante/otros constituyentes, relación agua/cemento, clase de exposición...

CONSTRUCTOR: Propiedades del hormigón fresco relevantes a la ejecución, por ejemplo: trabajabilidad, retención de la trabajabilidad, estabilidad, aumento de la resistencia inicial, ritmo de suministro...

ESPECIFICADOR: especificación del hormigón (combinación entre requisitos del cliente, del diseñador de la estructura, y del constructor)

PROVEEDOR: diseño de la mezcla de hormigón teniendo en cuenta los componentes disponibles y los requisitos especificados

EJECUCIÓN: Ensayos iniciales y validación de la mezcla de hormigón

La guía está dirigida a los individuos y corporaciones implicados en la contratación, diseño y construcción de pilotes y muros pantalla incluidos los propietarios/clientes, diseñadores, contratistas generales y contratistas especializados. Se pretende que sea un complemento práctico a las normas existentes, no un sustituto. Las especificaciones de proyecto, las normas, y los reglamentos siempre deben tomar precedencia.



Sección 2

Consideraciones de diseño que influyen en el flujo del hormigón



2.1 General

El diseño de las cimentaciones profundas es un tema especializado que requiere la colaboración tanto estructural como geotécnica, ya que también debe tener en cuenta las condiciones para su ejecución. Esta sección se centra en los detalles estructurales y el impacto de la jaula de armadura en el flujo del hormigón a través de las barras hacia la zona de recubrimiento. El impacto de la colocación del hormigón en la resistencia por punta y en la resistencia por fuste no se considera en esta guía, y ha de referirse al Eurocódigo 7 (EN 1997-1) o las normas americanas (por ejemplo, la FHWA GEC10).

Con respecto al detallado de la armadura, la situación ideal para la colocación del hormigón por el método tremie es que no haya ninguna obstrucción al flujo. Desafortunadamente, las jaulas de armadura, incluidos los separadores y los cajeados, representan una obstrucción importante al flujo. El diseño estructural, incluyendo el diseño de la jaula de armadura, tiene por tanto un efecto significativo sobre la calidad del elemento terminado.

Los siguientes apartados proporcionan recomendaciones de buena práctica relativas a la separación y el recubrimiento de las barras. El diseñador de la armadura debe considerar los requisitos para una adecuada colocación del hormigón específicos de su diseño, así como los requisitos mínimos de las normas, es decir, el diseño estructural debe cumplir las necesidades del diseñador y el constructor de la misma forma que el diseño de la mezcla. Esto puede hacer necesario que el diseñador reciba ayuda especializada.

2.2 Separación de armaduras

La separación entre armaduras (denominada 'a' en la *Figura 3*) debe ser evaluada por el calculista en base a los requisitos estructurales y la capacidad del hormigón para fluir a través de las barras verticales y horizontales de la jaula.

Según el Eurocódigo 2 (EN 1992-1), la separación requerida entre barras o grupos de barras verticales debe ser el doble de su diámetro D_s o diámetro nominal $D_{s,n}$ (ver *Tabla E.1* en el *Apéndice E*).

Para la ejecución, la separación mínima debe cumplir dos requisitos, ambos relacionados con el hormigón. El primero es permitir que el hormigón -entendido como un fluido de Bingham- fluya a través de las armaduras ($\min a$), y el segundo es que no exista bloqueo por parte de los áridos ($4 \times D_{\max}$):

$$a \geq \max \left[\begin{array}{l} \min a \\ 4 \times D_{\max} \end{array} \right]$$

La norma ACI 336.1 exige una separación mínima, $\min a$, para barras verticales de 100 mm o más [4 pulg.], incluyendo solapes, o cuatro veces el tamaño máximo del árido, D_{\max} , dependiendo de cuál sea más grande. Las normas EN 206, EN 1536 y EN 1538 estipulan los mismos requisitos que la ACI, salvo que permiten una separación reducida en barras verticales de 80 mm [3 pulg.] en zonas de solape, siempre que se cumpla con el segundo requisito relativo al tamaño máximo de árido. Estos y otros requisitos vienen resumidos en la *Tabla E.1* y la *Tabla E.2* del *Apéndice E*.

Para garantizar que el hormigón fluya hacia la zona de recubrimiento, se recomienda que la separación mínima en las barras verticales sea de 100 mm [4 pulg.], incluso en las zonas de solape. Esto puede lograrse aumentando la separación fuera de la zona de solape, empleando acopladores, o grifando las barras verticales de forma que el solape sea radial desde el centro del elemento.

La separación entre armaduras horizontales debe considerarse por separado, dado que estas barras pueden limitar el flujo horizontal y vertical del hormigón. Los requisitos de las normativas para barras horizontales vienen también resumidos en la *Tabla E.1* y la *Tabla E.2* del *Apéndice E*.

Debe evitarse armar el hormigón en varias capas para reducir el riesgo de que se produzcan efectos adversos en el flujo. Dentro de lo posible, las capas múltiples deben reemplazarse por grupos de barras, diámetros mayores, o un acero de más límite elástico. Si no se puede evitar la presencia de capas múltiples, la separación mínima, $\min a$, debe aumentarse, y se recomiendan ensayos a escala real.

Elevadas densidades de armadura en el hormigón de cimentaciones profundas suelen indicar que es necesario aumentar el tamaño de los elementos.

Nota: Además de la reducción del riesgo en relación a la calidad e integridad del producto final, el aumento del tamaño de los elementos puede reducir costes, en función de los costes relativos del hormigón y de la armadura.

Deben tenerse en cuenta también las tolerancias de doblado en la fabricación de las armaduras a la hora de diseñar la estructura.

2 / Consideraciones de diseño que influyen en el flujo del hormigón

2.3 Recubrimiento de hormigón

Con respecto al recubrimiento de hormigón para cimentaciones profundas, hay dos requisitos independientes que deben ser considerados en la etapa de diseño. El primer requisito cubre la necesidad de un determinado recubrimiento de hormigón durante la vida útil de la estructura y el segundo es la necesidad de un mínimo recubrimiento de hormigón durante la ejecución para que fluya el hormigón y poder retirar la entubación recuperable. Estos dos enfoques son independientes y por lo tanto no necesariamente compatibles.

Para ambos requisitos, el calculista debe especificar un recubrimiento nominal, c_{nom} , basado en un recubrimiento mínimo, c_{min} , más las tolerancias constructivas, Δc_{dev} , representado en la *Figura 3*.

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} \text{ con } c_{min} \geq \max \begin{cases} c_{min, \text{estructural}} \\ c_{min, \text{ejecución}} \end{cases}$$

Para la ejecución, se recomienda un recubrimiento nominal de al menos 75 mm [3 pulg.], teniendo en cuenta un recubrimiento mínimo (c_{min}) de 50 mm [2 pulg.] y una tolerancia constructiva (Δc_{dev}) de 25 mm [1 pulg.]. En la mayoría de los casos, el recubrimiento mínimo para la ejecución excede el derivado de los requisitos estructurales y de durabilidad.

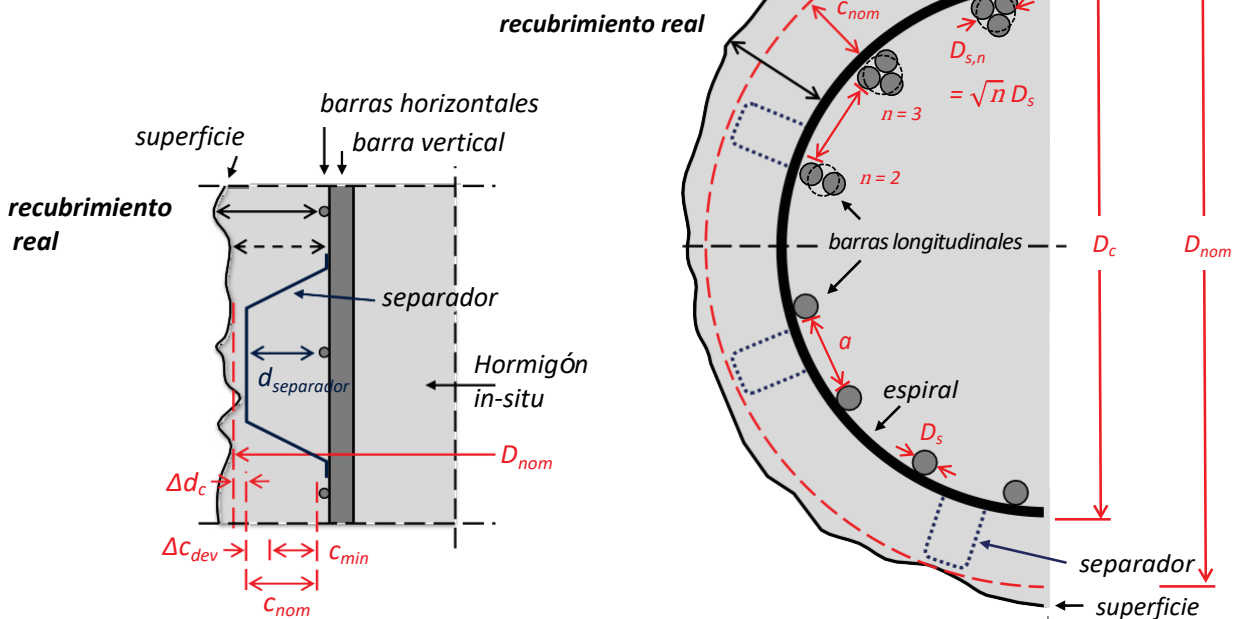
Nota: En el Apéndice E se aborda con detalle la variación entre normativas. Las normas EN 1536 y FHWA GEC 10 también identifican casos particulares en los que el recubrimiento mínimo nominal debe aumentarse.

Los separadores se detallan normalmente para salvar el recubrimiento nominal de diseño. Debería también tenerse en cuenta una tolerancia adicional, Δd_c , en el diseño de las armaduras para facilitar la colocación de la jaula dentro de la excavación (véase *Figura 3*):

$$D_c = D_{nom} - 2 c_{nom} - 2 \Delta d_c$$

FIGURA
03

RECUBRIMIENTO DE HORMIGÓN Y SEPARACIÓN ENTRE BARRAS EN CIMENTACIONES PROFUNDAS (TAMBIÉN APLICABLE A JAULAS RECTANGULARES)



Nota: El caso específico de los pilotes construidos empleando entubación recuperable se muestra y analiza en el Apéndice E.



Sección 3

Propiedades del hormigón tremie



3 / Propiedades del hormigón tremie

3.1 General

La reología del hormigón es fundamental para su comportamiento durante el proceso de hormigonado. La reología determina el éxito de la puesta en obra y la calidad del producto final (por ejemplo, su durabilidad).

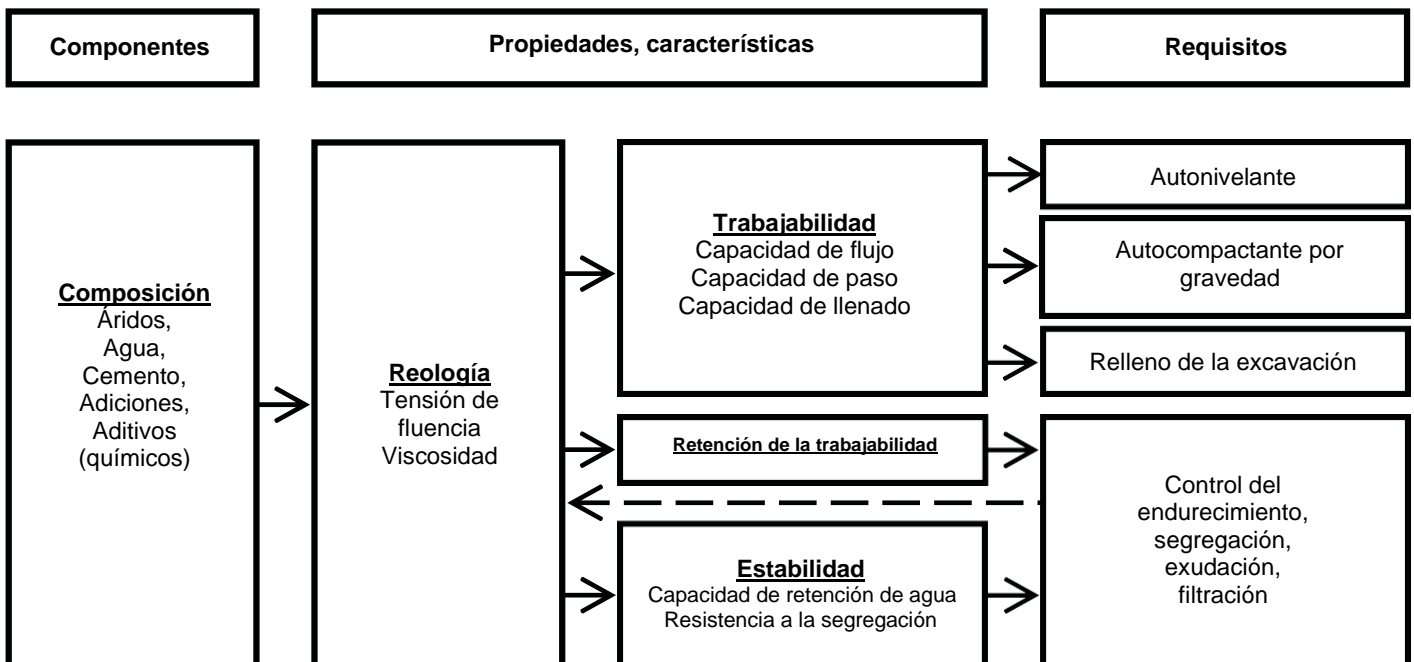
Las características reológicas clave del hormigón fresco son:

- Trabajabilidad (término general que define la capacidad del hormigón para rellenar la excavación, autonivelándose y autocompactándose por gravedad).
- Retención de la trabajabilidad (definiendo cuánto tiempo se conservarán las propiedades especificadas en el hormigón fresco).
- Estabilidad (resistencia a la segregación, exudación y filtración).

En las últimas décadas, el hormigón como material ha evolucionado significativamente. Los hormigones se diseñan teniendo en cuenta la durabilidad, además de la resistencia, y la tendencia es especificar resistencias más altas y relaciones agua/cemento más bajas. Esto da lugar a una mayor dependencia de los aditivos químicos para compensar el bajo contenido de agua, la reducción asociada de la trabajabilidad, y para cumplir con las especificaciones de trabajabilidad, estabilidad y conservación del flujo, a menudo en conflicto, dado que una estabilidad o conservación del flujo insuficientes pueden afectar a la trabajabilidad. La relación entre los ingredientes, sus propiedades reológicas fundamentales, las características generales del hormigón y sus prestaciones se ilustran en la *Figura 4*.

Hay muy poca orientación en las normas actuales acerca de la evaluación del comportamiento reológico. Este capítulo proporciona una explicación sobre la reología del hormigón y los principales parámetros empleados para identificarla.

FIGURA 04 DEPENDENCIA ENTRE COMPOSICIÓN, REOLOGÍA Y CARACTERÍSTICAS RELACIONADAS, Y LOS REQUISITOS GENERALES



3.2 Reología y trabajabilidad

Para comprender adecuadamente el comportamiento del hormigón en estado fresco es necesario definir ciertos parámetros:

- Tensión de fluencia (esfuerzo umbral), τ_0
- Viscosidad plástica, μ

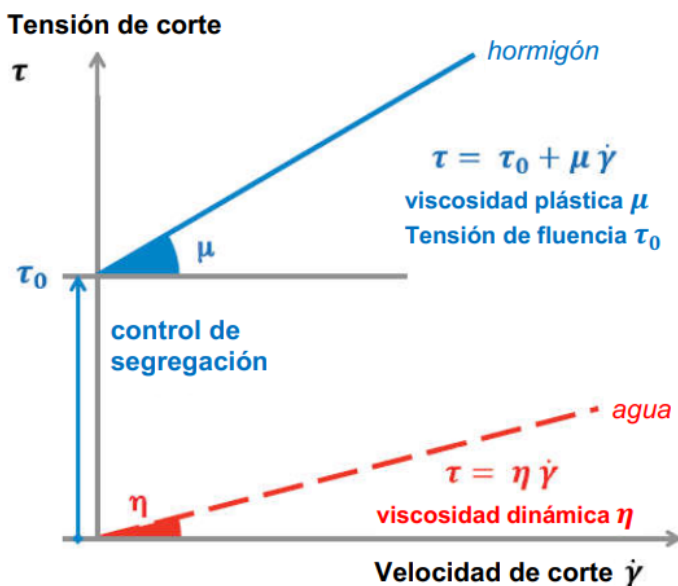
La *tensión de fluencia* o *esfuerzo umbral* es el esfuerzo cortante que hay que alcanzar para iniciar el flujo de hormigón. Para controlar la segregación la tensión de fluencia no debe ser demasiado baja. A la inversa, para permitir que el hormigón se compacte por gravedad, sin vibración externa, la tensión de fluencia no debe ser demasiado alta.

La *viscosidad plástica* es la pendiente de la recta de un fluido de Bingham, como se muestra en la *Figura 5*, y es una medida de su resistencia al flujo. Está relacionada con la interacción entre los granos y la viscosidad de la pasta entre los granos. El éxito de la colocación del hormigón requiere una baja viscosidad, ya que esto afecta a su distribución en el interior de la excavación y también al tiempo requerido para verterlo.

En la práctica, tanto la tensión de fluencia como la viscosidad plástica dependerán del tiempo y de la historia de tensiones de corte.

La *Figura 5* demuestra que el hormigón requiere una cierta cantidad de energía para comenzar a moverse (tensión de fluencia) y después se resiste a este movimiento (mediante la viscosidad).

FIGURA 05 COMPORTAMIENTO PLÁSTICO DE UN FLUIDO DE BINGHAM (EJ.: HORMIGÓN) Y UNO NEWTONIANO (EJ.: AGUA)



Los ensayos individuales de las propiedades del hormigón fresco que se utilizan actualmente para la comprobación y el control de la conformidad son incapaces de diferenciar los parámetros reológicos fundamentales (viscosidad plástica y tensión de fluencia), que sólo se pueden medir correctamente con aparatos de laboratorio (reómetro para hormigón). Hasta ahora, la facilidad de flujo como medida de la viscosidad se ha evaluado intuitivamente y cualitativamente durante la colocación, por ejemplo, a través de la observación y la clasificación de la dificultad en vaciar los tubos tremie o el tiempo de descarga del camión.

Nota 1: En esta guía, tanto la viscosidad dinámica como la viscosidad plástica de un fluido Bingham se denominan con el término general de 'viscosidad'.

Nota 2: El Programa de I+D sobre la Reología del Hormigón Tremie en Europa y EEUU (Kraenkel y Gehlen, 2018) ha demostrado una relación clara entre la tensión de fluencia y la viscosidad plástica, evaluada mediante mediciones con reómetro y valores derivados de métodos de ensayo simples y prácticos (Véase apartado 5.2).

La *Figura 6* ilustra una comparación cualitativa de la reología, representada por la tensión de fluencia y la viscosidad, de diferentes tipos de hormigón y aplicaciones.

El hormigón normal, compactado utilizando medios mecánicos, tiene una tensión de fluencia relativamente alta mientras que el hormigón autocompactante requiere una tensión de fluencia muy baja para obtener propiedades de autonivelación y compactación por gravedad. La tensión de fluencia del hormigón tremie se sitúa entre la de los dos y debe equilibrarse entre la tensión de fluencia relativamente baja necesaria para una buena capacidad de llenado, y la tensión más alta requerida para desplazar el fluido de soporte y controlar la segregación en cimentaciones profundas. La gran carga hidrostática de hormigón, que existe durante su vertido en cimentaciones profundas, ayuda a la compactación y hace innecesario trabajar con una tensión de fluencia baja, que puede dar lugar a mezclas de hormigón sensibles.

La viscosidad puede variar mucho en función de la composición real del hormigón. En términos generales, la viscosidad debe ser baja para el hormigón tremie. Esto sirve para mejorar la facilidad con la que el hormigón puede fluir en torno a las armaduras y otros obstáculos, y también reduce el tiempo necesario para completar el vertido. Además de los beneficios generales de plazo, el minimizar la duración de los vertidos evita o reduce al máximo la necesidad de mantener una trabajabilidad extendida, así como cualquier riesgo posterior de tener una mezcla de hormigón con una mayor sensibilidad.

3 / Propiedades del hormigón tremie

FIGURA 06 COMPARACIÓN CUALITATIVA DE LA REOLOGÍA EN DIFERENTES TIPOS DE HORMIGÓN

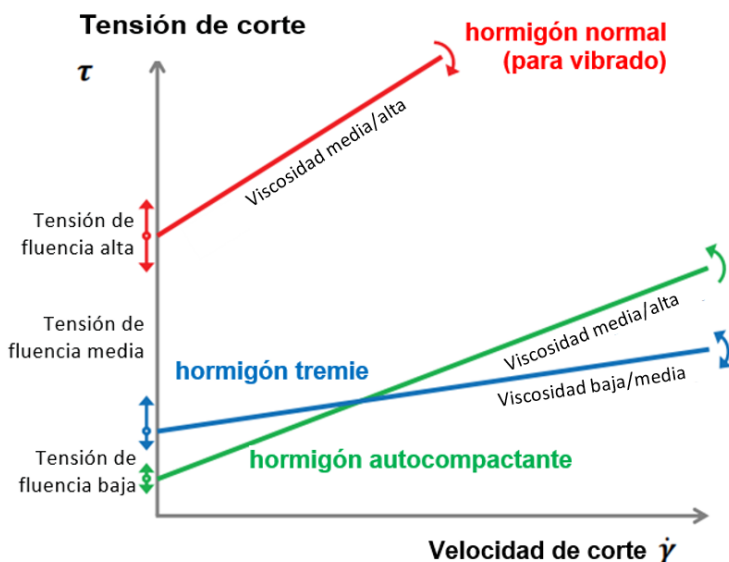
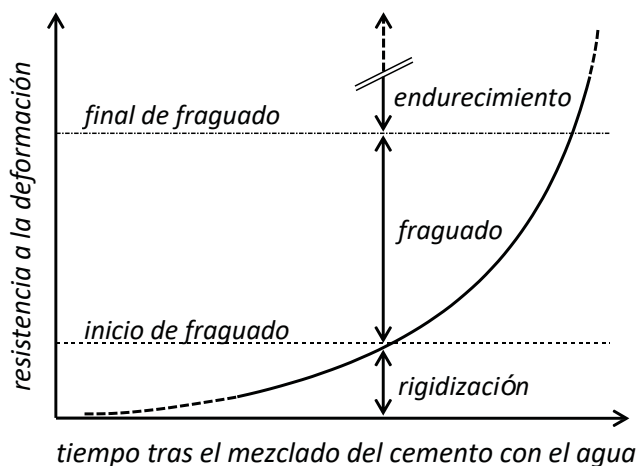


FIGURA 07 TIEMPO DE ENDURECIMIENTO Y DE FRAGUADO



3.3 Estabilidad del hormigón

El hormigón en estado fresco se considera un material tixotrópico, y presenta una forma de endurecimiento que es reversible, recuperando la fluidez cuando se agita el material. Este comportamiento se debe al asentamiento y la agrupación de partículas cuando el hormigón está en reposo, así como la ruptura de su estructura cuando es sometido a un esfuerzo cortante.

Es importante que la tixotropía del hormigón sea controlada, ya que una tixotropía excesiva podría afectar adversamente al flujo tras reanudarse el hormigonado después de una breve interrupción. Actualmente, no existen medidas o criterios de aceptación reconocidos. Una medida práctica sería limitar la tensión de fluencia después de un tiempo de reposo determinado, véanse *Apéndice A.5* y *Apéndice A.6*.

Debe controlarse la retención de trabajabilidad ya que existe un punto en el tiempo más allá del cual el hormigón no debe agitarse más, pues la rigidez desde ese momento se debe, principalmente, a la hidratación del cemento, y es irreversible (Roussel, 2012). Esto se ilustra en la *Figura 7*.

La estabilidad del hormigón se define como su capacidad para retener el agua (filtración y exudación) y su resistencia a la segregación estática. La necesidad de controlar la estabilidad debe equilibrarse con los requisitos de trabajabilidad.

Una vez que se ha vertido el hormigón, la velocidad de deformación baja a cero. Sigue reteniendo sus propiedades reológicas frescas, como su tensión de fluencia, pero estas varían con el tiempo, por ejemplo debido a un cambio con el tiempo en el efecto de los aditivos. La filtración, la exudación y la segregación estática pueden continuar mientras se endurece el hormigón (véanse *Figuras 7* y *13*). Esto es importante para el hormigón con tiempos de endurecimiento más largos, especialmente las mezclas con una gran retención de la trabajabilidad.

La estabilidad del hormigón puede afectar directamente a la calidad y la integridad del producto final, pero también de forma indirecta al tener un impacto sobre los mecanismos de flujo. En los casos en que las propiedades reológicas se han visto afectadas por una filtración o exudación excesivas, y el hormigón todavía tiene que moverse, por ejemplo para ser desplazado por vertidos posteriores, se verá afectado el propio mecanismo de flujo (véase *Figura 4*).

Existen dos mecanismos para la pérdida de agua del hormigón fresco, que pueden describirse a grandes rasgos de la siguiente manera:

- Filtración: separación del agua del hormigón debido al "aplastamiento" tras aplicar presión.
- Exudación: separación del agua de la matriz de pasta de cemento y áridos derivada de la gravedad.

3 / Propiedades del hormigón tremie

En la práctica, siempre se produce algo de pérdida de agua del hormigón fresco, lo cual suele ser debido a una combinación de ambos mecanismos. Dado que la segregación no puede ser eliminada por completo, es esencial entender ambos mecanismos para equilibrar la estabilidad con la trabajabilidad. A continuación, se proporcionan más detalles sobre la filtración, la exudación y la segregación estática. El apartado 4 de esta guía, que cubre el diseño de mezclas, expone medidas que pueden tomarse para minimizar los problemas de estabilidad.

Filtración

El hormigón fresco en cimentaciones profundas está sujeto a altas presiones hidrostáticas, que a su vez dan lugar a elevadas presiones del agua intersticial que aumentan con la profundidad. Estas presiones de agua pueden ser mucho mayores que las del agua en el terreno a su alrededor. Se genera un gradiente hidráulico y esto da lugar a un flujo de agua saliente desde el hormigón. El resultado de esta pérdida de agua es el endurecimiento del hormigón, cambiando por ejemplo las propiedades reológicas a una mayor tensión de fluencia y una mayor viscosidad.

La filtración puede ser relevante (por ejemplo, en cimentaciones muy profundas) cuando una jaula o una pila pilote debe insertarse después de que se ha hormigonado si el hormigón puede endurecerse de forma considerable debido a la filtración de agua en torno a los estratos permeables del suelo. En estos casos, la filtración debe considerarse en el proceso de diseño.

Nota: En base a I+D reciente (Azzi, 2016 y Dairou et al, 2015) se cree que las pérdidas por filtración pueden utilizarse como indicación del potencial total de exudación (véase apartado sobre Exudación a continuación). Hace falta más trabajo para validar y definir las condiciones de contorno (por ejemplo, el grado de consolidación del hormigón y el tipo de torta de filtrado).

El Apéndice A proporciona información acerca de los ensayos de filtración del hormigón fresco. El apartado 5.2 recomienda criterios de aceptación en los casos en que resulte relevante.

Exudación

La exudación del hormigón fresco es un tipo especial de segregación que ocurre una vez que el hormigón ha entrado en reposo. Las diferencias de densidad entre los distintos componentes dan lugar a altas presiones de agua en el hormigón fresco que exceden las presiones hidrostáticas. Esto da lugar a un gradiente hidráulico vertical que tiende a hacer que el agua en la pasta de cemento fluya verticalmente hacia la superficie del hormigón. Pueden desarrollarse también caminos preferentes de flujo del agua en el hormigón, variando a menudo de tamaño y frecuencia, en función de varios parámetros.

Nota 1: Los caminos visibles de flujo de agua a menudo se denominan canales de exudación (véase Apéndice D).

Nota 2: Las velocidades de flujo en los caminos de agua o canales de exudación pueden ser suficientes para transportar áridos finos y pasta de cemento.

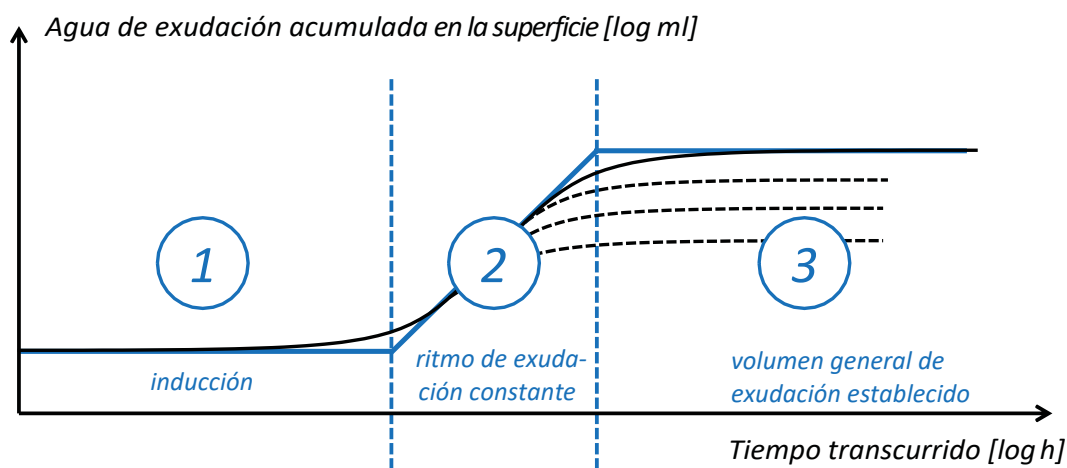
Para limitar el riesgo de anomalías generadas por los efectos anteriormente descritos, la exudación debe controlarse.

Investigaciones recientes (Massoussi et al, 2017) han identificado las tres etapas siguientes (véase Figura 8):

- Un periodo de inducción
- Un periodo con ritmo de exudación constante
- Un periodo en el que el volumen global de exudación ha quedado establecido

FIGURA
08

DIAGRAMA CONCEPTUAL DEL PROCESO DE EXUDACIÓN EN PASTAS DE CEMENTO (BASADO EN MASSOUSSI ET AL, 2017), CON POSIBLE INTERRUPTIÓN DE LA EXUDACIÓN A CAUSA DEL ENDURECIMIENTO



El grado de aparición de la exudación en cimentaciones profundas depende de muchos factores, los cuales incluyen pero no se limitan a la proporción entre el agua y el contenido de finos, la distribución de tamaños de áridos, la eficiencia de los aditivos con el tiempo, la altura total del hormigón y el tiempo que tarda en consolidarse.

Nota 1: El hormigón puede no terminar de consolidarse si la exudación se frena debido a un endurecimiento antes de que se haya podido expulsar toda el agua de exudación posible. Se puede por tanto distinguir entre la exudación y la exudación potencial que puede ocurrir bajo ciertas condiciones de drenaje.

Nota 2: El agua de exudación puede ser (parcialmente) reabsorbida debido a la hidratación del cemento.

Nota 3: Los ensayos de exudación a pequeña escala, como los que vienen descritos en el Apéndice A.9, no pueden relacionarse directamente a los procesos a tamaño real en las cimentaciones profundas. Las pruebas de filtración bajo presión positiva pueden resultar útiles para determinar el potencial total de exudación (Apéndice A.10).

El Apéndice A proporciona información sobre los ensayos de exudación del hormigón fresco, y el apartado 5.2 recomienda criterios de aceptación en los casos en que resulte relevante.

Mientras que la exudación es una característica fundamental del hormigón, es la exudación bajo muy elevadas presiones hidrostáticas en el hormigón la que resulta más relevante para los hormigones tremie. Esto da lugar a grandes presiones de agua en el hormigón, que son significativamente mayores que la presión hidrostática del agua. Por tanto, cuando los ensayos de exudación se consideran necesarios como parte de los ensayos de idoneidad, deberían ensayarse tanto la exudación como la filtración (bajo presión).

Segregación

El hormigón fresco en cimentaciones profundas depende de su tensión de fluencia para mantener su estabilidad una vez que se ha vertido. En hormigones con una tensión de fluencia relativamente baja, los áridos grandes y densos pueden hundirse a través de la pasta de cemento más ligera. Esto da lugar a una gradación de materiales en el hormigón. Este proceso se conoce como segregación estática.

Nota 1: Thorp et al (2018) proporcionan un historial de casos de segregación estática, en los cuales esta propiedad en una mezcla fuertemente retardada de hormigón (tiempo de fraguado retrasado) fue evaluada tras haberse endurecido (véase Apéndice A.7).

Nota 2: Puede producirse también segregación debido a los efectos dinámicos resultantes del transporte y la colocación. La segregación dinámica es el mecanismo por el cual la mezcla de hormigón pierde su homogeneidad. A su vez, se considera que puede garantizarse una resistencia suficiente a los efectos dinámicos a través de una composición y una cohesión apropiadas en el hormigón tremie.

El Apéndice A proporciona información acerca de los ensayos de segregación estática en hormigón fresco, y el apartado 5.2 recomienda criterios de aceptación en los casos en que resulte relevante.



Sección 4

Diseño de la mezcla de hormigón



4 / Diseño de la mezcla de hormigón

4.1 Introducción

No está dentro del alcance de esta guía discutir los principios generales del diseño de mezclas y la dosificación de materiales. El lector debe remitirse a uno de los textos estándar para una amplia cobertura de los temas relevantes, por ejemplo, "Tecnología del hormigón" por Neville y Brooks (2010).

Los pasos habituales para desarrollar el diseño de una mezcla de hormigón son los siguientes:

- 1) A partir de las propiedades mecánicas características requeridas, por lo general la resistencia a compresión simple (UCS/RCS), definir el promedio de UCS, sobre la base de consideraciones estadísticas (experiencia previa y desviación estándar esperada).
- 2) Selección del diámetro máximo del árido, basado en la separación de las armaduras. Con respecto a los detalles (distancia libre entre barras, recubrimientos, etc.), revisar la dosificación con especial atención a la trabajabilidad adecuada.
- 3) Dosificación de los componentes del conglomerante en base a los requisitos de resistencia y durabilidad. Considerar la sustitución de cemento por adiciones para limitar el calor de hidratación y el gradiente térmico en grandes elementos estructurales, y por razones económicas.
- 4) Selección de la relación agua/conglomerante, sobre la base de los requisitos mecánicos y de durabilidad.
- 5) Selección de la trabajabilidad necesaria basada en el método de colocación del hormigón.
- 6) Estimación de la cantidad de agua de amasado necesaria, basada en la trabajabilidad, tamaño máximo del árido y su forma (rodado o de machaqueo), aire ocluido, y uso de aditivos químicos reductores de agua.
Nota: Los aditivos de captación de aire no deben utilizarse con el hormigón tremie ya que el aire quedará comprimido en las cimentaciones profundas y puede cambiar las propiedades del hormigón (Feys, 2018)
- 7) Cálculo del peso necesario de conglomerante, basado en la relación agua/conglomerante seleccionada y en el agua de amasado necesaria.
- 8) Cálculo de la cantidad total de áridos, por diferencia de volumen y su granulometría, basado en la finura de la arena.
- 9) Evaluación de la cantidad y tipo de aditivo químico a añadir, para regular el tiempo de trabajabilidad, dependiendo de la temperatura y del tiempo total requerido para el transporte y la colocación.
- 10) Evaluación del tipo y cantidad de otros aditivos químicos a añadir, para ajustar la reología del hormigón fresco y/u otras características.

Los proveedores de hormigón normalmente cuentan con un abanico establecido de mezclas. Puede utilizarse una de estas mezclas como punto de partida y modificarla según haga falta.

Los comentarios que aparecen en los apartados 4.2, 4.3 y 4.4 tienen por objeto poner de relieve los temas críticos que son relevantes para el hormigonado tremie.

4.2 Consideraciones sobre el diseño de las mezclas

El diseño de mezclas de hormigón es un proceso complejo que debe equilibrar los requisitos de las especificaciones con los componentes disponibles. La selección y la proporción de componentes debe tener cuenta lo siguiente:

- Especificaciones del hormigón.
- La disponibilidad de materiales, su variabilidad y economía.
- Eficiencia de la planta de mezclado, y capacidad de control de producción de la planta.
- Condiciones ambientales esperadas en el momento de la colocación del hormigón.
- Logística de la producción, suministro y colocación del hormigón.

Con posterioridad a esta evaluación, la selección inicial de los componentes y la dosificación provisional debe tener en cuenta lo siguiente:

- Resistencia a compresión y durabilidad (y cualquier otro tipo de condiciones de diseño).
- Trabajabilidad suficiente, y mantenimiento de la misma durante el tiempo especificado.
- Estabilidad de la mezcla (resistencia a la segregación, incluida la exudación).
- Origen de los áridos, tamaño máximo, forma (rodados o de machaqueo) y granulometría.
- Contenido de cemento y composición.
- Uso de adiciones y sus combinaciones (véase *Apéndice B* para conceptos de adiciones de Tipo II).
- Contenido de agua libre.
- Relación agua/cemento.
- Aditivos adecuados.
- Sensibilidad de la mezcla a las variaciones de los constituyentes (es decir, la "reproducibilidad" en la producción normal).

Otras propiedades de diseño pueden venir impuestas por una extraordinaria demanda de durabilidad, tal vez debida a un estudio específico de la vida de servicio. En ese caso, puede que haya que tener en cuenta requisitos particulares, como un coeficiente de difusión de cloruros limitado. Una demanda posterior de componentes especiales, dosis más altas de adiciones superfina, una bajísima relación agua/cemento o similar pueden, a su vez, afectar a las propiedades del hormigón fresco. Deben equilibrarse los requisitos opuestos de durabilidad y trabajabilidad a lo largo del proceso de diseño de la mezcla.

El desarrollo de las mezclas de hormigón normalmente empieza en el laboratorio, y tras ensayos de laboratorio y estudios de sensibilidad satisfactorios, avanza hacia trabajos de campo con ensayos y desarrollos a escala real, seguidos de la aprobación final por todas las partes implicadas, incluyendo la determinación de criterios de aceptación para los ensayos en obra.

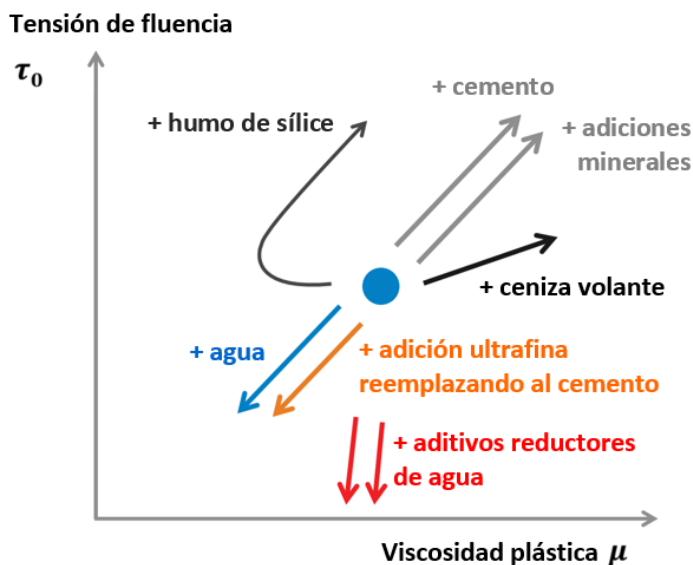
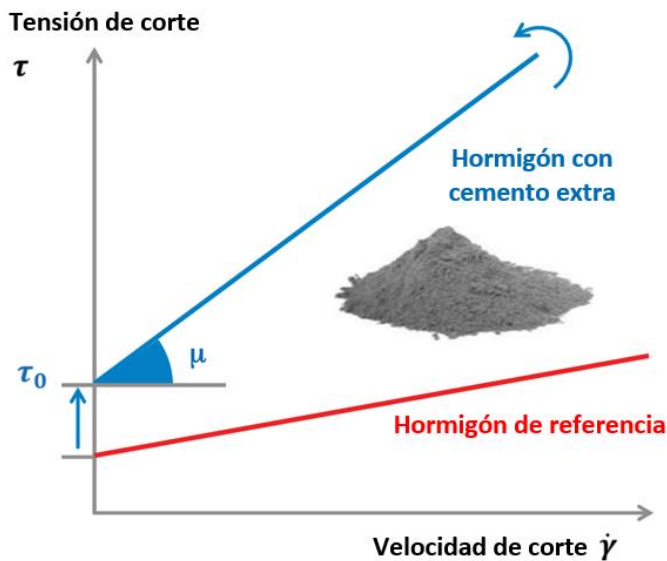
4.3 Componentes

Todos los componentes del hormigón y su proporción influyen sobre la reología de la mezcla, en particular las propiedades del árido, su forma y granulometría, el cemento y el tipo y contenido de adiciones, la relación agua/cemento y los tipos de aditivos y su dosificación.

La influencia de las adiciones de cemento sobre el comportamiento reológico de hormigón se muestra a la izquierda en la *Figura 9 (superior)*, y conduce a una tensión de fluencia superior, y a una mayor viscosidad. La influencia de los diversos componentes del hormigón tanto en la tensión de fluencia como en la viscosidad se ilustra en el reograma de la *Figura 9 (inferior)*.

FIGURA
09

INFLUENCIA DEL CEMENTO Y OTROS COMPONENTES SOBRE LA REOLOGÍA (SEGÚN WALLEVIK, 2003)



Una mezcla de hormigón debe cumplir con los requisitos de las normas y especificaciones aplicables al proyecto, como por ejemplo la relación agua/cemento, el contenido de finos, la resistencia mínima a la compresión, etc.

Con el fin de obtener una mezcla de hormigón más trabajable, es decir, para disminuir la viscosidad y/o la tensión de fluencia, las medidas adecuadas pueden ser:

- Sustituir parte del cemento por adiciones ultrafinas (significativamente más finas que el cemento).
- Ajustar la distribución de tamaños de los áridos.
- Añadir aditivos reductores de agua (plastificantes y superplastificantes).
- Aumentar la cantidad de agua o el volumen de la pasta.

Nota: Es una buena práctica el limitar el porcentaje de aditivos reductores de agua con el fin de evitar la excesiva sensibilidad a pequeñas variaciones en el contenido de agua o de otros componentes (por ejemplo, arena), que a su vez puede conducir a una insuficiente solidez de la mezcla de hormigón.

Con el fin de obtener una mezcla de hormigón más estable, es decir, para aumentar la viscosidad y/o la tensión de fluencia que reduciría la tendencia a la segregación estática y la exudación del hormigón, las medidas adecuadas pueden ser:

- Reducir la cantidad de agua y/o añadir cemento o filler (por ejemplo, polvo de piedra caliza)
- Añadir cenizas volantes, lo cual suele influir más sobre la viscosidad que sobre la tensión de fluencia.
- Ajustar la distribución del tamaño de los áridos.
- Añadir un aditivo modificador de la viscosidad.

Nota: El humo de sílice puede desempeñar un papel especial que a veces se especifica para lograr altas prestaciones, como una mayor durabilidad. Hasta un pequeño porcentaje, el humo de sílice puede tener un efecto positivo en la trabajabilidad (como filler ultrafino) pero el hormigón será más viscoso y puede alcanzar una mayor tensión de fluencia con porcentajes más altos (por ejemplo, el humo de sílice también puede tener efectos negativos y reducir la trabajabilidad).

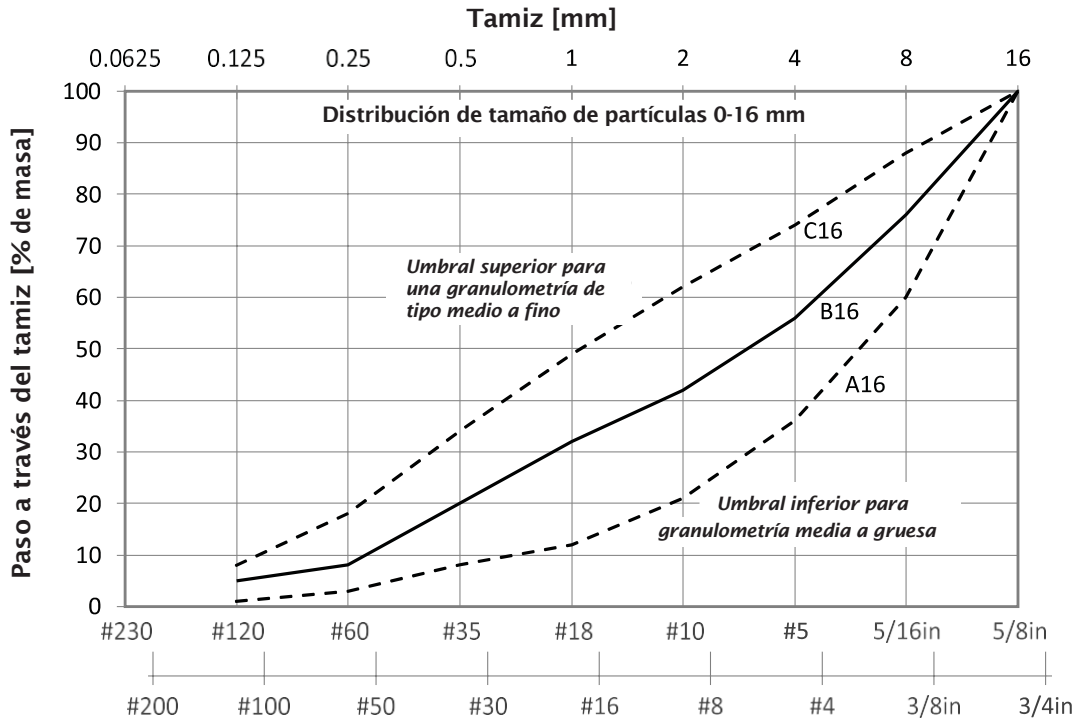
La selección y evaluación de la granulometría de los áridos es un elemento importante en el diseño de la mezcla de hormigón, donde la granulometría es simplemente la división de un árido en fracciones; cada fracción consiste en una clase de tamaño de partículas. Con el fin de minimizar el riesgo o la tendencia a la segregación, los áridos deben estar bien clasificados y distribuidos. (Dreux y Festa, 1998).

La *Figura 10* muestra el rango típico de granulometrías para el hormigón tremie empleando un árido máximo de 16 mm [5/8 pulg.]. Se recomienda utilizar la línea sólida como punto de partida para el diseño de la mezcla. En la norma DIN 1045-2 vienen distribuciones similares para otros tamaños máximos de áridos.

4 / Diseño de la mezcla de hormigón

FIGURA
10

DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑOS DE ÁRIDO (GRANULOMETRÍA) PARA UN TAMAÑO MÁXIMO DE ÁRIDO DE 16 MM [5/8 PULG.], SEGÚN EL ANEJO NACIONAL ALEMÁN DIN 1045-2 A LA NORMA EN 206-1



A la hora de desarrollar una granulometría adecuada, el proveedor del hormigón debe equilibrar una serie de factores:

- La forma de los áridos: las formas redondas (naturales) favorecen la producción de hormigones que fluyen bien frente a los áridos machacados más angulosos.
Nota: Con la misma granulometría y volumen, la tendencia al bloqueo en las armaduras se considera mayor para hormigones con áridos machacados, lo cual hace necesario emplear más pasta (estable) de cemento.
- El tamaño de los áridos: una granulometría más gruesa (con una mayor cantidad de áridos más grandes) puede aportar una mayor trabajabilidad, pero también hará que el hormigón sea más susceptible a la segregación.
- La proporción de finos: una mayor proporción de finos dará una mezcla de hormigón más cohesiva (mayor tensión de fluencia).

Nota: Una cantidad excesiva de finos podría poner en peligro la trabajabilidad debido a su alta demanda de agua, y puede dar lugar a mayores dosificaciones de aditivos químicos.

Si bien se reconoce el efecto beneficioso de los aditivos modernos en la producción de hormigón avanzado, debe entenderse el posible efecto negativo de los aditivos. La reducción de la cantidad de agua, por ejemplo, mediante el uso de aditivos reductores de agua, a su vez podría aumentar la viscosidad. Podría ser necesaria más pasta para compensar la trabajabilidad reducida. Como resultado de esto, la tensión de fluencia de la masa de hormigón se reducirá y la tendencia a la segregación aumentará.

Además de la dosificación de los aditivos, su naturaleza y mecanismo de funcionamiento pueden dar lugar a efectos secundarios tales como una apariencia pegajosa (alta viscosidad) o rigidez. Algunas combinaciones de cementos y aditivos pueden causar falta de solidez en el hormigón fresco, lo que podría dar lugar a una segregación excesiva (Aitkin, Flatt, 2015).

Quedan fuera del alcance de esta guía cualesquiera recomendaciones detalladas sobre el diseño de mezclas de hormigón. Esta guía se centra en evaluar el comportamiento del hormigón fresco por medio de los métodos de ensayo y los intervalos de aceptación recomendados recogidos en el apartado 5.

4.4 Dosificación y consideraciones prácticas

Los valores límite de las mezclas de hormigón deben ser conformes con la Norma Europea EN 206 en la cual se han unificado los requisitos de las normas EN 1536 y EN 1538, o con las normas locales relevantes u otras normas especificadas para el proyecto.

Debido a los nuevos desarrollos o condiciones de trabajo específicas, se pueden considerar desviaciones de estas normas tales como, por ejemplo, la sustitución parcial de cemento por cenizas volantes o incluso el uso de un contenido de cemento más bajo que el valor límite. Tres conceptos están disponibles para el uso y aplicación de las adiciones tipo II, o procedimientos para el reconocimiento de prestaciones equivalentes (tal y como se describen en el *Apéndice B*). Estos son:

1. El concepto del valor k .
2. El concepto de prestación equivalente del hormigón.
3. El concepto de prestación equivalente de combinaciones.

Tras un trabajo inicial de laboratorio (ensayos de idoneidad), es aconsejable llevar a cabo ensayos de producción sobre el terreno a escala real para evaluar el rendimiento y verificar la idoneidad de las propiedades especificadas. Deben dejarse tiempos adecuados en la programación contractual para llevar a cabo los ensayos necesarios.

Los ensayos en obra de los lotes y su evaluación deben ser realizados o dirigidos por personal cualificado. Se debe tomar la precaución de verificar que las condiciones que existían durante los ensayos de campo continúan existiendo durante la construcción. Si las condiciones cambian (origen de los áridos, origen del cemento, tipo o dosificación de las adiciones, aditivos químicos, etc.), se deben realizar nuevos ensayos de prueba de la mezcla para asegurar que sus prestaciones se continúan alcanzando (FHWA GEC10).

La dosificación requerida de aditivos debe ser determinada en ensayos de campo donde se repitan las condiciones (temperatura ambiente, tiempos de entrega, técnicas de vertido del hormigón, etc.) que se esperan durante la construcción, y donde se conserva y se ensaya una muestra de hormigón para determinar sus características de tiempo de trabajabilidad. Este estudio de la dosificación también debe incluir ensayos de trabajabilidad para desarrollar un gráfico de la pérdida de la misma tras el mezclado en función del tiempo.

Resulta esencial controlar el tiempo de mezcla para garantizar que no se produzcan efectos descontrolados debidos a los aditivos tanto antes como después del hormigonado. Los ensayos de laboratorio y campo deben ayudar a garantizar una dosificación y un tiempo de mezcla adecuados para minimizar los potenciales riesgos.

La efectividad de algunos aditivos superplastificantes depende de la temperatura, lo cual hace que sea importante verificar la mezcla para todo el intervalo de temperaturas anticipadas durante los trabajos. Sin el ajuste de las dosis de retardantes químicos, un aumento de temperatura de aproximadamente 10°C aumentará la tasa de pérdida de asentamiento en un factor de aproximadamente 2, lo que significa que un gráfico de la pérdida de asentamiento en el laboratorio a 22°C va a ser muy engañoso para el hormigón colocado en el tajo a temperaturas mayores de 32°C. (Tuthill, 1960).

Es una práctica común que se adopten mezclas de verano e invierno con diferentes dosis de aditivos químicos y ajustes menores en el contenido de cemento y la relación agua/cemento.

Debe prestarse especial atención al tipo de procedimiento de mezclado en la planta de hormigón. En general, el proceso de mezcla en húmedo es preferible al proceso de mezcla en seco. Durante el proceso de mezcla en húmedo, se mezclan todos los componentes en una mezcladora centralizada en las plantas de hormigón y luego se transfieren a los camiones hormigonera para su transporte. En el proceso de mezcla en seco, los componentes sólidos y secos se descargan al camión hormigonera y luego se añade agua, produciéndose el proceso de mezcla en el camión.

En general, el proceso de mezcla en húmedo es preferible al seco para hormigones de alto rendimiento. No obstante, es posible generar hormigón de alto rendimiento empleando el proceso de mezcla en seco, pero es esencial proporcionar un tiempo suficiente de mezcla en el camión, especialmente durante periodos de alta demanda. Se recomienda mantener registros detallados de cada envío, reflejando los tiempos de mezcla y las cantidades reales para cada camión.

Los ensayos de las mezclas de prueba a escala de laboratorio, o cuando sea posible a escala real, deben tener en cuenta las tolerancias de amasado. En el *apartado 5* pueden consultarse los métodos de ensayo aplicables para caracterizar la reología, incluyendo los rangos de aceptación recomendados.

Si el proveedor del hormigón necesita poder realizar pequeños ajustes sobre la mezcla acordada para garantizar las propiedades exigidas, la extensión de dichos ajustes debe pactarse de antemano. En ausencia de acuerdo, el proveedor no debe modificar o cambiar la mezcla.



Sección 5

Especificación y ensayo del hormigón y control de calidad de su producción



5.1 Nuevo enfoque para las especificaciones del hormigón fresco

Es fundamental que se especifiquen las propiedades reológicas del hormigón tremie, por las razones expuestas en la *sección 3*. Estas propiedades deben establecerse a través del desarrollo de la mezcla y de ensayos rigurosos de idoneidad, así como pruebas apropiadas de conformidad y aceptación para garantizar su mantenimiento a lo largo de un proyecto.

La práctica estándar actual es especificar la resistencia a la compresión, el contenido mínimo de cemento, la máxima relación agua/cemento, y el asentamiento. Estos parámetros son insuficientes para describir completamente las propiedades requeridas para el hormigón tremie fresco, sobre todo en términos de trabajabilidad, retención de la trabajabilidad y de estabilidad.

Deben especificarse requisitos adicionales para el hormigón por parte del especificador en lo que se refiere a los valores unitarios objetivo, métodos de ensayo, y criterios de aceptación como puede verse en la *sección 5.3*

5.2 Métodos de ensayo para caracterizar el hormigón fresco

Un estudio detallado de la Universidad Técnica de Múnich y la Universidad de Ciencia y Tecnología de Missouri (Kraenkel y Gehlen, 2018) identificó que las propiedades fundamentales que caracterizan la trabajabilidad son la tensión de fluencia y la viscosidad. Como actualmente no se dispone de ensayos prácticos de campo para medir directamente estas propiedades, hacen falta mediciones indirectas. Tanto el ensayo de asentamiento como el de velocidad de asentamiento descritos en el *Apéndice A.1* pueden utilizarse para dar una medición indirecta de las características relevantes, así como para dar una indicación de estabilidad empleando el ensayo VSI. La *Figura 11* ilustra la relación entre fluencia y asentamiento. La *Figura 12* muestra la relación aproximada entre la viscosidad y la velocidad de asentamiento.

FIGURA 11 CURVA DE ESCURRIMIENTO EN RELACIÓN A LA TENSIÓN DE FLUENCIA Y RANGO RECOMENDADO PARA HORMIGÓN TREMIE (VER APÉNDICE A.1.1 Y FIGURA 6)

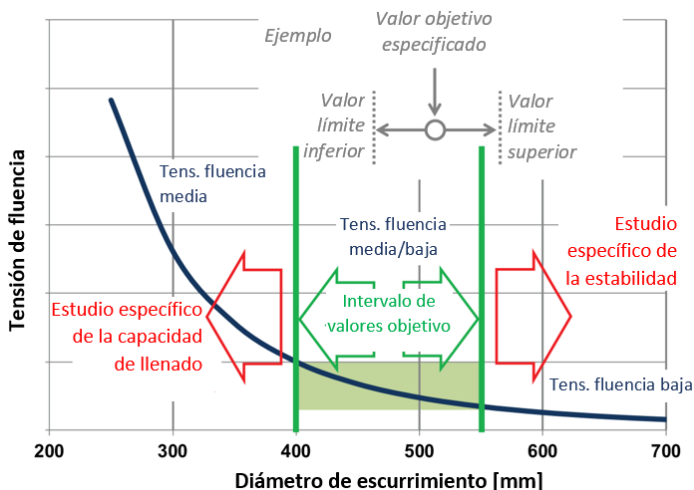
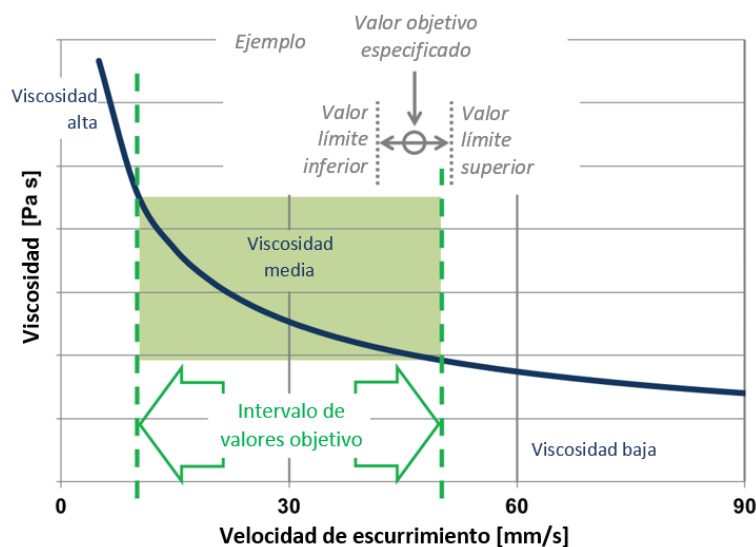


FIGURA 12 CURVA DE VELOCIDAD DE ESCURRIMIENTO EN RELACIÓN A LA VISCOSIDAD, MOSTRANDO EL RANGO RECOMENDADO DE VISCOSIDAD MEDIA PARA HORMIGÓN TREMIE (ENSAYO VÉASE APÉNDICE A.1.2)



Además de los ensayos combinados de escurrimiento, velocidad de escurrimiento y VSI (*Apéndice A.1*), en los *Apéndices A.2 a A.10* vienen otros ensayos para caracterizar el hormigón fresco en relación a su trabajabilidad, retención de trabajabilidad y estabilidad. La relevancia de estos y otros ensayos se aborda en el *apartado 5.3*.

El ensayo de asentamiento (*Apéndice A.2*) y el de la mesa de sacudidas (*Apéndice A.3*) son ensayos estándar para determinar la trabajabilidad según las normas EN 12350-2 y -5. En base al trabajo I+D llevado a cabo, el ensayo de escurrimiento da una mejor relación con la tensión de fluencia del hormigón tremie que el ensayo de asentamiento y el de la mesa de sacudidas. En esta guía se prefiere el escurrimiento como parámetro para representar la tensión de fluencia.

El ensayo de caja en L puede dar una indicación adecuada de la capacidad de paso del hormigón tremie, pero se considera cubierto este aspecto por la limitación obligatoria sobre el tamaño máximo de árido. Debido a la resistencia al paso del flujo a través de las barras dentro de la caja en L, este ensayo no puede relacionarse de forma directa con las propiedades reológicas de los hormigones tremie, y por tanto no se recomienda (Kraenkel y Gehlen, 2018).

5.3 Ensayos de idoneidad, conformidad y aceptación

El propósito de los ensayos de idoneidad es dar con una mezcla que equilibre los requisitos a menudo contrarios para las propiedades del hormigón fresco y endurecido (ej.: trabajabilidad, estabilidad, tiempo de retención de la trabajabilidad y/o tixotropía, ritmo de ganancia de resistencia y durabilidad). Es importante resaltar que el buen rendimiento del hormigón tremie viene determinado por una serie de ensayos y que ningún ensayo por sí solo puede describir de forma adecuada todas las características exigidas.

Los ensayos de conformidad son una parte integral del control de producción del Proveedor de Hormigón. La evaluación de la conformidad es el control sistemático de que el hormigón fresco cumple con los requisitos especificados.

Durante la ejecución de trabajos de cimentaciones profundas, los ensayos en obra verifican la aceptabilidad de cada carga de hormigón recibida. Los ensayos de aceptación deben incluir el ensayo de escurrimiento y el Índice de Estabilidad Visual (VSI) de cada carga. La velocidad de escurrimiento debe verificarse al menos una vez a la semana, ya que no es tan crítica como el diámetro de escurrimiento. Se pueden utilizar otros ensayos (ej.: estabilidad) según resulte necesario para demostrar la conformidad.

La *Tabla 01* proporciona un listado de los ensayos adecuados para el hormigón tremie (véase también *Apéndice A*).

La *Tabla 02* muestra ensayos recomendados, rangos de valores deseados, y tolerancias. También detalla la relevancia de cada ensayo de idoneidad y conformidad y da la frecuencia necesaria de ensayos de aceptación para el hormigón tremie. El Especificador debe elegir de la *Tabla 02* las características necesarias y especificar estos requisitos al Proveedor para que los verifique durante las pruebas de idoneidad.

TABLA 01 ENSAYOS APROPIADOS PARA EL HORMIGÓN TREMIE

Ensayo	Trabajabilidad	Tixotropía	Estabilidad
A1.1 Escurrimiento	✓	✓*	-
A1.2 Velocidad de escurrimiento	✓	-	-
A1.3 VSI	-	-	✓
A2 Asentamiento	✓	✓*	-
A3 Mesa de sacudidas	✓	✓*	-
A4 Flujo en cono modificado**	✓	-	-
A5 Corte manual con molinete**	✓	✓*	-
A6 Mant. de trabajabilidad**	✓	-	-
A7 Segregación estática	-	-	✓
A8 Segregación por tamiz**	-	-	✓
A9 Exudación**	-	-	✓
A10 Filtrado**	-	-	✓

* Puede obtenerse información sobre la tixotropía según lo comentado en el *Apéndice A.6*

** Estos ensayos no se rigen de forma estricta por las Normas Europeas o Americanas. Por tanto, no todos los proveedores están familiarizados con las propiedades especificadas y puede hacer falta un acuerdo específico con el Proveedor de hormigón según cada caso.

Otros métodos de ensayo opcionales se listan y describen en el *Apéndice A*.

TABLA 02 RECOMENDACIONES PARA LOS ENSAYOS DEL HORMIGÓN TREMIE

Ensayo	Rango recomendado para valor objetivo	Tolerancia en valor objetivo especificado	Ensayos de idoneidad y conformidad	Frecuencia de ensayos de aceptación**
A1.1 Escurrimiento	400 – 550 mm	± 50 mm	Obligatorios	Cada carga
A1.2 Velocidad de escurrimiento	10 – 50 mm/s	± 5 mm/s	Obligatorios	Min. 1 vez/semana
A1.3 VSI	0	-	Obligatorios	Cada carga
A4 Flujo en cono modificado****	3 – 6 s	± 1 s	Recomendados	Cuando sea necesario
A6 Retención de trabajabilidad	A especificar	- 50 mm	R/O*	Cuando sea necesario
A7 Segregación estática	≤ 10%	+ 2%	R/O*	Cuando sea necesario
A9 Exudación	≤ 0,1 ml/min	+ 0,02 ml/min	R/O*	Cuando sea necesario
A10 Filtrado Bauer****	≤ 22 ml***	+ 3 ml	R/O*	Cuando sea necesario

* Basado en una evaluación detallada por parte de ingenieros

** La frecuencia de los ensayos puede revisarse una vez que los valores deseados hayan sido alcanzados de forma fiable y consistente.

*** Pueden ser aceptables valores superiores de filtración en base a experiencias anteriores con mezclas similares.

**** Existen ensayos alternativos según lo descrito en los *Apéndices A.4.2* y *A.10.2*.

El valor objetivo fijado debe ir determinado por el Especificador después de producirse una evaluación técnica (por parte del Calculista y/o el Constructor) de los detalles particulares del elemento de cimentación profunda. Entre los factores más importantes están la separación entre barras verticales y horizontales, el volumen del elemento, el tiempo estimado de vertido, y la profundidad. En el *Apéndice F* figuran algunos factores adicionales. Si la evaluación detallada da como resultado la necesidad de una alta trabajabilidad (ej.: un objetivo de escurrimiento de 550 mm [22 pulg.]), entonces pueden hacer falta ensayos adicionales para garantizar que no existan problemas de estabilidad. Por otra parte, donde resulte apropiado un bajo grado de trabajabilidad (ej.: objetivo de 400 mm [16 pulg.] para el escurrimiento), pueden hacer falta ensayos adicionales para garantizar la capacidad de llenado con el tiempo, es decir, la retención de trabajabilidad.

5.4 Control de la retención de la trabajabilidad

Es importante que el Especificador (véase *Figura 2*) realice una evaluación realista del periodo a lo largo del cual deben obtenerse ciertas propiedades, o de cuándo debe limitarse la pérdida de trabajabilidad, sobre todo en el caso de grandes vertidos (ej.: mayores de 200 m³[260 cy]), cuando la capacidad de suministro es limitada, o cuando el suministro es complejo debido a una obra congestionada. Esta evaluación debe considerar lo siguiente:

- Tiempo necesario para hormigonar el pilote/panel
- Distancia/tiempo de transporte desde planta hasta obra
- Capacidad de la planta de hormigón y control de materiales
- Disponibilidad de instalaciones de reserva aprobadas
- Capacidad del camión hormigonera y número de camiones
- Calidad del acceso a la obra
- Condiciones climáticas, en particular la temperatura
- Pérdida real de trabajabilidad con el tiempo, véanse *Tablas 01 y 02* y *Apéndice A.6*

El resultado de una consideración detallada de los anteriores factores suele ser el requisito de extender la trabajabilidad (o retención del escurrimiento/asentamiento, a veces denominada vida trabajable o vida abierta) empleando aditivos retardantes o retenedores de la trabajabilidad, como ilustra la *Figura 13*.

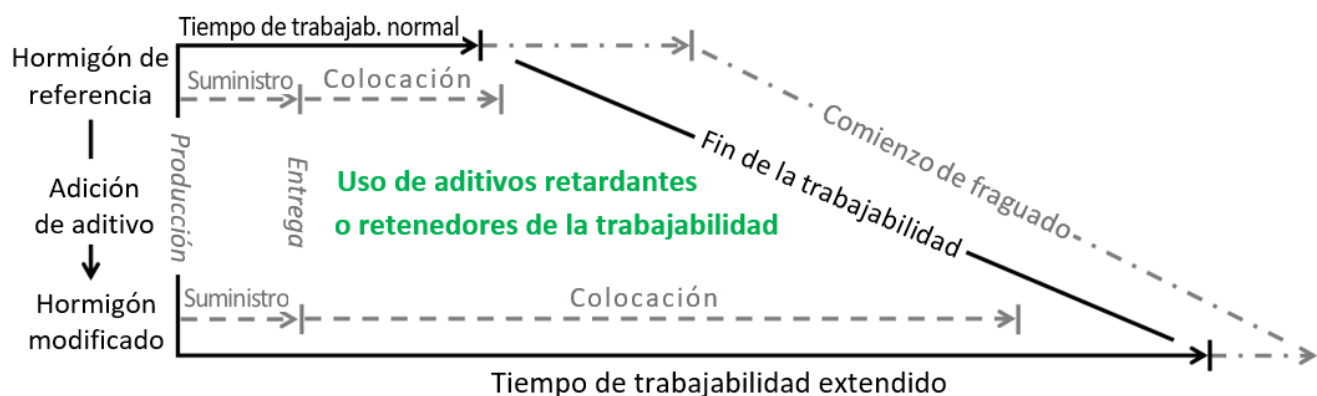
La retención de trabajabilidad recomendada puede especificarse como la trabajabilidad mínima necesaria al final del vertido completo de hormigón. Debe llevarse a cabo una evaluación detallada de los vertidos en elementos más profundos y de su duración para determinar si la trabajabilidad mínima anterior sigue siendo necesaria al final de dichos vertidos, teniendo en cuenta el tipo de flujo y el ritmo de extracción del tubo tremie.

Nota: En este momento no pueden hacerse recomendaciones detalladas para tales situaciones, pero deben abordarse en las futuras ediciones de esta guía, una vez que estudios numéricos ampliados hayan proporcionado suficientes pruebas para dichas recomendaciones.

Debe mencionarse que a día de hoy las normas están siendo actualizadas para dar un pautas consistentes acerca del muestreo del hormigón fresco y de la evaluación de la retención de la trabajabilidad. El *Apéndice A* proporciona las pautas preliminares que se siguen en la actualidad.

FIGURA
13

AMPLIACIÓN DEL TIEMPO DE TRABAJABILIDAD



5.5 Control de calidad del proceso de fabricación del hormigón

Los proveedores de hormigón deben trabajar de acuerdo con los requisitos especificados en el contrato (en Europa, EN 206 y su correspondiente Anejo Nacional). El productor de hormigón debe tener, donde sea posible, la certificación de conformidad del producto con los siguientes requisitos mínimos, si bien existen zonas remotas en las que puede resultar difícil encontrar proveedores que cuenten con dicha certificación:

- Un sistema de gestión de la calidad aprobado.
- Ensayo de productos realizado o calibrado por un laboratorio acreditado para las pruebas que se lleven a cabo.
- Vigilancia que incluya el control de la validez de las declaraciones de conformidad del productor por parte de un organismo acreditado de certificación.

Nota 1: El control de la conformidad se hará de acuerdo con los requisitos de control de conformidad para el diseño del hormigón especificados, por ejemplo en la Norma Europea EN 206.

Nota 2: Las disposiciones para la evaluación, la vigilancia y la certificación del control de producción por un organismo acreditado cumplirán las especificaciones normativas, por ejemplo EN 206.

El proceso de fabricación juega un papel clave en la consistencia de los lotes de hormigón y por lo tanto es muy importante para el funcionamiento del hormigón tremie. Es una buena práctica el conocer el proceso de diseño, fabricación y control de calidad del suministrador, antes de solicitar el suministro del hormigón. El Proveedor debe informar al especificador de la situación de la planta de producción de hormigón en el momento de la oferta e informar de inmediato si se produce un cambio de estado durante el periodo comprendido entre el momento de la oferta y la finalización del suministro.

En las regiones donde los Proveedores de hormigón con el nivel requerido de certificación de conformidad de los productos no están disponibles, es posible utilizar un Proveedor con un menor nivel de aseguramiento de la calidad. En ese caso podría ser responsabilidad del cliente la correcta calidad y consistencia (ej.: uniformidad) del hormigón suministrado. Como mínimo, debe tratarse de personal con experiencia el que compruebe (o evalúe) los siguientes elementos:

- La calibración de los sensores de pesaje para asegurar unas proporciones de la mezcla correctas.
- El contenido de humedad en los áridos.

Nota: El hormigón tremie suele tener una proporción mayor de áridos finos que los hormigones convencionales, y por tanto el contenido de agua estimado puede ser demasiado bajo (Harrison, 2017)

- La calibración de los medidores de caudal utilizados para la adición de agua, etc.

Nota: Los medidores de par pueden considerarse fiables para los rangos intermedios de trabajabilidad.

- El método de medición de los aditivos.
- La calibración de las sondas de humedad, tanto las automáticas cuando se usan para medir el contenido de humedad en el árido fino, como los dispositivos de mano utilizados para medir el contenido de humedad en los acopios.

Los siguientes puntos se consideran buena práctica para suministrar un hormigón tremie con una calidad consistentemente fiable. Los requisitos relevantes deben ir incluidos en las especificaciones del proyecto e incluir registros para demostrar la conformidad:

- El contenido de humedad de los áridos se debe medir de forma periódica, dependiendo del volumen de material que se utilice, las condiciones meteorológicas, las condiciones de almacenamiento, la sensibilidad de la mezcla, etc. La humedad en los áridos finos presenta mayor variación que en los áridos gruesos. Es una práctica habitual ajustar el contenido de humedad en base a la observación diaria de los áridos gruesos. El contenido de humedad en áridos finos varía más y, como mínimo, debe comprobarse para cada carga. No obstante, las plantas de producción actuales tienen sensores que miden la humedad de los áridos finos durante su alimentación hacia la mezcladora (sobre la marcha) y pueden ajustar la demanda de agua de forma acorde. Para proyectos grandes, deben especificarse sensores de humedad de la mezcla.

Nota 1: El seguimiento de contenido de humedad en el material de la superficie de un acopio de árido que no ha sido movido recientemente puede no ser representativo de la mayoría del material del acopio.

Nota 2: El contenido de humedad superficial y los valores de absorción del árido fino y grueso deben ser validados regularmente por secado en estufa de muestras representativas.

Nota 3: Pueden obtenerse una temperatura y un contenido de humedad constantes exigiendo que los áridos sean acondicionados un mínimo de 24 horas antes de procesar el hormigón.

- Los controles del contenido real de agua en el hormigón fresco deben hacerse de forma periódica.

Nota: El hormigón se dosifica frecuentemente usando controles automáticos que equilibran el volumen de constituyentes añadidos con el par de la mezcladora. Para los hormigones tremie con una alta trabajabilidad, es posible que estas medidas no sean lo suficientemente precisas y sea preferible medir el contenido real de agua.

- El agua de amasado, incluyendo cualquier agua reciclada, debe ser comprobada semanalmente por su contenido de finos y su composición química, con el fin de garantizar el cumplimiento de las normas aplicables, por ejemplo, las Normas ASTM C1602 o EN 1008.

Nota 1: La variación del agua reciclada puede causar efectos no deseados en la trabajabilidad, y por tanto hacer necesarios aditivos adicionales para garantizar la trabajabilidad exigida. La retención de la trabajabilidad debe volver a ensayarse si se emplea agua reciclada.

Nota 2: En la actualidad, algunos constructores son reacios a aceptar el agua reciclada debido a sus experiencias de una mayor dispersión de las propiedades del hormigón fresco, probablemente debida a diferentes contenidos de finos y/o restos variables de superplastificantes.

- La granulometría de muestras representativas del árido fino y grueso debe ser revisada semanalmente, o cuando se cambie su procedencia.
- La mezcladora debe limpiarse a fondo al menos una vez al día.
- Las copias electrónicas de los registros de pesaje de las amasadas deben ser impresas directamente en la documentación de envío de cada camión.

Nota: Toda la información necesaria para el usuario viene en el parte de envío, y, como se requiere una certificación de conformidad del producto, el organismo de acreditación verificará como comprobación rutinaria que los registros de la amasada de hormigón cumplen con lo especificado (véase Harrison, 2017 sobre la interpretación de registros).

- Los camiones hormigonera deben estar limpios y vacíos de cualquier resto de hormigón o agua antes de llenarse.

Nota: Es responsabilidad del Especificador permitir o prohibir el uso de materiales reciclados. Debe exigirse al Proveedor de hormigón que declare cualquier tipo de sistema de reducción de residuos para su aprobación. El uso y control de agua reciclada, la adición de polvo a la mezcladora, o la reutilización de áridos debe identificarse y medirse para controlar su contenido y efecto sobre el hormigón.

Sección 6

Ejecución



6.1 General

Esta sección analiza las técnicas y métodos utilizados para la colocación del hormigón por el método tremie en cimentaciones profundas (pilotes, muros pantalla y elementos portantes).

Las normas y códigos prácticos europeos, estadounidenses e internacionales varían. Por tanto, la guía hace recomendaciones en cuanto a lo que se considera la mejor práctica.

Esta sección no contempla las condiciones de vertido en seco, donde se suele permitir la caída libre del hormigón desde una cierta altura. Las normas EN 1536 y ICE SPERW permiten el hormigonado en condiciones secas si se comprueba inmediatamente antes del vertido que no hay agua en el fondo de la perforación. La norma FHWA GEC 10 define "en seco" como menos de 75 mm de agua sobre el fondo de la perforación, y un flujo de entrada no mayor que 25 mm en 5 minutos". En el caso de un mayor flujo de entrada de agua, se recomienda que la excavación se llene con agua de una fuente externa para superar el flujo de entrada con presión positiva dentro de la excavación, y luego utilizar la técnica tremie para la colocación del hormigón. La colocación de hormigón (incluso con un tremie) en una excavación con una afluencia excesiva de agua implica un riesgo de mezcla del hormigón fresco con el agua que entra.

6.2 Antes del hormigonado

Es esencial que el fondo de la excavación esté razonablemente libre de residuos sueltos, que pueden ser desplazados por la carga inicial del hormigón del tremie y acumularse en la capa interfase. Es difícil eliminar todos los residuos del fondo. Pequeñas cantidades de residuos son aceptables normalmente.

Donde se requiere una alta confianza en la limpieza del fondo, tal como en elementos cargados que dependen en gran medida de la capacidad portante por punta, es importante que los desechos en el fondo del panel o pilote se mantengan en el mínimo. Deben equilibrarse los beneficios de dedicarle tiempo adicional a limpiar la base frente a cualquier efecto negativo que esto pueda causar (ej.: mayor acumulación de torta de filtrado).

Los niveles apropiados de limpieza del fondo deben ser discutidos y acordados en la etapa de diseño del proyecto y verificados in situ. Hay una gran gama de métodos para controlar la limpieza del fondo, y se proporcionan algunos ejemplos en las normas FHWA GEC 10 y ICE SPERW.

Cabe señalar que la geometría de la herramienta de excavación dictará la forma de la base. Con cucharas y ruedas de corte se genera un perfil curvo en la base. En estos casos, es esencial que la localización de cualquier control de la limpieza del fondo sea cuidadosamente considerada y registrada.

La *Figura 14* muestra la situación especial de corte en material duro con una hidrofresa, donde el fondo sólo puede reproducir la forma de las ruedas de corte, incluyendo la zona de sobre-excavación en grandes paneles con mordidas centrales (taco central).

El fondo de los pilotes se limpia utilizando cazos de limpieza, bombas sumergibles, air lift, u otros sistemas aprobados. El fondo de las pantallas se limpia normalmente utilizando el equipo de excavación, u otro sistema aprobado.

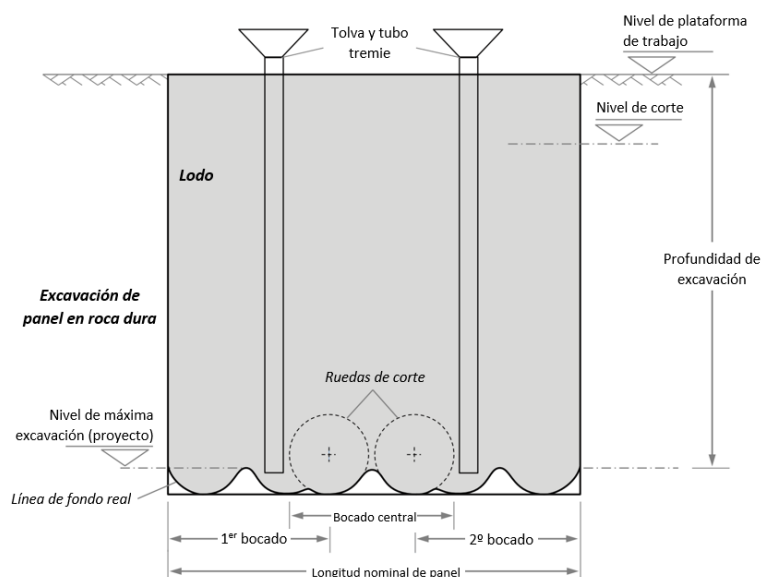
La Guía EFFC/DFI de Fluidos de Soporte comenta las opciones y limitaciones del control del grosor de la torta de filtrado a través del control de las propiedades del fluido de soporte.

El fluido de soporte debe cumplir con las propiedades especificadas en la Guía de Fluidos de Soporte antes de introducirse las armaduras y verterse el hormigón.

Antes de colocar las armaduras (y comenzar con el vertido), se debe confirmar que las condiciones pre-vertido reales están de acuerdo con el diseño y las especificaciones, por ejemplo, la profundidad de excavación, el recubrimiento de hormigón nominal (separadores) y la jaula de armadura. Los separadores deben garantizar la correcta posición de las armaduras dentro de la excavación (o entubación), y deben estar diseñados en función de las condiciones específicas de la obra.

En los paneles de pantallas de bocado múltiple, el nivel fondo de cada bocado debe ser igual, con tolerancia de 0,5 m, excepto en casos particulares, tales como los paneles de bocado múltiple en roca dura inclinada. En paneles escalonados, el proceso de colocación debe tener esto en cuenta.

FIGURA 14 FONDO REFLEJO DE LA GEOMETRÍA DE LA HERRAMIENTA DE EXCAVACIÓN (EJEMPLO EMPLEANDO UNA HIDROFRESA)



El tiempo transcurrido entre la limpieza final de la excavación y el comienzo del hormigonado debe ser lo más corto posible. Cuando se vayan a colocar elementos como juntas o jaulas de armadura, la limpieza se debe realizar antes de su colocación. El procedimiento de limpieza, así como el tiempo entre las operaciones, deben establecerse en los primeros paneles. Si se producen retrasos, la calidad del fluido de perforación debe volver a revisarse y, si es necesario, hay que realizar una limpieza adicional.

Los sólidos y partículas que decantan del fluido de perforación normalmente serán transportados sobre la superficie del hormigón ascendente en la capa interfase, tratada con mayor detalle en la Guía EFFC/DFI de Fluidos de Soporte. El hormigón debe verse por encima del nivel teórico para permitir la posterior retirada del hormigón en mal estado por encima del nivel de descabezado, dando lugar a un hormigón sano en el nivel de corte.

6.3 Equipo tremie

Los tubos tremie por gravedad deben tener un diámetro interior mínimo de 150 mm [6 pulg.], o seis veces el tamaño máximo del árido, el que sea mayor (EN 1536). Se utiliza comúnmente un diámetro de 250 mm [10 pulg.]. Los sistemas tremie a presión (líneas de bombeo) pueden ser menores de 150 mm [6 pulg.].

Los tubos tremie deben ser de acero, pues el aluminio reacciona con el hormigón.

Los tramos de tubería deben conectarse mediante un acoplamiento totalmente estanco al agua. Los tramos habituales tienen una longitud de entre 1 y 5 metros. Son preferibles longitudes más largas, pues llevan menos juntas, pero el orden (de colocación) de las diferentes longitudes tiene que considerarse de acuerdo con las condiciones específicas (por ejemplo, profundidad de la excavación, altura de la tolva, empotramiento en la primera retirada del tubo, y durante las últimas descargas a baja presión hidrostática). En general, los tubos deben separarse en cada junta cada vez que se utilizan, y guardarse en un soporte tremie, para que se puedan limpiar adecuadamente. Ha habido casos de uniones rotas durante la manipulación del tremie, por lo que es muy recomendable hacer inspecciones visuales completas.

- Los tubos tremie sin juntas se pueden utilizar en excavaciones de poca profundidad donde su manipulación lo permita.
- La tolva debe tener el mayor volumen posible. El ritmo de llenado debe hacer posible un suministro continuo de hormigón al tremie durante la colocación inicial del tubo tremie.
- Los tubos deben ser lisos, limpios y rectos de modo que se minimice la resistencia por fricción al flujo de hormigón.

6.4 Separación entre tremies

Los pilotes son circulares normalmente, y generalmente es suficiente una única tubería central dentro de la perforación.

Para muros pantalla, las normas especifican distintos límites a la distancia de flujo horizontal de 1,8 a 2,5 m [6 a 8 pies], con un máximo de 3 m [10 pies] (ICE SPERW, EN 1538, Z17). Se recomienda limitar la distancia a 2 m [7 pies]. Distancias mayores, de hasta 3 m [10 pies], podrían ser aceptables si la trabajabilidad del hormigón se ha demostrado suficiente, en combinación con una separación de las barras de armadura y un recubrimiento de hormigón por encima de los valores mínimos. Los ensayos a escala real o las simulaciones numéricas (en particular mediante estudios comparativos) pueden ayudar a encontrar valores adecuados, véanse las *secciones 7 y 9*.

Los tubos tremie deben situarse lo más simétricamente posible con el fin de evitar subidas irregulares del nivel del hormigón, es decir, en el centro para un solo tubo tremie y aproximadamente a 1/4 de la longitud del panel desde cada extremo con 2 tubos tremie.

6.5 Colocación inicial del hormigón

El inicio del hormigonado es uno de los pasos más críticos de todo el proceso de vertido, ya que el primer hormigón tiene que separarse del lodo de perforación.

Ambos métodos de colocación iniciales, húmedo y seco, se citan en varias normas y documentos técnicos (por ejemplo, la Norma Americana FHWA GEC 10).

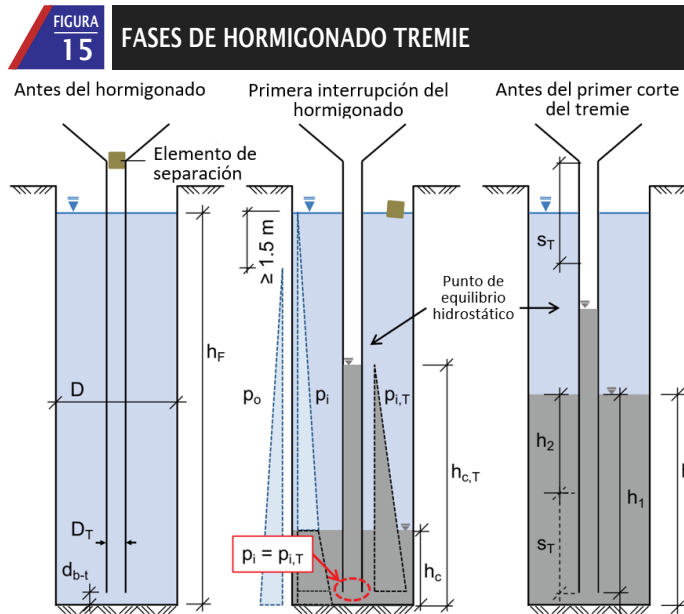
En el método de hormigonado inicial en seco (a menudo confundido por el "vertido seco"), el final del tubo tremie va cerrado y el hormigón únicamente entra en contacto con el fluido de soporte una vez que sale del tubo tremie. Se coloca una placa de acero o de madera contrachapada con un anillo de sellado en la parte inferior de la tubería tremie que permite al fluido de perforación mantenerse fuera de la tubería durante su descenso al fondo de la excavación. A continuación, se descarga el hormigón directamente en el tubo tremie seco, con el tubo levantado entre 0,1 m y 0,2 m [4 a 8 pulg.] para permitir que el hormigón fluya en la excavación. Para vertidos profundos, puede ser difícil evitar que el fluido entre en el tubo tremie a través de las juntas y/o evitar que flote el tubo tremie.

Con el método de colocación inicial en húmedo, se debe utilizar un medio de separación cuando el tubo tremie esté lleno de fluido. Ejemplos de este tipo de "tapones" incluyen gránulos de vermiculita (posiblemente agrupados en un saco), pelotas de goma inflables, esponjas y bolas y cilindros de espuma. A veces se utiliza además una placa de acero en la base de la tolva, y cuando esta está llena se levanta la placa utilizando una grúa. El tapón debe evitar que la carga inicial de hormigón se mezcle con el fluido de perforación, lo que daría lugar a la segregación dentro del tremie. Para iniciar el hormigonado, el tubo tremie debe bajarse a la parte inferior de la excavación y luego levantarse una altura pequeña

(no mayor que el diámetro de la tubería tremie) para iniciar el flujo de hormigón y permitir que el tapón salga por la base del tremie. La especificación ICE SPERW afirma que un tapón deslizante de vermiculita debe tener una longitud de dos veces el diámetro tremie y que el tremie no debe levantarse más de 0,2 m [8 pulg.] desde la base. Por motivos prácticos, el método de colocación inicial en húmedo es el método preferencial.

La Figura 15 muestra las condiciones de presión antes y durante las etapas del vertido, y destaca que antes del primer corte el tubo tremie debe estar suficientemente sumergido. No obstante, debido a los aspectos dinámicos del flujo del hormigón, el nivel real de hormigón en el tubo tremie, en particular tras la interrupción después del vertido inicial, puede ser más bajo que el del punto de equilibrio hidrostático como indica la Figura 15.

El nivel de hormigón requerido debe ser evaluado para cada condición específica del sitio, pero en la mayoría de las circunstancias se requiere un mínimo de 5 m [15 pies] (6 m [18 pies] según la norma EN 1536) antes del primer corte del tremie. Es esencial que haya disponible un volumen suficiente de hormigón en la obra, definido como la cantidad para llenar la altura mínima, antes de comenzar con el vertido.



Donde:

- h_F Nivel del fluido de perforación
- D_T Diámetro de tubo tremie
- D Dimensión (diámetro o espesor) de excavación
- d_{b-t} Distancia desde el fondo de excavación a la apertura del tubo tremie
- h_c Nivel del hormigón en la excavación
- $h_{c,T}$ Nivel del hormigón en el tubo tremie (=punto de equilibrio hidrostático)
- h_1/h_2 Empotramiento de tubo tremie antes (1) / después (2) del corte
- s_T Longitud de tramo de tubería tremie a cortar, con: $h_2 \geq 3$ m (10 pies)
- p_o/p_i Presión hidrostática fuera (o) y dentro (i) de la excavación
- $p_{i,T}$ Presión hidrostática dentro de la tubería tremie

6.6 Empotramiento del tremie

El tremie requiere un mínimo de empotramiento en el hormigón que ya se ha vertido. Las normas de ejecución europeas (EN 1536, EN 1538) especifican un empotramiento mínimo de 1,5 a 3 m [5 a 10 pies], con los valores más altos para las excavaciones más grandes. En general, un empotramiento mínimo de 3 m [10 pies] es bien aceptado en la práctica.

Si se está utilizando entubación recuperable durante el vertido del hormigón al tremie, la extracción de los tramos de entubación debe tenerse en cuenta al considerar el empotramiento mínimo del tremie. La extracción de los tramos de la entubación recuperable hará que el nivel del hormigón descienda al ocupar el espacio anular dejado por la entubación. Antes de retirar un tramo de entubación, la profundidad de empotramiento del tremie debe ser adecuada para mantener el empotramiento mínimo requerido tras el descenso del hormigón.

Cuando se utilizan dos o más tubos tremie (véase el apartado 6.4) el extremo inferior de los tremies tiene que mantenerse en el mismo nivel (excepto cuando la base está escalonada y requiere medidas iniciales especiales).

Para conseguir que el hormigón fluya, el peso del hormigón dentro de la tubería tremie debe superar:

- La resistencia fuera de la base del tubo tremie (presión hidrostática del fluido).
- La resistencia del hormigón ya vertido.
- La fricción entre el hormigón y la cara interna de la tubería tremie.

Algunos autores se refieren al "punto de equilibrio hidrostático", cuando la fuerza de gravedad dentro del tremie está en equilibrio con la resistencia al flujo (véase Figura 15). El hormigón que se añada por encima del punto de equilibrio hidrostático hará que el hormigón fluya, y cuanto mayor sea la velocidad de vertido, más rápido será el flujo por la salida de tremie.

Hay fuertes argumentos técnicos para evitar un excesivo empotramiento del tremie. Un empotramiento muy alto conduce a una menor presión hidráulica, pérdida del suministro de energía y un flujo de hormigón más lento. Se recomienda un empotramiento de 3 m [10 pies] como mínimo a 8 m [25 pies] como máximo. Al concluir el hormigonado, por ejemplo, cerca del nivel de la plataforma, es aceptable reducir el empotramiento mínimo del tremie a 2 m [7 pies].

Para pilotes perforados de pequeño diámetro, puede que sea necesario incrementar el empotramiento máximo para evitar la necesidad de cortar el tremie antes de terminar de descargar el camión de hormigón.

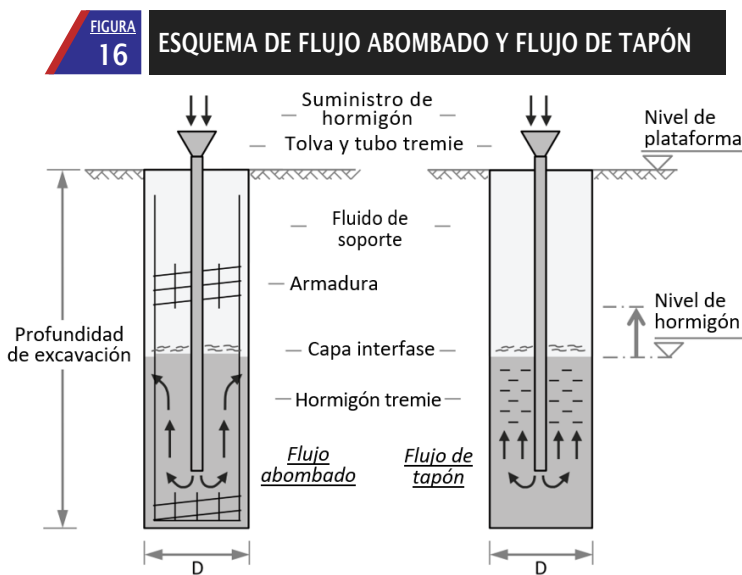
Es obligatorio medir la profundidad del hormigón en puntos tremie después de verter cada carga de hormigón, lo cual suele hacerse con una cita lastrada. En los casos en que dos (o más) tubos tremie sean empleados en un panel, es esencial minimizar la diferencia entre los niveles de hormigón y descargar en ambos tubos tremie a la vez.

El hormigón debe fluir libremente por el tremie sin necesidad de bombeo (elevación y descenso rápido del tremie). La necesidad de subir y bajar el tremie para mantener el flujo es una indicación de falta de trabajabilidad. Esto puede afectar a la configuración del flujo de hormigón y entraña el riesgo de que se produzca la mezcla con fluido de perforación y material contaminado en la parte superior del hormigón, conduciendo al atrapamiento de los detritus.

Debe detallarse en la documentación y/o acordarse antes de comenzar los trabajos una metodología adecuada para volver a empotrar el tubo tremie después de retirarlo accidentalmente por encima del nivel de hormigón o en caso de interrumpirse el suministro de hormigón (véase también la norma EN 1536, apartado 8.4.8).

6.7 Patrones de flujo del hormigón

Los resultados de ensayos de campo (Böhle and Pulsfort, 2014), y simulaciones con modelado numérico (véase la Sección 9) han confirmado que existen dos tipos básicos de flujo: 'abombado' y 'de tapón'. Estos se muestran de manera esquemática en la Figura 16.



En base a la cantidad limitada de datos de ensayos de campo y a simulaciones de modelado numérico, se cree que el flujo abombado es el tipo de flujo más común en los vertidos profundos de tremie. Se entiende que el hormigón fresco, después de salir del tubo tremie e ir hacia arriba, genera un flujo laminar para una distancia particular dentro de una zona central de la excavación, siguiendo el camino de menor resistencia al flujo (en torno al tubo tremie) y extendiéndose hacia fuera al llegar a la parte superior del hormigón. El hormigón más viejo es desplazado hacia arriba y hacia los lados para luego ser "embutido" hacia dentro de la circunferencia exterior de la excavación donde sigue habiendo una resistencia al flujo relativamente alta. Por tanto, el flujo abombado es habitual, especialmente en cimentaciones

profundas en las que las armaduras suponen un obstáculo importante al flujo vertical. Una superficie de excavación rugosa también puede impedir el flujo del hormigón y contribuir al flujo abombado.

El flujo de tapón se ve como un tapón encima de la columna de hormigón dentro de la excavación (o dentro de la jaula) y encima de la salida del tubo tremie, que es elevado por la presión del fluido inducida debajo al "bombear" hormigón tremie fresco que desplaza el hormigón más antiguo hacia arriba. Se entiende que el hormigón fresco no se mezcla con el tapón. Un caso extremo de este tipo de flujo conllevaría que el hormigón que hace el tapón no sufre esfuerzo cortante, es decir, que internamente está en reposo y es propenso a efectos tixotrópicos. El flujo de tapón se estima más probable en los casos en que prevalece una fricción perimetral muy baja (ej.: no hay jaula de armaduras y la superficie de excavación es suave) o en el caso de la sección interior de una excavación amplia, la cual daría lugar a una combinación de flujo abombado y flujo de tapón.

Hay muchos factores interdependientes que determinan qué tipo (o combinación de tipos) de flujo ocurren. El flujo en un elemento individual de cimentación profunda también puede variar durante un mismo vertido, por ejemplo, debido a una reología del hormigón que depende del tiempo, a la congestión local de armaduras, o a cambios en las condiciones hidrostáticas. Puede emplearse el modelado numérico para entender mejor estas interacciones complejas y aislar los parámetros más sensibles (véase la Sección 9).

Los patrones de flujo del hormigón han sido investigados ocasionalmente sobre el terreno, pero todavía no se han llegado a entender del todo. Hay más investigaciones en marcha, donde se modelan numéricamente los patrones de flujo del hormigón desde el tubo tremie, incluyendo la capa interfase y utilizando programas de dinámica de fluidos o simulaciones (Böhle and Pulsfort, 2014).

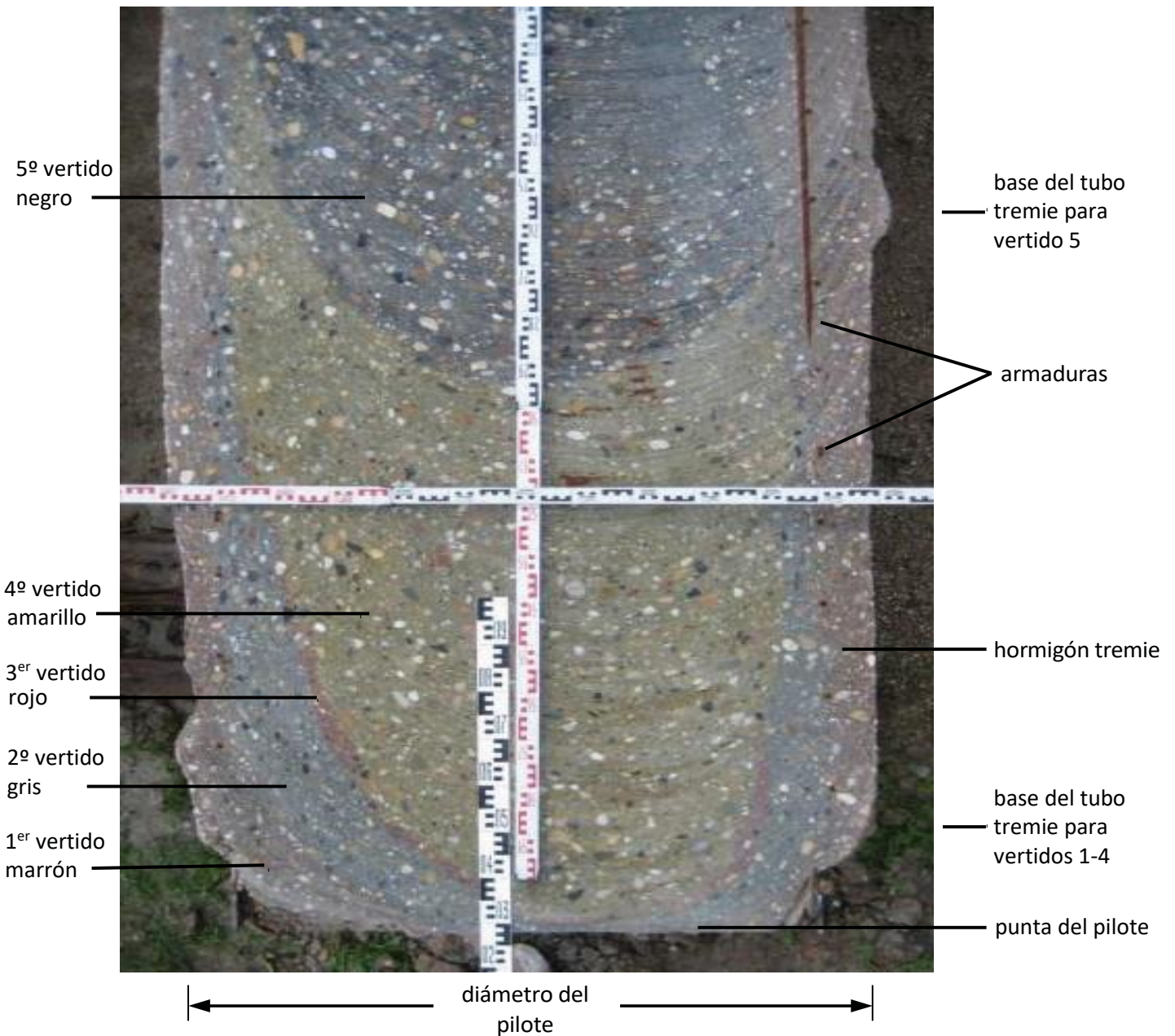
La Figura 17 muestra una sección longitudinal a través de un pilote perforado hormigonado con hormigón teñido para investigar los patrones de flujo bajo condiciones específicas. En el patrón de flujo visible aparece el hormigón vertido al principio en torno al exterior (especialmente en la zona de recubrimiento) y el hormigón vertido después en el centro. Las tandas de hormigón teñido de amarillo y negro se vertieron desde diferentes niveles de salida antes y después de cortar el tubo tremie.

Se aprecia el mecanismo de flujo asociado como sistemático para un proceso de hormigonado en varias fases, en el cual el tubo tremie se levanta siguiendo unos pasos definidos y desplaza el hormigón más antiguo hacia arriba y hacia los lados, indicativo del flujo abombado.

Nota: el hormigón teñido de rojo en la tercera tanda se ve únicamente como una capa fina entre la segunda tanda (gris) y la cuarta (amarillo). Esto puede indicar un cambio en el patrón de flujo, por ejemplo, debido a una variación clara de la reología, o generada por las condiciones de borde (dentro de la excavación)

FIGURA
17

SECCIÓN LONGITUDINAL DE UN PILOTE PERFORADO, HORMIGONADO CON DIFERENTES CARGAS DE HORMIGÓN TENIDO (BÖHLE Y PULSFORT, 2014), INDICANDO FLUJO ABOMBADO



La propiedad reológica dominante que afecta al patrón de flujo del hormigón es la tensión de fluencia (indicada por el escurrimiento). La viscosidad (indicada por la velocidad de escurrimiento) puede tener efecto sobre el tiempo total necesario para el vertido (flujo más lento del hormigón) y a su vez sobre la necesidad de retención de trabajabilidad, que debe reducirse en la medida de lo posible. La viscosidad también tiene un efecto directo sobre la resistencia del hormigón (horizontal) a fluir a través de aperturas en la jaula de armaduras.

En los casos en que la tensión de fluencia y la viscosidad aumenten con el tiempo, puede resultar necesario adaptar las técnicas de ejecución durante el vertido, por ejemplo, reduciendo la profundidad de empotramiento del tremie hacia el final del mismo.

6.8 Flujo alrededor de las armaduras y los cajeados (box-outs)

Tal como se establece en la *Sección 2*, el calculista debe prestar especial atención a cualquier restricción al flujo de hormigón.

Cualquier obstrucción es una resistencia al flujo y disminuirá la capacidad del hormigón utilizado para fluir adecuadamente alrededor de las armaduras y cajeados, y envolverlas. Teniendo en cuenta que el flujo real es una función de la energía en el punto de restricción, la congestión es más crítica a mayores distancias de recorrido desde la salida del tubo tremie y en cotas más altas, donde la presión de hormigón es menor.

El detalle de las armaduras, los cajeados, etc. tienen que cumplir con los códigos (véase *Apéndice E*). Asimismo, puede emplearse el modelado numérico para evaluar la sensibilidad a los cambios del detalle de armado y determinar las configuraciones menos invasivas.

Los separadores y otros elementos embebidos deben perfilarse para facilitar el flujo del hormigón.

6.9 Registro del hormigonado

Se debe medir la profundidad del hormigón en cada posición del tremie, y la longitud de tremie sumergida debe quedar registrada en intervalos regulares correspondientes a cada descarga de hormigón.

Las profundidades medidas, los volúmenes colocados y las longitudes del tremie y el encamisado deben ser dibujadas de inmediato en un gráfico durante la operación de vertido y comparar con los valores teóricos, teniendo en cuenta el efecto de las sobre-excavaciones. Un ejemplo de un gráfico de este tipo viene dado en las normas EN 1538 y FHWA GEC10.

Esta comparación puede ayudar a identificar áreas donde se hayan producido sobre-excavaciones o donde el hormigón puede estar rellenando huecos. Es raro tener una infra-excavación, y un infra-consumo de hormigón podría indicar un problema de inestabilidad, colapso, o mezcla de fluido de perforación, escombros o tierra con el hormigón. Estas mediciones pueden identificar una condición inusual en una excavación donde podría justificarse más investigación.



Sección 7

Ensayos a escala real



Una manera eficaz de obtener información crucial sobre cualquier elemento de cimentación profunda es la instalación de uno o más elementos de ensayo a escala real. Estos, idealmente, deberían ser construidos usando la misma técnica de instalación, equipos y materiales propuestos para las obras permanentes. Los problemas identificados en los ensayos a escala real pueden ser abordados antes de que se construyan las obras permanentes. También proporcionan la oportunidad para ajustar aspectos del proceso de construcción y desarrollar parámetros de conformidad.

El objeto y alcance de los trabajos de ensayo deberían ser proporcionales al tamaño, la complejidad y los riesgos del proyecto. Los elementos a ensayar deberían seleccionarse tras un examen de:

- El diseño y los detalles constructivos.
- El comportamiento del hormigón fresco.
- Los métodos de colocación, la experiencia y la capacidad del Constructor.
- La experiencia en terrenos con esas características.

Puede resultar necesario excavar para descubrir los elementos construidos hasta una profundidad significativa.

En la práctica, este tipo de ensayos es mejor llevarlos a cabo por el contratista designado después de la movilización al sitio, pero antes del inicio de las obras permanentes. El tiempo y el coste de la prueba deben ser reconocidos por el cliente en una etapa temprana, y especificarse en detalle en los documentos de licitación.

Cuando el presupuesto y/o las limitaciones de plazo no permitan este tipo de ensayos a escala real, se recomienda por lo menos realizar in situ ensayos de conformidad del hormigón, además de los ensayos de idoneidad normalmente realizados en el laboratorio del proveedor.



Sección 8

Control de calidad de obras completadas



8 / Control de calidad de obras completadas

8.1 General

Es muy importante que el Constructor cumpla con las normas relacionadas con la garantía de calidad y control, y que el proceso de producción sea supervisado y gestionado por personas competentes con una formación y experiencia adecuadas.

El hormigón colocado en pilotes perforados, pantallas y elementos portantes normalmente se vierte en una excavación abierta y el proceso de colocación no es visible desde la superficie. Es posible que se detecten algunas imperfecciones en el hormigón endurecido aun cuando el Constructor haya empleado buenas prácticas en los métodos de ejecución. Los requisitos de control de calidad deben, por tanto, permitir la aceptación de estas imperfecciones siempre y cuando no afecten al rendimiento estructural y la durabilidad de las obras completadas. En pos de la eficiencia y coherencia de las inspecciones y la aceptación, las imperfecciones aceptables deben definirse claramente en los procedimientos de trabajo y en los requisitos de inspección y ensayo.

La definición de las imperfecciones aceptables puede basarse en la experiencia anterior o en pruebas de construcción realizadas antes de comenzar los trabajos principales. Normalmente es mucho mejor dedicarle tiempo y esfuerzo a las pruebas previas frente a especificar ensayos de control de calidad caros y detallados después de terminar las obras. Otra opción es descubrir y ensayar una muestra limitada de pilotes o pantallas tras la construcción de los primeros elementos, como parte de los procedimientos de garantía y control de calidad, lo que permite implementar en una fase temprana las medidas correctoras necesarias.

8.2 Métodos de ensayo posteriores a la construcción

Una serie de métodos, tanto invasivos como no invasivos, suelen estar disponibles para proporcionar información sobre la geometría y la calidad de los pilotes o pantallas.

El *Apéndice C* aporta una visión general de los métodos.

Los métodos de ensayo no invasivos son a menudo difíciles de interpretar correctamente, y requieren conocimiento y experiencia especializada.

Las imperfecciones pueden corresponder, generalmente, a una de estas tres categorías:

- Materiales anómalos (inclusiones)
- Canalizaciones
- Acolchado (puede denominarse también efecto “sombra”)

El *Apéndice D* da una descripción más detallada de cada categoría de imperfección, junto con ejemplos.

Si las imperfecciones se convierten en defectos y si éstos son frecuentes, puede ser posible postular el mecanismo de formación de la imperfección, que si se detecta a tiempo permitirá los cambios en los materiales, detalles constructivos o procesos que eviten una mayor incidencia.

Las imperfecciones pueden ser causadas por detalles constructivos inapropiados o por un hormigón que no tiene las propiedades de flujo o de estabilidad adecuadas para dichos detalles y procedimiento de colocación, o por una mano de obra deficiente. La aplicación de las recomendaciones de esta guía, siguiendo en particular el procedimiento de interacción entre todas las partes involucradas, debería ayudar a minimizar dichas imperfecciones.



Sección 9

Modelado numérico del flujo de hormigón



9 / Modelado numérico del flujo de hormigón

9.1 Introducción

Los métodos de modelado numérico (ej.: empleando un Modelo de Fluido de Bingham) son extremadamente útiles para entender la importancia individual de cada factor que afecta al flujo del hormigón, así como para evaluar la sensibilidad a los cambios en cada factor, tal y como ilustra la *Tabla F.1*.

Al fijar las propiedades reológicas del hormigón y el fluido de soporte y definir sus condiciones de contorno, resulta posible modelar de forma realista el flujo de una masa de hormigón dentro de una excavación.

La *Figura 18* muestra los resultados de un pilote perforado de 1,5 m [5 pies] de diámetro y una profundidad de 16 m [52 pies] con armaduras, y un vertido de hormigón que simula el levantamiento por fases del tubo tremie. Se pueden consultar resúmenes de más simulaciones con modelos numéricos de los socios académicos en Li et al, 2018.

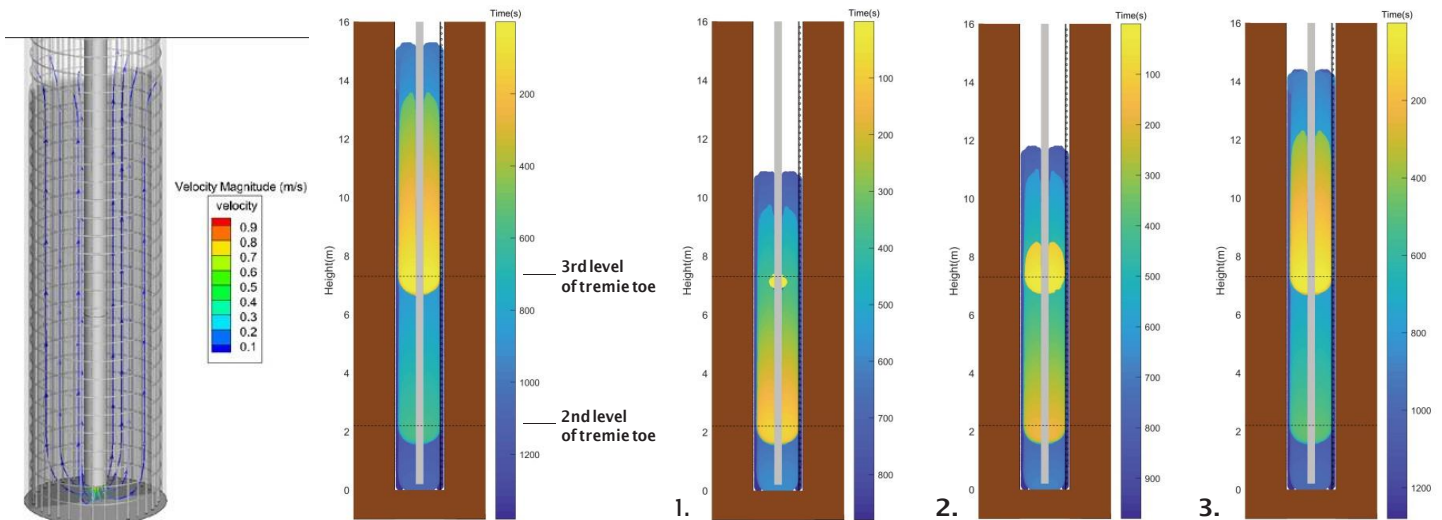
Las simulaciones demuestran que el flujo de la masa de hormigón puede modelarse con éxito y que los factores particulares se pueden aislar para mostrar su impacto individual sobre los mecanismos de flujo. Por ejemplo, al verter hormigón con una tensión de fluencia más baja sobre hormigón ya vertido (con tensión de fluencia alta) puede dar lugar a patrones de flujo irregulares.

9.2 Estudios realizados

El Grupo de Trabajo ha colaborado con socios académicos revisando los estudios con modelos para determinar las interrelaciones fundamentales y las sensibilidades correspondientes.

FIGURA 18

SIMULACIONES QUE MUESTRAN EL FLUJO DE LA MASA DE HORMIGÓN SEGÚN ISOCURVAS DE VELOCIDAD (IZQUIERDA), Y SEGÚN HORMIGÓN TENIDO TRAS EL IZADO DEL TUBO TREMIE POR FASES (LI ET AL, 2018)

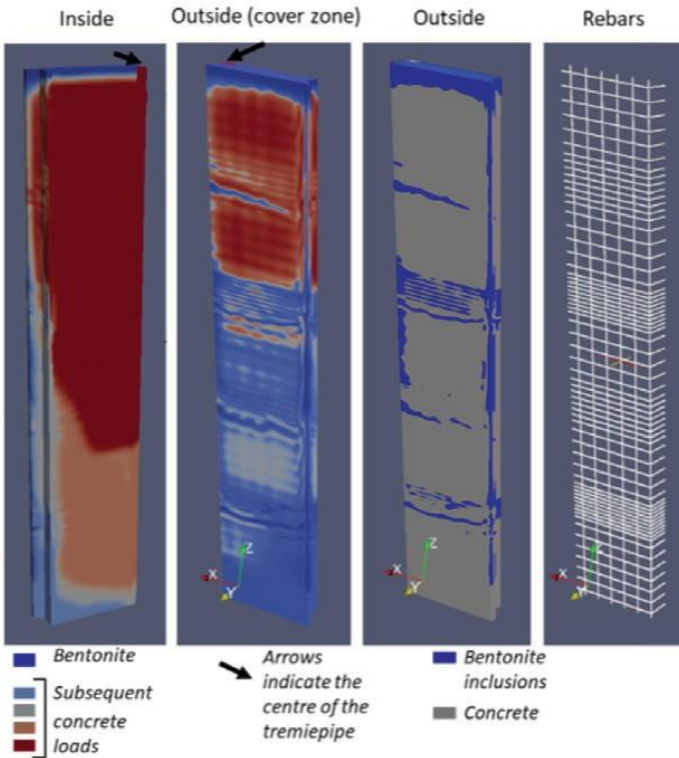


- 3rd level of tremie toe = Tercer nivel de punta del tremie
- 2nd level of tremie toe = Segundo nivel de punta del tremie
- Height = Altura
- Time = Tiempo
- Velocity Magnitude = Magnitud de velocidad
- Velocity = Velocidad

La *Figura 19* muestra una simulación de un panel de muro pantalla con una variación en la separación de las armaduras a diferentes alturas, resaltando el riesgo de inclusiones en la zona de recubrimiento debido a las restricciones al flujo (Li et al, 2018).

FIGURA
19

SIMULACIONES DEL FLUJO DE LA MASA DE HORMIGÓN EN UN CUARTO DE PANEL DE MURO PANTALLA, VISTO DESDE DENTRO (IZQ) Y DESDE FUERA DE UN CUARTO DE PANEL, CON INCLUSIONES DEBIDAS A LA CONCENTRACION DE ARMADURAS (IMAGENES CORTESÍA DE JAN VAN DALEN)



- Inside = Dentro
- Outside = Fuera
- Cover zone = Zona de recubrimiento
- Rebars = Armaduras
- Bentonite inclusions = Inclusiones de bentonita
- Arrows indicate the centre of the tremie pipe = Las flechas indican el centro del tubo tremie
- Subsequent concrete loads = Cargas de hormigón sucesivas

La revisión de los estudios con modelos ha dado lugar a un gran número de conclusiones importantes que se valoran en la *Tabla F.1*. El trabajo de investigación conjunto realizado por el Grupo de Trabajo y sus socios académicos aporta más detalles sobre los métodos de modelado numérico (Li et al, 2018).

9.3 Limitaciones

El tiempo de procesamiento de las simulaciones depende del grado de detalle del modelo y puede durar, con la tecnología actual, hasta varias semanas para cada situación numérica particular. La definición precisa de la forma y el tamaño de las armaduras aumenta considerablemente el tiempo de cálculo. La opción de reemplazar las armaduras por una membrana porosa da una buena correlación, pero conlleva mucho menos tiempo de cálculo (Roussel y Gram, 2014).

Es importante equilibrar la complejidad del modelo con la sensibilidad prevista a la modificación de los parámetros (basándose en la experiencia de simulaciones anteriores) para reducir el tiempo de cálculo y poder realizar más simulaciones.

La simulación numérica es una herramienta potente para resolver las ecuaciones diferenciales parciales que rigen y surgen del modelo físico. Por tanto, la importancia de la simulación numérica está limitada a la capacidad del modelo físico empleado (ej.: Modelo de fluido de Bingham).

Actualmente, se están llevando a cabo trabajos adicionales con ensayos a escala real, cuyos resultados luego se contrastan con aquellos derivados de los modelos.



Apéndice A

Métodos de ensayo para caracterizar el hormigón fresco



Apéndice A / Métodos de ensayo para caracterizar el hormigón fresco

Los ensayos prácticos descritos en este apéndice pueden utilizarse para determinar:

- La trabajabilidad, representada por la viscosidad y la tensión de fluencia
- La retención de la trabajabilidad, incluida la tixotropía
- La estabilidad

Nota: Los ensayos deben realizarse siguiendo estrictamente los métodos descritos en este apéndice. Cualquier desviación debe quedar claramente documentada.

A.1.1 Ensayo de escurrimiento según EN 12350-8 y ASTM C1611

PRINCIPIO: El escurrimiento es una medida de la trabajabilidad, y puede relacionarse directamente con la tensión de fluencia.

PROCEDIMIENTO: El ensayo se basa en el ensayo de escurrimiento descrito en las normas EN 12350-2 y ASTM C143. El cono hueco truncado de 300 mm [12 pulg.] y la placa base se humedecen y el cono se coloca sobre la placa, véase la *Figura A.1*, y se rellena de hormigón fresco. Cuando el cono se levanta, el hormigón asienta y fluye. El diámetro final del hormigón se mide (escurrimiento en mm). La muestra para el ensayo debe volverse a mezclar antes de llevarlo a cabo, empleando un contenedor de para remezclar de al menos 10 l [2,6 GAL] y una pala cuadrada.

Los aparatos de ensayo, compuestos por un cono truncado y una placa de acero, tal y como se muestra en la *Figura A.1*, deben seguir las normas EN 12350-2 o ASTM C143. El cono es el mismo que se utiliza en el ensayo de asentamiento, y la placa base debe estar compuesta por un material no absorbente ni susceptible de ser atacado/deteriorado por la pasta de cemento de manera que no restrinja el flujo del hormigón. Es importante humedecer la placa y el molde una vez limpios antes de llenar el cono con hormigón.

Siempre y cuando su trabajabilidad sea suficiente para autocompactarse, el hormigón no necesita compactarse por capas, pudiendo ser vertido de una vez sin necesidad de agitación o compactación mecánica. Se colma de hormigón el molde para mantener cierto exceso antes de enrasar su superficie por medio de un movimiento de corte y vaivén de una barra. El hormigón derramado debe retirarse de la placa antes de levantar el cono, y con cuidado levantarlo de forma constante (antes de que pasen 30 s desde su llenado) en un tiempo de entre 1 y 3 s.

Después de que el hormigón ha dejado de fluir, debe medirse dos veces el diámetro del material esparcido (torta) en ángulo recto redondeando hasta los 10 mm [0,4 pulg.] más cercanos y registrarse el diámetro medio. Si la variación entre ambos valores es mayor a 50 mm [2 pulg.], debe tomarse y ensayarse una nueva muestra.

OBSERVACIONES: Este ensayo puede combinarse con el de velocidad de escurrimiento (A.1.2) y el ensayo de Índice de Estabilidad Visual (VSI) (A.1.3).

A.1.2 Ensayo de velocidad de escurrimiento

PRINCIPIO: La velocidad de escurrimiento es una medida de la trabajabilidad, y puede relacionarse directamente con la viscosidad.

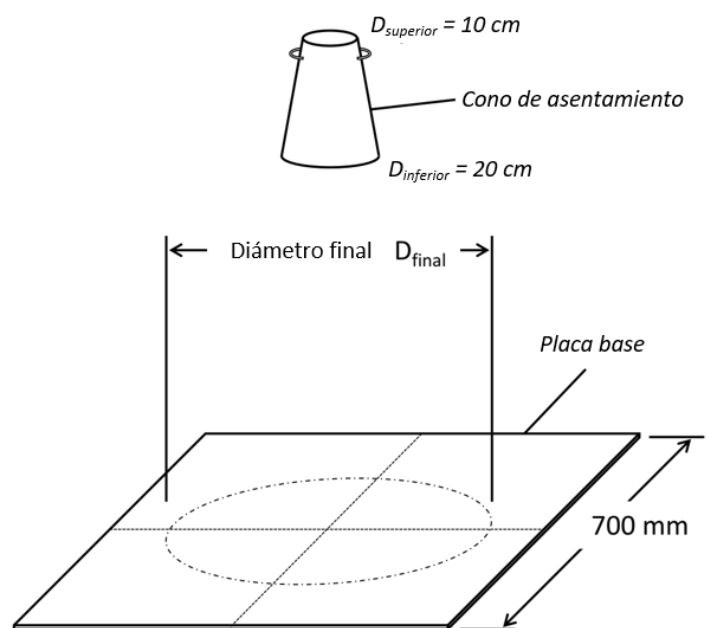
PROCEDIMIENTO: El montaje del ensayo es igual que el del ensayo de escurrimiento, véanse A.1.1 y la *Figura A.1*. Además, se necesita un cronómetro con una precisión de hasta 0,1s.

Cuando se levanta el cono, el hormigón asienta y fluye, y se mide el tiempo T_{final} [s] que tarda el hormigón en esparcirse hasta el diámetro final D_{final} [mm]. El diámetro final es igual al escurrimiento (véase A.1.1), es decir, el valor medio entre los dos diámetros medidos en ángulo recto y redondeado a los 10 mm más cercanos [1/2 pulg.]. El cronómetro debe ponerse en marcha inmediatamente después de separar el cono de la placa y detenerse, con redondeo al segundo más cercano, cuando pueda considerarse que el hormigón ha dejado de fluir (movimiento horizontal menor que 1 mm/s). La distancia recorrida $(D_{\text{final}} - 200)/2$ [mm] dividida por el tiempo transcurrido t_{final} [s] es la velocidad de escurrimiento [mm/s]. (en EE.UU. se puede utilizar la expresión $(D_{\text{final}} - 8)/2$ [pulg.] para obtener [pulg./s]).

OBSERVACIONES: El ensayo puede combinarse con el ensayo de escurrimiento (A.1.1) y el de Índice de Estabilidad Visual (VSI) (A.1.3). El ensayo original especifica un tiempo de flujo T_{500} como el tiempo que necesita el hormigón para esparcirse hasta un diámetro de 500 mm [20 pulg.]. Como es posible que el hormigón tremie no se esparza tanto, esta medida se considera inaplicable en este caso.

FIGURA A.1

EQUIPO PARA LOS ENSAYOS COMBINADOS DE ESCURRIMIENTO, VELOCIDAD DE ESCURRIMIENTO Y VSI



A.1.3 Ensayo de Índice de Estabilidad Visual (VSI) según ASTM C1611

PRINCIPIO: El Índice de Estabilidad Visual (VSI) es el resultado de una evaluación visual y clasifica la resistencia a la segregación.

PROCEDIMIENTO: Igual que con el escurrimiento, véase A.1.1, seguido de una inspección visual bajo los criterios presentados en la Tabla A.1.

OBSERVACIONES: Este ensayo solo puede indicar tendencias obvias de segregación y puede no ser suficiente para detectar mezclas de hormigón sensibles. Para mediciones más fiables, y en caso de duda, deben emplearse los ensayos de segregación (A.7) o de segregación por tamizado.

TABLA A.1 CLASES DE ÍNDICE DE ESTABILIDAD VISUAL VSI (SEGÚN LA NORMA ASTM C1611)

VALOR VSI	CRITERIO
0 = Muy estable	No se aprecia segregación o exudación
1 = Estable	No se aprecia segregación; ligeros indicios de exudación observados en forma de "brillo" sobre la masa de hormigón
2 = Inestable	Ligero halo de mortero < 10 mm [1/2 pulg.] y/o acumulación de áridos en el centro de la masa de hormigón
3 = Altamente inestable	Segregación clara, apreciándose un gran halo de mortero > 10 mm [1/2 pulg.] y/o una gran acumulación de áridos en el centro de la masa de hormigón

FIGURA A.2 EJEMPLOS DE CLASES DE ÍNDICE DE ESTABILIDAD VISUAL VSI

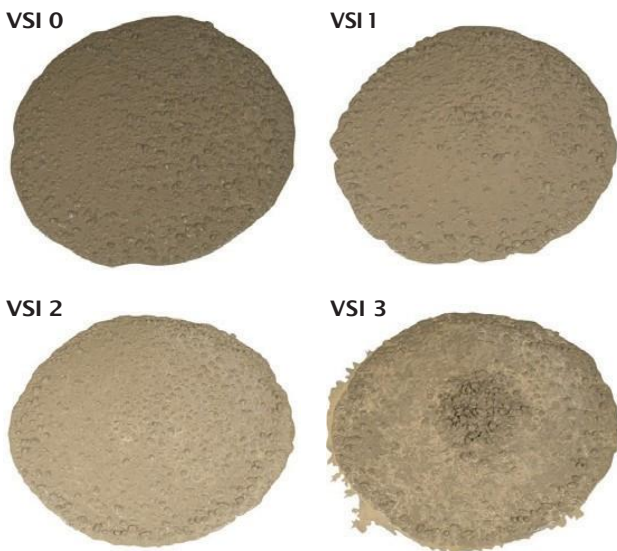


Foto cortesía de BASF Corporation

A.2 Ensayo de asentamiento según EN 12350-2 y ASTM C143

PRINCIPIO: El asentamiento del hormigón ofrece una medida de la trabajabilidad.

PROCEDIMIENTO: Se rellena y compacta un molde con hormigón fresco compuesto por un cono hueco truncado de 30 cm [12 pulg.], véase la Figura A.1. Cuando el cono se levanta el hormigón asienta y se mide la distancia vertical de asentamiento del hormigón.

OBSERVACIONES: Se puede detectar potencialmente una seria falta de estabilidad de forma visual.

Nota 1: Para el rango de escurrimiento de 400-550 mm [16-22 pulg.], Kraenkel y Gehlen (2018) encontraron un rango de asentamiento equivalente de 220-270 mm [9-11 pulg.]. No obstante, si el asentamiento se plantea como ensayo de aceptación, es necesario establecer una correlación para la mezcla de hormigón en cuestión durante los ensayos de idoneidad.

Nota 2: Dada la tolerancia especificada de 30 mm [1 pulg.] para el ensayo de asentamiento, este ensayo no se considera apropiado para hormigón tremie con alta fluidez. Además, la norma EN 206 estipula en su Apéndice L que, debido a la falta de sensibilidad del método de ensayo, se recomienda emplear el ensayo de asentamiento únicamente para $D_{\text{asentamiento}} < 210$ mm [8 pulg.]. En consecuencia, este ensayo debería ser aplicado únicamente si puede especificarse la trabajabilidad mediante un valor objetivo que no resulte mayor a 210 mm [8 pulg.].

A.3 Ensayo de la mesa de sacudidas según EN 12350-5

PRINCIPIO: El esparcimiento del hormigón permite medir la trabajabilidad del hormigón.

PROCEDIMIENTO: El hormigón fresco se rellena y compacta en un cono hueco truncado de 20 cm [8 pulg.] de altura. Tras levantar el cono, se levanta la placa y se deja caer 15 veces hasta dar con el esparcimiento final, que es el que se mide.

OBSERVACIONES: Visualmente se puede detectar de forma potencial si existe una seria falta de estabilidad. Debido a los impactos producidos al soltar la placa, puede ser posible detectar una tendencia a la segregación dinámica.

Nota 1: Para el rango del escurrimiento de 400-550 mm [16-22 pulg.], Kraenkel y Gehlen (2018) encontraron un rango equivalente de esparcimiento de 560-640 mm [22-25 pulg.] en el ensayo de la mesa de sacudidas. No obstante, si la mesa de sacudidas se plantea como ensayo de aceptación, es necesario establecer una correlación para la mezcla de hormigón en cuestión durante los ensayos de idoneidad.

Nota 2: En comparación con el ensayo de escurrimiento, el ensayo de la mesa de sacudidas tiene una sensibilidad menor, y además emplea impactos dinámicos que pueden ser más apropiados para una colocación dinámica (por ejemplo, vibrando el hormigón). Si se utiliza el ensayo de la mesa de sacudidas como prueba de aceptación, debe considerarse una tolerancia de 40 mm [1.5 pulg.] tal y como estipula la norma EN 206, Apéndice L.

Apéndice A/ Métodos de ensayo para caracterizar el hormigón fresco

A.4 Ensayo de flujo

A.4.1 Ensayo de flujo en cono modificado

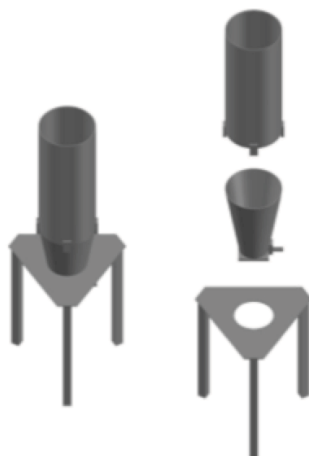
PRINCIPIO: El tiempo de vaciado del hormigón desde el cono modificado es una medida de su trabajabilidad, y puede relacionarse directamente con la viscosidad.

PROCEDIMIENTO: Se monta un cilindro hueco sobre un cono hueco truncado invertido con una compuerta en su apertura inferior que permanece cerrada antes de empezar el ensayo, véase la *Figura A.3*. Se rellena el molde con 20 litros [5 GAL] de hormigón fresco dejando un exceso en la parte superior. El sobrante se enrasa con una barra o una regla. La operación de llenado debe llevarse a cabo en no más de un minuto. En no más de otro minuto debe abrirse rápidamente la compuerta y registrarse el tiempo de vaciado del hormigón por gravedad hasta que el cono se quede vacío. El tiempo se mide con una precisión de 0,1 s.

OBSERVACIONES: Para albergar 20 litros [5 GAL] (19,9 l según los cálculos) de hormigón fresco en total, la altura del cilindro debe ser de 465 mm [18 pulg.] con un diámetro interior constante de 200 mm [7,8 pulg.] (que alberga 14,6 l [3,8 GAL], sumando al volumen del cono, que alberga 5,3 l [1,4 GAL]). El cono truncado puede ser el cono estándar utilizado en el ensayo de asentamiento. Un procedimiento alternativo para determinar el tiempo de vaciado es el ensayo de flujo en cono invertido, véase A.4.2.

FIGURA
A.3

EQUIPO (EJEMPLO) PARA EL ENSAYO DE FLUJO EN CONO MODIFICADO



Imágenes cortesía de Thomas Kraenkel

A.4.2 Ensayo de flujo en cono invertido

PRINCIPIO: El tiempo de vaciado del hormigón desde el cono invertido es una medida de la trabajabilidad y puede relacionarse con la viscosidad.

PROCEDIMIENTO: Empleando el mismo equipo del ensayo de escurrimiento según el apartado A.1 más un cronómetro, el molde se coloca boca abajo (invertido) sobre la placa base con la apertura de 100 mm abajo. El cono se rellena de hormigón en una sola operación y se compacta 25 veces con una barra. Después de enrasar la superficie y esperar 30 s, el cono se levanta verticalmente unos 40 cm [12 a 16 pulg.] en un tiempo de entre 2 y 4 segundos. Se registra el tiempo de vaciado del hormigón hasta que el cono ha quedado vacío. El tiempo se mide con una precisión de 0,1 s.

OBSERVACIONES: Si se piensa emplear este ensayo como prueba de conformidad o aceptación, en los ensayos de idoneidad debe determinarse y acordarse el valor objetivo. Debido al volumen inferior de hormigón en comparación con el ensayo de flujo en cono modificado (A.4.1), junto con la posible influencia de la operación de izado del cono, el tiempo de vaciado del cono invertido puede ser menos preciso que en el caso del cono modificado, sobre todo para las viscosidades más bajas. No obstante, este ensayo ha proporcionado datos fiables en el caso de mezclas de hormigón tremie para detectar viscosidades bajas, medias o altas. Sin una especificación detallada, el rango recomendado para los ensayos de aceptación es de un mínimo de 2 segundos y un máximo de 7 segundos.

A.5 Ensayo manual de corte con molinete

PRINCIPIO: La resistencia a cortante del hormigón fresco permite medir su tensión de fluencia.

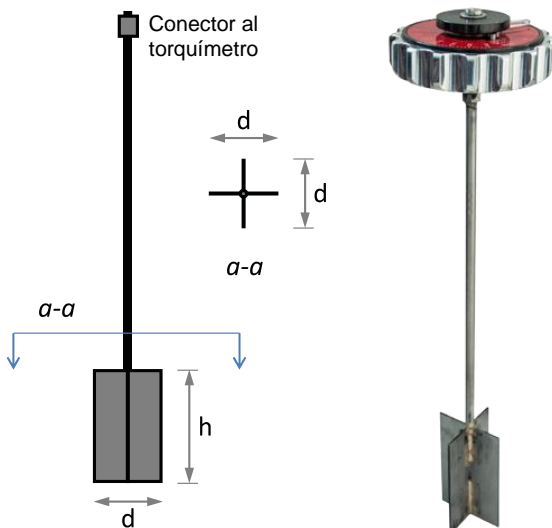
PROCEDIMIENTO: Se prepara una muestra de hormigón fresco en un recipiente de volumen suficiente y unos 20 cm [8 pulg.] de altura. En el indicador del torquímetro se mueve la aguja en sentido antihorario hasta cero. A continuación, se introducen suavemente las paletas de corte en la muestra. La parte superior de las paletas debe quedar al menos 50 mm [2 pulg.] por debajo de la parte superior del hormigón. Por último, se rota manualmente el molinete y se registra el par de torsión máximo.

OBSERVACIONES: Una diferencia entre el par de torsión medido en el hormigón fresco antes y después de dejarlo reposar da una indicación de su tixotropía. Se pueden utilizar hasta 5 celdas para ensayar una serie de muestras de hormigón con diferentes tiempos de reposo. Debe insertarse la celda en cada muestra y ensayarla a cortante, por ejemplo, inmediatamente y después de pasados 2, 4, 8 y 15 minutos. El aumento de la tensión de fluencia estática es una medida directa de la tixotropía del hormigón y puede calcularse como el ritmo de estructuración A_{st} (en Pa/min), véase Roussel y Cussigh, 2008. Un aumento del 100% en 15 minutos puede considerarse una tixotropía excesiva. Para la evaluación completa de la tixotropía permitida debe establecerse una correlación con el escurrimiento. Con objeto de garantizar una selectividad suficiente, deben adaptarse las paletas en comparación con las típicas de suelos cohesivos: la celda tendrá una altura $h = 100$ mm [4 pulg.] y un diámetro $d = 60$ mm [2 pulg.] (4 palas a 90° de 30 mm de ancho), véase la Figura A.4. El eje tendrá suficiente longitud (unos 300 mm [12 pulg.]) para que el molinete se pueda insertar bajo la superficie del hormigón.

Nota 1: Un diámetro de 50 mm [2 pulg.] para la celda del molinete también se considera aceptable.

FIGURA
A.4

DIMENSIONES DEL EJE Y LA CELDA DEL MOLINETE DE CORTE PARA EL ENSAYO MANUAL DE CORTE CON MOLINETE (NEW ZEALAND GEOTECHNICAL SOCIETY, 2001)



A.6 Ensayo de retención de la trabajabilidad

PRINCIPIO: El ensayo de retención de la trabajabilidad mide el periodo de tiempo a lo largo del cual el hormigón retiene el escurrimiento especificado.

PROCEDIMIENTO: Repetir los ensayos de escurrimiento (A.1.1) con intervalos discretos hasta llegar al tiempo de vertido total necesario para el elemento en cuestión. Se está actualizando la norma EN 12350 (Ensayos de hormigón fresco) para incluir requisitos de muestreo y almacenamiento en los ensayos de retención de la trabajabilidad. A continuación, se presentan los requisitos en fase de borrador.

Tras la fabricación del hormigón (para ensayos de campo preferiblemente 3 m^3 [4 cy] pero al menos 1 m^3 [1.3 cy]), cada muestra (o suficientes sub-muestras) debe guardarse en contenedores cilíndricos sellables fabricados con un material no absorbente y poco susceptible al ataque de la pasta de cemento, aptos para alojar y conservar pequeñas cantidades de hormigón. La relación entre la altura y el diámetro debe estar en un rango de 0,7 a 1,3 y generar un tamaño suficiente para albergar la muestra. La cantidad de hormigón en la muestra no debe ser inferior a 1,5 veces la cantidad estimada para los ensayos, y debe ser suficiente para rellenar el contenedor sellado hasta una distancia de entre 25 mm [1 pulg.] y 50 mm [2 pulg.] de la tapa. Cuando una muestra se necesite para medir la retención del asentamiento tras un determinado tiempo, debe vaciarse el hormigón del contenedor sellado sobre un contenedor o bandeja de remezclado y volver a mezclarse empleando una pala antes de llevar a cabo el ensayo. Deben llevarse a cabo ensayos de asentamiento cada hora (cada 2 h para vida trabajable > 4 h).

OBSERVACIONES: Para realizar un ensayo simplificado de retención de la trabajabilidad, el hormigón del ensayo puede conservarse en una carretilla cubierta.

Para verificar la tendencia tixotrópica de una mezcla de hormigón, deben llenarse dos conos de asentamiento con hormigón fresco y realizarse un ensayo de escurrimiento de inmediato. Después de un periodo de reposo de 15 minutos, debe realizarse el segundo ensayo de escurrimiento. Si la diferencia en los valores obtenidos es mayor a 30 mm [1 pulg.] debe repetirse el ensayo. Los resultados preliminares del Proyecto de Investigación y Desarrollo indican que la tixotropía es significativa en los casos en que el escurrimiento después de 15 minutos de reposo es 50 mm [2 pulg.] (o más) menor que el valor inicial.

A.7 Ensayo de segregación estática

A.7.1 Ensayo de segregación estática (o prueba de lavado) de acuerdo con la norma ASTM C1610 y la directriz alemana DAFStb para HAC (hormigón auto-compactante)

PRINCIPIO: El ensayo evalúa la segregación estática mediante la variación de la distribución del árido grueso a lo largo de la altura.

PROCEDIMIENTO: Una columna hueca de 3 cilindros conectados se llena y se compacta con hormigón fresco, véase la Figura A.5 (la norma y directriz original no permiten la compactación o la vibración para mezclas de HAC). Después de un período establecido, por ejemplo de 2 horas, la proporción de árido grueso en los cilindros superior e inferior se determina por lavado y tamizado. La diferencia en el árido grueso es una medida de la segregación.

OBSERVACIONES: La prueba se desarrolló para hormigón auto-compactante (HAC) con baja tensión de fluencia de forma intencionada, donde la segregación de los áridos la controla la viscosidad y por lo tanto depende del tiempo. Dependiendo del tiempo de trabajabilidad, también en el caso del hormigón tremie, puede resultar más apropiado un tiempo de reposo adaptado. Se puede emplear el Índice de Estabilidad Visual con Endurecimiento (HVSI) si se considera el tiempo de fraguado completo, véase A.7.2.

FIGURA A.5 MONTAJE DEL ENSAYO DE SEGREGACIÓN ESTÁTICA SEGÚN NORMA ASTM C1610



A.7.2 Ensayo de índice de estabilidad visual con endurecimiento (HVSI) según AASHTO R81

PRINCIPIO: El ensayo evalúa la segregación estática mediante el examen de la distribución del árido en una probeta de ensayo endurecida y cortada en dos.

PROCEDIMIENTO: Se llena de hormigón un molde cilíndrico normalizado, sin compactación ni vibración, y se deja endurecer sin perturbaciones. Una vez lo suficientemente endurecida, la probeta se corta en dos, axialmente, y la distribución de los áridos se compara con las descripciones y fotografías estándar para determinar la clase HVSI, véase la Tabla A.2.

OBSERVACIONES: El ensayo se desarrolló para hormigón auto-compactante, pero es probable que sea igualmente aplicable al hormigón tremie. Tiene la ventaja de tener en cuenta el tiempo de fraguado completo, y que no necesita equipo especializado más que una sierra para hormigón. El tiempo de curado para que la muestra de hormigón sea lo suficientemente dura como para cortarla debe dar lugar a una resistencia a compresión mínima de 6 MPa [900 psi], y no ser inferior a 24 h.

TABLA A.2 CLASIFICACIÓN PARA EL ENSAYO DE ÍNDICE DE ESTABILIDAD VISUAL CON ENDURECIMIENTO (HVSI)

HVSI	CLASIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN
0	Estable	No hay capa de mortero en la parte superior del plano de corte y/o no hay variación de tamaño y porcentaje de área en la distribución del áridos gruesos de arriba a abajo
1	Estable	Ligera capa de mortero, con altura igual o menor a 6 mm [1/4 pulg.], en la parte superior del plano de corte y/o ligera variación de tamaño y porcentaje de área en la distribución de áridos gruesos de arriba a abajo
2	Inestable	Capa de mortero, con altura menor o igual a 25 mm [1 pulg.] y mayor de 6 mm [1/4 pulg.], en la parte superior del plano de corte y/o variación moderada de tamaño y porcentaje de área en la distribución de áridos gruesos de arriba a abajo
3	Inestable	Segregación clara evidenciada por una capa de mortero con altura mayor a 25 mm [1 pulg.] y/o variación considerable de tamaño y porcentaje de área en la distribución de áridos gruesos de arriba a abajo

A.8 Ensayo de segregación por tamizado según norma EN 12350-11

PRINCIPIO: La cantidad de material que pasa por un tamiz con aperturas cuadradas de 5 mm [0,2 pulg.] en un contenedor es una medida de la segregación.

PROCEDIMIENTO: Una muestra de 10 litros [2,6 GAL] ($\pm 0,5$ l) de hormigón fresco se guarda durante 15 minutos en un cubo con tapa para evitar la evaporación. Debe pesarse un contenedor vacío, colocarse el tamiz (seco) encima y pesarse de nuevo o tarar la báscula a cero. Tras 15 minutos de reposo, se debe retirar la tapa del cubo y verificar si hay agua de exudación (registrar observaciones). Deben verse 4,8 kg [10,6 lbs] ($\pm 0,2$ kg) de la muestra de hormigón (incluyendo cualquier agua de exudación existente) desde una altura de caída de 500 mm [20 pulg.] (± 50 mm) de forma continua y cuidadosa sobre el tamiz. Tras 120 s (± 5 s), debe retirarse el tamiz sin generar vibración. La cantidad de material en el contenedor se registra como la porción segregada en forma de % de la masa vertida sobre el tamiz.

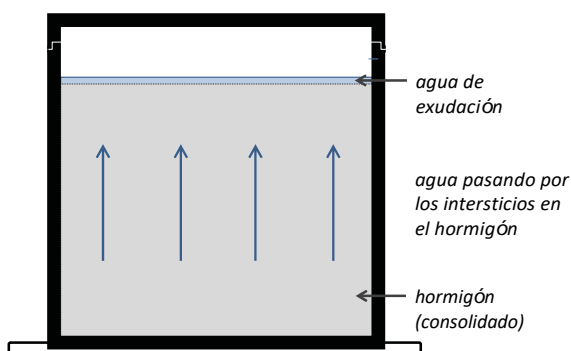
A.9 Ensayo de exudación de acuerdo (aproximadamente) con EN 480-4, ASTM C232 y NF XP P18468

PRINCIPIO: La cantidad de agua en la superficie del hormigón en un contenedor es una medida de la exudación, véase la *Figura A.6*.

PROCEDIMIENTO: Se introduce hormigón hasta una altura de 250 mm [10 pulg.] en un recipiente cilíndrico con un diámetro interior de 250 mm [10 pulg.] y una altura interior de en torno a 300 mm [12 pulg.]. La segregación del agua en la superficie se mide cada 30 minutos hasta que se puede establecer un ritmo constante de exudación o hasta que la exudación se detiene (al fraguar el hormigón).

OBSERVACIONES: El tiempo en que empieza la exudación y el ritmo constante de exudación (véanse la *Figura 8* en el apartado 3.3) tras comenzar la exudación son esenciales para describir el potencial de exudación. Se considera aceptable una tasa de exudación promedio en 2 horas de menos de 0,1 ml/min [0,003 oz/min]. Según la norma NF XP P 18468, el periodo de 2 horas relevante con un ritmo de exudación supuestamente constante comienza cuando se registra el segundo valor de agua en superficie distinto de cero.

FIGURA A.6 ESQUEMA DE MONTAJE PARA DETERMINAR LA EXUDACIÓN POR GRAVEDAD



A.10 Ensayo de filtrado

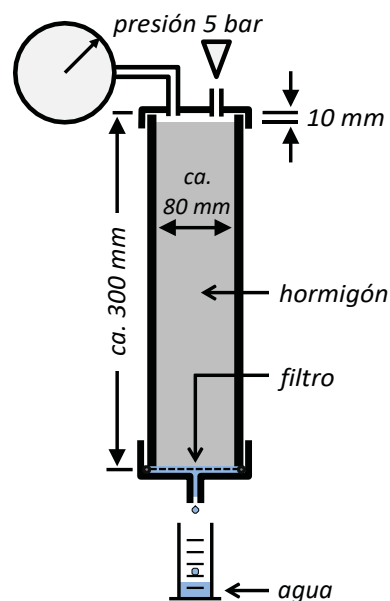
A.10.1 Ensayo de filtrado Bauer

PRINCIPIO: El ensayo simula la capacidad de retención de agua del hormigón fresco bajo la presión y determina la pérdida por filtrado a través de un filtro. (Véase la *Figura A.7*).

PROCEDIMIENTO: Se llena un recipiente cilíndrico con 1,5 litros [0,4 GAL] de hormigón fresco y se presuriza con aire comprimido a 5 bar [73 psi] durante 5 minutos. El agua que se separa del hormigón en masa a través de un filtro de papel se recoge en la parte inferior del recipiente, en una probeta. La pérdida por filtrado registrada es una medida de la estabilidad al filtrado del hormigón.

OBSERVACIONES: El tamaño máximo de árido debe limitarse a 20 mm. Debe emplearse papel de filtro endurecido especial API de 90 mm [3,54 pulg.] de diámetro (Fann® no 206051). Según un criterio de aceptación de 15 l/m³ (tomado de Z17, CIA) para el hormigón tremie en cimentaciones profundas (profundidad >15 m [50 pies]), el valor correspondiente de ensayo para la muestra de 1,5 l [0,4 GAL] es aproximadamente 22 ml [0,7 oz]. El espesor registrado de la torta de filtrado (cake) y su consistencia también aportan una indicación de la robustez del hormigón frente a la pérdida de trabajabilidad. Una torta blanda y flexible es preferible frente a una torta dura. Un método alternativo de ensayo para determinar las pérdidas por filtración es el ensayo de filtrado con prensa "austríaca", véase el apartado A.10.2.

FIGURA A.7 MONTAJE DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA PÉRDIDA DE AGUA DEL HORMIGÓN FRESCO A PRESIÓN (BAUER)



Nota: el equipo de ensayo está basado en los ensayos estándar para fluidos de perforación según API RP 13B-1, también mencionado en la norma EN ISO 10414-1.

A.10.2 Ensayo de filtro prensa para hormigón según las directrices austríacas sobre hormigón blando (Merkblatt, Weiche Betone, 2009)

PRINCIPIO: El ensayo simula la capacidad de retención de agua del hormigón fresco bajo presión hidrostática y determina la pérdida por filtrado a través de un filtro, véase la *Figura A.8*.

PROCEDIMIENTO: Se llena un recipiente cilíndrico con 10 litros [2,5 GAL] de hormigón fresco y se presuriza con aire comprimido a 3 bar [44 psi]. El agua que se separa del hormigón en masa a través de un filtro de papel se recoge en la parte inferior del recipiente, en una probeta. La pérdida por filtrado registrada es una medida de la estabilidad al filtrado del hormigón.

OBSERVACIONES: Los ensayos internos del sector indican una correlación entre este ensayo "austríaco" de filtro prensa y el ensayo de filtrado Bauer, definida por $V_{\text{loss-15,ÖVBB}} [l/m^3] / V_{\text{loss,BAUER}} [l/m^3] = 1,8$ (aprox. = 2), de forma que una pérdida por filtrado en el ensayo de filtro prensa de aproximadamente $25 l/m^3$ puede usarse como equivalente a 22 ml [0,7 oz] de pérdida de filtrado en el ensayo de filtrado Bauer. En las Directrices Austríacas sobre Hormigón Blando se establece una clase de estabilidad FW20 para el hormigón tremie cuando la profundidad excede 15 m [50 pies]. Se recomienda una pérdida por filtrado de $20 l/m^3$ [4 GAL/cy] como máximo para los ensayos de idoneidad y 15 minutos de tiempo de filtrado (el valor de ensayo correspondiente para la muestra de 10 l es 200 ml [6,8 oz]). Como criterio adicional, se puede especificar una pérdida máxima de $40 l/m^3$ [8 GAL/cy] para un tiempo de filtrado de 60 minutos. Para ensayos de aceptación, se permite una pérdida por filtrado de $25 l/m^3$ [5 GAL/cy] tras 15 minutos en el caso de la clase de estabilidad FW20.

A.11 Composición del hormigón fresco

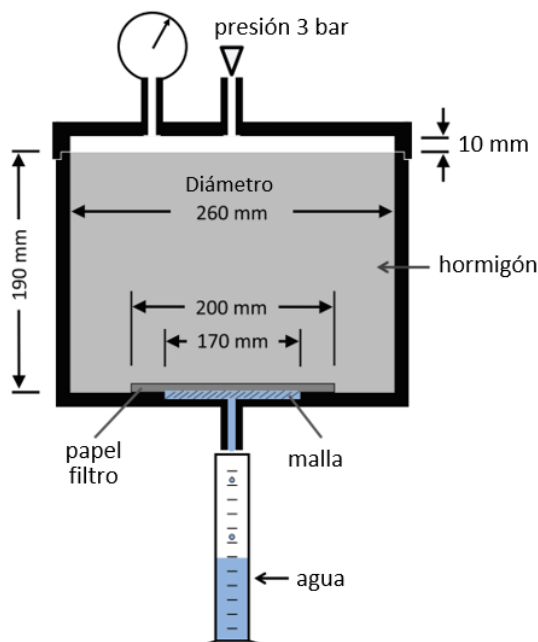
Con el fin de verificar que la composición real cumple con los valores de diseño, se pueden ensayar en un laboratorio especializado la densidad, el contenido de agua, la relación agua/cemento, el contenido de finos menores de 0,125 mm (tamiz 120), y el contenido (o la forma) del árido grueso.

El ensayo de secado en horno, donde el agua de amasado se evapora del hormigón con un horno de baja temperatura o de microondas, se puede realizar en obra para determinar el contenido de agua (por ejemplo, siguiendo la norma AASHTO T 318).

FIGURA

A.8

MONTAJE PRINCIPAL PARA DETERMINAR LA FILTRACIÓN DE AGUA DEL HORMIGÓN FRESCO A PRESIÓN (SEGÚN MERKBLATT, WEICHE BETONE, 2009)





Apéndice B

Conceptos de uso de las adiciones



El contenido mínimo de cemento especificado para el hormigón en cimentaciones profundas a menudo no es necesario para obtener el grado de resistencia requerido, sino para alcanzar propiedades específicas en estado fresco. Adiciones como cenizas volantes y GGBS (escorias de horno alto) se utilizan a menudo para reemplazar parte del cemento, lo que a su vez afecta a la trabajabilidad del hormigón fresco, a su retención del flujo y su estabilidad, así como a su resistencia, durabilidad y sostenibilidad global.

Hay disponibles tres conceptos para el uso y la aplicación de las adiciones (reactivas) de tipo II (EN 206). Estos son:

1. El concepto de valor K.
2. El concepto de prestación equivalente del hormigón (ECPC).
3. El concepto de prestación equivalente de las combinaciones (EPCC).

Las reglas para la aplicación de los tres conceptos varían dentro de los diferentes estados miembros del CEN. Para cada proyecto, el concepto debe ser cuidadosamente considerado, tanto desde el punto de vista técnico como económico.

Concepto de valor K

El concepto de valor K es un concepto normativo. Se basa en la comparación del comportamiento frente a durabilidad de un hormigón de referencia con otro en el que parte del cemento es reemplazado por una adición en función de la relación agua/cemento y el contenido de adición.

El concepto de valor K permite tener en cuenta las adiciones tipo II:

- Mediante la sustitución del término “relación agua/cemento” por “relación agua/(cemento+K * adiciones)” y;
- Con una cantidad de (cemento + K * adiciones) no menor que el contenido mínimo de cemento requerido para la clase de exposición correspondiente.

Las reglas de aplicación del concepto de valor K para las cenizas volantes conformes a la Norma Europea EN 450-1, para el humo de sílice según la EN 13263-1, y para la escoria granulada de horno alto según la EN 15167-1, junto con los cementos de tipo CEM I y CEM II/A según la norma EN 197-1 se dan en las cláusulas correspondientes de la Norma Europea EN 206:2013.

Se pueden aplicar modificaciones a las reglas del concepto de valor K donde se haya establecido su idoneidad (por ejemplo valores K mayores, incremento de la dosificación de las adiciones, el uso de otras o combinaciones de las mismas, así como otros cementos).

Para una descripción más detallada del procedimiento completo y la aplicación del concepto de valor K, se remite al lector al CEN/TR 16639.

Concepto de prestación equivalente del hormigón (ECPC)

Los principios de prestación equivalente del hormigón se han introducido en la Norma Europea EN 206.

Este concepto permite modificar los requisitos de contenido mínimo de cemento y relación máxima agua/cemento (a/c) cuando se utiliza una combinación de una adición específica y un cemento específico en que el origen de la fabricación y las características de cada uno están claramente definidos. Debe demostrarse que el hormigón tiene un comportamiento equivalente en especial con respecto a su interacción con el medio ambiente y su durabilidad en comparación con un hormigón de referencia de acuerdo con los requisitos establecidos para la clase de exposición especificada.

El cemento de referencia debe cumplir los requisitos de la Norma Europea EN 197-1 y proceder de un origen que se haya utilizado en la práctica en el lugar de uso dentro de los últimos cinco años y se haya usado para la clase de exposición seleccionada. El hormigón de referencia debe ajustarse a las disposiciones vigentes en el lugar de uso para la clase de exposición seleccionada.

La composición y los materiales constituyentes del hormigón diseñado y prescrito serán elegidos para satisfacer los requisitos especificados para el hormigón fresco y endurecido, incluyendo la consistencia, densidad, resistencia, durabilidad y protección contra la corrosión de las armaduras, teniendo en cuenta el proceso de producción y el método previsto de ejecución del hormigonado.

Concepto de prestación equivalente de las combinaciones (EPCC)

Los principios del “concepto de prestación equivalente de las combinaciones” permiten definir un rango de combinaciones de cemento, conforme con la Norma Europea EN 197-1, y adición o adiciones, habiendo establecido la idoneidad para cumplir plenamente con los requisitos de relación agua/cemento máxima, y mínimo contenido de cemento que se especifican para un hormigón.

Los elementos del método son:

1. Identificar un tipo de cemento que se ajuste a la norma europea de cemento y que tenga la misma o similar composición a la combinación prevista.
2. Evaluar si los hormigones fabricados con la combinación tienen la misma resistencia y durabilidad que los hormigones elaborados con cemento del tipo identificado para la clase de exposición seleccionada.
3. Aplicar el control de la producción que asegure que estos requisitos para los hormigones que contienen la combinación se definen e implementan.

En Europa hay tres métodos aplicables para establecer la prestación equivalente de las combinaciones: el método de Reino Unido, el método irlandés, y el método portugués. Estos tres métodos se han desarrollado por separado y difieren considerablemente en los requisitos para el control de las combinaciones. Los tres métodos se describen detalladamente en CEN/TR 16639.



Apéndice C

Métodos de ensayo en obras completadas



Realizar ensayos sobre obras completadas no es obligatorio para obras geotécnicas si su diseño cumple con las normas relevantes, y su ejecución cumple tanto con las normas de ejecución como con las reglas de buena práctica establecidas por la industria. Sin embargo, los ensayos post-construcción se han vuelto más frecuentes últimamente. Generalmente, los ensayos se emplean según las especificaciones del proyecto. Algunos ensayos necesitan prepararse antes de ejecutarse la cimentación, mientras que otros pueden aplicarse todavía cuando existen razones para sospechar que hay algún defecto (véase el Apéndice D).

Tanto los métodos destructivos como los no destructivos generalmente requieren conocimiento especializado para su realización e interpretación. Se requiere pericia a nivel técnico para llevar a cabo estas pruebas, mientras que la interpretación de los resultados debería realizarla un ingeniero cualificado con el asesoramiento del ingeniero geotécnico del proyecto.

Además de la lista de métodos de ensayo directo, el registro cross-hole sínico y el perfil térmico de integridad son representativos de los métodos de ensayo no destructivos que requieren una planificación detallada previa a la construcción. El ensayo cross-hole ya se ha especificado en muchas cimentaciones y es probable que el perfil térmico se especifique más frecuentemente en el futuro debido a las ventajas descritas. Otros métodos están disponibles y se describen en las Recomendaciones para el Piloteo, ICE SPERW, FHWA GEC, o en literatura especializada sobre ensayos no destructivos.

Si la realización de ensayos sobre obras completadas es un requisito, los ensayos no destructivos deben ser la primera opción frente a los destructivos.

Métodos de ensayo directos

- Extracción de testigos de la cimentación para investigar sus características, o para inspeccionar las condiciones de la base. Para el último caso, pueden instalarse conductos fijados a la armadura y extendidos hasta la base para facilitar la perforación y obtención de los testigos.
- Inspección de la cimentación y su base por medio de televisión de circuito cerrado, dentro de una perforación.
- Excavación para inspeccionar la superficie de la cimentación.
- Extracción de un pilote.

Registro cross-hole sínico

Transmisión de una onda acústica desde un transmisor colocado dentro de un tubo en el elemento de cimentación hacia un receptor posicionado en el mismo tubo u otro separado. El método de ensayo se detalla en la Norma Americana ASTM D6760-14, y la NF P94-160-1.

El tiempo que tarda la onda en alcanzar el receptor junto con la energía transmitida se miden y emplean para interpretar el resultado. En la mayoría de aplicaciones, fuertes anomalías en el tiempo de llegada junto con una energía menor se interpretan como anomalías ultrasónicas (potenciales defectos, imperfecciones).

Los tubos para el registro sínico se sitúan normalmente en formación dentro de la jaula de armadura de la cimentación, para no obstruir el flujo del hormigón. La posibilidad de obtener perfiles sínicos entre pares múltiples de tubos puede proporcionar una indicación de la naturaleza, posición y dimensiones de un posible defecto en el centro de la jaula de armadura y en torno al conducto. No puede proporcionar ninguna indicación de los posibles defectos en la zona de recubrimiento, es decir, entre las armaduras y la superficie de la excavación.

El ensayo es sensible a variaciones tanto en la velocidad real dentro del hormigón como en la precisión del posicionamiento de los conductos. La interpretación y evaluación de los resultados necesita personal experto y deberían incluir toda la información disponible en relación a la ejecución (Beckhaus, Heinzelmann, 2015).

Se ha demostrado que, en principio, puede investigarse la integridad entre pantallas o entre dos pilotes secundarios (incluyendo el pilote primario entre medio) si hay tubos instalados a cada lado de la(s) junta(s) (Niederleithinger et al, 2010). Sin embargo, los resultados de tales mediciones pueden ser difíciles de valorar debido a la presencia de juntas "frías" entre los elementos. Esta prueba no es aplicable cuando se emplean juntas perdidas, como por ejemplo elementos de hormigón prefabricado o de acero.

Perfil térmico de integridad

El perfil térmico de integridad consiste en medir el calor de hidratación del hormigón. Las diferencias en la conductividad térmica y la generación de calor de cualquier inclusión producen una variación de temperatura que puede medirse uno o dos días después del hormigonado. El método de ensayo viene detallado en la Norma americana ASTM D7949-14. Puede encontrarse información sobre ensayos con fibra óptica en ICE SPERW.

Las temperaturas pueden monitorizarse mediante series de termistores, métodos de medición a través de fibra óptica distribuida, u, ocasionalmente, sondas térmicas, insertadas en tubos dentro del elemento de cimentación. Estos sistemas se acoplan generalmente a las armaduras y miden la temperatura de la zona de recubrimiento del elemento de cimentación. Pueden ser aplicables derechos de propiedad a los diferentes sistemas patentados.

En la mayoría de aplicaciones, la ausencia de un incremento en temperatura podría indicar una anomalía térmica local (defecto potencial). Los datos térmicos pueden obtenerse de todo el fuste, haciendo posible un análisis tridimensional completo. El sistema puede evaluar tanto el interior del elemento como la zona de recubrimiento y también puede dar información relativa a sobre-excavaciones, a las condiciones del terreno o a la alineación de las armaduras.

Esta tecnología puede utilizarse también para hacer un seguimiento del flujo del hormigón dentro del pilote o panel durante el proceso de hormigonado tremie, mediante la monitorización en tiempo real de la diferencia en temperatura entre el fluido de soporte y el hormigón.



Apéndice D

Interpretación de las imperfecciones

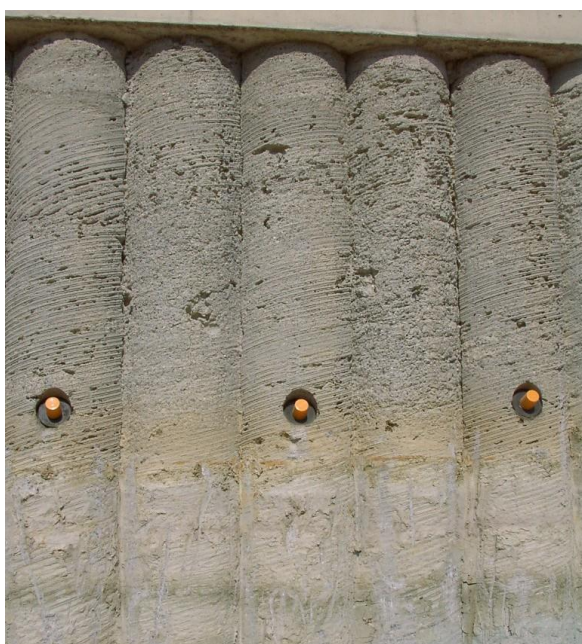


Las imperfecciones dentro de un elemento de cimentación profunda, que se desvían respecto a la calidad perfecta y/o de la continuidad habitual de los elementos de hormigón armado hormigonados in situ, se consideran posibles defectos y suelen estar sujetas a una inspección más detallada. A las imperfecciones se les puede referir también como rasgos.

Las imperfecciones no son necesariamente defectos. Por ejemplo, las marcas en la superficie del hormigón de los pilotes por la retirada de herramientas de excavación son inevitables (véase la *Figura D.1*). Tales surcos no deben ser considerados como imperfecciones, siempre y cuando no comprometan el recubrimiento mínimo estructural después de la ejecución.

FIGURA
D.1

EJEMPLOS DE PILOTES CON SURCOS, SIN AFECTAR A SU RECUBRIMIENTO MÍNIMO POR DURABILIDAD



Se debe realizar una interpretación exhaustiva de las imperfecciones por un especialista con experiencia en trabajos geotécnicos que luego pueda evaluar objetivamente si la imperfección constituye un defecto o simplemente una anomalía sin causar efectos adversos sobre la capacidad de carga o la durabilidad. Las siguientes secciones pueden ayudar en la interpretación y evaluación de imperfecciones.

El mecanismo de formación de imperfecciones

Para la clasificación de las imperfecciones, algunas características especiales pueden revelar su mecanismo de formación, aunque es frecuente que las imperfecciones no tengan una sola causa, y por esta razón es imprescindible tener conocimientos especializados y experiencia:

- Situación de las imperfecciones: ¿Relacionadas con armaduras muy densas, u obstrucciones en la zona de recubrimiento?
- Límite de las imperfecciones: ¿Variación del espesor del recubrimiento relacionado con la incidencia?
- Tipo de material atrapado: ¿Mezcla de materiales o compuesto únicamente de materiales del hormigón?
- Irregularidades durante el vertido: ¿La colocación del hormigón y el empotramiento del tremie han sido correctos?
- Insuficiente tiempo de trabajabilidad: ¿Dosificación del retardador de acuerdo con las especificaciones de mantenimiento del flujo?
- Inestabilidad del hormigón: ¿Presencia de una capa interfase de cierto espesor con material que asciende sobre el hormigón, acanaladuras en la cara expuesta, falta de áridos en el hormigón?

Inspección directa de cimentaciones profundas descubiertas

Después de la excavación las anomalías de la superficie de hormigón se pueden evaluar visualmente y fotografiarse, para su documentación.

Pueden extraerse testigos a través de imperfecciones reconocidas para evaluar su extensión y para inspeccionar la adherencia entre la armadura y el hormigón. Los testigos pueden ser sometidos a ensayos o análisis petrográfico para saber más acerca de la calidad del hormigón.

Inspección indirecta de cimentaciones profundas

La inspección indirecta se refiere a los ensayos no destructivos y a la evaluación de señales, tales como los registros sísmicos cross-hole o el perfil térmico de integridad. Requiere una planificación detallada con el contratista.

Clasificación de los tipos de imperfecciones

Cuando las imperfecciones se interpretan como sistemáticas, deben ser clasificadas. La mayoría de las imperfecciones entrarán dentro una de las siguientes tres categorías:

Inclusiones

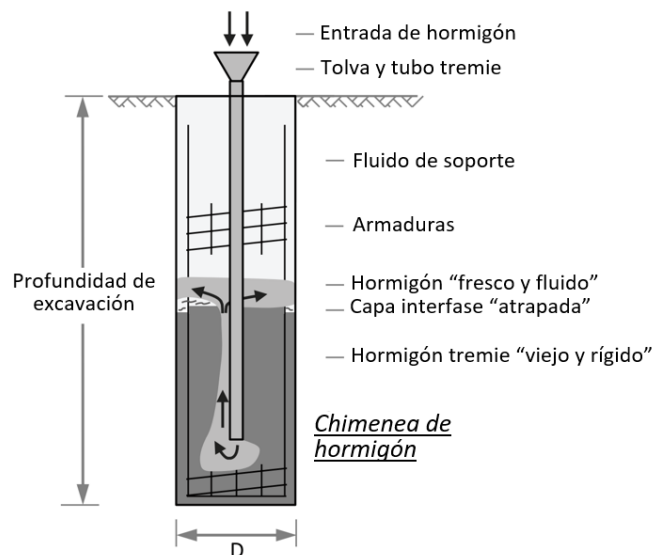
Las inclusiones consisten en material atrapado dentro de la cimentación que no corresponde al hormigón de referencia. Pueden ser de material no cementado procedente de una mezcla del fluido de perforación, material excavado y hormigón, como el procedente de la capa interfase, o material mal cementado originado por la segregación del hormigón. La *Figura D.2* muestra dos ejemplos.

FIGURA D.2 EJEMPLOS DE INCLUSIONES EN UN MURO PANTALLA Y UN PILOTE (FOTO DE PILOTE TOMADA DE LA FIGURA 9.14B, FHWA GEC10)



Las inclusiones normalmente se consideran aceptables si su extensión y frecuencia es limitada. Solo se deben clasificar como defectos si alcanzan dimensiones que afecten la capacidad portante u ocupan amplias partes de la zona de recubrimiento, pudiendo reducir la durabilidad. Pueden ser causadas por un patrón irregular de flujo como el que ilustra la *Figura D.3*, donde el “hormigón fresco y fluido” no puede desplazar el “hormigón viejo y rígido” (sobre una porción significativa de la sección, como muestran las *Figuras 16 y 17*).

FIGURA D.3 ESQUEMA DE CHIMENEA DE HORMIGÓN DEBIDA A LA PÉRDIDA DE TRABAJABILIDAD EN LA MEZCLA DURANTE EL HORMIGONADO TREMIE (SEGÚN FIGURA 9.13, FHWA GEC10), DONDE PUEDE QUEDAR PARCIALMENTE ATRAPADA UNA CAPA INTERFASE Y DAR LUGAR A UNA INCLUSIÓN



Los ensayos no destructivos pueden ayudar a detectar las inclusiones (véase *Apéndice C*). Estos ensayos requieren un conocimiento y experiencia especializados con los que seguir evaluando el alcance de las imperfecciones.

Canalizaciones

Las canalizaciones también se conocen como “canales de exudación” (Bleed channels). Se trata de zonas estrechas verticales con áridos ligeramente cementados y con falta de finos y matriz de cemento, por lo general cerca de la superficie del panel o pilote. Este fenómeno es debido a una estabilidad insuficiente del hormigón (mala resistencia a la segregación/exudación) para las condiciones reales del terreno y puesta en obra.

Los canales de exudación por lo general no se consideran defectos si son aislados y de espesor limitado, pues no reducen significativamente la durabilidad (véase la *Figura D.3*). Además, el agua de exudación puede subir hacia arriba en torno a los elementos verticales presentes en las secciones, por ejemplo barras de armadura longitudinales, o por el interior del núcleo de los elementos amplios.

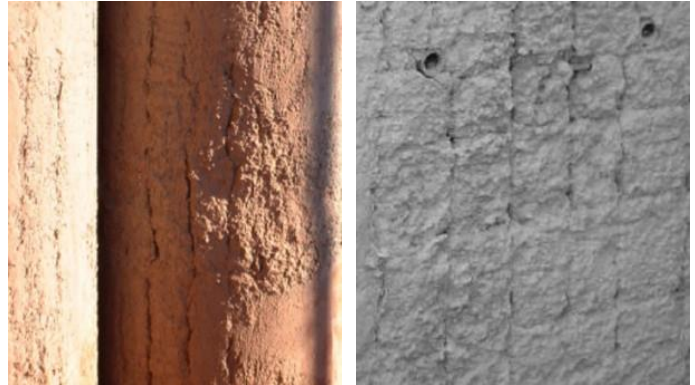
FIGURA
D.4

EJEMPLOS DE CANALIZACIONES QUE RECORREN LA SUPERFICIE DE UN PILOTE Y UN MURO PANTALLA



FIGURA
D.5

ACOLCHADO EN UN PILOTE (IZQ) Y EN UN PANEL (DCHA)



Acólchado (Mattressing)

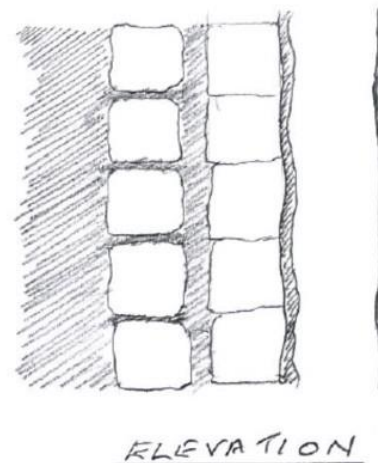
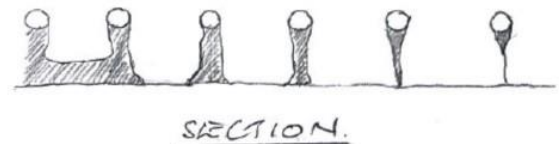
Mientras que un “acolchado” ligero se describe como rasgos lineales verticales que provienen principalmente de barras de armadura verticales, un “acolchado” mayor y más pronunciado refleja la intersección de rasgos lineales verticales y horizontales. Ambas características provienen de material retenido por la sombra que producen las armaduras. Un acolchado vertical puede proporcionar una ruta predefinida para el agua de exudación, lo cual puede desembocar en una combinación de defectos.

El acolchado puede interrumpir el espesor total del recubrimiento de hormigón de las armaduras. Como el efecto sobre la durabilidad o la capacidad de carga (dependiendo de la extensión y frecuencia) puede ser significativo, el “acolchado” debe interpretarse como un posible defecto, e investigarse más a fondo (ver Figuras D.4 y D.5).

La formación de “acolchado” se asocia con un flujo horizontal restringido del hormigón a través de la armadura y hacia la zona del recubrimiento combinado con un flujo vertical insuficiente, y por lo tanto con una falta de flujo libre alrededor de las barras de armadura. La energía aplicada al hormigón fresco, su capacidad para fluir, su estabilidad y su capacidad de paso, en combinación con la densidad de acero en la armadura y el espesor del recubrimiento de hormigón, pueden contribuir a la intensidad de esta imperfección. Es probable que el “acolchado” sea más recurrente en la parte superior, pues la presión hidrostática es menor.

FIGURA
D.6

ESQUEMA DE DISTINTOS GRADOS DE ACOLCHADO





Apéndice E

Información detallada
sobre las consideraciones
de diseño



Este apéndice debe leerse de forma conjunta con la *Sección 2* e incluye información suplementaria acerca de los detalles de armado, el recubrimiento, las columnas individuales sobre pilotes individuales (pilas-pilote), todos relacionados con el impacto sobre el flujo del hormigón.

Detalles de armado

Los detalles de armado de las estructuras de cimentación profunda deberían llevarse a cabo únicamente por personal experimentado.

Se debe hacer todo esfuerzo posible para asegurarse de que las armaduras no están congestionadas y que cumplen con las reglas de espaciamiento mínimo dadas en las normas pertinentes. En los casos en que se requieran armaduras de alta densidad, se deberá utilizar el diámetro de barra y espaciamiento de barras máximos disponibles. En los casos en que se requieren capas múltiples se debe poner especial atención en el mantenimiento de un flujo de hormigón suficiente (véanse las *Secciones 3 y 6*). Cuando existe un armado muy denso suele ser indicación de que las dimensiones del elemento de cimentación profunda deben incrementarse.

Entre las restricciones sobre la distribución de las armaduras también están:

- Armado adicional para permitir la elevación y colocación (por ejemplo, estribos y rigidizadores)
- Espacio para las juntas (en pantallas, si se usan)
- Espacio para el tubo tremie
- Instrumentación
- Restricciones de ancho y longitud debidas a la normativa de transporte
- El peso de las armaduras
- Elementos en la zona de recubrimiento como por ejemplo espaciadores, cajeados y acopladores
- Vainas de anclajes y otros elementos embebidos como cajeados de instalaciones, etc.

Las exigencias para los detalles de armado vienen resumidas en las *Tablas E.1, E.2 y E.3*.

Las normas estructurales como la EN 1992 establecen reglas para los detalles de armado, en particular para el espaciamiento y el recubrimiento en elementos estructurales. Estas reglas también son válidas para cimentaciones profundas, es decir, para su diseño estructural. Consideran las tolerancias de ejecución, como por ejemplo para las dimensiones de las armaduras, pero no pueden abarcar todas las tolerancias específicas de las cimentaciones profundas. Por consiguiente, existen normas de ejecución como la EN 1536 o la EN 1538 que fijan reglas adicionales, generando a veces interpretaciones contradictorias.

Espacio libre entre armaduras

El espacio libre entre barras afecta a la capacidad del hormigón para fluir hacia la zona de recubrimiento, y debe ser apropiado para las condiciones reales. Esto resulta difícil de cuantificar, ya que hace falta considerar el espaciamiento entre barras horizontales y verticales, el tamaño de los huecos resultantes, la disposición de filas múltiples de armadura, el tamaño de los áridos del hormigón, y la reología en relación a las distancias de flujo y las presiones hidrostáticas. El armado transversal a través del centro de la jaula (enganches, conectores, estribos, tirantes, etc.) afecta al flujo vertical ascendente del hormigón.

Existe consenso en que el espaciamiento de las barras en cimentaciones profundas debe ser mucho mayor que el que requieren los códigos estructurales, debido a las severas exigencias de ejecución.

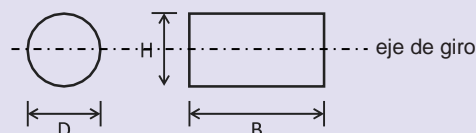
Como se indica en el *apartado 2.2*, debe ser obligatorio un espacio libre mínimo en vertical de 100 mm [4 pulg.]. La norma FHWA GEC10 recomienda valores de entre 5 y 10 veces el tamaño máximo del árido en el caso de darse condiciones difíciles de instalación, como por ejemplo, elementos muy grandes o muy profundos, varios niveles de barras, o una geometría compleja de la jaula. Esto también incluye las zonas de empalme o los lugares en que las barras están conectadas con empalmes mecánicos.

Se espera que las investigaciones futuras mediante simulaciones por ordenador, validadas con ensayos de campo, puedan ayudar a establecer reglas mejores para determinar el espacio libre adecuado.

Apéndice E / Información detallada sobre las consideraciones de diseño

TABLA
E.1

REQUISITOS DE ARMADO COMÚNMENTE EMPLEADOS EN PILOTES PERFORADOS Y ELEMENTOS PORTANTES (BARRETTES)



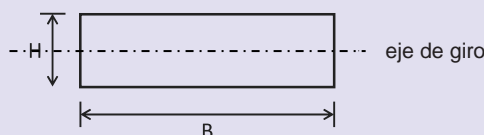
Vertical	ACI336.3R-14, 4.6, en referencia a ACI318 (véase ACI318-14, 10.6.1)	$1\% A_c$	para elementos en compresión que no pueden diseñarse de hormigón en masa, donde A_c es la sección nominal.
	EN1536:2010+A1, Tabla 3	$\geq 0,5\% A_c$	$A_c \leq 0,5m^2$
		$\geq 0,0025m^2$	$0,5m^2 < A_c \leq 1,0m^2$
		$\geq 0,25\% A_c$	$A_c > 1,0m^2$
Estribos, cercos o armadura en espiral	ACI336.3R-14, 4.6 en referencia a ACI318 (véase ACI318-14, 10.6.1)		la expresión (10-5) da el área mínima para el armado en espiral.
	EN1536:2010+A1, Tabla 4	$\geq 6mm$	Estribos, cercos o armadura en espiral
		\geq una cuarta parte del diámetro máximo de las barras longitudinales	
	$\geq 5mm$	Armado transversal en forma de malla electrosoldada	
Vertical	EN1992-1-1:2004+A1, 9.3.1	$(f_{cm}/f_{yk}) A_c$, pero no menos que $0,5\% A_c$	donde f_{cm} es la resistencia media del hormigón, la cual puede tomarse como 8 MPa por encima de la resistencia característica, y f_{yk} es el límite elástico de las armaduras (estas expresiones asumen que poco más que la cuarta parte de las armaduras controlan la fisuración en la cara sometida a tracción).
Estribos, cercos o armadura en espiral (donde proceda para la resistencia a cortante)	EN1992-1-1:2004+A1, 9.2.2	cercos o armadura en espiral para pilotes	donde s es el espacio libre entre los estribos o la longitud de paso de armaduras en espiral, f_{ck} es la resistencia característica del hormigón (N/mm^2), f_{yk} es el límite elástico de las armaduras
		$\geq 0,08 [f_{ck}]^{1/2}/f_{yk}$	
		estribos o cercos para elementos portantes	$\geq 0,08 [f_{ck}]^{1/2}/f_{yk}$
	EN1992-1-1:2004+A1, 9.2.2	espaciamiento vertical de cercos en pilotes $\leq 0,6 D$	(se asume que la profundidad efectiva es de en torno a $0,8 D$ en el caso de pilotes o $0,8 H$ en el caso de elementos portantes, y que el plano de fallo potencial se corta con las armaduras en espiral al menos tres veces)
		espaciamiento vertical de estribos o cercos en elementos portantes $\leq 0,6 H$	
		longitud de paso de armaduras en espiral $\leq 0,3 D$	

ESPACIAMIENTO PARA PILOTES PERFORADOS Y ELEMENTOS PORTANTES			
SITUACIÓN	APARTADO	VALOR	COMENTARIOS
Para elementos en los que la excentricidad de la carga no excede D/8 para pilotes, o H/6 para elementos portantes			
Espaciamien- to horizontal y vertical de las barras	EN1992-1-1:2004+A1, 9.3.1	≥ 100 mm	incluso en solapes
	ACI336.1-01, 3.4.9	$\geq 4 D_{max}$	donde D_{max} = tamaño máximo del árido, incluso en solapes
	EN1536:2010+A1, 7.5.2.5	≤ 400 mm	lo más amplio posible, pero menos de 400 mm.
	EN206:2013+A1, Annex D.2.2	$\geq 4 D_{max}$	donde D_{max} = tamaño máximo del árido.
	EN1536:2010+A1, 7.5.2.6	≥ 100 mm	para barras longitudinales aisladas o agrupadas.
	EN1992-1-1:2004+A1, 9.3.1	≥ 80 mm	para longitud de solape, siempre que $D_G \leq 20$ mm (debe tenerse especial consideración para el mantenimiento de un flujo de hormigón suficiente, véanse las secciones 3 y 6).
	EN1536:2010+A1, 7.5.2.7	$\geq 1,5 D_{max}$ y $\geq 2 D_s$	para capas de barras, colocadas radialmente, donde D_s es el diámetro de las barras (de acero).

Apéndice E / Información detallada sobre las consideraciones de diseño

TABLA
E.2

REQUISITOS DE ARMADO COMÚNMENTE EMPLEADOS EN MUROS PANTALLA



Vertical – para pantallas en las que la excentricidad de la carga no excede $H/6$	EN1992-1- 1:2004+A1, 9.6.2	$0,2\% A_c$	donde A_c es el área nominal de panel
	EN1538:2010+A1, 7.5.3.1	$D_s \geq 12 \text{ mm}$	donde D_s = diámetro de barras (de acero)
	EN1538:2010+A1, 7.5.3.1	> 3 barras / m	en ambos lados de la jaula de armaduras
Vertical – para pantallas en las que la excentricidad de la carga excede $H/6$	EN1992-1- 1:2004+A1, 9.3.1	área mínima de cada cara/longitud elemento = $0,26$ (f_{cm}/f_{yk}) d , pero no menos de $0,0013 d$	donde f_{cm} es la resistencia media del hormigón, que puede tomarse como 8 N/mm^2 por encima de la resistencia característica, f_{yk} es el límite elástico de las armaduras, y d es la profundidad efectiva al centroide de las armaduras a tracción desde la cara a compresión
	EN1538:2010+A1, 7.5.3.1	$D_s \geq 12 \text{ mm}$	donde D_s = diámetro de barras (de acero).
	EN1538:2010+A1, 7.5.3.1	> 3 barras / m	en ambos lados de la jaula de armaduras
Horizontal	EN1992-1- 1:2004+A1, 9.6.3	área total mínima / altu- ra unidad $> 0,1\% A_c$	donde A_c es el área nominal de una sección vertical a través de un panel / altura del elemento.
	EN1992-1- 1:2004+A1, 9.6.3	área mínima de cada cara / altura de uni- dad $\geq 25\% A_{sv}$	donde A_{sv} es el área del armado vertical en la cara / longitud elemento
	EN1538:2010+A1		Sin requisitos específicos
Estribos pa- santes (donde sea necesario para el es- fuerzo cortan- te)	EN1992-1- 1:2004+A1, 9.2.2	área mínima / área de elemento de muro (en alzado) ($0,08 [f_{ck}]^{1/2} / f_{yk}$)	donde f_{ck} es la resistencia característica del hormigón, f_{yk} es el límite elástico del armado.
	EN1992-1- 1:2004+A1, 9.2.2	espaciamiento horiz. $\leq 0,75 d$, pero no excede 600 mm	donde d es la profundidad efectiva al centroide de las armaduras a tracción desde la cara a compresión
	EN1992-1- 1:2004+A1, 9.2.2	espaciamiento vertical $\leq 0,75 d$	

Apéndice E / Información detallada sobre las consideraciones de diseño

TABLA
E.2

REQUISITOS DE ARMADO COMÚNMENTE EMPLEADOS EN MUROS PANTALLA (CONT.)

ESPACIAMIENTO PARA MUROS PANTALLA			
SITUACIÓN	APARTADO	VALOR	COMENTARIOS
Para elementos en los que la excentricidad de la carga no excede D/8 para pilotes, o H/6 para elementos portantes			
	EN206:2013+A1, Annex D.2.2	$\geq 4 D_{\max}$	donde D_{\max} es el tamaño máximo del árido.
Espaciamiento de barras verticales	EN1538:2010+A1, 7.5.3.2	≥ 100 mm	de barras individuales o grupos, paralelas a la cara de la pantalla
	EN1538:2010+A1, 7.5.3.3	≥ 80 mm	para la longitud de solape, siempre y cuando $D_{\max} \leq 20$ mm (debe darse especial consideración a mantener un flujo de hormigón suficiente; véanse las secciones 3 y 6).
Espaciamiento vertical de barras horizontales	EN1538:2010+A1, 7.5.4.2	≥ 200 mm	
	EN1538:2010+A1, 7.5.4.3	≥ 150 mm	donde sea necesario, siempre y cuando $D_{\max} \leq 20$ mm, donde D_{\max} es el tamaño máximo del árido.
Espaciamiento horizontal de barras transversales	EN1538:2010+A1, 7.5.4.4	≥ 150 mm	
	EN1538:2010+A1, 7.5.4.5	≥ 200 mm	recomendado
Espaciamiento horizontal de jaulas adyacentes	EN1538:2010+A1, 7.5.5.1	≥ 200 mm	
	EN1538:2010+A1, 7.5.5.2	≥ 400 mm	recomendado
Espaciamiento horizontal de jaulas y juntas incl. juntas de estanqueidad	EN1538:2010+A1, 7.5.5.3	≥ 100 mm	
	EN1538:2010+A1, 7.5.5.4	≥ 200 mm	recomendado

Apéndice E / Información detallada sobre las consideraciones de diseño

TABLA
E.3

REQUISITOS HABITUALES DE ADHERENCIA, ANCLAJE, SOLAPES Y ANCHO DE FISURA

ADHERENCIA, ANCLAJE (LONGITUD DE DESARROLLO), Y SOLAPES (LONGITUD DE EMPALME) PARA PILOTES PERFORADOS Y MUROS PANTALLA		
SITUACIÓN	APARTADO	COMENTARIOS
Para elementos en los que la excentricidad de la carga no excede D/8 para pilotes, o H/6 para elementos portantes		
Anclaje	ACI318-14, 25.4.2	Barras a tracción.
	ACI318-14, 25.4.9	Barras a compresión.
Longitud de solape	ACI318-14, 25.5.2	Barras a tracción.
	ACI318-14, 25.5.5	Barras a compresión.
	ACI318-14, 25.6	Reglas adicionales para barras agrupadas.
	ACI318-14, 10.7.5.2	Reglas adicionales para columnas, que se asumen aplicables también a los pilotes.
Tensión de adherencia	EN1992-1-1:2004+A1, 8.4.2	Si no se ha empleado fluido de soporte, las condiciones de adherencia se clasificarían generalmente como 'buenas' tanto para barras verticales como horizontales. Se debe buscar consejo especializado (por ejemplo, Jones, Holt, 2004) acerca del impacto sobre la adherencia de los fluidos de soporte.
Longitud de anclaje	EN1992-1-1:2004+A1, 8.4.4	Debe tenerse en cuenta que cuando el recubrimiento excede el tamaño de las barras, lo cual suele ser el caso, el factor α_2 puede tomarse con un valor menor al de la unidad.
Longitud de solape	EN1992-1-1:2004+A1, 8.7.3	Debe tenerse en cuenta que cuando el recubrimiento excede el tamaño de las barras, lo cual suele ser el caso, el factor α_2 puede tomarse con un valor menor al de la unidad. No obstante, el factor α_6 será usualmente 1,5, correspondiente a todas las barras solapadas en la misma sección. Debe considerarse el uso de acopladores, sobre todo para barras grandes, las cuales la Norma Europea EN1992-1-1, 8.8 define con un diámetro mayor de 32mm (40mm en el UK NA).
ANCHOS DE FISURA		
SITUACIÓN	APARTADO	COMENTARIOS
Cálculo de anchos de fisura	ACI336.3R-14	Sin requisitos.
	EN1992-1-1:2004+A1,7.3.4	Debe tenerse en cuenta que los comentarios debajo de la Tabla NA.4 del anexo nacional del Reino Unido a la Norma Europea EN1992-1-1 incluyen recomendaciones para situaciones en las cuales el recubrimiento es bastante mayor que el requerido para temas de durabilidad, y no existen exigencias estéticas por ser estructuras hormigonadas contra el suelo. Bajo estas circunstancias, es razonable determinar el ancho de fisura para el recubrimiento exigido por durabilidad, y verificar que este no excede el ancho de fisura máximo relevante. Esto puede llevarse a cabo asumiendo que el ancho de fisura varía linealmente de cero en la cara de la barra hasta el valor calculado en la superficie.

Recubrimiento de hormigón

En lo que se refiere a exigencias estructurales, el recubrimiento es necesario tanto por durabilidad como para resistir las fuerzas de ruptura generadas por la adherencia del armado.

Para la ejecución de cimentaciones profundas por medio de hormigón colocado por tremie, es crítico según indican varias normas de ejecución (EN 1536, EN 1538, ACI 301) prever un adecuado recubrimiento para permitir que el hormigón fluya alrededor y embeba por completo la armadura y para obtener un hormigón denso y durable en esta zona.

El mayor de los valores individuales del recubrimiento exigido según consideraciones de adherencia, durabilidad y ejecución debería incrementarse para incorporar la tolerancia de construcción, como se muestra debajo y en el apartado 2.3.

Recubrimiento nominal = máximo entre el mínimo exigido por motivos de durabilidad, adherencia, ejecución + tolerancias de construcción.

$$C_{nom} = C_{min} + \Delta C_{dev} \text{ with } C_{min} \geq \max \begin{cases} C_{min, \text{estructural}} \\ C_{min, \text{ejecución}} \end{cases}$$

La recomendación general de esta guía es que el recubrimiento nominal mínimo para la ejecución debe ser de 75 mm [3 pulg.], esto es, un recubrimiento mínimo de 50 mm [2 pulg.] más una tolerancia de 25 mm [1 pulg.].

El recubrimiento nominal debe aumentarse la cantidad correspondiente en los casos en que el recubrimiento estructural mínimo, dado por ejemplo en la norma EN 1992, sea mayor a 50 mm [2 pulg.] (según lo anterior).

Nota 1: El recubrimiento mínimo de ejecución debe aumentarse si se consideran críticas las condiciones de flujo del hormigón. En la norma EN 1536 vienen algunos ejemplos, tales como cuando se emplea un tamaño máximo de árido de 32 mm [1 1/4 pulg.], o si aumenta la viscosidad del hormigón (por ejemplo, cuando el humo de sílice reemplaza al cemento en un 5% o más), o en el caso de suelos blandos sin usar revestimiento.

Nota 2: La norma FHWA GEC 10 sugiere un recubrimiento mayor para pilotes de mayor diámetro, por ejemplo un recubrimiento de 75 mm [3 pulg.] para pilotes con un diámetro no mayor a 1 m [3 pies], 100 mm [4 pulg.] para pilotes con un diámetro mayor a 1 m [3 pies] pero no mayor a 1,5 m [5 pies], y 150 mm [6 pulg.] para diámetros por encima de los 1,5 m [5 pies].

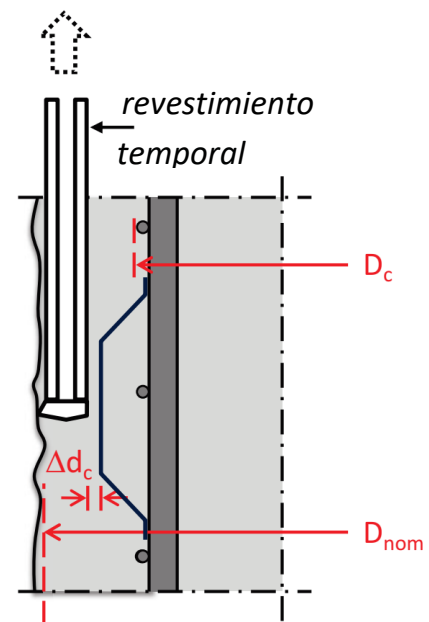
Nota 3: La norma EN 1536 permite reducir el recubrimiento mínimo de ejecución a 40 mm [1.5 pulg.] desde la cara externa del revestimiento permanente, si se emplea. Se recomienda que el recubrimiento mínimo de las armaduras hasta la cara interior del revestimiento, ya sea temporal o permanente, no sea menor a 50 mm [2 pulg.]. No son necesarias las tolerancias constructivas en este caso, pero sigue siendo obligatoria una tolerancia adicional para la colocación de las jaulas, véase la Figure E.1.

Nota 4: La distancia exigida entre las jaulas y las juntas o encofrados es independiente del recubrimiento de hormigón. Según la norma EN 1538 +A1, 7.5.5.3 y 7.5.5.4, estas distancias deben ser $\geq 100 \text{ mm}$ [4 pulg.] y $\leq 200 \text{ mm}$ [8 pulg.] respectivamente.

Nota 5: Muchos calculistas son reacios a aplicar un gran recubrimiento alegando que el ancho de las fisuras en la superficie puede volverse excesivo. Esto no debería ser una preocupación, ya que el ancho de fisuración solo debe calcularse en el punto de recubrimiento mínimo, considerándose el hormigón por encima de ese valor como un extra (véase Guía CIRIA C760 y ACI 350).

FIGURA E.1

RECUBRIMIENTO DE HORMIGÓN EN PILOTES PERFORADOS CON REVESTIMIENTO TEMPORAL (SUPLEMENTO A LA FIGURA 3)



Columnas individuales sobre pilotes individuales (pilas-pilote)

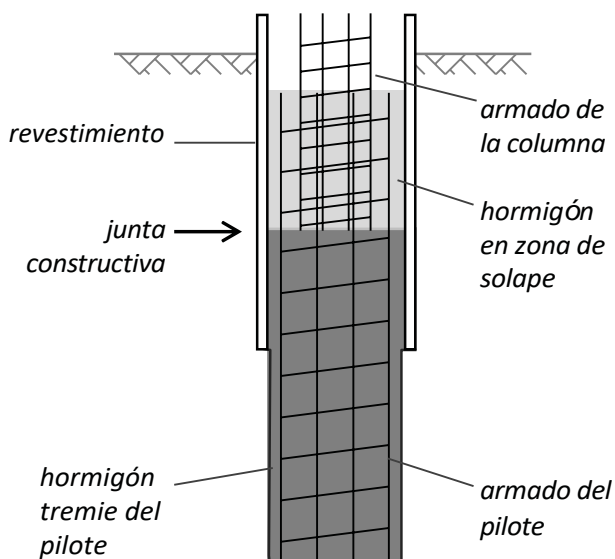
Los detalles de conexión de la jaula de armadura presentan un reto constructivo en los pilotes perforados en los que un único pilote se utiliza para soportar una única columna y el solape entre el armado de la columna y el del pilote se produce cerca de la parte superior del pilote. Este detalle puede resultar particularmente congestionado en casos donde se emplea un solape sin contacto y el armado de la columna consiste en una jaula independiente interior al armado del pilote, como se muestra en la Figura E.2. Las placas de anclaje de torres eléctricas, los postes de señales, o estructuras similares también pueden resultar en congestión de este tipo. Es especialmente difícil para el hormigón tremie abrirse paso a través de dos jaulas de armadura sin atrapar contaminantes del fluido en la parte superior del pilote.

La solución más efectiva para esta situación es prever una junta constructiva debajo del solape, de manera que se pueda desca-bezar el pilote y realizar el hormigonado de la zona de solape en seco como hormigón estructural convencional. Este enfoque normalmente requiere el empleo de una entubación superficial para facilitar la excavación estable del pilote por encima de la junta constructiva. La superficie de la junta constructiva requiere normalmente una preparación mediante la retirada de lechada, exu-dación, agua, u hormigón contaminado antes de colocar el hormi-gón en la zona de solape. En algunos casos puede ser posible retirar fluidos y hormigón contaminado de la zona de solape y completar el solape mientras el hormigón se mantiene trabajable.

En algunos casos en los que el solape dentro del pilote sea relati-vamente corto (por ejemplo, hasta 2 m [7 pies]), puede ser posible insertar la jaula interior en el hormigón fresco después de haberse vertido todo el hormigón. Aunque este procedimiento resultaría dificultoso con la jaula para una columna alta, puede resultar ma-nejable con un tramo corto de armadura empleado para subir por encima de la superficie a modo de armadura de solape, o para placas de anclaje. Este proceso (comúnmente llamado "inserción en fresco" ("wet-sticking")) puede verse limitado si las tolerancias de alineación son ajustadas, debido a las dificultades para lograr una colocación precisa, así como debido al corto periodo de tiempo en que el hormigón mantiene la fluidez necesaria para que el trabajo sea realizado.

FIGURA
E.2

DETALLE DE UNIÓN DE UN PILOTE PERFORADO COMO SOPORTE DE UNA COLUMNA DE SUPERESTRUCTURA





Apéndice F

Selección de factores y efectos sobre el flujo del hormigón



Apéndice F / Selección de factores y efectos sobre el flujo del hormigón

En la *Tabla F.1* se muestra una selección de factores importantes y sus posibles efectos sobre el flujo del hormigón dentro de cimentaciones profundas, y sobre su calidad asociada. Esta tabla refleja el punto de vista del Grupo de Trabajo Conjunto para el Hormigón. La lista no es exhaustiva, pero permite obtener una vista general de los contenidos de esta guía.

TABLA
F.1

FACTORES VARIOS Y SUS POSIBLES EFECTOS SOBRE EL FLUJO DEL HORMIGÓN Y LA CALIDAD DE LAS CIMENTACIONES PROFUNDAS

PARÁMETRO	RECOMENDACIÓN	EFECTO(S)	VER
Espacio libre entre armaduras	Maximizar	Menos resistencia al bloqueo y menos resistencia a que el hormigón pase.	2.2, Ap. E
		Minimiza el riesgo de inclusiones y de que el hormigón no rodee adecuadamente las barras de la armadura .	6.8
Armadura de varias capas	Evitar	Menos resistencia al paso del hormigón	2.2
Recubrimiento de hormigón	Aumentar	Reduce el riesgo de acolchado y puede actuar como margen de seguridad para un espesor inevitable de torta de filtrado (cake)	2.2
Reología y trabajabilidad del hormigón	Tensión de fluencia media/baja	Tensión de fluencia y viscosidad altas hacen que el hormigón fluya mal.	3.2
	Viscosidad media	Una tensión de fluencia demasiado baja puede generar inestabilidad. Las variaciones acusadas en las propiedades pueden contribuir a patrones de flujo irregulares	4.3 6.7
Tixotropía	Controlar	El aumento excesivo de la tensión de fluencia del hormigón durante las pausas inevitables puede contribuir a patrones de flujo irregulares. En el hormigón colocado al final el mismo efecto puede dar lugar a menos filtración, exudación o segregación.	3.2
Estabilidad del hormigón	Controlar	La filtración, exudación o segregación excesivas pueden dar lugar a anomalías y patrones de flujo irregulares.	3.3
Uso de adiciones y aditivos (químicos)	Optimizar	Mejora la reología	4.4
		Puede afectar a la robustez y estabilidad de la mezcla de hormigón (dependiendo de la dosificación y las interacciones).	
Escurrimiento	Según Tabla 01	Valores altos dan lugar a una mayor trabajabilidad, pero menor estabilidad.	5.1
Velocidad de escurrimiento	Según Tabla 01	Valores bajos dan lugar a una mayor resistencia al flujo, que puede aumentar el tiempo total de hormigonado.	5.1
Ensayos de idoneidad	Ensayos de laboratorio en fase de diseño	Encontrar una composición adecuada con los componentes disponibles para cumplir con las exigencias específicas del proyecto, haciendo posible la toma de decisiones de cara a especificar valores de conformidad.	5.2
	Repetir	Demostrar la idoneidad con cambios en los componentes o las dosis.	
Ensayos de conformidad	Pruebas de campo al comenzar la ejecución	Confirman que las propiedades especificadas durante la fase de diseño pueden lograrse con el hormigón concreto suministrado por el proveedor.	5.2
	Adaptar el diseño de la mezcla de hormigón	Permitir la conformidad frente al rendimiento previsto con pequeños cambios en la mezcla del hormigón; si no, repetir ensayos de idoneidad.	
Ensayos de aceptación	Hacer frecuentemente durante la ejecución	Demostrar con frecuencia la conformidad con las especificaciones, y cumplir las normas de control de calidad.	5.2
Retención de trabajabilidad	Controlar	Lograr hormigón todavía trabajable al final del tiempo previsto para el vertido. Debe evitarse un aumento excesivo de la tensión de fluencia, ya que puede dar lugar a una trabajabilidad insuficiente.	5.3
		Una retención más duradera puede aumentar la exudación y la segregación.	

Apéndice F / Selección de factores y efectos sobre el flujo del hormigón

TABLA
F.1

FACTORES VARIOS Y SUS POSIBLES EFECTOS SOBRE EL FLUJO DEL HORMIGÓN Y LA CALIDAD DE LAS CIMENTACIONES PROFUNDAS (CONT.)

PARÁMETRO	RECOMENDACIÓN	EFECTO(S)	VER
Tiempo total de vertido	Minimizar retrasos	Menos cambios en la reología del hormigón	5.3
Residuos en la base	Limitar	Los residuos en la base pueden mezclarse con el hormigón inicial y dar lugar a inclusiones.	6.2
Densidad del fluido de soporte	Limitar	Menor resistencia al flujo del hormigón	6.2
Limpieza del fluido de soporte	Maximizar	La presencia de más partículas de terreno en el fluido de soporte puede dar lugar a una capa interfase más gruesa por encima del hormigón.	6.2
Superficie del tubo tremie	Suave y limpia	Limita la fricción entre el hormigón y el tubo tremie, y a su vez la resistencia al flujo.	6.3
Espaciamento tremie	Limitar	Una distancia de flujo mayor puede causar problemas cerca de las jaulas de armadura, en la zona de recubrimiento, o cerca de las juntas.	6.4 6.8
Empotramiento del tremie (en el hormigón ya vertido)	Minimizar	Flujo de hormigón más rápido. Cese más rápido del movimiento del hormigón (colocado al final) debajo del tubo tremie. Reducción del riesgo de segregación dinámica.	6.6
Variaciones de trabajabilidad entre tandas de hormigón	Limitar	Las variaciones acusadas pueden generar cambios en el mecanismo de flujo y contribuir a patrones de flujo irregulares.	9

Referencias



Referencias

ACI

ACI CT-13	Terminología del hormigón ACI - Una norma de ACI	2013
ACI 211.1-91	Práctica estándar para seleccionar la dosificación de hormigones normales, pesados y en masa (Aprobada de nuevo en 2009). ACI.	1991
ACI 301-16	Especificaciones para el hormigón estructural. ACI.	2016
ACI 304R-00	Guía para medir, mezclar, transportar, y colocar hormigón (Aprobada de nuevo en 2009). ACI.	2000
ACI 318-14	Exigencias del código de la edificación para el hormigón estructural y comentarios. ACI.	2014
ACI 336.1-01	Especificaciones para la construcción de pilotes perforados. ACI.	2001
ACI 336.3R-14	Informe sobre el diseño y construcción de pilotes perforados. ACI.	2014
ACI 350-06	Exigencias del código para estructuras de hormigón de la ingeniería medioambiental. ACI	2006
ACI 543R-12	Guía de diseño, fabricación, e instalación de pilotes de hormigón. ACI.	2012

ASTM INTERNATIONAL

ASTM C143-15	Método de ensayo estándar para asentamiento de hormigón de cemento hidráulico. Norma ASTM.	2015
ASTM C232-14	Método de ensayo estándar para la exudación del hormigón. Norma ASTM.	2014
ASTM C1602-12	Especificación estándar para el agua de amasado en la producción de hormigón de cemento hidráulico. Norma ASTM.	2012
ASTM C1610-14	Método de ensayo estándar para la segregación estática de hormigón autocompactante empleando la técnica de la columna. Norma ASTM.	2014
ASTM C1611-14	Método de ensayo estándar para el escurrimiento del hormigón autocompactante. Norma ASTM.	2014
ASTM C1712-17	Método de ensayo para la evaluación rápida de la resistencia a la segregación estática del hormigón autocompactante por medio del ensayo de penetración. Norma ASTM	2017
ASTM D6760-16	Método de ensayo estándar para la comprobación de la integridad de cimentaciones profundas de hormigón mediante ensayos cross-hole ultrasónicos. Norma ASTM.	2016
ASTM D7949-14	Método de ensayo estándar para el perfil térmico de integridad de cimentaciones profundas de hormigón. Norma ASTM.	2014

CEN

EN 196-3:2016	Métodos de ensayo de cementos. Parte 3: Determinación del tiempo de fraguado y de la estabilidad de volumen. Norma Europea. CEN.	2016
EN 197-1:2011	Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes. Norma Europea. CEN.	2011
EN 206:2013 + A1:2016	Hormigón. Especificaciones, prestaciones, producción y conformidad. Norma Europea. CEN.	2016
EN 450-1:2012	Cenizas volantes para hormigón. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad. Norma europea. CEN.	2012
EN 480-4:2005	Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Métodos de ensayo. Parte 4: Determinación de la exudación del hormigón. Norma Europea. CEN.	2005
EN 1008:2002	Agua de amasado para hormigón. Especificaciones para la toma de muestras, ensayos y aptitud al uso incluyendo las aguas de lavado de instalaciones de reciclado de la industria del hormigón, como agua de amasado para hormigón.	2002
EN 1536:2010 + A1:2015	Ejecución de trabajos geotécnicos especiales. Pilotes perforados. Norma Europea. CEN.	2015

CEN CONT.			
EN 1538:2010 + A1:2015	Ejecución de trabajos geotécnicos especiales. Muros pantalla. Norma Europea. CEN.		2015
EN 1992-1-1:2004 + A1:2014	Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación. Norma Europea. CEN.		2014
EN 1997-1:2004 + A1:2013	Eurocódigo 7: Proyecto geotécnico. Parte 1: Reglas generales. Norma Europea. CEN.		2013
EN 12350-1 to -12	Ensayos de hormigón fresco - Partes 1 a 12. Norma Europea. CEN.		2009 to 2010
	-1	Toma de muestras	2009
	-2	Ensayo de asentamiento	2009
	-5	Ensayo de la mesa de sacudidas	2009
	-8	Hormigón autocompactante. Ensayo de escurrimiento	2010
-11	Hormigón autocompactante. Ensayo de segregación por tamizado	2010	
EN 13263-1:2005 + A1:2009	Humo de sílice para hormigón. Parte 1: Definiciones, requisitos y criterios de conformidad. Norma Europea. CEN.		2009
EN 15167-1:2006	Escorias granuladas molidas de horno alto para su uso en hormigones, morteros y pastas. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad. Norma Europea. CEN.		2006
EN ISO 9001:2015	Sistemas de gestión de calidad. Requisitos. Norma Europea e internacional. CEN + ISO.		2015
EN ISO 10414-1	Industrias del petróleo y del gas natural. Ensayos de campo de fluidos de perforación (ISO 10414:2008) Parte 1: Fluidos basados en agua.		2008
CEN/TR 16639	Uso del concepto de valor K, del concepto de prestación equivalente del hormigón y del concepto de prestación equivalente de las combinaciones. Informe técnico. CEN.		2014

OTRAS NORMAS, GUÍAS Y RECOMENDACIONES			
AASHTO R81	Especificación estándar para la segregación estática de cilindros de hormigón autocompactante (HAC) endurecidos		2017
AASHTO T318	Método de ensayo estándar para el contenido de agua en hormigón recién mezclado mediante secado en horno microondas		2015
API RP 13B-1	Ensayos de campo para fluidos de perforación basados en agua. Prácticas recomendadas por la API 13B-1. 4ª edición, 3-2009		2009
Z17, CIA	Hormigón tremie para cimentaciones profundas. Prácticas recomendadas, Instituto del Hormigón de Australia. Australia		2012
CIRIA C580	Muros pantalla – guía para un diseño económico. CIRIA. Londres. Reino Unido		2003
CIRIA C760	Guía de diseño de muros pantalla. CIRIA, Londres, Reino Unido		2017
DAfStb Guideline on SCC	Selbstverdichtender Beton (SVB-Richtlinie). DAfStb. Beuth. Berlin, Germany		2003
DIN 1045-2	Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1		2001
DFI Publication 74	Normas de práctica industrial y directrices prácticas del DFI para muros pantalla. Instituto de Cimentaciones Profundas (Deep Foundations Institute).		2005
FHWA GEC10	Pilotes perforados: Procedimientos de construcción y métodos de diseño LRFD. Circular de Ingeniería Geotécnica N° 10. Publicación N° FHWA-NHI-10-016. Instituto Nacional de Autopistas, Departamento de Transporte de Estados Unidos, Administración Federal de Autopistas, Washington, D.C.		2010
Guide technique LCPC	Ouvrages de soutènement - Recommandations pour l'inspection détaillée, le suivi et le diagnostic des ouvrages de soutènement en parois composites – Guide technique LCPC – Laboratoire Central des Ponts et Chaussées - Paris Cedex		2003
ICE SPERW	Especificación ICE para pilotes y muros pantalla. 3ª edición. ICE. Reino Unido		2017

OTRAS NORMAS, GUÍAS Y RECOMENDACIONES CONT.

Guía de Fluidos de Soporte	Guía de fluidos de soporte para cimentaciones profundas. 1ª Edición. EFFC y DFI	
New Zealand Geotechnical Society Inc.	Normativa para el ensayo manual de corte con molinete	2001
Merkblatt Weiche Betone	Weiche Betone. Betone mit Konsistenz \geq F 59. Inklusive ergänzender Klarstellungen. ÖBV. Dezember 2009, Wien. Austria [es: Normativa sobre hormigón fresco. Hormigón con consistencia igual o mayor que un flujo de 59 cm (ensayado según EN 12350-5)]	2009
NF P94-I60-1	Auscultation d'un élément de foundation, partie 1: Méthode par transparence. AFNOR. Paris, France	2000
NF XP P 18-468	Béton – Essai pour béton frais - Ressuage. AFNOR. Paris, France	2016
Recomendaciones para el pilotaje	(EA Pilotes). 2ª edición 2012. DGGT (Ed.). Wiley, Berlín. Alemania	2012
Richtlinie Bohrpfähle	Richtlinie Bohrpfähle. ÖBV. 2013, Wien, Austria [es: Guía sobre pilotes perforados]	2013
Richtlinie Dichte Schlitzwände	Richtlinie Dichte Schlitzwände. ÖBV. [es: Normativa sobre pantallas plásticas impermeables]	2013

OTRAS PUBLICACIONES

Aitcin, P.-C., Flatt, R.J. (Ed.)	Ciencia y tecnología de los aditivos del hormigón. Woodhead Publishing.	2015
Azzi A. et al	Relación entre diseños de mezcla y exudación para hormigón SF-SCC aplicado a muros pantalla. Conferencia Internacional sobre la Sostenibilidad del Hormigón, SCC-2016, Washington, EE.UU., pp. 1129-1139	2016
Beckhaus K., Heinzlmann H.	Ensayos de integridad sónica cross-hole para pilotes perforados – Un reto. Actas del Simposio Internacional sobre Ensayos No Destructivos en la Ingeniería Civil. NDT-CE 2015, Berlín	2015
Böhle B., Pulsfort, M.	Untersuchungen zum Fließ- und Ansteifverhalten von Beton bei der Herstellung von Bohrpfählen. 33. Baugrundtagung, 2014. DGGT, Berlín, Alemania [es: Ejecución de pilotes perforados asistida por fluido y revestimiento, y sus efectos sobre el comportamiento del flujo del hormigón]	2014
Brown D., Schindler A.	Hormigón de altas prestaciones y construcción de pilotes perforados. Problemas contemporáneos en cimentaciones profundas - Actas de la conferencia. GeoDenver 2007, EE.UU.	2007
Dairou M.M. et al	Influencia del desarrollo estructural del hormigón en reposo sobre la penetración de las armaduras en pilotes. Revista Internacional de Análisis y Diseño Estructural, IJSAD, Vol. 2, Número 1, pp. 77-82	2015
DAfStb Guideline on SCC	Selbstverdichtender Beton (SVB-Richtlinie). DAfStb. Beuth. Berlin, Germany	2003
Deese G.G., Mullins, G	Factores que afectan al flujo del hormigón en la ejecución de pilotes perforados. Conferencia GEO3 – GEO Sobre la garantía de calidad/Control de calidad. Dallas, Texas	2005
Dreux G., Festa J.	Nouveau Guide du Béton et de ses constituants. Eyrolles, París, Francia [es: Nueva guía del hormigón y sus componentes].	1998
Feys D.	Por qué no es buena idea utilizar un aireante para aumentar la trabajabilidad en cimentaciones profundas. Actas de la Conferencia Internacional DFI-EFFC sobre Cimentaciones Profundas y Mejora del Terreno, Roma, Italia	2018
Harrison T A.	Control y conformidad de la relación agua/conglomerante en el hormigón fresco. Informe Técnico 76 de la Sociedad del Hormigón	2017
Jones A.E.K., Holt D.A.	Diseño de solapes de barras corrugadas en hormigón bajo fluidos de perforación bentoníticos y poliméricos. Structural Engineer, vol. 82. Londres, Reino Unido.	2004

OTRAS PUBLICACIONES CONT.

Kosmatka S., et al	Diseño y control de las mezclas de hormigón. 14ª Edición, Asociación de Cemento Portland. Skokie, IL, EE.UU.	2003
Kraenkel T., Gehlen C.	Ensayos de reología y trabajabilidad del hormigón para cimentaciones profundas en Europa y Estados Unidos. Informe de investigación No. 20-F-0107, Cátedra de Ciencia de los Materiales y Ensayos, Centro de Materiales de Construcción, Universidad Técnica de Múnich	2018
Li C., et al	Simulación numérica del flujo del hormigón fresco en cimentaciones profundas, Cálculos de Ingeniería	2018
Littlechild B., Plumbridge G.	Influencia de las técnicas constructivas sobre el comportamiento de pilotes perforados hormigonados in situ construidos bajo lodo de perforación, Actas de 7ª Conf. Int. sobre Pilotes y Cimentaciones Profundas, Viena, DFI, p1.6.1 to 1.6.8	1998
Loukili A. (Ed.)	Les bétons auto-plaçants. Hermès Science, Lavoisier. París. Francia. (es: Los hormigones autocompactantes)	2011
Lubach A.	Cavidades de bentonita en muros pantalla. Casos de estudio, desglose del proceso, análisis de escenarios, y experimentos de laboratorio	2004
Kosmatka S., et al	Diseño y control de las mezclas de hormigón. 14ª Edición, Asociación de Cemento Portland. Skokie, IL, EE.UU.	2003
Lowke, D.	Sedimentationsverhalten und Robustheit Selbstverdichtender Betone (Resistencia a la segregación y solidez del hormigón autocompactante). Tesis doctoral, Universidad Técnica de Múnich.	2013
Loukili A. (Ed.)	Los hormigones autocompactantes. Hermès Science, Lavoisier. París. Francia	2011
Lubach A.	Cavidades de bentonita en muros pantalla. Casos de estudio, desglose del proceso, análisis de escenarios, y experimentos de laboratorio	2010
Massoussi N., et al	El carácter heterogéneo de la exudación en las pastas de cemento. Investigación sobre cemento y hormigón 95, pp. 108-116	2017
Neville A.M., Brooks, J.J.	Tecnología del hormigón. Segunda edición 2010, Pearson Education Ltd., Reino Unido	2010
Newman J., Choo, B.S.	Tecnología avanzada de hormigón, Procesos (Vol 4), Capítulo 12, Elsevier	2003
Niederleithinger E., et al	Estudio de viabilidad del ensayo crosshole sónico en pantallas de pilotes secantes. Actas del 23º Simposio SAGEEP sobre la aplicación de la geofísica a los problemas de ingeniería y medio ambiente. Sociedad Geofísica del Medio Ambiente y la Ingeniería. Keystone, Colorado, EE.UU.	2010
Poletto R.J., Tamaro G.J.	Reparaciones de muros pantalla, lecciones aprendidas. Actas del 36ª Conferencia Anual sobre Cimentaciones Profundas. DFI 2011, Boston, EE.UU.	2011
Puller M.	Excavaciones profundas: Manual práctico (2ª Edición), Thomas Telford Publishing Ltd, Londres, Reino Unido	2003
Roussel N. (Ed.)	Entendiendo la reología del hormigón. Woodhead Publishing Ltd., Reino Unido	2012
Roussel N., Cussigh F.	Hormigonado por capas del hormigón autocompactante: Las consecuencias mecánicas de la tixotropía. Investigación sobre cemento y hormigón 38, pp. 624–632	2008
Roussel N., Gram A. (Eds.)	Simulación de flujo del hormigón fresco. Documento de Estado del Arte del Comité Técnico RILEM 222-SCF	2014
Rupnow T., Icenogle P.	Comparación entre hormigón convencional y autocompactante para la construcción de pilotes perforados. Informe final 533. Centro de Investigación del Transporte de Luisiana. 2015	2015
Seitz J.M., Schmidt H.-G.	Bohrpfähle. Ernst & Sohn, Berlín, Alemania (Pilotes perforados)	2000
Sellountou A., et al	Perfil térmico de integridad: Un avance tecnológico reciente en la evaluación de la integridad de pilotes de hormigón. Actas de la Primera Conferencia Internacional, Seminario sobre Cimentaciones Profundas: Santa Cruz, Bolivia	2013
Spruit R.	Detectar anomalías en muros pantalla. Tesis doctoral, Universidad Técnica de Delft, Ingeniería civil y Geociencia. IPSKAMP drukkers, Países Bajos	2015

OTRAS PUBLICACIONES CONT.		
Thorp A., et al	Experiencia reciente en materia de propiedades y ensayos del hormigón tremie. Conferencia Internacional DFI-EFFC sobre Cimentaciones Profundas y Mejora del Terreno, Roma, 5-8 de junio	2018
Torrenti J.M.	Del hormigón fresco al hormigón endurecido. Técnicas del ingeniero, página web (www.techniques-ingenieur.fr), Francia	2009
Turner M.J.	R144 Ensayos de integridad en pilotes. Informe. Asociación de Investigación e Información de la Industria de la Construcción (CIRIA), Reino Unido	1997
Tuthill, L., et al	Observaciones en ensayos y uso de retardantes reductores del agua. ASTM International.	1960
Wallevik O.H.	Reología – Una aproximación científica para el desarrollo del hormigón autocompactante. Actas del 3 ^{er} Simposio Internacional sobre Hormigón Autocompactante. Reykjavik, Islandia.	2003
Yao S. X., Bittner R. B.	Hormigón bajo el agua en pilotes perforados: los temas clave y casos prácticos. Acta de la conferencia Problemas Contemporáneos en Cimentaciones Profundas, GeoDenver 2007, EE.UU.	2007