

Tema 3:
Propiedades del hormigón

CONTENIDO:

| | | |
|---------|--|----|
| 1. | Introducción | 2 |
| 2. | Durabilidad..... | 2 |
| 2.1 | Definición de la agresión exterior. Tipos de ambiente..... | 3 |
| 2.2 | Obtención de la durabilidad | 6 |
| 3. | Propiedades del hormigón fresco..... | 9 |
| 4. | Retracción del hormigón | 11 |
| 5. | Propiedades del hormigón endurecido | 15 |
| 5.1 | Propiedades mecánicas | 15 |
| 5.1.1 | Resistencia a compresión. | 15 |
| 5.1.1.1 | Determinación de la resistencia estimada..... | 20 |
| 5.1.1.2 | Decisiones derivadas del control de resistencia..... | 22 |
| 5.1.2 | Resistencia a tracción..... | 22 |
| 5.2 | Propiedades reológicas..... | 23 |
| 5.2.1 | Deformaciones del hormigón | 23 |
| 5.2.2 | Diagrama tensión-deformación del hormigón | 25 |
| 5.2.3 | Módulo de deformación longitudinal del hormigón | 26 |
| 6. | Dosificación | 26 |
| 7. | Designación de los hormigones | 27 |

1. INTRODUCCIÓN

En el presente tema se realiza un breve estudio de los factores fundamentales a tener en cuenta en la fabricación de un hormigón para que cumpla las condiciones de calidad que se le exige en el proyecto de una estructura de hormigón armado.

Estas exigencias de calidad del hormigón obedecerán tanto a criterios de resistencia y rigidez, como a criterios de durabilidad. Por lo tanto, se introduce el concepto de durabilidad, así como los factores (acciones físicas y químicas) que afectan a esta durabilidad.

Finalmente se estudian las características fundamentales que presenta el material hormigón en las distintas fases por las que atraviesa su formación, hasta alcanzar las características que se le exige como material de construcción.

2. DURABILIDAD

Como se ha visto en el Tema 1, la característica principal del hormigón armado es que se trata de un material mixto, compuesto por hormigón y acero. La finalidad del hormigón es doble: por una parte, específicamente resistente (con gran capacidad para resistir, con bajo coste, importantes solicitaciones de compresión), y por otra parte, de protección de las armaduras de acero.

Esta segunda dimensión está siendo cada vez más tenida en cuenta por los proyectistas y usuarios, ya que como dice la Instrucción EHE-08 una estructura debe ser proyectada y construida para que sea resistente, con suficiente seguridad, durante el periodo de vida útil previsto en el proyecto, así como para resistir la agresividad del ambiente. En efecto, de poco sirve realizar una estructura aparentemente resistente y económica si tras pocos años va a manifestar, debido a la agresividad del ambiente, patologías que comprometan su seguridad y/o funcionalidad, obligando a realizar reparaciones costosas o incluso a afrontar la demolición (ver figuras 2-1 a 2-4).

El fenómeno de degradación más importante de las estructuras de hormigón armado es el de la corrosión de las armaduras, que se produce por ausencia, escasez o calidad del recubrimiento de hormigón para las condiciones ambientales a las que ha estado expuesto el elemento estructural.

Otras formas de degradación tienen su origen en agresiones químicas, como puede la causada por sulfatos, y otras físicas, como las debidas a las heladas o a la erosión mecánica.

La instrucción EHE define la **durabilidad** de una estructura de hormigón como su capacidad para soportar, durante la vida útil para la que ha sido proyectada, las condiciones físicas y químicas a las que está expuesta, y que podrían llegar a provocar su degradación como consecuencia de efectos diferentes a las cargas y solicitaciones consideradas en el análisis estructural.



Figura 2-1: Corrosión de armadura en pilares



Figura 2-2: Corrosión de armadura en viguetas de forjado unidireccional



Figura 2-3: Corrosión de armadura en nervios de forjado reticular



Figura 2-4: Degradación del hormigón en presencia de sulfatos

2.1 Definición de la agresión exterior. Tipos de ambiente

Para tener en cuenta el conjunto de condiciones físicas y químicas a las que va estar sometida la estructura, y poder así incorporar en el proyecto medidas destinadas a garantizar la durabilidad deseada, la Instrucción EHE introduce el concepto de tipo de ambiente [Artículo 8.2]. Éste viene definido por:

- Una **clase general** de exposición, frente al fenómeno de **corrosión** de las armaduras.
- Las **clases específicas** de exposición, frente a otros procesos de degradación **distintos de la corrosión** de las armaduras.

En la tabla 2-1 (Tabla 8.2.2 de la Instrucción EHE-08) se presentan las clases generales de exposición. Todo elemento estructural está sometido a una única clase o subclase general de exposición.

En la tabla 2-2 (Tabla 8.2.3.a de la Instrucción EHE-08) se representan las clases específicas de exposición. Un elemento estructural puede estar sometido a ninguna, una o varias clases específicas de exposición, pero no podrá estarlo simultáneamente a más de una de las subclases definidas para cada una de estas clases.

La clasificación de la agresividad del ataque químico se realizará de acuerdo a los criterios establecidos en la tabla 2-3 (Tabla 8.2.3.b de la Instrucción EHE-08).

En el caso de que un elemento estructural esté sometido a alguna clase específica de exposición, en la designación del tipo de ambiente se reflejarán todas las clases, unidas mediante el signo “+”.

En la memoria se justificará la selección de las clases de exposición consideradas para los distintos elementos estructurales. Así mismo en los planos se reflejará el tipo de ambiente para el que se ha proyectado cada elemento.

| Clase general de exposición | | | Tipo de ataque | Descripción | Ejemplos |
|----------------------------------|-------------------|--------------|---|---|--|
| Clase | Subclase | Designación | | | |
| No agresiva | | I | Ninguno | <ul style="list-style-type: none"> • Interiores de edificios, sin condensaciones | <ul style="list-style-type: none"> • Interiores protegidos de la intemperie |
| Normal | Humedad alta | II a | Corrosión de origen diferente de los cloruros | <ul style="list-style-type: none"> • Interiores con humedad relativa >65%, o con condensaciones • Exteriores sin cloruros, expuestos a lluvia, con precipitación media anual >600 mm • Elementos enterrados o sumergidos | <ul style="list-style-type: none"> • Sótanos no ventilados • Cimentaciones • Tableros y pilas de puentes en esas zonas • Cubiertas de edificios |
| | Humedad media | II b | | <ul style="list-style-type: none"> • Exteriores sin cloruros, expuestos a lluvia, con precipitación media anual <600 mm | <ul style="list-style-type: none"> • Construcciones exteriores protegidas de la lluvia • Tableros y pilas de puente en esas zonas |
| Marina | Aérea | III a | Corrosión por cloruros | <ul style="list-style-type: none"> • Elementos de estructuras marinas por encima del nivel de pleamar • Elementos exteriores de estructuras a menos de 5 km de la línea costera | <ul style="list-style-type: none"> • Edificaciones cerca de la costa • Puentes cerca de la costa • Partes aéreas de diques, pantanales y otras defensas litorales • Instalaciones portuarias |
| | Sumergida | III b | | <ul style="list-style-type: none"> • Elementos de estructuras marinas sumergidas permanentemente por debajo del nivel mínimo de bajamar | <ul style="list-style-type: none"> • Partes sumergidas de diques, pantanales y otras defensas litorales • Cimentaciones y partes sumergidas de pilas de puentes en el mar |
| | En zona de mareas | III c | | <ul style="list-style-type: none"> • Elementos de estructuras marinas en la zona de carrera de mareas | <ul style="list-style-type: none"> • Partes en el recorrido de marea de diques, pantanales y otras defensas litorales • Partes de pilas de puentes sobre el mar, en el recorrido de marea |
| Con cloruros de origen no marino | | IV | | <ul style="list-style-type: none"> • Instalaciones no impermeabilizadas en contacto con agua de elevado contenido de cloruros, sin relación con el mar • Superficies no impermeabilizadas expuestas a sales de deshielo | <ul style="list-style-type: none"> • Piscinas • Pilas de pasos superiores o pasarelas en zonas de nieve • Estaciones de tratamiento de agua |

☞ Se exige cementos resistentes al agua de mar (MR)

TABLA 2-1: Clases generales de exposición

| Clase específica de exposición | | | | Descripción | Ejemplos |
|--------------------------------|---------------------|-------------|----------------------------|---|--|
| Clase | Subclase | Designación | Tipo de ataque | | |
| Química agresiva | Débil | Qa | Ataque químico | <ul style="list-style-type: none"> Elementos situados en ambientes con contenido de sustancias químicas capaces de provocar la alteración del hormigón con velocidad lenta (ver tabla 8.2.3.b) | <ul style="list-style-type: none"> Instalaciones industriales, con sustancias débilmente agresivas según tabla 8.2.3.b. Construcciones en proximidades de áreas industriales, con agresividad débil según tabla 8.2.3.b. |
| | Mediana | Qb | | <ul style="list-style-type: none"> Elementos en contacto con agua de mar Elementos situados en ambientes con contenidos de sustancias químicas capaces de provocar la alteración del hormigón con velocidad media (ver tabla 8.2.3.b) | <ul style="list-style-type: none"> Dolos, bloques y otros elementos para diques. Estructuras marinas en general. Instalaciones industriales, con sustancias de agresividad media según tabla 8.2.3.b. Construcciones en proximidades de áreas industriales, con agresividad media según tabla 8.2.3.b. Instalaciones de conducción y tratamiento de aguas residuales con sustancias de agresividad media según tabla 8.2.3.b. |
| | Fuerte | Qc | | <ul style="list-style-type: none"> Elementos situados en ambientes con contenidos de sustancias químicas capaces de provocar la alteración del hormigón con velocidad rápida (ver tabla 8.2.3.b) | <ul style="list-style-type: none"> Instalaciones industriales, con sustancias de agresividad alta de acuerdo con tabla 8.2.3.b. Instalaciones de conducción y tratamiento de aguas residuales, con sustancias de agresividad alta de acuerdo con tabla 8.2.3.b. |
| Con heladas | Sin sales fundentes | H | Ataque hielo-deshielo | <ul style="list-style-type: none"> Elementos situados en contacto frecuente con agua, o zonas con humedad relativa media ambiental en invierno superior al 75%, y que tengan una probabilidad anual superior al 50% de alcanzar al menos una vez temperaturas por debajo de -5C° | <ul style="list-style-type: none"> Construcciones en zonas de alta montaña. Estaciones invernales. |
| | Con sales fundentes | F | Ataque por sales fundentes | <ul style="list-style-type: none"> Elementos destinados al tráfico de vehículos o peatones en zonas con más de 5 nevadas anuales o con valor medio de la temperatura mínima en los meses de invierno inferior a 0°C | <ul style="list-style-type: none"> Tableros de puentes o pasarelas en zonas de alta montaña. |
| Erosión | | E | Abrasión cavitación | <ul style="list-style-type: none"> Elementos sometidos al desgaste superficial. Elementos de estructuras hidráulicas en los que la cota piezométrica pueda descender por debajo de la presión de vapor del agua. | <ul style="list-style-type: none"> Pilas de puentes en cauces muy torrenciales. Elementos de diques, pantanales y otras obras de defensa litoral que se encuentren sometidas a fuertes oleajes. Pavimentos de hormigón. Tuberías de alta presión. |

TABLA 2-2: Clases específicas de exposición

| Tipo de medio agresivo | Parámetros | Tipo de exposición | | |
|------------------------|--|--------------------|---------------------------|----------------------|
| | | Qa | Qb | Qc |
| | | Ataque débil | Ataque medio | Ataque fuerte |
| Agua | Valor del pH | 6,5 - 5,5 | 5,5 - 4,5 | < 4,5 |
| | CO ₂ agresivo (mg CO ₂ /l) | 15 - 40 | 40 - 100 | > 100 |
| | Ión amonio (mg NH ₄ ⁺ /l) | 15 - 30 | 30 - 60 | > 60 |
| | Ión magnesio (mg Mg ²⁺ /l) | 300 - 1000 | 1000 - 3000 | > 3000 |
| | Ión sulfato (mg SO ₄ ²⁻ /l) | 200 - 600 | 600 - 3000 [Ⓜ] | > 3000 [Ⓜ] |
| Suelo | Residuo seco (mg /l) | 75 - 150 | 50 - 75 | < 50 |
| | Grado de acidez Baumann-Gully | > 20 | Ⓜ | Ⓜ |
| | Ión sulfato (mg SO ₄ ²⁻ /kg de suelo seco) | 2000 - 3000 | 3000 - 12000 [Ⓜ] | > 12000 [Ⓜ] |

Ⓜ Estas condiciones no se dan en la práctica

Ⓜ Se exige cementos resistentes a los sulfatos (SR)

TABLA 2-3: Clasificación de la agresividad química

2.2 Obtención de la durabilidad

Para garantizar la durabilidad adecuada de la estructura se procederá de la siguiente forma:

- Utilizando técnicas preventivas en el momento de **proyecto**. En función del tipo de agresión ambiental al que van a estar sometidos los distintos elementos estructurales, se deciden los siguientes aspectos:
 - ↳ Las formas y detalles estructurales.
 - ↳ El **tipo de hormigón** (incluyendo sus constituyentes, cemento y aditivos). En la tabla 2-4 se recogen las limitaciones de contenido de cemento y relación agua/cemento que establece la EHE-08 (Tabla 37.3.2) en función de la clase de exposición ambiental.

| Clase de exposición | | | | Máxima relación agua/cemento | Contenido de cemento (kg/m ³) | | Resistencia mínima (N/mm ²) Ⓜ |
|----------------------------------|---------------------|--------------|---|------------------------------|---|----------|---|
| Clase | Subclase | Designación | Tipo de ataque | | Mínimo | Máximo Ⓜ | |
| No agresiva | | I | Ninguno | 0,65 | 250 | 400 | 25 |
| Normal | Humedad alta | II a | Corrosión de origen diferente de los cloruros | 0,60 | 275 | | 25 |
| | Humedad media | II b | | 0,55 | 300 | | 30 |
| Marina | Aérea | III a | Corrosión por cloruros | 0,50 | 300 | | 30 |
| | Sumergida | III b | | 0,50 | 325 | | 30 |
| | En zona de mareas | III c | | 0,45 | 350 | | 35 |
| Con cloruros de origen no marino | | IV | | 0,50 | 325 | | 30 |
| Química agresiva | Débil | Qa | Ataque químico | 0,50 | 325 | | 30 |
| | Mediana | Qb | | 0,50 | 350 | | 30 |
| | Fuerte | Qc | | 0,45 | 350 | | 35 |
| Con heladas | Sin sales fundentes | H | Ataque hielo-deshielo | 0,55 | 300 | 30 | |
| | Con sales fundentes | F | Ataque por sales fundentes | 0,50 | 325 | 30 | |
| Erosión | | E | Abrasión cavitación | 0,50 | 300 | 30 | |

Ⓜ En casos excepcionales, previa justificación experimental y autorización expresa de la Dirección de Obra, se podrá superar dicho límite.

Ⓜ Estos valores son recomendados.

TABLA 2-4: Criterios de dosificación y resistencia del hormigón

- ↳ Un **recubrimiento** adecuado que garantice la protección de las armaduras. En las tablas 2-5, 6 y 7 se recogen los recubrimientos mínimos que establece la EHE-08 (Tabla 37.2.4.1.a, b y c).

| Clase de exposición | Tipo de cemento | Resistencia característica del hormigón [N/mm ²] | Vida útil de proyecto (t _g), [años] | |
|---------------------|---|--|---|-----|
| | | | 50 | 100 |
| I | Cualquiera | f _{ck} ≥ 25 | 15 | 25 |
| IIa | CEM I | 25 ≤ f _{ck} < 40 | 15 | 25 |
| | | f _{ck} ≥ 40 | 10 | 20 |
| | Otros tipos de cementos o en el caso de empleo de adiciones al hormigón | 25 ≤ f _{ck} < 40 | 20 | 30 |
| | | f _{ck} ≥ 40 | 15 | 25 |
| IIb | CEM I | 25 ≤ f _{ck} < 40 | 20 | 30 |
| | | f _{ck} ≥ 40 | 15 | 25 |
| | Otros tipos de cementos o en el caso de empleo de adiciones al hormigón | 25 ≤ f _{ck} < 40 | 25 | 35 |
| | | f _{ck} ≥ 40 | 20 | 30 |

TABLA 2-5: Recubrimientos mínimos (mm) para las clases generales de exposición I y II

| Hormigón | Cemento | Vida útil de proyecto (t _g) (años) | Clase general de exposición | | | |
|------------|---|--|-----------------------------|------|------|----|
| | | | IIIa | IIIb | IIIc | IV |
| Armado | CEM II/B-S, B-P, B-V, A-D, CEM III/A, CEM III/B, CEM IV, u hormigón con adición de microsílíce superior al 6% o de cenizas volantes superior al 20% | 50 | 25 | 30 | 35 | 35 |
| | | 100 | 30 | 35 | 40 | 40 |
| | Resto de cementos utilizables | 50 | 45 | 40 | ❶ | ❶ |
| | | 100 | 65 | ❶ | ❶ | ❶ |
| Pretensado | CEM II/A-D o bien con adición de humo de sílice superior al 6% | 50 | 30 | 35 | 40 | 40 |
| | | 100 | 35 | 40 | 45 | 45 |
| | Resto de cementos utilizables, según el Artículo 26º | 50 | 65 | 45 | ❶ | ❶ |
| | | 100 | ❶ | ❶ | ❶ | ❶ |

❶ Estas situaciones obligarían a unos recubrimientos excesivos, desaconsejables desde el punto de vista de la ejecución del elemento. En estos casos, se recomienda comprobar el Estado Límite de Durabilidad según lo indicado en el Anejo nº 9, a partir de las características del hormigón prescrito en el Pliego del prescripciones técnicas del proyecto.

TABLA 2-6: Recubrimiento mínimo (mm) para las clases generales de exposición III y IV

| Clase de exposición | Tipo de cemento | Resistencia característica del hormigón [N/mm ²] | Vida útil de proyecto (t _g), (años) | |
|---------------------|---|--|---|-----|
| | | | 50 | 100 |
| H | CEM III | 25 ≤ f _{ck} < 40 | 25 | 50 |
| | | f _{ck} ≥ 40 | 15 | 25 |
| | Otros tipos de cemento | 25 ≤ f _{ck} < 40 | 20 | 35 |
| | | f _{ck} ≥ 40 | 10 | 20 |
| F | CEM II/A-D | 25 ≤ f _{ck} < 40 | 25 | 50 |
| | | f _{ck} ≥ 40 | 15 | 35 |
| | CEM III | 25 ≤ f _{ck} < 40 | 40 | 75 |
| | | f _{ck} ≥ 40 | 20 | 40 |
| | Otros tipos de cementos o en el caso de empleo de adiciones al hormigón | 25 ≤ f _{ck} < 40 | 20 | 40 |
| | | f _{ck} ≥ 40 | 10 | 20 |
| E ② | Cualquiera | 25 ≤ f _{ck} < 40 | 40 | 80 |
| | | f _{ck} ≥ 40 | 20 | 35 |
| Qa | CEM II/B-S, B-P, B-V, A-D, CEM III, CEM IV u hormigón con adición de microsílíce superior al 6% o de cenizas volantes superior al 20% | - | 40 | 55 |
| | Resto de cementos utilizables | - | ❶ | ❶ |
| Qb, Qc | Cualquiera | - | ❸ | ❸ |

❶ Estas situaciones obligarían a unos recubrimientos excesivos

❷ Estos valores corresponden a condiciones moderadamente duras de abrasión. En el caso de que se prevea una fuerte abrasión, será necesario realizar un estudio detallado.

❸ El Autor del proyecto deberá fijar estos valores de recubrimiento mínimo y, en su caso, medidas adicionales, al objeto de que se garantice adecuadamente la protección del hormigón y de las armaduras frente a la agresión química concreta de que se trate.

TABLA 2-7: Recubrimientos mínimos para las clases específicas de exposición

- ✎ El valor máximo aceptable de **abertura de fisuras** en el hormigón. En la tabla 2-8 se recogen los valores que establece la EHE-08 (Tabla 5.1.1.2).

| Clase de exposición | Hormigón armado | Hormigón pretensado |
|---|-----------------|---------------------|
| I | 0,4 | 0,2 |
| IIa, IIb, H | 0,3 | 0,2 ^❶ |
| IIIa, IIIb, IV, F, Qa ^❶ | 0,2 | Descompresión |
| IIIc, Qb ^❶ , Qc ^❶ | 0,1 | |

❶ Adicionalmente deberá comprobarse que las armaduras activas se encuentran en la zona comprimida de la sección, bajo la combinación de acciones cuasipermanentes.

❷ La limitación relativa a la clase Q sólo será de aplicación en el caso de que el ataque químico pueda afectar a la armadura. En otros casos, se aplicará la limitación correspondiente a la clase general correspondiente.

TABLA 2-8: valor máximo aceptable de apertura de fisuras, w_{mán} [mm]

- ✎ En caso de ambientes muy agresivos, las eventuales medidas de protección superficiales, y de protección de las armaduras contra la corrosión.
- Utilizando técnicas de control, en el momento de la **ejecución**, asegurando que se respetan estrictamente:
- ✎ las prescripciones de proyecto,

- ↳ una serie de reglas de buena práctica encaminadas a la realización de una estructura íntegra, con un hormigón de elevada calidad y curado adecuadamente.

3. PROPIEDADES DEL HORMIGÓN FRESCO

El hormigón fresco es un material heterogéneo formado por elementos sólidos (áridos y cemento), líquidos (agua) y gaseosos (aire ocluido). Además, los elementos sólidos son muy heterogéneos entre sí ya que están constituidos por granos de distinto tamaño y naturaleza. En general se denomina amasada a la cantidad de hormigón fabricada de una sola vez.

Entre las propiedades del hormigón fresco figuran:

- La **homogeneidad**. Corresponde con el mantenimiento de características similares dentro de una misma amasada.
- La **uniformidad**. Corresponde con el mantenimiento de características similares entre distintas amasadas.
- La **densidad**. El procedimiento de ensayo viene recogido en la Norma UNE-EN 12350-6:2006 “Ensayos de hormigón fresco. Parte 6: Determinación de la densidad”.
- La **docilidad**. Se define como la aptitud de un hormigón para ser puesto en obra con los medios de compactación de que se dispone. Depende, entre otros, de los siguientes factores:
 - ↳ De la cantidad de agua de amasado. A menor cantidad de agua menor docilidad.
 - ↳ De la granulometría y naturaleza de los áridos. Los áridos grandes y los procedentes de machaqueo presentan una menor docilidad que los áridos pequeños y naturales de aristas redondeadas.
 - ↳ Del contenido de cemento. A mayor contenido de cemento menor docilidad.
- La **consistencia**. La docilidad del hormigón es un concepto cualitativo. Para cuantificar este concepto surge el de consistencia, cuyo valor se obtiene mediante los ensayos oportunos, entre los cuales destaca el método del cono de Abrams¹. Es éste un molde troncocónico de 30 cm de altura que se rellena con el hormigón a ensayar. La pérdida de altura que experimenta la masa fresca del hormigón una vez desmoldada, expresada en centímetros, da una medida de su consistencia.

¹ El procedimiento de ensayo viene recogido en la Norma UNE-EN 12350-2:2009; “Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento”.



Fig. 3-1 Ensayo del cono de Abrams para la medida de la consistencia

Las distintas consistencias y los valores límites de los asentos correspondientes en el cono de Abrams son los que se indican en la tabla 3-1 y en la figura 3-2:

| Consistencia | Asiento en cm | Tolerancia |
|-------------------|---------------|------------|
| Seca ² | 0-2 | 0 |
| Plástica | 3-5 | ±1 |
| Blanda | 6-9 | ±1 |
| Fluida | 10-15 | ±2 |
| Líquida | 16-20 | ±2 |

TABLA 3-1. Valores límites de los asentos según la consistencia

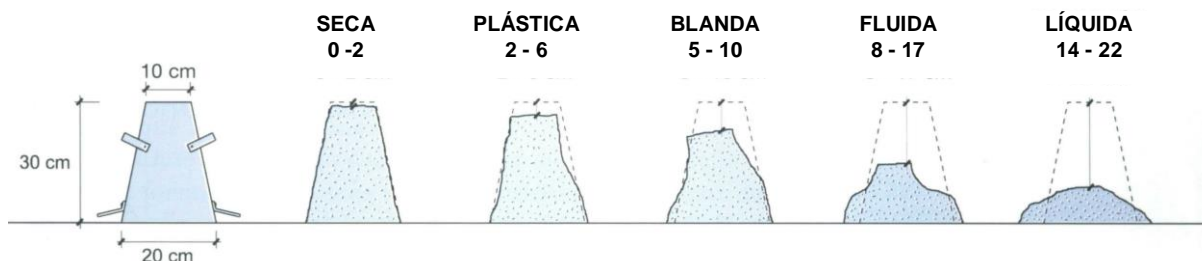


Fig. 3-2 Valores límites de los asentos según la consistencia

En el caso de hormigones para edificación, se recomienda en general que el asiento en el cono de Abrams no sea inferior a 6 cm. ^{EHE-Comentarios 31.5}, es decir, se recomienda el empleo de hormigones de consistencia blanda.

² Para la consistencia seca debe emplearse el método de la mesa vibratoria que viene recogido en la Norma UNE-EN 12350-3:2009 “Ensayos de hormigón fresco. Parte 3: Ensayo Vebe”

4. RETRACCIÓN DEL HORMIGÓN

La retracción del hormigón es el fenómeno que se produce cuando, durante el proceso de fraguado y endurecimiento en contacto con el aire, el hormigón contrae de volumen.

La retracción puede explicarse por la pérdida paulatina de agua en el hormigón.

Los factores que influyen en la retracción son, con su respectiva influencia:



Fig. 4-1 Fisuras de retracción

| FACTOR | AUMENTA LA RETRACCIÓN | DISMINUYE LA RETRACCIÓN |
|--------------------------------------|---|---|
| La humedad del ambiente | | A mayor humedad menor retracción |
| El tipo y clase del cemento | Dan mayor retracción los cementos más resistentes y rápidos a igualdad de las restantes variables | |
| La finura de molido del cemento | A mayor finura mayor retracción | |
| La presencia de finos en el hormigón | A mayor presencia de finos mayor retracción | |
| La cantidad de agua de amasado | A mayor cantidad de agua mayor retracción | |
| La armadura existente en el hormigón | | El hormigón armado retrae menos que el hormigón en masa |

La retracción es una deformación impuesta que provoca tensiones de tracción y, por consiguiente fisuras, cuando se encuentra impedido el libre acortamiento del hormigón; por ello tiene tanta más influencia cuanto más rígida es una estructura. Ejemplos de fisuras de retracción se muestran en las figuras 4-1, 4-2 y 4-3.

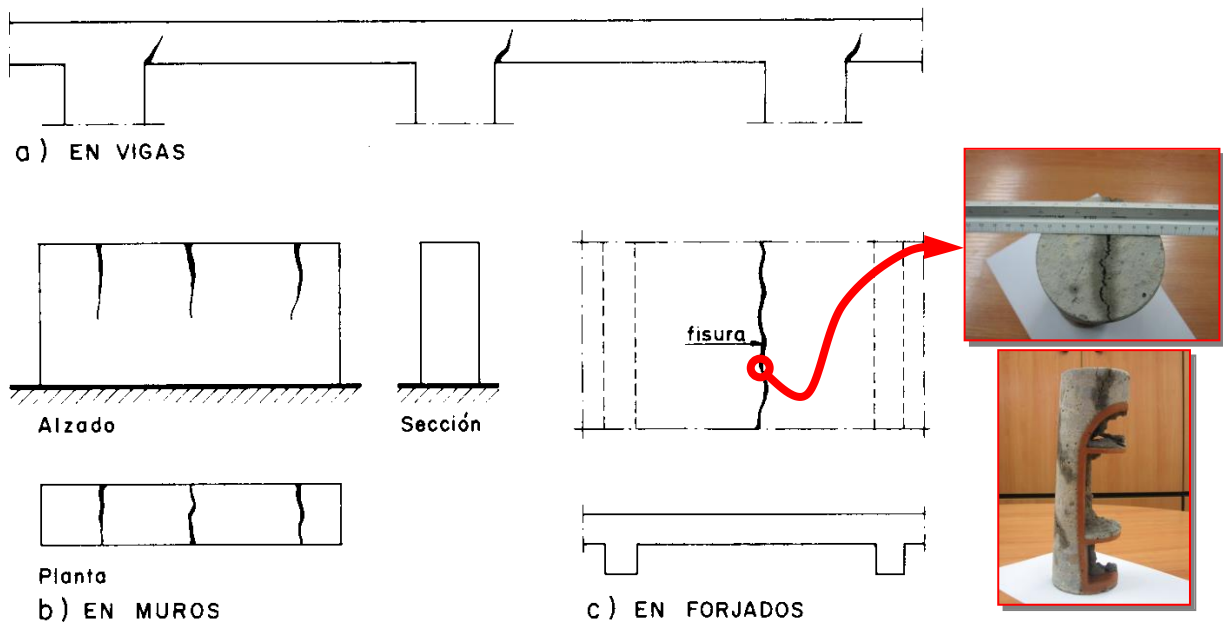


Figura 4-1: Fisuras de retracción en distintos elementos de hormigón



Figura 4-2: Fisura de retracción en una valla de hormigón en masa, consecuencia de la coacción existente en su extremo

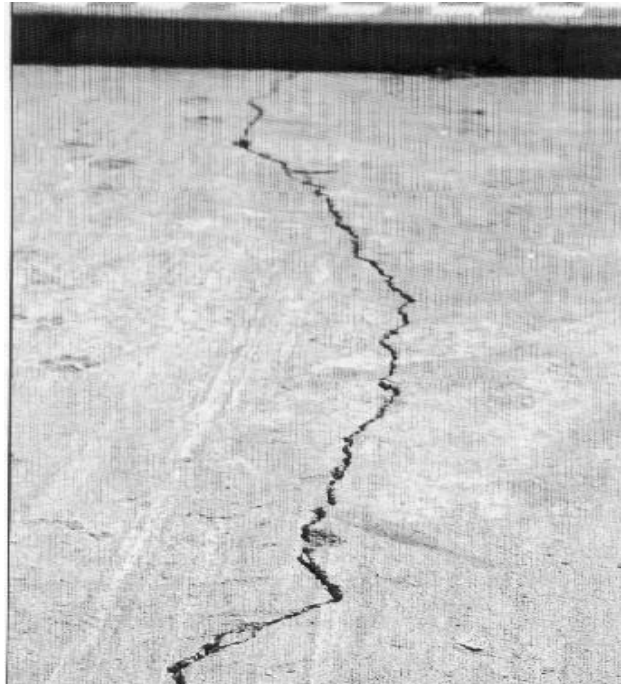


Figura 4-3: Fisura de retracción en una solera de hormigón sin armadura en su cara superior, consecuencia del fuerte soleamiento durante su fraguado y endurecimiento

La cuantía de la retracción en hormigones normales puede evaluarse, según la Instrucción EHE (Artículo 39.7) en función de las siguientes variables:

- tiempo transcurrido desde la ejecución $t-t_s$
donde:
 - ↳ t : es la edad del hormigón en el instante de evaluación
 - ↳ t_s : es la edad del hormigón al comienzo de la retracción
- humedad relativa en el ambiente
- espesor medio de la pieza, definido convencionalmente como

$$e = \frac{2 \cdot A_c}{u}$$

donde:

- ↳ A_c : es el área de la sección transversal
- ↳ u : es el perímetro en contacto con la atmósfera

A partir de ellas, la siguiente tabla de triple entrada [Tabla 39.7, Instrucción EHE] suministra los valores relativos de retracción [expresados adimensionalmente, en 10^{-6}]:

| t-t _s [días] | Humedad relativa [%] | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 50 | | | 60 | | | 70 | | | 80 | | |
| | Espesor medio e [mm]: $e = \frac{2 \cdot A_c}{u}$ | | | | | | | | | | | |
| | 50 | 150 | 600 | 50 | 150 | 600 | 50 | 150 | 600 | 50 | 150 | 600 |
| 14 | -193 | -69 | -17 | -173 | -61 | -15 | -145 | -51 | -13 | -107 | -38 | -10 |
| 30 | -262 | -99 | -25 | -235 | -89 | -23 | -197 | -75 | -19 | -146 | -55 | -14 |
| 90 | -369 | -166 | -44 | -331 | -149 | -39 | -277 | -125 | -33 | -206 | -93 | -24 |
| 365 | -466 | -292 | -87 | -417 | -262 | -78 | -350 | -219 | -65 | -260 | -163 | -49 |
| 1.825 | -507 | -434 | -185 | -454 | -388 | -165 | -381 | -326 | -139 | -283 | -242 | -103 |
| 10.000 | -517 | -499 | -345 | -463 | -448 | -309 | -388 | -375 | -259 | -288 | -279 | -192 |

TABLA 4-1: Valores de la retracción [10^{-6}]

Para paliar los efectos de la retracción se emplean los siguientes procedimientos:

- Disponer junta permanente (muros, pavimentos...) o temporales (presas, arcos...). Estas últimas se hormigonan después, cuando las dos partes aisladas han experimentado la mayor parte de su retracción.
- Proteger y realizar un curado prolongado de las superficies, especialmente en tiempo seco.



Figura 4-4: Curado mediante riego directo durante el fraguado y primer período de endurecimiento del hormigón.

- Disponer armaduras repartidas de pequeño diámetro, en forma de malla superficial (forjados) o armaduras de piel (vigas esbeltas).



Figura 4-5: Armadura de reparto en la capa de compresión de forjados

5. PROPIEDADES DEL HORMIGÓN ENDURECIDO

5.1 Propiedades mecánicas

5.1.1 Resistencia a compresión.

Desde el punto de vista estructural, la resistencia a compresión simple es sin duda la característica mecánica más importante de un hormigón. Su determinación se realiza mediante ensayos normalizados sobre probetas cilíndricas o cúbicas.

En la figura 5-1 se muestran las distintas etapas necesarias para la obtención de la resistencia a compresión del hormigón por rotura de probetas cilíndricas.



Fabricación de probetas en obra



Conservación en cámara húmeda del laboratorio de ensayos



Refrentado. Obtención de la planeidad de la cara superior de la probeta



Rotura de la probeta. Se muestra la probeta antes y después de romper

Figura 5-1: Etapas del proceso de obtención de la resistencia a compresión del hormigón

La resistencia del hormigón a compresión establecida en la Instrucción EHE se refiere a la resistencia de la unidad de producto o amasada. Se obtiene, a partir de los resultados de los ensayos de rotura a compresión, en número igual o superior a dos, realizados sobre probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, de 28³ días de edad, fabricadas, conservadas, refrentadas y rotas por compresión según métodos normalizados⁴.

Esta definición presupone la homogeneidad del hormigón de cada amasada, lo cual implica atribuir a errores propios de los métodos de ensayo (momento y forma de la toma de la muestra, ejecución de la

³ En algunas obras en las que el hormigón no vaya a estar sometido a sollicitaciones en los tres primeros meses a partir de su puesta en obra, podrá referirse la resistencia a compresión a la edad de 90 días.

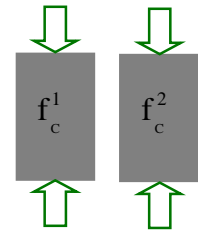
⁴ Las normas UNE que recogen estos métodos son:

- UNE-EN 12350-1:2009. Ensayos de hormigón fresco. Parte 1: Toma de muestras
- UNE-EN 12390-2:2009. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia
- UNE-EN 12390-3:2009. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas

probeta, transporte y conservación, etc.), las posibles discrepancias entre los resultados obtenidos en las distintas probetas de la misma amasada. De esta forma, no se consideraran los ensayos cuando los resultados de las probetas presenten las siguientes desviaciones, en términos del recorrido relativo r (diferencia entre el mayor resultado y el menor, dividida por el valor medio):

$$\text{Para dos probetas: } r = \frac{f_c^2 - f_c^1}{(f_c^1 + f_c^2) / 2} \leq 0,13$$

$$\text{Para tres probetas: } r = \frac{f_c^3 - f_c^1}{(f_c^1 + f_c^2 + f_c^3) / 3} \leq 0,20$$



donde f_c^i representa la resistencia a compresión de la probeta i (ordenadas de menor a mayor).

Si la condición anterior se cumple, la resistencia a compresión del hormigón de la amasada vendrá dada por el valor medio de los resultados de las distintas probetas.

Según el cuidado y rigor con que se confeccione el hormigón, los resultados de estos ensayos serán más o menos dispersos. Esta circunstancia ha de tenerse en cuenta al definir un hormigón por su resistencia.

Los problemas que se presentan al intentar calificar un hormigón por su resistencia son los siguientes:

- ❶ No se conoce la resistencia del hormigón de una amasada hasta los 28 días de su puesta en obra, de tal forma que para entonces, con los ritmos actuales de ejecución, puede ser demasiado tarde.

Para intentar paliar esta situación es habitual ensayar dos probetas a los 7 días de edad, al objeto de poder obtener con suficiente antelación un indicativo de la posible calidad del hormigón colocado en obra. En estos casos, de cada amasada que se ensaya se extraen cuatro probetas en vez de dos (ver Figura 5-1). Dos se ensayan a 7 días y otras dos a 28 días, siendo los primeros resultados informativos y los últimos los que definen convencionalmente la resistencia del hormigón.

- ❷ Dados n resultados de resistencia ($f_{c1}, f_{c2}, \dots, f_{cn}$) obtenidos al ensayar las N amasadas del hormigón la estructura ¿Cuál es el valor que represente la resistencia de ese hormigón? (ver Figura 5-2.).

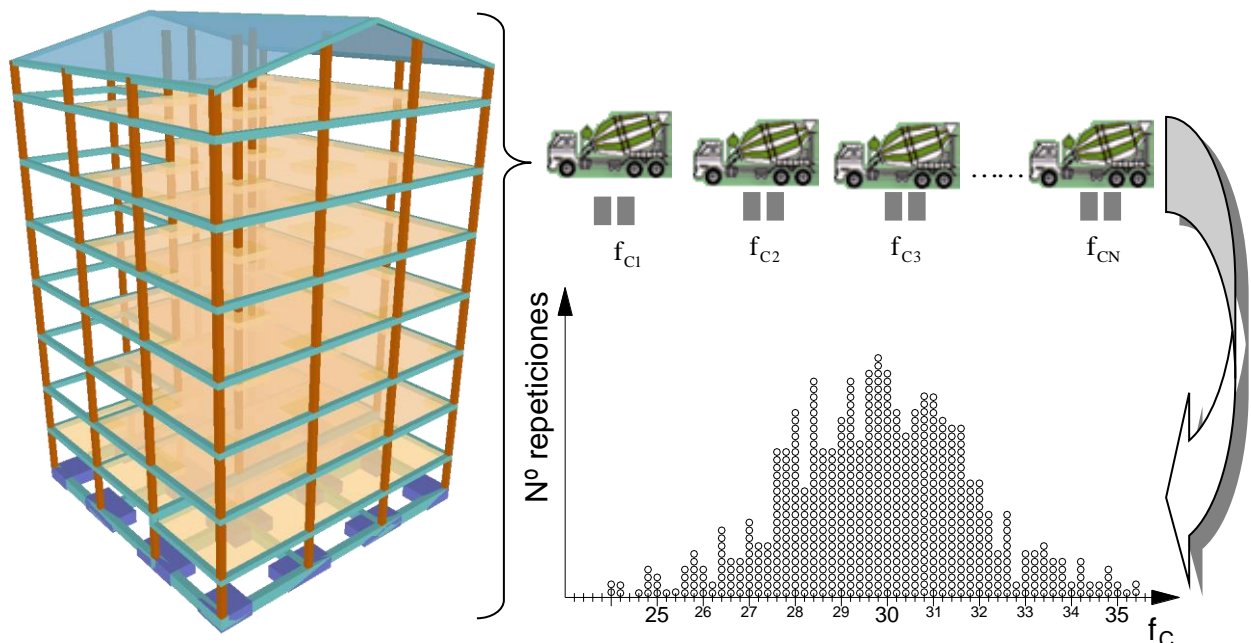


Figura 5-2. Determinación de la resistencia del hormigón de una estructura

Una primera respuesta a este problema consiste en adoptar, para dicho valor, la media aritmética (f_{cm}) de los N valores. Pero el valor así obtenido no refleja la verdadera calidad del hormigón, al no intervenir en su cálculo la dispersión de los resultados.

Por tal motivo se ha adoptado el concepto de resistencia característica, medida estadística obtenida haciendo intervenir simultáneamente el valor de la resistencia media y el coeficiente de variación de la serie de resultados. De esta forma, se define como **resistencia característica** f_{ck} de un hormigón, aquel valor que presenta un nivel de confianza del 95%, es decir, que existe una probabilidad del 5% de que se presenten valores individuales de resistencia inferiores a la resistencia característica f_{ck} . Dicho de un modo más sencillo, un hormigón de resistencia característica f_{ck} sería aquel del que, fabricadas y rotas 100 probetas, solamente 5 darían valores de resistencias inferiores a f_{ck} .

Asociado a este concepto de resistencia característica surgen otros tres:

- **Resistencia de proyecto** f_{ck} : es el valor que se adopta en el proyecto como base de los cálculos. Se denomina también **resistencia especificada**.

La Instrucción EHE, para la resistencia característica especificada, recomienda en el artículo 39.2 la utilización de la siguiente serie:

20; 25; 30; 35; 40; 45; 50

en la cual las cifras indican la resistencia característica especificada del hormigón a compresión a 28 días, expresadas en N/mm^2 . La resistencia de 20 N/mm^2 se limita en su utilización a hormigones en masa.

La resistencia de 25 N/mm^2 se emplea generalmente en edificación, salvo que exista una clase específica de agresión en cuyo caso puede llegar a utilizarse la resistencia de 30 ó 35 N/mm^2 (ver tabla 2-4). Las restantes resistencias se suelen utilizar en obras importantes de ingeniería y en prefabricación.

- **Resistencia característica real** $f_{c,real}$ de la obra: es el valor que corresponde a un nivel de confianza del 95% en la distribución de resistencias del hormigón colocado en obra.

En la mayoría de los casos, puede suponerse que la resistencia del hormigón se comporta de acuerdo con una distribución gaussiana (Figura 5-3), en cuyo caso la resistencia característica real $f_{c,real}$, viene dada por la expresión:

$$f_{c,real} = f_{cm} (1 - 1,64 \cdot \delta)$$

donde f_{cm} es la resistencia media y δ es el coeficiente de variación de la población.

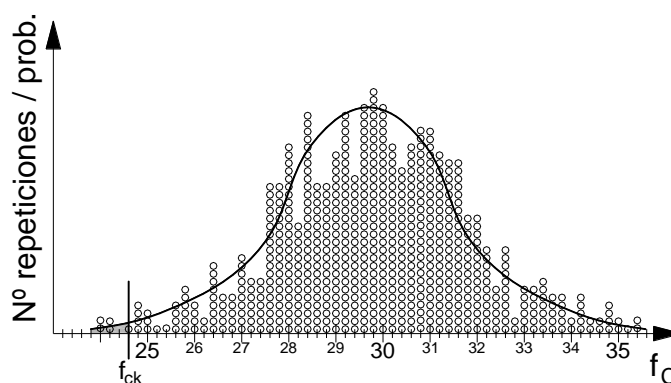


Figura 5-3

- **Resistencia característica estimada** f_{est} : es el valor que estima o cuantifica la resistencia característica real de obra a partir de un número finito de resultados de ensayos normalizados de resistencia sobre probetas tomadas en obra.
- Ⓢ Es necesario tener ejecutada toda la estructura para poder conocer la resistencia del hormigón, situación que puede ser crítica si la resistencia obtenida no alcanza el valor especificado en proyecto.

Para intentar minimizar este problema la Instrucción EHE permite dividir la estructura en unidades más pequeñas, denominadas LOTES, a las que se les calcula su resistencia

característica y para las que se establecen los criterios de aceptación del hormigón (ver Figura 5-4).

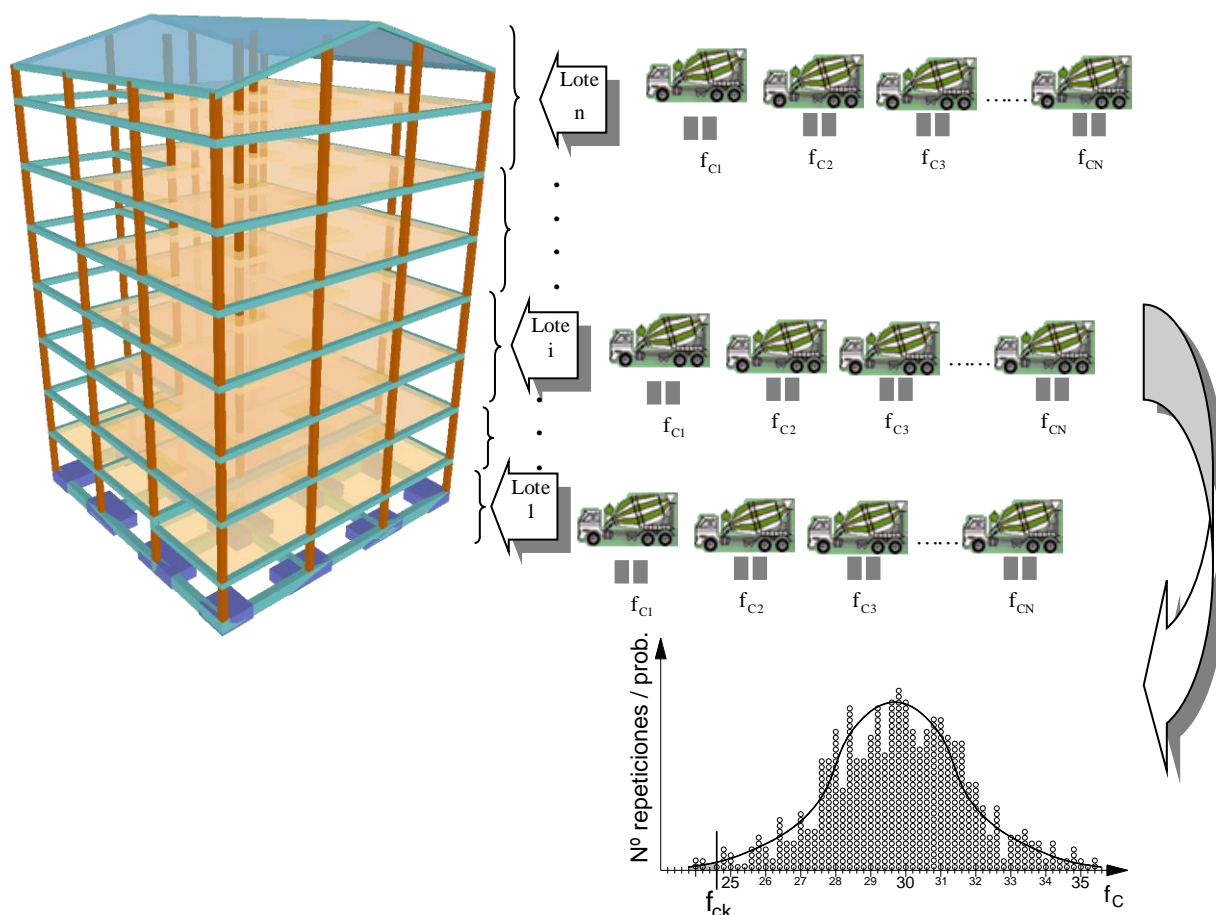


Figura 5-4. Determinación de la resistencia característica del hormigón de un lote
El tamaño del lote de control queda definido con los criterios que se indican en la Tabla 5-2.

| LIMITE SUPERIOR | TIPO DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES | | |
|-------------------------------|--|---|--|
| | Elementos o grupos de elementos que funcionan fundamentalmente a compresión (pilares, pilas, muros portantes, pilotes, etc.) | Estructuras que tienen únicamente elementos sometidos a flexión (forjados de hormigón con pilares metálicos, tableros, muros de contención, etc.) | Macizos (zapatas, estribos de puente, bloques, etc.) |
| Volumen de hormigón | 100 m ³ | 100 m ³ | 100 m ³ |
| Tiempo de hormigonado | 2 semanas | 2 semanas | 1 semana |
| Superficie construida | 500 m ² | 1000 m ² | --- |
| Numero de plantas construidas | 2 | 2 | --- |

TABLA 5-2. Límites máximos para el establecimiento de los lotes de control

Además, en la lotificación de la estructura se tendrá que tener en cuenta lo siguiente:

- ↳ No se mezclarán en un mismo lote elementos de tipología estructural distinta (columnas distintas de la tabla 5-2)
- ↳ El hormigón de un mismo lote procederán del mismo suministrador, estará elaboradas con las mismas materias primas y será el resultado de la misma dosificación nominal.
- ↳ Para el caso de hormigones fabricados en central de hormigón en posesión de un Sello o Marca de Calidad oficialmente reconocido por un Centro Directivo de las Administraciones

Publicas o un distintivo reconocido o un CC-EHE, se podrán aumentar los límites de la tabla 5-2 al doble, siempre y cuando se den además las condiciones siguientes:

- Los resultados de control de producción están a disposición del Peticionario y deberán ser satisfactorios. La Dirección de Obra revisara dicho punto y lo recogerá en la documentación final de obra.
- El numero mínimo de lotes que deberá muestrearse en obra será de tres, correspondiendo, si es posible, a lotes relativos a los tres tipos de elementos estructurales que figuran en la tabla 5-2.
- En el caso de que en algún lote f_{est} fuera menor que la resistencia característica del proyecto, se pasara a realizar el control normal sin reducción de intensidad, hasta que en cuatro lotes consecutivos se obtengan resultados satisfactorios.

5.1.1.1 Determinación de la resistencia estimada

La Instrucción EHE permite determinar la resistencia estimada del hormigón utilizando cualquier de los dos controles de recepción que a continuación se indican:

- Control al 100 por 100

En esta modalidad de control se determina la resistencia de todas las amasadas componentes de la parte de estructura (lote) sometida a control

La resistencia característica determinada en esta modalidad de control es la real del hormigón y viene dada por el valor de resistencia que ocupa uno de los siguientes lugares en la serie de todos los valores ordenados de menor a mayor:

| Numero de amasadas N | Lugar del valor característico (ordenados de menor a mayor) |
|----------------------|---|
| ≤ 20 | 1º |
| $20 < N \leq 40$ | 2º |
| $40 < N \leq 60$ | 3º |

TABLA 5-1

- Control estadístico.

Con este tipo de control se determina la resistencia a compresión solo de una fracción de las amasadas que constituyen`

Para cada lote el número mínimo de amasadas a ensayar será función la resistencia de proyecto del hormigón:

$$\text{↯ Si } f_{ck} \leq 25 \text{ N/mm}^2 \rightarrow N \geq 2$$

$$\text{↯ Si } 25 \text{ N/mm}^2 \leq f_{ck} \leq 35 \text{ N/mm}^2 \rightarrow N \geq 4$$

$$\text{↯ Si } f_{ck} \geq 35 \text{ N/mm}^2 \rightarrow N \geq 6$$

Cuando el lote abarque dos plantas del edificio, al menos una amasada de las ensayadas en el lote será de cada planta.

Se ordenan las resistencias de las N amasadas de cada lote de menor a mayor:

$$X_1 \leq X_2 \leq \dots \leq X_m \leq \dots \leq X_N$$

Se define como resistencia característica estimada (f_{est}) del lote la que cumple las siguientes expresiones:

- Si $N < 6 \Rightarrow f_{est} = K_N \cdot X_1$
- Si $N \geq 6 \Rightarrow f_{est} = 2 \cdot \frac{(X_1 + X_2 + \dots + X_{m-1})}{m-1} - X_m \leq K_N \cdot X_1$

es decir: si $f_{est} < K_N \cdot X_1$, se tomara el valor $f_{est} = K_N \cdot X_1$

siendo:

K_N un coeficiente tabulado en función de N y la clase de instalación en que se fabrique el hormigón (ver tabla 5-3).

| N | HORMIGONES FABRICADOS EN CENTRAL | | | | | | | |
|----------------------|----------------------------------|----------------------|------|------------------------------|-------|------------------------------|-------|-------------|
| | CLASE A | | | CLASE B | | CLASE C | | OTROS CASOS |
| | Recorrido relativo máximo, r | K_N | | Recorrido relativo máximo, r | K_N | Recorrido relativo máximo, r | K_N | |
| Con sello de calidad | | Sin sello de calidad | | | | | | |
| 2 | 0,29 | 0,93 | 0,90 | 0,40 | 0,85 | 0,5 | 0,81 | 0,75 |
| 3 | 0,31 | 0,95 | 0,92 | 0,46 | 0,88 | 0,57 | 0,85 | 0,80 |
| 4 | 0,34 | 0,97 | 0,94 | 0,49 | 0,90 | 0,61 | 0,88 | 0,84 |
| 5 | 0,36 | 0,98 | 0,95 | 0,53 | 0,92 | 0,66 | 0,90 | 0,87 |
| 6 | 0,38 | 0,99 | 0,96 | 0,55 | 0,94 | 0,68 | 0,92 | 0,89 |
| 7 | 0,39 | 1,00 | 0,97 | 0,57 | 0,95 | 0,71 | 0,93 | 0,91 |
| 8 | 0,40 | 1,00 | 0,97 | 0,59 | 0,96 | 0,73 | 0,95 | 0,93 |

TABLA 5-3. Valores de K_N

X_1 : Resistencia de la amasada de menor resistencia.

X_m : Resistencia de la amasada ordenada con el numero de orden m.

X_{m-1} : Resistencia de la amasada ordenada con el numero de orden m-1.

m: puede tomar los dos valores siguientes dependiendo de si N es par o impar:

$N/2$, si N es par.

$(N-1)/2$, si N es impar.

Para obtener el coeficiente K_N , se hará a partir de la tabla 5-3. La forma de operar con esta tabla es la que se indica:

- Al comienzo de la obra se acepta la clasificación (A, B o C) que proponga el Suministrador, el cual conocerá a través de sus resultados de control de producción.
- Se recibe del laboratorio los resultados de todas las amasadas del lote. N es el numero de amasadas realmente controladas.
- Se calcula: se determina el recorrido relativo (r) de las resistencias de las N amasadas controladas del lote, de la forma:

$$r = \frac{(X_N - X_1)}{X_{med}}$$

siendo:

X_1 : Resistencia de la amasada de menor resistencia.

X_N : Resistencia de la amasada de mayor resistencia.

X_{med} : Resistencia media de todas las amasadas controladas del lote.

que debe de ser inferior al recorrido relativo (r) máximo especificado en la tabla para el tipo de instalación. Si esto se cumple se elige el coeficiente K_N correspondiente.

- Si en algún lote se obtiene un valor de recorrido relativo (r) superior al máximo establecido en la tabla para la clasificación propuesta por la instalación, esta se cambia a la que corresponda al valor tabulado superior al obtenido, utilizando así para la estimación de K_N la nueva columna correspondiente. Esta nueva columna se utilizara para los siguientes lotes, procediendo de igual forma pudiendo cambiar de nuevo de columna.
- Para volver a aplicar el K_N correspondiente al nivel inmediatamente anterior (columna de la tabla utilizada antes) será necesario haber obtenido en 5 lotes consecutivos (el ensayado y los 4 siguientes) resultados del recorrido relativo inferior o igual al máximo que se este utilizando, pudiendo aplicar al quinto resultado y a los siguientes el nuevo

valor del coeficiente K_N . La mejora de la clasificación solo puede producirse de una en una. De la C a la B y de la B a la A.

- La columna Otros casos esta reservada para aquellas instalaciones que no puedan ser consideradas central, independientemente del recorrido relativo de la muestra.

5.1.1.2 Decisiones derivadas del control de resistencia

Obtenido el valor de la resistencia característica estimada, f_{est} , de un lote se tomaran diferentes decisiones en función de los siguientes resultados:

- Si $f_{est} \geq f_{ck} \Rightarrow$ El lote puede ser aceptado.
- Si $0,90 \cdot f_{ck} \leq f_{est} < f_{ck} \Rightarrow$ Aceptación del lote, sin perjuicio de las sanciones previstas en el pliego de prescripciones técnicas particulares.
- Si $f_{est} < 0,90 \cdot f_{ck} \Rightarrow$ La aceptación, refuerzo o demolición quedan pendientes de los siguientes estudios:
 - ↳ Estudio de la variación del coeficiente de seguridad previsto en el proyecto por el hecho de considerar f_{est} .
 - ↳ Realización de ensayos complementarios con el fin de obtener una estimación del coeficiente de seguridad del elemento con la resistencia del hormigón obtenida en los mismos.
 - ↳ Ensayos de puesta en carga.

La decisión será tomada por la Dirección Facultativa en función de la información obtenida.

5.1.2 Resistencia a tracción

Desde un principio se sabe que el hormigón resiste bien los esfuerzos de compresión y mal los de tracción, por lo que no suele contarse con su colaboración para esta sollicitación, que es absorbida en su totalidad por las armaduras.

No obstante, al estar ligada la resistencia a tracción con otros fenómenos distintos del resistente, como pueden ser la fisuración (y por lo tanto con la durabilidad) o la posibilidad de rotura frágil en secciones muy débilmente armadas (ductilidad), es necesario conocer dicha resistencia.

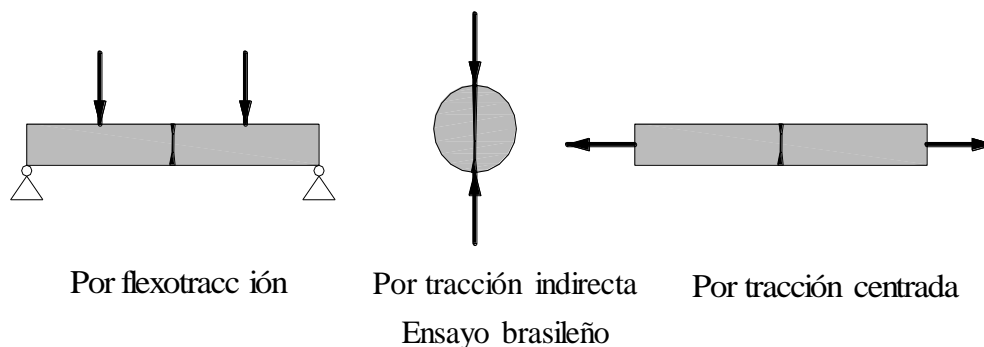


Figura 5-5: Ensayos para la obtención de la resistencia a tracción del hormigón

Como ocurre con la resistencia a compresión, la resistencia a tracción es un valor un tanto convencional que depende del tipo de ensayo. Existen tres formas de obtener la resistencia a tracción: por flexotracción⁵, por tracción indirecta⁶ (ensayo brasileño) y por ensayo directo de tracción. En la figura 5-5 se muestran los esquemas de estos tres ensayos.

⁵ UNE-EN 12390-5:2009; “Ensayos de hormigón endurecido. Parte 5. Resistencia a flexión de probetas”.

⁶ UNE-EN 12390-6:2010; “Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6. Resistencia a tracción indirecta de probetas”.

Si no se dispone de resultados de ensayos, podrá estimarse la resistencia a tracción en función de la resistencia característica de proyecto a compresión, mediante las fórmulas:

- resistencia característica inferior a tracción (correspondiente al cuantil del 5%):

$$f_{ct,k} = 0,70f_{ct,m}$$

- resistencia media a tracción:

$$f_{ct,m} = 0,30f_{ck}^{2/3} \quad \text{para } f_{ck} \leq 50 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{ct,m} = 0,58f_{ck}^{1/2} \quad \text{para } f_{ck} > 50 \text{ N/mm}^2$$

donde, $f_{ct,k}$, y $f_{ct,m}$, están expresadas en N/mm^2 .

La elección del valor de f_{ct} a introducir en los cálculos depende del tipo de problema: para el estado límite de formación de fisuras debe tomarse el valor característico, y para el estudio de deformaciones, el valor medio.

5.2 Propiedades reológicas

La Reología es la rama de la Mecánica que estudia la evolución de las deformaciones de un material, producidas por causas tensionales, a lo largo del tiempo.

5.2.1 Deformaciones del hormigón

Para clasificar las deformaciones que se producen en el hormigón, realizaremos dos procesos de carga y descarga de una probeta de hormigón, y observaremos la evolución de sus deformaciones en el tiempo. El primero de ello se realizará con carga instantánea y el segundo con carga mantenida.

- a) Carga y descarga instantánea.

Supongamos que en el instante inicial $t = 0$ cargamos la probeta a una tensión σ_0 : aparecerá entonces una deformación OA instantánea. Si descargamos inmediatamente la probeta, la deformación no se anula totalmente; se recupera la mayor parte, O'A, y queda una deformación remanente, OO'. Hay dos partes en la deformación instantánea del hormigón: la **deformación elástica**, AO', y la **deformación remanente**, OO'. La primera es recuperable y la segunda no.

A partir de este primer ciclo de carga (carga noval), la deformación remanente no vuelve a presentarse, siempre que la tensión a la que se someta la probeta no supere a la ya aplicada, σ_0 . Dicho de otro modo, el hormigón se comporta frente a las cargas sucesivas (no noval) como perfectamente elástico.

- b) Carga mantenida.

Carguemos ahora la probeta, en el instante t_1 , de manera que se produzca en ella una tensión $\sigma_1 < \sigma_0$: aparecerá una deformación elástica BC. Si se mantiene la carga, la deformación irá creciendo con el tiempo según la curva CD, debido al comportamiento plástico del hormigón. Si al llegar al instante t_2 se descarga la probeta, se recupera instantáneamente la deformación elástica ($DE = BC$); y si se deja transcurrir el tiempo con la probeta descargada, se va recuperando una parte creciente de la deformación, según la curva EF.

Quedan así puestas de manifiesto las tres deformaciones fundamentales del hormigón, que se han acotado en la figura 5-6 referidas al instante t_n : la **deformación elástica instantánea**, la **deformación elástica diferida** y la **deformación plástica diferida**. Estas mismas deformaciones pueden ponerse de manifiesto en un instante t_i anterior a la descarga, sin más que dibujar la rama plástica CC' simétrica de la EF.

Resumiendo lo dicho, pueden clasificarse las deformaciones según la tabla 5-4, en la que se han hecho figurar, además, las deformaciones térmicas y de retracción, independientes de las cargas exteriores.

| | | | |
|---------------|---------------------------------------|-------------------------------|---|
| | Dependientes de las cargas exteriores | | Independientes de las cargas exteriores |
| | Instantáneas | Diferidas (FLUENCIA) | |
| Reversibles | ELÁSTICAS | ELÁSTICAS DIFERIDAS | TÉRMICAS |
| Irreversibles | REMANENTES | PLÁSTICAS DIFERIDAS | RETRACCIÓN |

TABLA 5-4: Tipos de deformaciones del hormigón

La consideración de la fluencia del hormigón está recogida en el Artículo 39.8 de la Instrucción EHE.

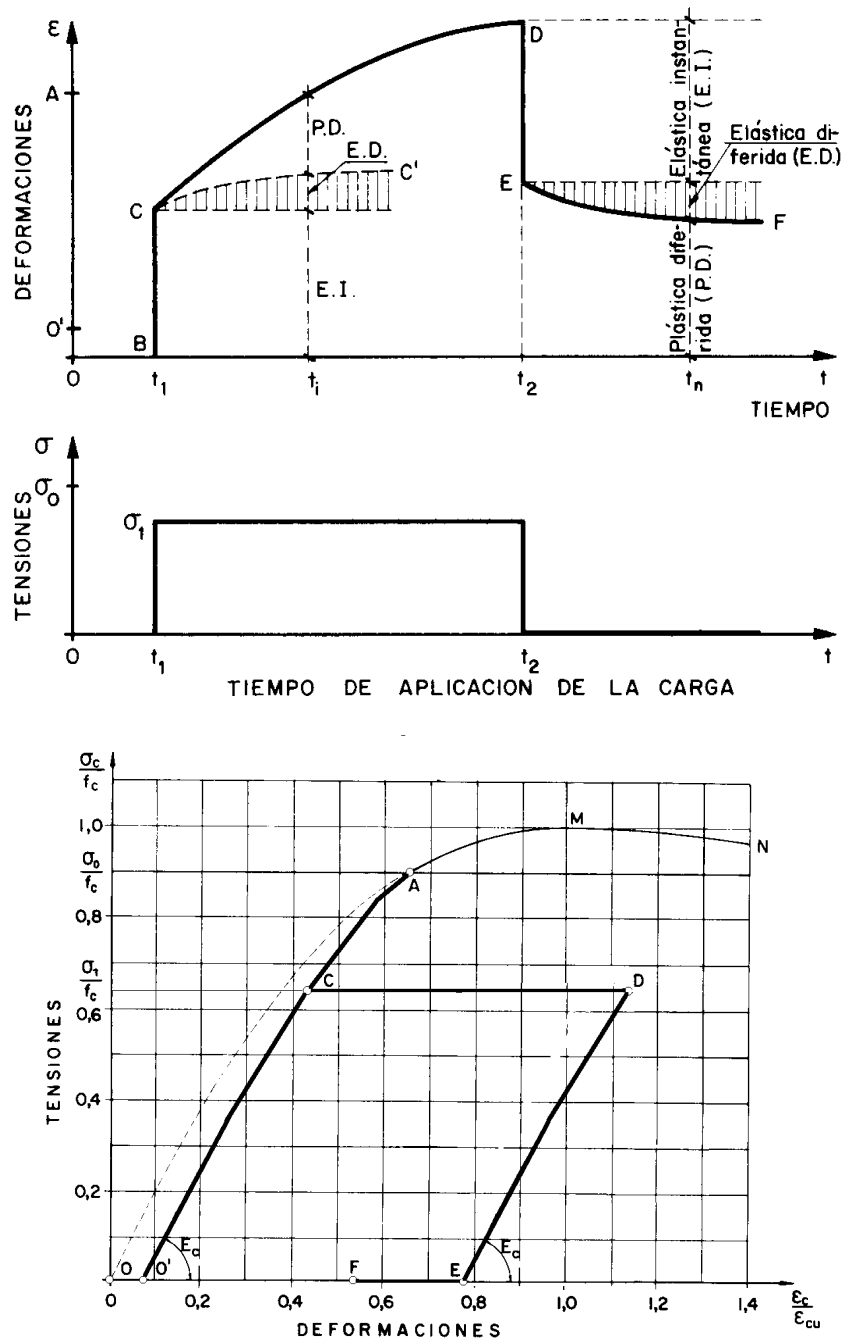


Figura 5-6: Procesos de carga y carga de una probeta de hormigón

5.2.2 Diagrama tensión-deformación del hormigón

El diagrama tension-deformación del hormigón depende de numerosas variables: edad del hormigón, duración de la carga, forma y tipo de la sección, naturaleza de la sollicitación, etc..

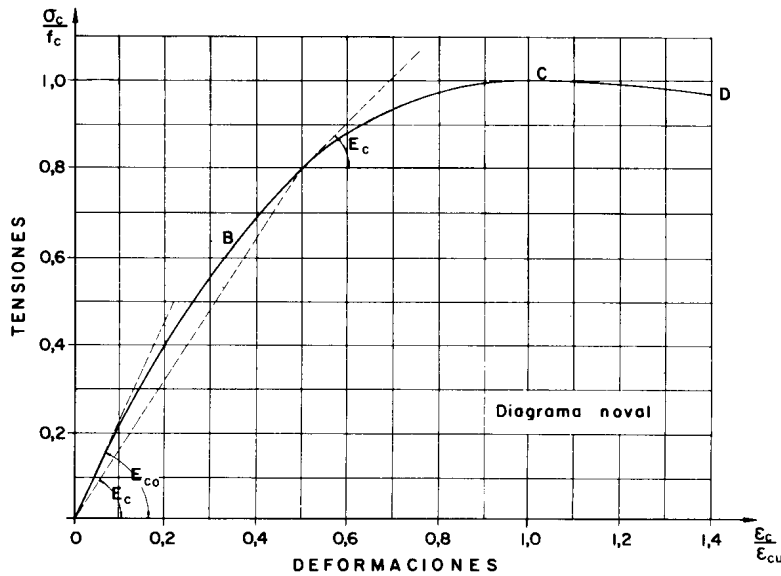
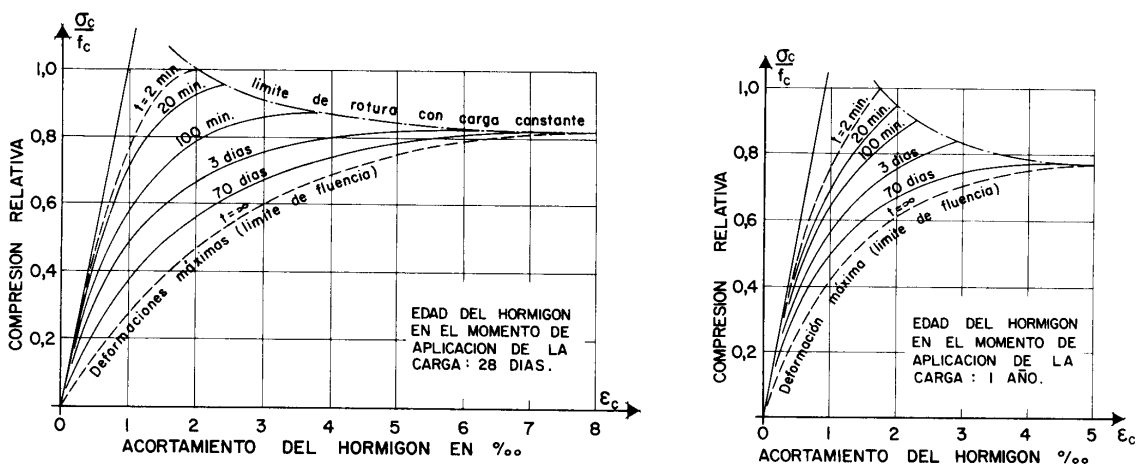


Figura 5-7: Diagrama noval tensión-deformación del hormigón

Puede considerarse, a título puramente cualitativo, que el diagrama noval tensión-deformación del hormigón presenta una parte final parabólica y otra inicial aproximadamente rectilínea, tal y como se observa en la figura 5-7.

El diagrama noval de la figura 5-7 corresponde a una cierta duración del proceso de carga. Si esta duración se hace variar se obtienen otras curvas del tipo de la figura 5-8 (Instrucción EHE, figuras 39.3.a y 39.3.b), donde claramente se observa la influencia de la duración del proceso de carga sobre el diagrama tensión-deformación, o lo que es lo mismo, sobre la deformación producida por un determinado estado de cargas.



Igualmente, la edad del hormigón en el momento de aplicación de la carga influye en la magnitud de su deformación (fluencia), en el sentido de disminuirla cuanto menos joven es el material, como puede apreciarse igualmente en la figura 5-8.

5.2.3 Módulo de deformación longitudinal del hormigón

El hormigón se comporta como un material elástico sólo para tensiones reducidas y de corta duración, tal y como se ha comentado en el apartado anterior. No cabe hablar por tanto de módulo de elasticidad, sino de módulo de deformación longitudinal. Dada la curvatura del diagrama tensión-deformación el módulo de deformación no es constante.

Podemos distinguir los siguientes conceptos:

- **Módulo tangente**, también llamado **módulo de elasticidad**, cuyo valor es variable en cada punto y viene dado por la inclinación de la tangente a la curva en dicho punto:

$$E_c = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$$

- **Módulo secante**, también llamado **módulo de deformación**, cuyo valor es variable en cada punto y viene medido por la inclinación de la recta que une el origen con dicho punto.

$$E_c = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

- **Módulo inicial**, también llamado **módulo de elasticidad en el origen**, que corresponde a tensión nula, en cuyo caso coinciden el módulo tangente y el secante. Viene medido por la inclinación de la tangente a la curva en el origen.

Para el cálculo de la deformación instantánea, la Instrucción EHE (Artículo 39.6) establece que para cargas instantáneas o rápidamente variables, el módulo longitudinal inicial del hormigón (pendiente de la tangente en el origen a la curva tensión-deformación) a la edad de j días puede tomarse igual a:

$$E_{0j} = 10.000 \sqrt[3]{f_{cm,j}}$$

siendo $f_{cm,j}$ la resistencia media a compresión del hormigón a j días de edad, expresada en N/mm^2 para obtener el módulo en N/mm^2 .

Como módulo instantáneo de deformación longitudinal secante (pendiente de la secante) se adoptará

$$E_j = 8.500 \sqrt[3]{f_{cm,j}}$$

siempre que las tensiones, en condiciones de servicio, no superen el valor de $0,45 f_{c,j}$, siendo $f_{c,j}$ la resistencia característica a compresión del hormigón a j días de edad.

Para realizar un cálculo más riguroso (Artículo 39.6, Instrucción EHE), se emplean coeficientes correctores, α en función de la naturaleza del árido y β en función de la edad del hormigón.

Si no se realiza este cálculo, cuando se trate de cargas duraderas o permanentes podrá tomarse, como criterio aproximado, dos tercios de los valores anteriores en climas húmedos y dos quintos en climas secos, para evaluar la deformación diferida final que, sumada a la instantánea, proporciona la deformación final.

6. DOSIFICACIÓN

El proceso mediante el cual se determinan las cantidades de cemento, agua y áridos necesarias para la obtención de un hormigón, recibe el nombre de dosificación.

Para dosificar correctamente un hormigón hay que tener en cuenta tres factores fundamentales:

- ❑ Las características de **resistencia y rigidez de la estructura**, para lo cual será necesario indicar la **resistencia** que debe tener el hormigón.
- ❑ Las condiciones de **ejecución de la estructura**, para lo cual será necesario indicar la **consistencia** del hormigón para ser puesto en obra y el **tamaño máximo del árido**, que permitan garantizar la ejecución de la estructura con un hormigón adecuadamente compactado, sin formación de coqueas, nidos de grava ...etc.
- ❑ La agresión ambiental que condiciona la **durabilidad de la estructura**, para lo cual será necesario indicar el **Tipo de ambiente**, y, si es necesario, la necesidad de emplear un cemento

con las características adicionales de resistencia a los sulfatos (SR) o al agua de mar (MR). En este sentido será necesario respetar las limitaciones que se recogieron en tabla 2-4.

Aunque hay muchos métodos para dosificar teóricamente un hormigón, las cantidades de los distintos componentes debe establecerse mediante los oportunos ensayos en laboratorio, con objeto de asegurarse de que el hormigón obtenido satisfaga las condiciones o características de calidad exigidas en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares del Proyecto.

En el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares es *siempre necesario indicar las referentes a su resistencia a compresión, su consistencia, tamaño máximo del árido, el tipo de ambiente a que va a estar expuesto, y, cuando sea preciso, las referentes a prescripciones relativas a aditivos y adiciones, resistencia a tracción del hormigón, absorción, peso específico, compacidad, desgaste, permeabilidad, aspecto externo, etc.*^{EHE-30.2}

7. DESIGNACIÓN DE LOS HORMIGONES

Los hormigones se designarán con el siguiente formado:

T-R / C / TM / A

donde:

- T: Indicativo que será:
 - HM: Hormigón en masa.
 - HA: Hormigón armado.
 - HP: Hormigón pretensado.
- R: Resistencia característica especificada, en N/mm². Según la serie: 20⁷; 25; 30; 35; 40; 45; 50; 55; 60; 65; 70; 75; 80; 85; 90; 95; 100
- C: Letra indicativa del tipo de consistencia:

| Consistencia | Asiento en cm | Tolerancia |
|--------------|---------------|------------|
| Seca | 0-2 | 0 |
| Plástica | 3-5 | ±1 |
| Blanda | 6-9 | ±1 |
| Fluida | 10-15 | ±2 |
| Líquida | 16-20 | ±2 |

- TM: Tamaño máximo del árido en mm.
- A: Designación del ambiente.

En las páginas siguientes se muestran, a título de ejemplo, las actas de resultados de dos amasadas. La primera de ella corresponde a la rotura a 7 días de la primera amasada o toma del lote. La segunda de ellas se corresponde a la rotura a 28 días de la cuarta amasada o toma del lote. En ambos caso el número de probetas por amasada o toma es de cuatro: dos para la rotura a 7 días y otras dos para la rotura a 28 días.

⁷ Solo permitida en hormigón en masa.

| ENTIDAD ACREDITADA PARA LA PRESTACION DE ASISTENCIA TÉCNICA A LA CONSTRUCCION Y OBRA PUBLICA RD. 1250189 Nº DE INSCRIPCIÓN DEL R.E.A. L507-06 MA | | ORIGINAL LABORATORIO | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|------------------|--|-------------------|------------------|-----------------|-------------|-------------------|------------------|--------|-----|------------|------------------|----------|------------|-------------|-------------|------------------|----------|------------|-------------|-------------------|------------------|-----------|--|--|--|------------------|-----------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| C/ Benaque Nº 9 29004 MALAGA Tel. 952 23 08 42 (6 Lineas) FAX 952 23 12 14 URL: www.cemosa.es E-Mail : laboratorio@cemosa.e | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Fabricación y Ensayo a Compresión de Probetas de Hormigón | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Probetas cilíndricas 30*15 cm) | | Conservación : Cámara húmeda | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Código Prensa :HO18/263/74/5 | | Precisión : Clase 1 (> 1%) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| NORMAS DE ENSAYO UNE 83300/84 - 83301/91 - 83303/84 - 83304/84 - 83313/90 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Expediente 1/0030/027/131 Peticionario OBRASCON HUARTE LAIN, S.A. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Obra 75 VIVIENDAS EN ALTOS DEL RODEO (MARBELLA) - MALAGA | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Contratista OBRASCON HUARTE LAIN, S.A. Dirección Técnica | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Fck 30 Mpa | | Tipo de Hormigón HA- 30/B/15/IIIa/Qa | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | Unidad controlada ALZADO MURO | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Vertido MURO E/P Nº 96/97/98,MODULO C | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Cemento (Tipo) 142.5 R/SR | | Nº de Probetas (n) 4 Nivel de Control Normal EHE | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Contenido Cemento (Kg/m3) 330 | | Lote 1-LAM-3 Nº de Tomas (N) 4 Toma Nº 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Relación Agua/Cemento (A/C) 0,48 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Fecha de Fabricación 20-feb-03 Hora 18,45 | | Tensiones medias (fcm) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Proveedor ANDEMOSA MARBELLA | | <table border="1"> <tr> <td></td> <td>menor de 7 días</td> <td>7 días</td> <td>28 días</td> <td>mayor de 28 días</td> </tr> <tr> <td>Kp/cm2</td> <td></td> <td>345</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>MPa</td> <td></td> <td>33,8</td> <td></td> <td></td> </tr> </table> | | | menor de 7 días | 7 días | 28 días | mayor de 28 días | Kp/cm2 | | 345 | | | MPa | | 33,8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | menor de 7 días | 7 días | 28 días | mayor de 28 días | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Kp/cm2 | | 345 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MPa | | 33,8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Camión -3108-BW | | Cono 8 cm | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Albarán 551054 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Nº de Probeta</th> <th rowspan="2">Fecha de Rotura</th> <th rowspan="2">Edad (días)</th> <th colspan="2">Tensión de rotura</th> </tr> <tr> <th>Kp/cm2</th> <th>MPa</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>27-feb-03</td> <td>7</td> <td>349</td> <td>34,2</td> </tr> <tr> <td></td> <td>27-feb-03</td> <td>7</td> <td>341</td> <td>33,5</td> </tr> <tr> <td>2003-03519</td> <td>20-mar-03</td> <td>28</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>20-mar-03</td> <td>28</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> | | | | Nº de Probeta | Fecha de Rotura | Edad (días) | Tensión de rotura | | Kp/cm2 | MPa | | 27-feb-03 | 7 | 349 | 34,2 | | 27-feb-03 | 7 | 341 | 33,5 | 2003-03519 | 20-mar-03 | 28 | | | | 20-mar-03 | 28 | | | | | | | | | | | | |
| Nº de Probeta | Fecha de Rotura | Edad (días) | Tensión de rotura | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | Kp/cm2 | MPa | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 27-feb-03 | 7 | 349 | 34,2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 27-feb-03 | 7 | 341 | 33,5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2003-03519 | 20-mar-03 | 28 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 20-mar-03 | 28 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p><i>La incertidumbre de los resultados esta a disposición del cliente en CEMOSA. Los resultados solo afectan al material ensayado. Este informe no podrá reproducirse sin autorización por escrito de CEMOSA. Este informe consta de una sola hoja.</i></p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Observaciones | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ADIT. WRDA-95 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Firmado : Manuel Salas Casanova Director Técnico | | Firmado : Elena Frade Viano Jefe Area HA-HC | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | Málaga, 05-mar-03 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AREAS DE ACREDITACION: HA: << Control de hormigón en masa o armado y sus materiales constituyentes: cemento, áridos, agua, acero para armaduras, aditivos y aditivos >> HC: << Control de hormigón en masa, de cemento, de áridos y de agua >> AP: << Ensayos de laboratorio de perfiles y barras de acero para estructuras >> AS: << Control in situ de la ejecución de la soldadura de elementos estructurales de acero >> SE: << Ensayo de laboratorio mecánico de suelo >> ST: << Tomas de muestras inalteradas, ensayos y pruebas in situ de suelos >> SV: << Ensayos de suelos, áridos, mezcla bituminosa y sus materiales constituyentes en viales >> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Figura 7.2. Acta de resultados del ensayo a compresión a 7 días

ENTIDAD ACREDITADA PARA LA PRESTACION DE ASISTENCIA TECNICA A LA CONSTRUCCION Y OBRA PUBLICA RD. 1230/80
Nº DE INSCRIPCION DEL R.E.A. L007-06 MA

C/ Benaque Nº 9 29004 MALAGA
Tel. 952 23 08 42 (6 Lineas)
FAX 952 23 12 14
URL: www.cemosa.es
E-Mail : laboratorio@cemosa.e

**ORIGINAL
LABORATORIO**

Fabricación y Ensayo a Compresión de Probetas de Hormigón
 Probetas cilíndricas 30*15 cm) Conservación : Cámara húmeda Código Prensa :HO18/263/74/5 Precisión : Clase 1 (> 1%)

NORMAS DE ENSAYO UNE 83300/84 - 83301/91 - 83303/84 - 83304/84 - 83313/90

Expediente 1/0030/027/014 Peticionario OBRASCON HUARTE LAIN, S.A.
 Obra 75 VIVIENDAS EN ALTOS DEL RODEO (MARBELLA) - MALAGA
 Contratista OBRASCON HUARTE LAIN, S.A.
 Dirección Técnica

Fck 30 Mpa Tipo de Hormigón HA- 30/B/25/IIIa/Qa Unidad controlada CIM ENCEPADO
 Vertido ENCEPADO 52,MODULO A

| Cemento (Tipo) Contenido Cemento (Kg/m ³) Relación Agua/Cemento (A/C) Fecha de Fabricación 31-oct-02 Hora 11,30 Proveedor ANDEMOSA MARBELLA Camión -42 - Albarán 546835 | Nº de Probetas (n) 4 Nivel de Control Normal EHE Lote 1-LCE-1 Nº de Tomas (N) 4 Toma Nº 4 Estimador (Kn) 0,97 R. característica estimada (Fest, Mpa) 35,1 Tensiones medias (fcm) | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--|--------|-----------------|------------------|---------|------------------|--------------------|--|-----|-----|--|-----|--|------|------|--|
| | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th></th> <th>menor de 7 días</th> <th>7 días</th> <th>28 días</th> <th>mayor de 28 días</th> </tr> <tr> <td>Kp/cm²</td> <td></td> <td style="background-color: yellow;">321</td> <td style="background-color: yellow;">369</td> <td></td> </tr> <tr> <td>MPa</td> <td></td> <td style="background-color: yellow;">31,5</td> <td style="background-color: yellow;">36,2</td> <td></td> </tr> </table> | | menor de 7 días | 7 días | 28 días | mayor de 28 días | Kp/cm ² | | 321 | 369 | | MPa | | 31,5 | 36,2 | |
| | menor de 7 días | 7 días | 28 días | mayor de 28 días | | | | | | | | | | | | |
| Kp/cm ² | | 321 | 369 | | | | | | | | | | | | | |
| MPa | | 31,5 | 36,2 | | | | | | | | | | | | | |

| Nº de Probeta | Fecha de Rotura | Edad (días) | Tensión de rotura | |
|---------------|-----------------|-------------|--------------------|------|
| | | | Kp/cm ² | MPa |
| | 07-nov-02 | 7 | 320 | 31,4 |
| | 07-nov-02 | 7 | 321 | 31,5 |
| 2002-17220 | 28-nov-02 | 28 | 367 | 36,0 |
| | 28-nov-02 | 28 | 371 | 36,4 |
| | | | | |
| | | | | |

La incertidumbre de los resultados esta a disposición del cliente en CEMOSA.
 Los resultados solo afectan al material ensayado.
 Este informe no podrá reproducirse sin autorización por escrito de CEMOSA.
 Este informe consta de una sola hoja.

Observaciones
 ADIT.WRDA-95.CEMENTO:I 42.5R/S(INCOMPLETO)SEGUN ALBARAN,CC:325,A/C:0.50

Firmado : Manuel Salas Casanova
 Director Técnico

Firmado : Elena Frade Viano
 Jefe Area HA-HC Málaga,05-mar-03

AREAS DE ACREDITACION: HA: << Control de hormigón en masa o armado y sus materiales constituyentes: cemento, áridos, agua, acero para armaduras, adiciones y aditivos >>
 HC: << Control de hormigón en masa, de cemento, de áridos y de agua >> AP: << Ensayos de laboratorio de perfiles y barras de acero para estructuras >> AS: << Control in situ de la ejecución de la soldadura de elementos estructurales de acero >> SE: << Ensayo de laboratorio mecánico de suelo >> ST: <<Toma de muestras inalteradas, ensayos y pruebas in situ de suelos >>
 SV: << Ensayos de suelos, áridos, masclas bituminosas y sus materiales constituyentes en viales >>

Figura 7.2. Acta de resultados del ensayo a compresión a 28 días

BIBLIOGRAFÍA:

- ❑ EHE-08. Instrucción de Hormigón Estructural
- ❑ Jiménez Montoya y otros. “Hormigón armado”. GG.
- ❑ UNE-EN 12350-1:2009. Ensayos de hormigón fresco. Parte 1: Toma de muestras
- ❑ UNE-EN 12350-2:2009. Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento
- ❑ UNE-EN 12350-3:2009. Ensayos de hormigón fresco. Parte 3: Ensayo Vebe
- ❑ UNE-EN 12390-2:2009. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia
- ❑ UNE-EN 12390-3:2009. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas
- ❑ UNE-EN 12390-5:2009. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 5. Resistencia a flexión de probetas.
- ❑ UNE-EN 12390-6:2010. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6. Resistencia a tracción indirecta de probetas