



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

PROTOCOLO DE REVISIÓN DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

Autor:

García Román, Paula

Tutor:

Alonso Álvarez, J. Francisco

**Departamento de Construcciones
Arquitectónicas, Ingeniería del
Terreno y Mecánica de los Medios
Continuos y Teoría de Estructuras**

Valladolid, abril de 2024.

A mis padres Lourdes y Jose Luis
a mis hermanos Ana y Alvaro
a mis abuelos Isi y Manolo

RESUMEN

El siguiente Proyecto de Fin de Grado pertenece al área de las estructuras. En concreto, ha sido tutorizado por el departamento de Construcciones Arquitectónicas, Ingeniería del Terreno, y Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras de la Universidad de Valladolid.

Su finalidad es explicar algunos de los ensayos, tanto destructivos como no destructivos, realizados a estructuras de hormigón existentes, así como la forma de interpretar los resultados del estudio para poder contrastarlos con la correspondiente normativa aplicable en el emplazamiento en el que se encuentre y certificar que éstas son seguras de cara a un uso concreto.

PALABRAS CLAVE

Ensayo, estructura, hormigón, validación y normativa.

ABSTRACT

The next Final Year project belongs to structures field. In particular, it has been tutorized by the Department of Architectural Constructions, Landscape Engineering, and Continuous Medium Mechanics and Theory of Structures of Valladolid University.

Its purpose is to explain some tests, both constructive and destructive, performed on existing concrete structures as well as how to interpret the results of the survey in order to compare them with applicable local regulation and to confirm that it is safe for a particular use.

KEY WORDS

Test, structure, concrete, validation and legislation.

RESUMEN.....	3
PALABRAS CLAVE	3
1. INTRODUCCION.....	11
1.1. Justificación.....	11
1.2. Objetivos.....	11
1.3. Estructura del trabajo Fin de Grado	11
2. NORMATIVA EXISTENTE EN ESPAÑA.....	13
2.1. Normativa existente en España sobre el hormigón	13
2.2. Normativa existente en España sobre el acero	20
2.3. Normativa existente en España sobre el cemento	25
2.4. Normativa existente en España para la evaluación de la resistencia del hormigón endurecido	28
3. PROCESO DE EVALUACION DE UNA ESTRUCTURA DE HORMIGON ARMADO	30
3.1. Proceso de evaluación preliminar.....	30
3.2. Proceso de evaluación detallado.....	33
3.3. Proceso de evaluación avanzado	37
4. ENSAYOS PARA EVALUAR LA RESISTENCIA DEL HORMIGON.....	40
4.1. Generalidades.....	40
4.1.1. <i>Ensayos de información</i>	41
4.1.2. <i>Características y propiedades de los aceros</i>	42
4.2. Condicionantes para la evaluación de la resistencia del hormigón	51
4.2.1. <i>Edad de la estructura</i>	51
4.2.2. <i>Ambiente en que se encuentra la estructura de hormigón</i>	53
4.3. Ensayos a estructuras existentes de hormigón armado	56
4.3.1. <i>Resumen métodos de ensayo no destructivos</i>	56
4.3.2. <i>Toma de muestras</i>	57
4.3.3. <i>Extracción de testigos de hormigón</i>	59
4.3.4. <i>Control por ultrasonidos</i>	69

4.3.5.	<i>Ensayo esclerométrico</i>	77
4.3.6.	<i>Profundidad de carbonatación</i>	84
5.	CONCLUSIONES Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACION	89
6.	BIBLIOGRAFIA.....	91
7.	ANEXO A - CASO PRACTICO	93
7.1.	Antecedentes de la obra y normativa aplicable	94
7.2.	Objeto.....	94
7.3.	Metodología	95
7.4.	Datos e hipótesis de partida.....	95
7.5.	Descripción del sistema estructural.....	96
7.6.	Ensayo de extracción y rotura de testigos de hormigón.....	96
7.7.	Ensayo esclerométrico y velocidad de ultrasonidos	101
7.8.	Ensayo de carbonatación del hormigón en vigas	104
7.9.	Conclusión del informe de revisión de estructuras de hormigón armado.....	109
7.10.	Presupuesto de los trabajos.....	110

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Coeficiente de fractura del hormigón en función de la cantidad de cemento (Instrucción de 1912).....	13
Tabla 2.2. Tipificación de hormigones (Instrucción de 1939).....	14
Tabla 2.3. Relaciones a/c y contenido en cemento según el ambiente (Instrucción EH-88).....	17
Tabla 2.4. Relación de designaciones entre normas NBE-EA-95 y UNE EN 10025:2020.....	22
Tabla 2.5. Tipos de cemento (UNE0301:1988).....	26
Tabla 2.6. Tipos de cemento CEM (UNE 80301:1996).....	27
Tabla 3.1. Niveles de análisis estructural (Código Estructural).....	38
Tabla 4.1. Características mecánicas de los aceros no aleados (Código Estructural).....	43
Tabla 4.2. Resiliencia según el espesor nominal del producto y la temperatura de ensayo (Código Estructural).....	43
Tabla 4.3. Características mecánicas de los aceros soldables de grano fino en la condición de normalizado (Código Estructural).....	44
Tabla 4.4. Resiliencia según la dirección del producto y la temperatura de ensayo (Código Estructural).....	44
Tabla 4.5. Características mecánicas de los aceros soldables de grano fino laminados termomecánicamente (Código Estructural).....	45
Tabla 4.6. Resiliencia según la dirección del producto y la temperatura de ensayo (Código Estructural).....	45
Tabla 4.7. Características mecánicas de los aceros con resistencia mejorada a la corrosión atmosférica (Código Estructural).....	46
Tabla 4.8. Resiliencia según el grado del acero (Código Estructural).....	46
Tabla 4.9. Características mecánicas de los aceros de alto límite elástico en la condición de templado y revenido (Código Estructural).....	47
Tabla 4.10. Resiliencia según la dirección del producto y la temperatura de ensayo (Código Estructural).....	47
Tabla 4.11. Estricción en función del grado de acero con resistencia mejorada a la tracción (Código Estructural).....	48
Tabla 4.12. Características mecánicas de los aceros inoxidable (Código Estructural).....	49
Tabla 4.13. Clases de exposiciones del hormigón estructural (Código Estructural).....	54
Tabla 4.14. Clases de exposiciones del acero estructural por corrosión atmosférica (Código Estructural).....	55
Tabla 4.15. Clases de exposiciones del acero estructural relativa al agua y suelo (Código Estructural).....	56
Tabla 4.16. Características de los END (J.H.Bungey y S.G.Millard).....	56
Tabla 4.17. Límites de intervalo de confianza ensayos de probetas testigo.....	57
Tabla 4.18. Dispersión de las medidas in situ y precisión máxima para los principales ensayos no destructivos.....	58
Tabla 4.19. Factor de corrección aplicable a los testigos de hormigón en función de su esbeltez según UNE EN 13791:2020.....	65
Tabla 4.20. Parámetros de aceptación de resultados para el ensayo de índice de rebote según norma UNE EN 12504-2:2022.....	83

<i>Tabla A1. Medidas tomadas a testigos de hormigón de 75 mm de diámetro.....</i>	<i>97</i>
<i>Tabla A2. Resultados de la prueba de rotura por compresión de los testigos de 75 mm de diámetro.....</i>	<i>97</i>
<i>Tabla A3. Medidas tomadas a testigos de hormigón de 100 mm de diámetro.....</i>	<i>98</i>
<i>Tabla A4. Resultados de la prueba de rotura por compresión de los testigos de 100 mm de diámetro.....</i>	<i>98</i>
<i>Tabla A5. Lecturas ensayo de esclerometría.....</i>	<i>102</i>
<i>Tabla A6. Resultado ensayo de esclerometría: índice de rebote y resistencias del concreto.....</i>	<i>103</i>
<i>Tabla A7. Localización de las armaduras en pilares sometidas al ensayo de carbonatación.....</i>	<i>105</i>
<i>Tabla A8. Localización de las armaduras en zapatas sometidas al ensayo de carbonatación.....</i>	<i>107</i>
<i>Tabla A9. Dimensiones de las secciones de las zapatas Z01 y Z02.....</i>	<i>109</i>

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Tipificación de hormigones (Instrucción de 1973).....	16
Figura 2.2. Evolución de las Instrucciones para la recepción de cemento.....	25
Figura 2.3. Requisitos de evolución de resistencia a muy corta edad.....	29
Figura 3.1. Procedimiento de evaluación inicial (Appraisal of Existing Structures, tercera edición).....	31
Figura 3.2. Procedimiento de evaluación detallado parte 1 (Appraisal of Existing Structures, tercera edición).....	33
Figura 3.3. Procedimiento de evaluación detallado parte 2 (Appraisal of Existing Structures, tercera edición)	35
Figura 4.1. Evolución de resistencia del hormigón respecto al tiempo	52
Figura 4.2. Recomendación del número de testigos en función de la variación de la resistencia y error máximo (ACI).60	
Figura 4.3. Pachómetro.....	61
Figura 4.4. Prensa.....	62
Figura 4.5. Máquina de pulido de testigos de hormigón.....	63
Figura 4.6. Determinación de la condición de probetas cilíndricas ensayadas en satisfactorias y no satisfactorias.....	64
Figura 4.7. Equipo de ultrasonidos (1928).....	69
Figura 4.8. Sistema de flujos de un equipo de ultrasonidos.....	72
Figura 4.9. Representación gráfica de distintos defectos detectados por un equipo de ultrasonidos	74
Figura 4.10. Croquis alternativo para realizar el ensayo de ultrasonidos.....	74
Figura 4.11. Martillo para ensayos de hormigón.....	79
Figura 4.12. Funcionamiento del ensayo esclerométrico (ACII 228.1R-03).....	81
Figura 4.13. Ejemplo prueba de carbonatación del hormigón	86
Figura A1. Comprobación de la sección de una armadura en elemento estructural.....	99
Figura A2. Comprobación del estado de la cavidad de un testigo mediante carbonatación.....	100
Figura A3. Medición de la sección de la cavidad de un testigo de hormigón de 75mm de diámetro.....	100
Figura A4. PROBETA 6. Antes y después del ensayo.....	101
Figura A5. CATA 1. Antes y después del ensayo.....	105
Figura A6. CATA 2. Antes y después del ensayo.....	106
Figura A7. CATA 3. Antes y después del ensayo.....	106
Figura A8. CATA 4. Antes y después del ensayo.....	106
Figura A9. CATA 5. Antes y después del ensayo.....	107
Figura A10. CATA 6. Antes y después del ensayo	107
Figura A11. CATA 7.....	108
Figura A12. CATA 8: Parte 1.....	108
Figura A13. CATA 8: Parte 2.....	108
Figura A14. Esquema dimensiones secciones de zapatas.....	109

INDICE DE GRAFICAS

Gráfica 4.1. Correlación del índice de rebote en función de la resistencia a compresión simple en probeta cilíndrica79

Gráfica 4.2. Profundidad de carbonatación (mm) en función del tiempo (años)85

1. INTRODUCCION

1.1. Justificación

Son muchas las empresas constructoras que ven afectada su trayectoria económica, a la par que su reputación laboral, mientras se encuentran en proceso de ejecución de un proyecto. Por ese motivo, entre otros, algunas edificaciones no son finalizadas, pero se conserva su estructura, en caso de que ésta sí que haya sido total o parcialmente terminada.

Previo a una continuación de proyecto y teniendo en cuenta que habrá pasado un largo tiempo desde la ejecución de la estructura, es requisito imprescindible comprobar que dicha edificación mantiene sus propiedades y sigue siendo apta para el uso que se le va a asignar.

1.2. Objetivos

El objetivo de este proyecto es crear un protocolo para identificar, clasificar, explicar y evaluar los ensayos necesarios para comprobar la aptitud de una estructura de hormigón. Para ello, se contrastarán los resultados de cada prueba con lo especificado en la normativa vigente para cada ensayo.

1.3. Estructura del trabajo Fin de Grado

Una vez comprendida la forma de llevar a cabo un protocolo de revisión de estructuras de hormigón y explicados los ensayos que debemos realizar para que nos aporten información sobre el estado de la estructura, se distinguirán dos grandes grupos: ensayos destructivos y ensayos no destructivos. Cada grupo englobará varios ensayos dentro de los cuales se diferenciarán cuatro subapartados:

- Fundamento teórico
- Material y equipo
- Procedimiento
- Resultados

Como es de esperar, la norma aplicable a las construcciones de hormigón armado ha ido evolucionando a lo largo de los años en función de las necesidades y descubrimientos de cada etapa. Por ese motivo, el desarrollo de esa normativa a lo largo de la historia del hormigón y el acero tendrá un papel fundamental en este proyecto, siendo uno de los primeros puntos explicados con el fin de poner en situación al lector.

No obstante, cada ensayo tiene su propia ley vigente en la actualidad a la que se hará referencia en todo momento para explicar el desarrollo y evaluación de cada ensayo.

Además, el protocolo no solo incluye los ensayos a realizar sino las variables influyentes antes, durante y después del desempeño de estos. Es por eso que se expondrá una planificación previa a todo estudio y los condicionantes a los que se debe prestar atención para que las conclusiones sean lo más parecidas a la situación real de la estructura.

Por último, se razonarán algunos comentarios generales al conjunto de los distintos estudios y se expondrá la bibliografía correspondiente a la información mostrada a lo largo de este trabajo. A modo de ejemplo, el Anexo A desarrolla un caso real de desarrollo del protocolo de revisión de estructuras de hormigón incluyendo en él una oferta económica.

2. NORMATIVA EXISTENTE EN ESPAÑA

Como precedente a cualquier estudio debemos informarnos de la normativa vigente en cada campo. En este apartado se describirá la trayectoria legislativa de los materiales involucrados en un protocolo de revisión de estructuras de hormigón.

Es importante tener en cuenta, no solo la normativa aplicable en el momento del estudio de la estructura sino la aplicable en el momento en el que el esqueleto fue validado para su construcción.

2.1. Normativa existente en España sobre el hormigón

Instrucción de 1912:

En 1892 se data la entrada del hormigón estructural basado en el cemento portland con la presentación y difusión de la patente de Hennebique por parte de José Eugenio Ribera. A pesar de que la primera norma de obligado cumplimiento se implementó en 1939, en 1912 el Laboratorio del Material de Ingenieros publicó el artículo “*Instrucciones reglamentarias para el empleo del cemento armado*” en la revista “*La Construcción Moderna*”. En él, se detallan algunas recomendaciones de dosificación y valores del llamado “coeficiente de fractura” del hormigón en función de la mezcla. La Tabla 2.1 recoge un resumen del coeficiente de fractura estimado en función de la cantidad de cemento empleada. Dichos coeficientes de fractura se ven afectados por un «coeficiente de trabajo» de 0.25, dentro de un formato de seguridad de tensiones admisibles.

Cantidad de cemento	Coefficiente de fractura del hormigón a los 28 días
300 kg	100 kg/cm ²
350 kg	120 kg/cm ²
400 kg	140 kg/cm ²

Tabla 2.1. Coeficiente de fractura del hormigón en función de la cantidad de cemento (Instrucción de 1912)

Instrucción de 1939:

Hasta 1939 no se redactó la primera Instrucción para el proyecto y ejecución de obras de hormigón, publicación número 1 del Ministerio de Obras Públicas. En dicha obra ya se mencionan algunos de los parámetros fundamentales del hormigón a ensayos análogos a los que se practican hoy en día; por ejemplo, la resistencia al ensayo en probeta cilíndrica o cúbica. Los hormigones en esta normativa están denominados mediante letras, desde tipo A a tipo F, siendo los primeros los de mejor calidad con resistencias de 170 kg/cm² (17 N/mm²) y los últimos de peores prestaciones con resistencias de 30 kg/cm² (3 N/mm²) que se obtienen con cantidades de cemento entre 400 kg y 200 kg y relaciones agua/cemento de 0.50 y 1.25 respectivamente (ver Tabla 2.2).

Dosificación por m ³ de árido que, además de cumplir las condiciones del artículo 9º, tenga más del 65% de compacidad			
Tipo	Cemento, kg	Agua, litros	Resistencia, kg/cm ²
A	400	200	170
B	375	200	150
C	360	220	120
D	300	220	90
E	250	220	60
F	200	250	30

Tabla 2.2. Tipificación de hormigones (Instrucción de 1939)

Instrucción HA-61:

El Instituto Eduardo Torroja publicó la Instrucción especial para estructuras de hormigón armado, HA-61, entre los años 1957 y 1961. Sin ser una norma de obligado cumplimiento, su uso estuvo muy extendido y se dividía en tres partes: la primera dedicada exclusivamente a materiales y ejecución, la segunda a los documentos de proyecto y la tercera al cálculo de elementos lineales planos.

Por primera vez, se introduce una forma rigurosa de determinar el parámetro resistencia, denominado a partir de ese momento como resistencia característica, y se define como el valor medio de los $n/2$ valores de resistencia más bajos obtenidos en ensayos sobre n probetas. El valor mínimo de la resistencia característica se fija en 130 kg/cm^2 (13 N/mm^2) para hormigón armado con barras lisas y 170 kg/cm^2 (17 N/mm^2) para barras corrugadas.

A efectos de cálculo, se introduce el diagrama rectangular del hormigón, aceptando que este material tiene un comportamiento plástico. Además, se define un nuevo, término llamado resistencia minorada del hormigón, cuyo valor resulta de dividir la resistencia característica por el coeficiente 1.6.

Según esta Instrucción, el contenido de cemento debe establecerse siempre entre 250 y 450 kg por cada m^3 de hormigón, sin poner más límites sobre a relación agua/cemento que los que se consideren necesarios para obtener las resistencias mínimas. Adicionalmente, la HA-61 introduce un capítulo sobre adiciones al hormigón en el que se imponen limitaciones únicamente sobre la composición y uso de escamas de cloruro cálcico. También se hace referencia por primera vez a la durabilidad del hormigón, insistiendo en la importancia de la compactación en hormigones en ambientes agresivos e imponiendo recubrimientos en función del tipo de pieza y de la agresividad del ambiente.

Instrucción HA-68:

La *Instrucción para el proyecto y la ejecución de las obras de hormigón en masa o armado* de 20 de septiembre de 1968, conocida como HA-68, fue la primera redactada por la Comisión Permanente Interministerial del Hormigón.

En lo relativo a los requisitos especificados en ella, varía sensiblemente respecto a la HA-61. Sin embargo, introduce una fórmula para calcular la resistencia a tracción a partir de la resistencia característica a compresión. Además, elimina el límite de resistencia para estructuras armadas con barras corrugadas y establece un valor general de 120 kg/cm^2 (12 N/mm^2). Respecto a la anterior norma, el coeficiente de minoración se reduce de 1.6 a 1.5.

Instrucción EH-73:

La Instrucción EH-73: Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado, se aprueba el 19 de octubre de 1973. En ella se tipifica el hormigón mediante la designación H-X, donde X es la resistencia característica con grado de confianza del 95% expresada en kg/cm². Fija límites mínimos de resistencia de 125 kg/cm² (12.5 N/mm²) para hormigones armados y 50 kg/cm² (5 N/mm²) para hormigones en masa. La resistencia característica máxima considerada es H-500. Los contenidos de cementos se mantienen similares a los de la HA-61. Al igual que la HA-68, solo menciona los aditivos para señalar que se podrán emplear si su efecto está justificado mediante ensayos.

Como novedad destacable en lo referente al cálculo, se introduce el diagrama tensión-deformación parábola-rectángulo, con vértice de la parábola en la abscisa 2‰ y extremo del rectángulo en flexión en la abscisa 3.5‰, y el coeficiente de cansancio 0.85 (Ver Figura 2.1).

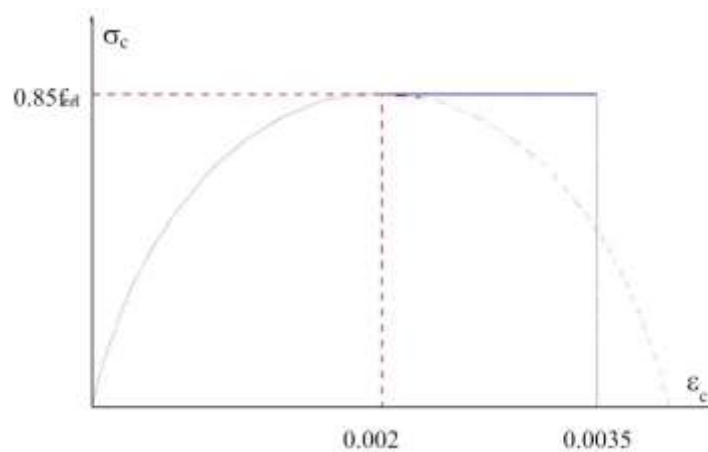


Figura 2.1. Tipificación de hormigones (Instrucción de 1973)

Instrucción EP-77:

La Instrucción EP-77: Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado, se aprueba el 18 de febrero de 1977 y es la primera vez que se incluyen las condiciones específicas para hormigones con armadura activa. Tanto esta Instrucción como las posteriores de la serie EP mantienen los requisitos exigidos en el EH correspondiente (en este caso, la EH-73), haciendo hincapié en la importancia del control, y de la resistencia a compresión en las obras pretensadas, señalando una resistencia característica mínima de 250 kp/cm² (25 N/mm²) y prohibiendo el uso de cualquier cemento que no sea el Portland o el puzolánico.

Instrucciones EH-80, EP-80, EH-82, EH-88, EH-91, EP-93:

La serie de normativas contemplada en este apartado no presenta grandes diferencias respecto a la EH-73 en lo relativo a la tecnología del hormigón. Los límites de relación agua/cemento y los contenidos de este solo presentan una salvedad a partir de la EH-88 se formaliza la clasificación y definición de los ambientes, sustituyendo su habitual partición (protegido, intemperie y agresivo) por una nomenclatura con números romanos, así como subclases para fundentes y heladas. A partir de este momento, la relación a/c y el contenido del cemento irán ligadas a la clase de ambiente (ver Tabla 2.3).

Los cambios de instrucción se aprovechan también para actualizar la normativa UNE referida por la misma, incluyendo los capítulos sobre adiciones y aditivos y el pliego de recepción de cementos.

Ambiente	Relación máxima a/c	Contenido mínimo en cemento, kg/cm ³	
		Hormigón en masa	Hormigón armado
I	0.65	150	250
II	0.6	175	275
II _h	0.55	175	300
II _f (1)	0.5	200	300
III	0.55	200	300
III _h	0.5	200	300
III _f (1)	0.5	200	325
Químicamente agresivo (2)	0.5	200	235

(1): En estos casos, deberán utilizarse aireantes que produzcan un contenido de aire ocluido mayor o igual que el 4.5%.

(2): En el caso particular de sulfatos, el contenido mínimo en cemento de los hormigones en masa se elevará de 250 kg/m³. Además, tanto para hormigones en masa como para los armados, el cemento deberá ser resistente a los sulfatos si el contenido en sulfatos del agua es mayor o igual que 400 mg/kg, o si en suelos es mayor o igual que 300 mg/kg.

Tabla 2.3. Relaciones a/c y contenido en cemento según el ambiente (Instrucción EH-88)

Instrucción EHE-98:

La *Instrucción de Hormigón Estructural (EHE)* fue aprobada por el real decreto el 11 de diciembre de 1998 de ahí que fuese conocida como EHE-98. Supone una modificación de la política llevada a cabo hasta ese momento en el ámbito de la edificación puesto que integra las dos principales familias de normas de hormigón estructural (EH, de hormigón armado y EP, de pretensado) en una sola instrucción. La Instrucción EHE pone mayor énfasis en la durabilidad de las estructuras en función de la composición de los hormigones. Dada la dificultad intrínseca de controlar directamente la relación agua/cemento, parámetro clave en la caracterización de la durabilidad del hormigón, en una estructura de hormigón ya elaborada, aumenta la exigencia sobre las resistencias mínimas a usar.

Se incluye una clasificación de tipos de ambiente en función de la agresividad relacionada con la corrosión (de I a IV) y clases específicas en función de la agresividad química al propio hormigón (de Qa a Qc). Además, existen clases de heladas con y sin sales fundentes (H y F), y clase erosiva (E). De estas clases se derivan subclases en función de la resistencia característica (entre 25 MPa a 35 MPa) y los contenidos mínimos de cemento (entre 250 kg/m³ y 350 kg/m³).

La EHE introduce un anexo en el que se describen las características y leyes de comportamiento de hormigones de alta resistencia, clasificando aquellos con resistencia característica de 60 MPa a 100MPa.

Instrucción EHE-08:

La *Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08)* retoma y actualiza la norma antes mencionada incluyendo el año de aprobación, 18 de julio de 2008. Mantiene las pautas fundamentales y la orientación de la durabilidad de la primera EHE, junto a la clasificación de ambientes y composición de hormigones que esta especificaba. Como novedad, cabe destacar que el coeficiente de cansancio aumentó de 0.85 a 1.00.

Por otro lado, se introducen los hormigones de tecnología avanzada en la normativa. Los correspondientes a una resistencia característica de 60 MPa a 100MPa pasan a formar parte del cuerpo general de la Instrucción.

Por otra parte, se insertan anejos con algunas recomendaciones para la formulación y uso de hormigones autocompactantes, hormigones reforzados con fibras, hormigones con árido reciclado y hormigones ligeros.

Por último, como motivo de la inquietud social por la sostenibilidad del planeta, la EHE-08 plantea una ecuación mediante la cual es posible calcular el índice de contribución de la estructura a este equilibrio. La introducción de la sostenibilidad en el ámbito estructural marcará la orientación que se desea dar a las futuras normativas en cuanto a racionalidad en el uso de los recursos y el impacto de las estructuras sobre la salud y el entorno.

Código Estructural:

Actualmente en España, la Ley que engloba todos los aspectos mencionados anteriormente es el *Código Estructural (CE)*, norma que sustituye a la EHE-08 desde que fue aprobada el 29 de junio de 2021 y publicada en el Boletín Oficial del Estado (Real Decreto 470/2021) el 10 de agosto de 2021. Permite el empleo de los Eurocódigos estructurales 2, 3 y 4 para cumplir con los requisitos relativos al diseño estructural de elementos.

En el CE se regulan las cuestiones relativas a bases de proyecto y análisis estructural, así como a los requisitos técnicos exigibles a los materiales componentes, a la durabilidad y vida útil de las estructuras, a la acción del incendio, al control y la ejecución de las estructuras. En cuanto a las clases de exposición de los elementos de hormigón, se generan siete grupos más definidos que en la antigua norma.

La norma contempla en sus bases los hormigones con árido grueso reciclado, con un máximo de un 20% en peso respecto al contenido total de árido grueso. A su vez, incorpora sistemas de protección para la mejora de la durabilidad (art. 39), sistemas de refuerzo de estructuras de hormigón (art. 41) y sistemas de reparación (art. 40). En cuanto a los anexos se refiere, se incluye un método de control de fisuración sin cálculo, limitando los diámetros del armado y cambian las resistencias mínimas de los hormigones con áridos ligeros (12 N/mm² para hormigones en masa y 25 N/mm² para hormigones armados o pretensados)

En términos generales, el Código Estructural actualiza y amplía la EHE-08 en cuanto a lo que se refiere a la sostenibilidad, creando el Distintivo de Sostenibilidad Oficialmente Reconocido (DSOR).

2.2. Normativa existente en España sobre el acero

Instrucción de 1912:

En la Instrucción de 1912, cuyo carácter no es de obligado cumplimiento, se admite el uso de hierros (con coeficiente de trabajo de 7 a 9 kp/mm²) o aceros (con coeficiente de trabajo de 7 a 12 kp/mm²) en barras de sección circular con longitud inferior a 50mm cuya superficie sea rugosa, estriada o con forma de columna salomónica.

Inclusive, prevalece el uso de barras redondas frente a las estriadas por ser más fáciles de hormigonar, ser más económicas y ser ventajosas por presentar mayor superficie a igualdad de sección.

Instrucción de 1939:

En la anterior Instrucción se detallan las características mínimas de los aceros para armar. Sin embargo, no se detallan los requisitos de composición más allá de la designación “acero del tipo normal” llamado “dulce” en el comercio, al que se refiere un límite elástico superior a 2400 kg/cm² (240 N/mm²) y alargamiento mínimo del 18% en rotura. Se plantea una tensión mínima de adherencia entre armadura y hormigón, excepto para las barras con gancho cuyos requisitos de anclaje se fijan en 30 diámetros en barras lisas y 20 diámetros en rugosas o por gancho sin especificar longitud. Se admite el empalme por solapo en una longitud de 25 diámetros.

Normas NBE MV:

Los primeros Decretos que recogían normas de obligado cumplimiento relacionadas con las estructuras de acero en la edificación han estado formados por una serie dispersa de normas NBE MV aprobadas entre los años 1966 y 1982. Estas son:

- NBE MV 102-1975 "Acero laminado para estructuras de edificación".
- NBE MV 103-1972 "Cálculo de estructuras de acero laminado en edificación".

- NBE MV 104-1966 "Ejecución de las estructuras de acero laminado en la edificación".
- NBE MV 105-1967 "Roblones de acero".
- NBE MV 106-1968 "Tornillos ordinarios y calibrados, tuercas y arandelas de acero para estructuras de acero laminado".
- NBE MV 107-1968 "Tornillos de alta resistencia y sus tuercas y arandelas".
- NBE MV 108-1976 "Perfiles huecos de acero para estructuras de edificación".
- NBE MV 109-1979 "Perfiles conformados de acero para estructuras de edificación".
- NBE MV 110-1982 "Cálculo de las piezas de chapa conformada de acero de edificación".
- NBE MV 111-1980 "Placas y paneles de chapa conformada de acero para la edificación".

Debido a la confusión que podía generar la existencia de multitud de normas individuales a la hora de emplear acero en estructuras de edificación, se vio necesaria la implantación de una norma básica que agrupase todas las anteriores, a la vez que introdujese algunas modificaciones indispensables, particularmente, en relación con las referencias a normas UNE que a lo largo de los años sufrieron revisiones y actualizaciones como consecuencia de la revisión de normas europeas. Por todo ello, este Real Decreto tiene por objeto aprobar la Norma Básica de la Edificación NBE EA-95 "Estructuras de acero en edificación".

NBE EA-95:

La Norma Básica de la Edificación NBE EA-95 será excusable para aquellos edificios que, a la fecha de entrada en vigor del Real Decreto, es decir, el 18 de enero de 1996, estén en fase de construcción, posean la licencia de edificación, o sus proyectos estén aprobados por las Administraciones Públicas competentes o visados por Colegios Profesionales.

Esta norma, al tratarse de una refundición de las normas NBE-MV, mantiene las designaciones ya conocidas del acero, entre las que se encuentran: A37, A42 y A52 con los grados b, c y d para cada uno de ellos. No obstante, la designación comercial utilizada de aceros es la que figura en las normas UNE EN 10025:2020: *Productos laminados en caliente de aceros para estructuras. Parte 2: Condiciones técnicas de suministro de los aceros estructurales no aleados.* y UNE EN 10210-1:2007: *Perfiles huecos para construcción, acabados en caliente, de acero no aleado y de grano fino. Parte 1: Condiciones técnicas de suministro.* La Tabla 2.4 recopila las equivalencias con la UNE EN 10025:2020:

Designación según NBE EA-95	Designación según UNE EN 10025:2020
A37b	S 235 JR
-	S 235 JR G2
A37c	S 235 JO
A37d	S 235 J2 G3
A42b	-
A42c	-
A42d	-
-	2 275 JR
-	S 275 JO
-	S 275 J2 G3
A52b	S 355 JR
A52c	S 355 JO
A52d	S 355 J2 G3

Tabla 2.4. Relación de designaciones entre normas NBE-EA-95 y UNE EN 10025:2020

La NBE EA-95 constituyó un paso previo a la posterior adaptación de la reglamentación al “Eurocódigo para las estructuras de acero” que se produjo con la aprobación del Documento Básico “DB SE-A Acero”, integrante de la Parte II del Código Técnico de la Edificación (CTE), el 17 de marzo de 2006.

EAE-12:

La norma EAE, cuyas siglas significan Instrucción de Acero Estructural, fue publicada el 27 de mayo de 2011 en el Boletín Oficial del Estado. Hasta el momento la normativa de obligado cumplimiento se había limitado al ámbito de la edificación a través de las normas MV y NBE referenciadas anteriormente.

Sin embargo, en Europa se han producido novedades técnicas y legislativas en relación con las estructuras de acero que resulta conveniente tener en cuenta e incorporar, en su caso, a la normativa española vigente. A grandes rasgos, el Comité Europeo de Normalización desarrolló y actualizó el Programa de Eurocódigos estructurales, y en concreto, un conjunto de normas bajo el epígrafe EN-1993 “Eurocódigo 3. Proyecto de estructuras de acero”.

Además, previamente a la entrada en vigor de la EAE, se desarrolló e implantó el mercado CE en numerosos productos de construcción a través del cual se especificaban las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas de los Estados miembros sobre los productos mencionados.

En la Instrucción EAE, se atiende a las cuestiones relativas a bases de proyecto y análisis estructural, así como a los requisitos técnicos exigibles a los materiales utilizados, a la durabilidad y vida útil de las estructuras, a la acción de incendio, y a aspectos relativos a sostenibilidad, incorporando, en base a estos, criterios de proyecto y ejecución. Esta Instrucción, cuyo ámbito de aplicación se extiende a todas las estructuras y elementos de acero estructural, tanto de edificación como de ingeniería civil, se verá complementada con la próxima revisión del ya citado Documento Básico “DB SE-A: Acero” del CTE.

Código Estructural:

Al igual que para el hormigón, el 10 de noviembre de 2021 entra en vigor el Código Estructural que deroga a la norma EAE-12 y da paso a una norma conjunta de edificación en función del material utilizado.

Una de las novedades más relevantes implica la incorporación de requisitos legales para estructuras de acero inoxidable, y estructuras mixtas de hormigón y acero. Así como la ampliación del número de aceros especiales empleados en elementos estructurales hasta alcanzar límites elásticos de 700 N/mm². Además, se actualizan los ambientes de exposición.

En términos generales y como antes mencionado, de forma análoga al resto de estructuras (hormigón, acero y mixtas), el Código Estructural establece las exigencias que se deben cumplir para satisfacer los requisitos de seguridad estructural, seguridad en caso de incendio y protección del medio ambiente a través de uso eficiente de recursos naturales.

2.3. Normativa existente en España sobre el cemento

El cemento ha sido uno de los primeros materiales de construcción objeto de normalización y reglamentación. A lo largo de la historia, el número de tipos de cemento, así como el proceso tecnológico de fabricación de cada uno de ellos ha variado en función de las necesidades del momento y de la investigación desarrollada. El resultado de este crecimiento ha contribuido a elevar gradualmente la categoría resistente para todos los cementos.

A partir de 1981, se comienzan a editar normas UNE basadas en los documentos elaborados por el Comité Europeo. Inicialmente no estaban armonizadas entre ellas, pero en 1988, se incluyeron el Pliego para la recepción de cementos RC-88, fecha en la que se comienzan a aplicar en España.

La Figura 2.2 muestra las Instrucciones para la recepción de cementos obligatorias en obras de construcción, centrales de fabricación de hormigón y fábricas de productos de construcción en cuya composición estuviese incluido el cemento. No obstante, las normas que se mencionan han evolucionado con el fin de recoger distintas normas y adaptarse a las disposiciones reglamentarias de la Unión Europea (UE). En posteriores apartados se explica un poco más las Instrucciones de recepción de cementos en España.



Figura 2.2. Evolución de las Instrucciones para la recepción de cemento

Las siguientes líneas pretenden puntualizar los años más relevantes de la evolución del cemento junto a una breve descripción de esta:

- 1824: Joseph Aspdin y James Parker patentaron el cemento Portland.
- 1930: Aparece la palabra “aglomerante” y surgen varios tipos de cemento.
- 1960: Se sustituye la palabra “aglomerante” por “conglomerante” y comienzan a aparecer algunas designaciones para los cementos más importantes; por ejemplo, P (Cementos Portland), PS (Cementos Portland Siderúrgicos) o PUZ (Cementos Puzolánicos). Además, aparecen clases y categorías en todos los tipos de cemento dependiendo de su resistencia y se genera una equivalencia entre los cementos portland, siderúrgicos y puzolánicos.
- 1964: Se crean los llamados Cementos de Adición.
- 1988: Incorporación de nuevas designaciones y composiciones según la norma UNE 80301:1988 *Cementos. Designaciones, Clasificación y Especificaciones*. (Ver Tabla 2.5)

Denominación	Designación	
	Tipo	Clase
Portland	I-0 y I	35, 35A, 45, 45A, 55 y 55A
Portland compuesto	II	35, 35A, 45, 45A
Portland con escoria	II-S	35, 35A, 45, 45A
Portland con puzolana	II-Z	35, 35A, 45, 45A
Portland con ceniza volante	II-C	35, 35A, 45, 45A
Portland con filler calizo	II-F	35, 35A, 45, 45A
Horno alto	III-1 y III-2	25, 35, 35A, 45, 45A
Puzolánico	IV	25, 35, 35A, 45, 45A
Mixto	V	25, 35
Aluminoso	VI	55

Tabla 2.5. Tipos de cemento (UNE 80301:1988)

- 1996: La norma UNE 80301:1988, modificada y llamada UNE 80301:1996: *Cementos. Cementos comunes. Composición, especificaciones y criterios de conformidad*, se adapta a los cementos de la norma europea experimental ENV 197-1:1992 y, por ese motivo, aparecen los cementos CEM europeos (Ver Tabla 2.6).

Denominación	Designación
Cemento Portland	CEM I
Portland con escoria	CEM II/A-S y CEM II/B-S
Portland con humo de sílice	CEM II/A-D
Portland con puzolana	CEM II/A-P y CEM II/B-P
Portland con ceniza volante	CEM II/A-V y CEM II/B-V
Portland caliza	CEM II/A-L
Portland mixto	CEM II/A-M y CEM II/B-M
Horno alto	CEM III/A y CEM III/B
Puzolánico	CEM IV/A y CEM IV/B
Compuesto	CEM V

Tabla 2.6. Tipos de cemento CEM (UNE 80301:1996)

- 2002: Una vez que el marcado CE se instaló con carácter de obligado cumplimiento, manteniéndose los cementos nacionales y su homologación con el mismo carácter, se establece en España la certificación de la conformidad para los cementos comunes legalmente comercializados en Estados miembros de la Unión Europea según la norma UNE EN 197-1:2000: *Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes*. Inclusive, aparecen nuevas posibles adiciones para los cementos comunes; por ejemplo, puzolanas calcinadas (Q) y cenizas volantes calcáreas (W).
- 2006: Se publica como norma UNE EN la primera norma europea del Cemento de aluminato de calcio (UNE EN 14647:2006: *Cemento de aluminato de calcio. Composición, especificaciones y criterios de conformidad*)
- 2013: Entra en vigor el Reglamento 305/2011 del Parlamento Europeo y del Consejo de 9 de marzo de 2011, el cual fija condiciones armonizadas para la introducción o comercialización del cemento y sobre el uso del marcado CE sobre ellos. El nuevo Reglamento establece que es el fabricante quien asumen la responsabilidad del producto cuando coloca el marcado CE y los Estados miembros tendrán potestad sobre los materiales que posean dicho marcado.

- 2016: Con la finalidad, por una parte, de dar cumplimiento al citado Reglamento 305/2011 y, por otra parte, de actualizar las normas vigentes y los avances técnicos que se han ido produciendo, el 6 de junio de 2016 se aprueba una nueva Instrucción para la recepción de cementos (RC-16) con la finalidad de establecer las prescripciones técnicas generales que deben satisfacer los cementos junto con las bases para su uso, extendiéndose su aplicación a todas las obras de construcción.

2.4. Normativa existente en España para la evaluación de la resistencia del hormigón endurecido

Los procedimientos habituales de evaluación de la resistencia *in situ* se basan en la estimación de la resistencia del hormigón en una región de ensayo mediante la obtención de información sobre la estructura a través de la extracción y ensayo a compresión de testigos extraídos de los elementos de hormigón a estudiar o, con el objetivo de obtener la máxima información posible sin dañar la estructura, el establecimiento de correlaciones entre resultados de testigos y otros ensayos no destructivos (por ejemplo, midiendo la velocidad de paso de impulsos ultrasónicos a través del hormigón) o semi-destructivos (por ejemplo, midiendo la resistencia al arrancamiento).

En el momento de publicar este Trabajo de Fin de Grado (2024), en España se encuentra vigente el Código Estructural dentro del cual se recogen los ensayos para la evaluación de una estructura de hormigón armado; en concreto, los requisitos clave para estimar la resistencia característica a compresión *in situ* mediante testigos, la resistencia característica a compresión *in situ* mediante métodos indirectos y la conformidad del hormigón basada en ensayos normalizados.

El Código Estructural requiere el cumplimiento de diferentes normativas europeas en función de la edad del hormigón o bien de una resistencia mínima alcanzada. En el caso de que la estructura de hormigón haya sido fabricada en 24 horas o menos, se llevarán a cabo los ensayos requeridos en la norma UNE EN 14488-2:2007: *Ensayos de hormigón proyectado. Parte 2: Resistencia a compresión del hormigón proyectado a corta edad.*

Esta específica ensayo de penetración (utilizado hasta que el hormigón adquiere una resistencia igual a 1 N/mm²), método de la pistola de clavos (utilizado para estimar una resistencia hasta a 20 N/mm²). En función de la evolución temprana de la resistencia medida con los ensayos antes mencionados en las primeras 24 horas, el hormigón se clasificará en tres clases según la Figura 2.3:

- Clase J1: Evolución de resistencias entre las curvas A y B.
- Clase J2: Evolución de resistencias entre las curvas B y C.
- Clase J3: Evolución de resistencias superior a la curva C.

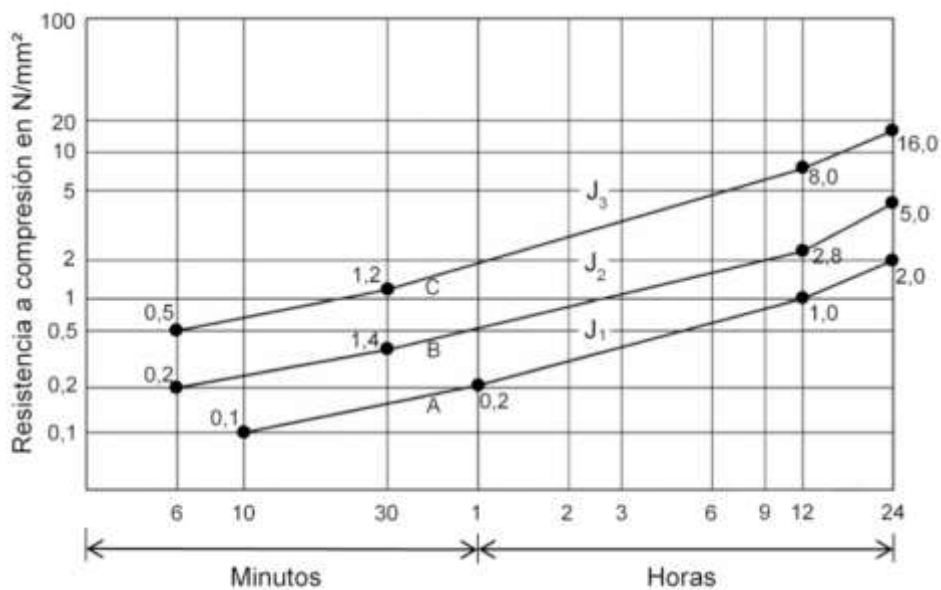


Figura 2.3. Requisitos de evolución de resistencia a muy corta edad

Por otra parte, la resistencia a compresión del hormigón proyectado cuando el material tenga una resistencia mínima de 15 N/mm² se estima de acuerdo con la norma UNE EN 123090-3:2020: *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas*. Las muestras pueden ser cilíndricas o cúbicas, mientras que la relación altura/diámetro debe ser la unidad para muestras cúbicas y el doble para muestras cilíndricas. El uso de testigos de distintas geometrías exige la aplicación de factores de conversión para comparar los resultados experimentales de resistencia a compresión. El Código Estructural recomienda establecer una única forma de las probetas y adecuar la preparación de las mismas para que se mantenga la relación longitud/diámetro, también llamada esbeltez, deseada.

3. PROCESO DE EVALUACION DE UNA ESTRUCTURA DE HORMIGON ARMADO

Por proceso de evaluación de una estructura de hormigón se entiende la realización de una serie de actividades técnicas tales como: localización y revisión de la documentación existente sobre la obra, inspección de ésta, registro de datos de campo (anomalías observadas), toma de muestras para los análisis experimentales, ensayos de laboratorio sobre dichas muestras, comprobaciones de cálculo, pruebas de carga... etcétera.

Los siguientes apartados tratarán de revisar y comentar los aspectos principales del proceso de evaluación de una estructura de hormigón, si bien el procedimiento es suficientemente genérico como para extender su aplicación a otros tipos estructurales.

3.1. Proceso de evaluación preliminar

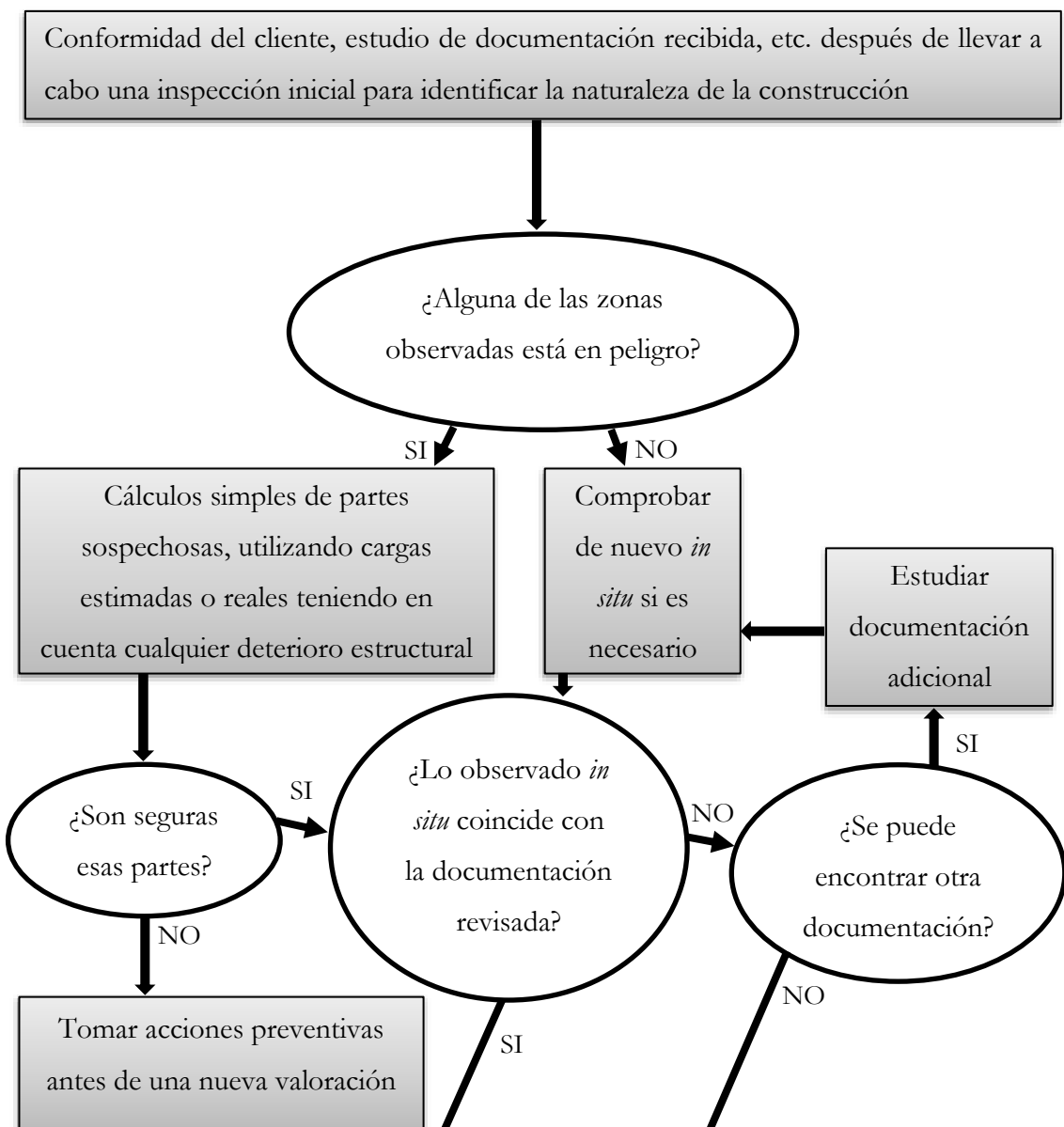
Para dar comienzo, se considera necesario el establecimiento de un juicio introductorio sobre el estado de la estructura (rigidez, resistencia...etc.) a base de la realización de cálculos simples. Si las conclusiones fuesen satisfactorias, no resultaría indispensable implementar actividades adicionales, sin embargo, en el caso de que surja como resultado una situación peligrosa, se deben implementar las medidas de seguridad necesarias antes de continuar la investigación.

En primer lugar, antes de comenzar con el análisis experimental, es primordial analizar y estudiar la documentación disponible acerca de la estructura que posteriormente será ensayada. No resulta raro la inexistencia de dicha documentación sobre una obra existente pues no siempre fue necesario disponer de un expediente que certificase una obra antigua. Tampoco es extraño disponer de informes parciales o poco útiles, por lo tanto, la inspección de la obra enfocada en confirmar el contenido de la documentación o en justificar su rechazo, es fundamental.

En segundo lugar, es necesario un chequeo preliminar de posibles mecanismos de fallo, de la capacidad de carga de los elementos principales y de sus márgenes de seguridad. Esta verificación se realizará a través de estimaciones y cálculos simples, por ese motivo, la experiencia del profesional que realice la tarea es muy relevante.

Lógicamente, ante la presencia de elementos con síntomas de agotamiento o con lesiones que puedan afectar a su resistencia, el técnico debe estudiar posibles vías para la transmisión de cargas. De no existir dichas vías o no ser del todo fiables, el experto restringirá el uso y buscará la forma de salvar la situación antes de continuar con la evaluación.

En el diagrama de flujo de la Figura 3.1 se esquematiza con detalle este planteamiento. Cabe destacar que no resulta infrecuente, como ya mencionado anteriormente, que este primer paso no sea suficiente para obtener resultados concluyentes y será necesario realizar un proceso de evaluación detallado.



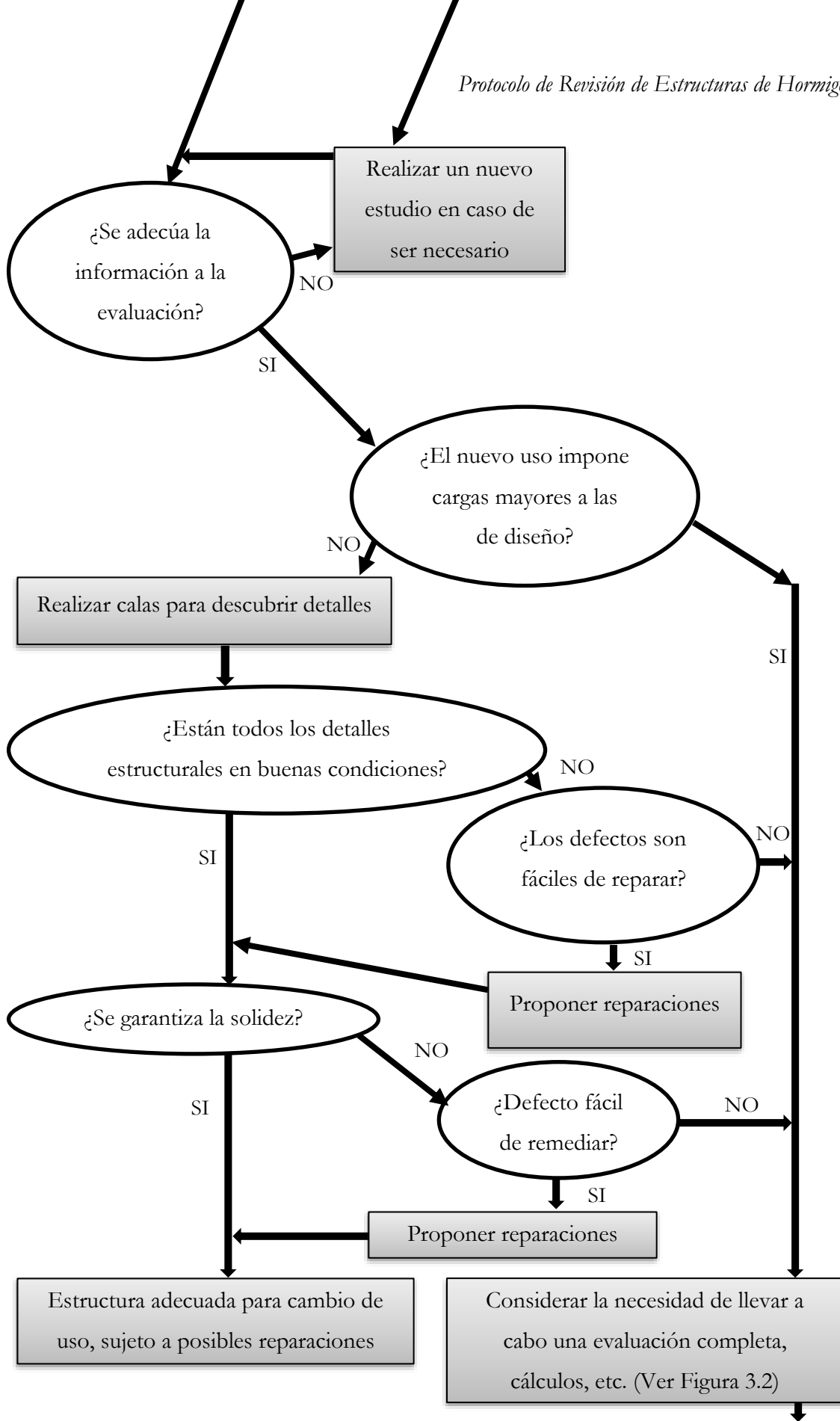
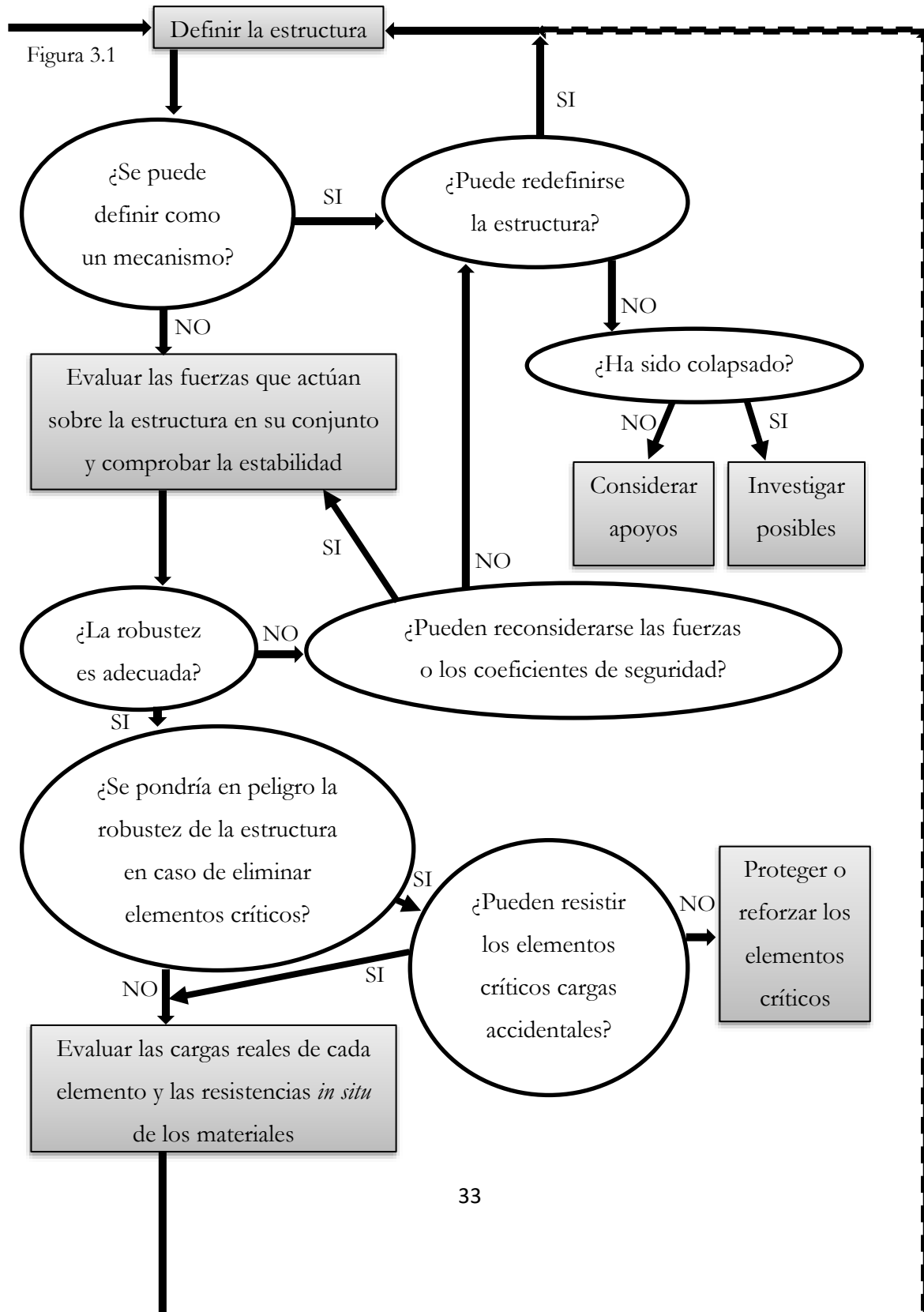


Figura 3.1. Procedimiento de evaluación inicial (Appraisal of Existing Structures, tercera edición)

3.2. Proceso de evaluación detallado

Un proceso de evaluación detallado consiste en la investigación minuciosa y conclusión exhaustiva de los resultados obtenidos en el análisis de una estructura. Continuando con el hilo del punto 3.1, el diagrama de flujo de la Figura 3.2, tomado de la referencia “Appraisal of Existing Structures” ya citada previamente, sistematiza el trascurso a seguir.



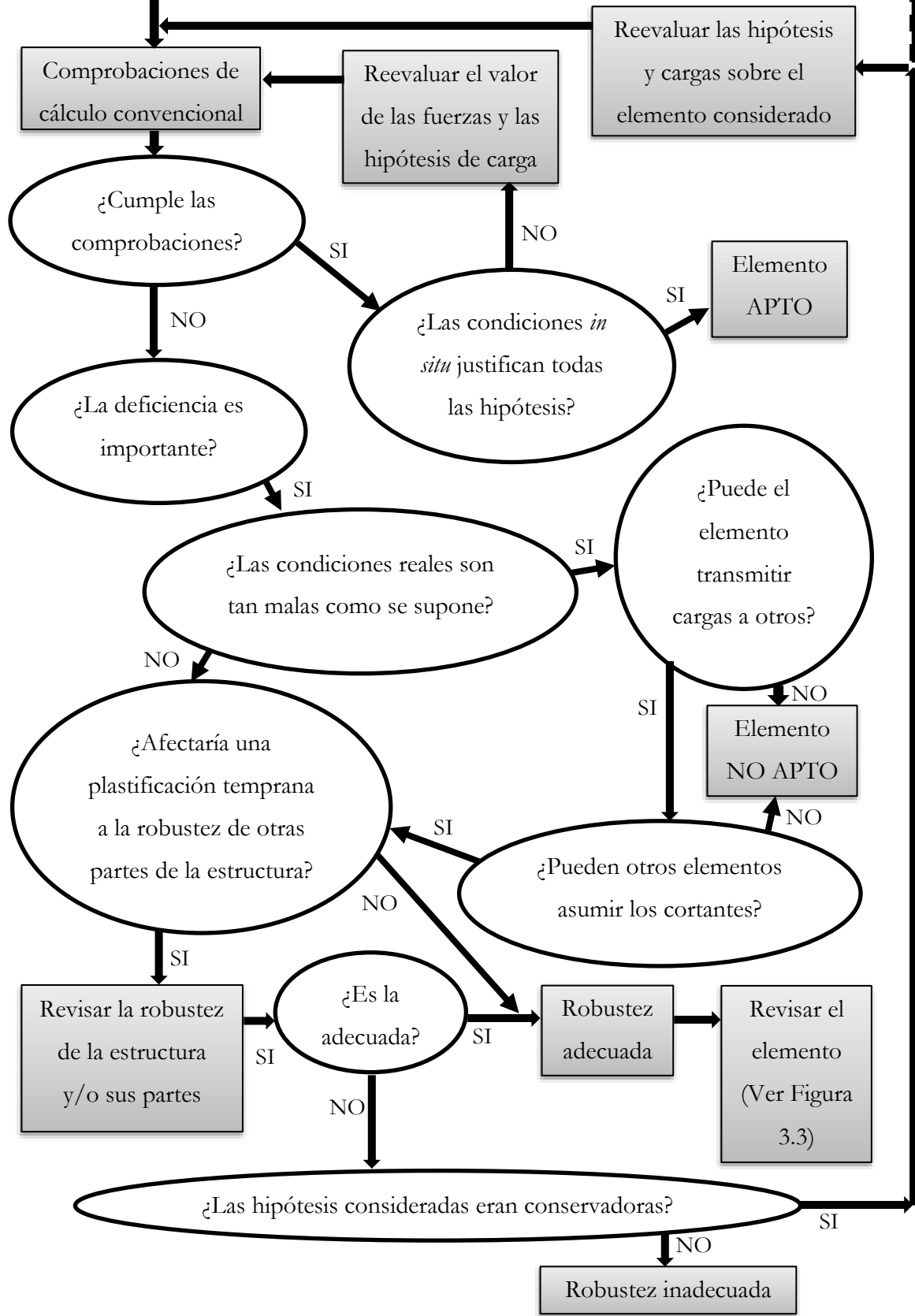
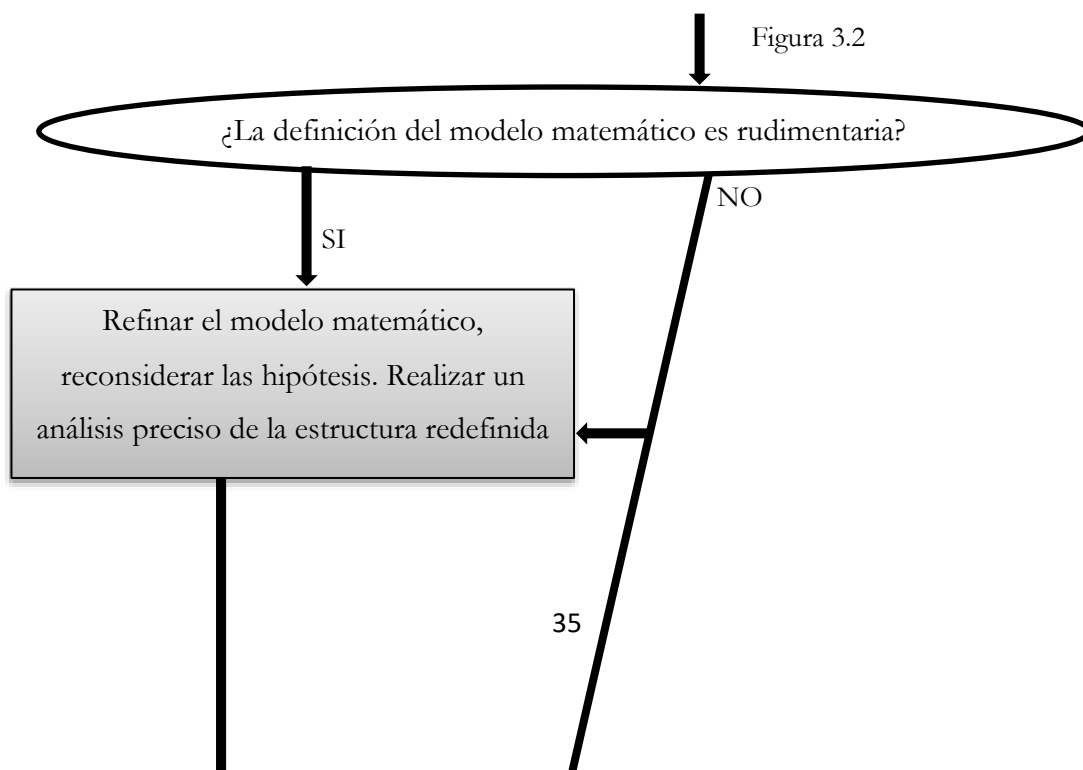


Figura 3.2. Procedimiento de evaluación detallado parte 1 (Appraisal of Existing Structures, tercera edición)

De acuerdo con dicha referencia, los resultados alcanzados son tres:

- La estructura se encuentra dentro de unos márgenes de seguridad adecuados, incluso teniendo en cuenta nuevas cargas, considerando las hipótesis fundamentadas sobre la resistencia de sus componentes y las cargas actuantes, de acuerdo con la normativa vigente ya explicada.
- Los cálculos indican que la estructura se encuentra sobre solicitada hasta el punto de que los márgenes de seguridad son inferiores o iguales a uno. En ocasiones es necesario reconsiderar las hipótesis y detectar posibles errores, sin embargo, si los resultados no varían se considerará el apeo y/o desalojo de la obra.
- Los coeficientes de seguridad de la estructura superan la unidad, pero se mantienen inferiores a los recomendados por las normativas de aplicación y la obra no muestra indicios de sobre sollicitación. Para este caso, es aconsejable llevar a cabo un modelo de cálculo más refinado que tenga en cuenta mecanismos secundarios de fallo y vías alternativas para las sollicitaciones.

Como conclusión, deberá señalarse qué elementos estructurales deben ser reforzados. Es imprescindible que el informe final de evaluación recoja todas las actividades realizadas, las hipótesis de partida y unas conclusiones fundamentadas claras. En última instancia, dicho informe debe ser firmado por uno o varios de los profesionales con atribuciones legales para ello y competencia técnica.



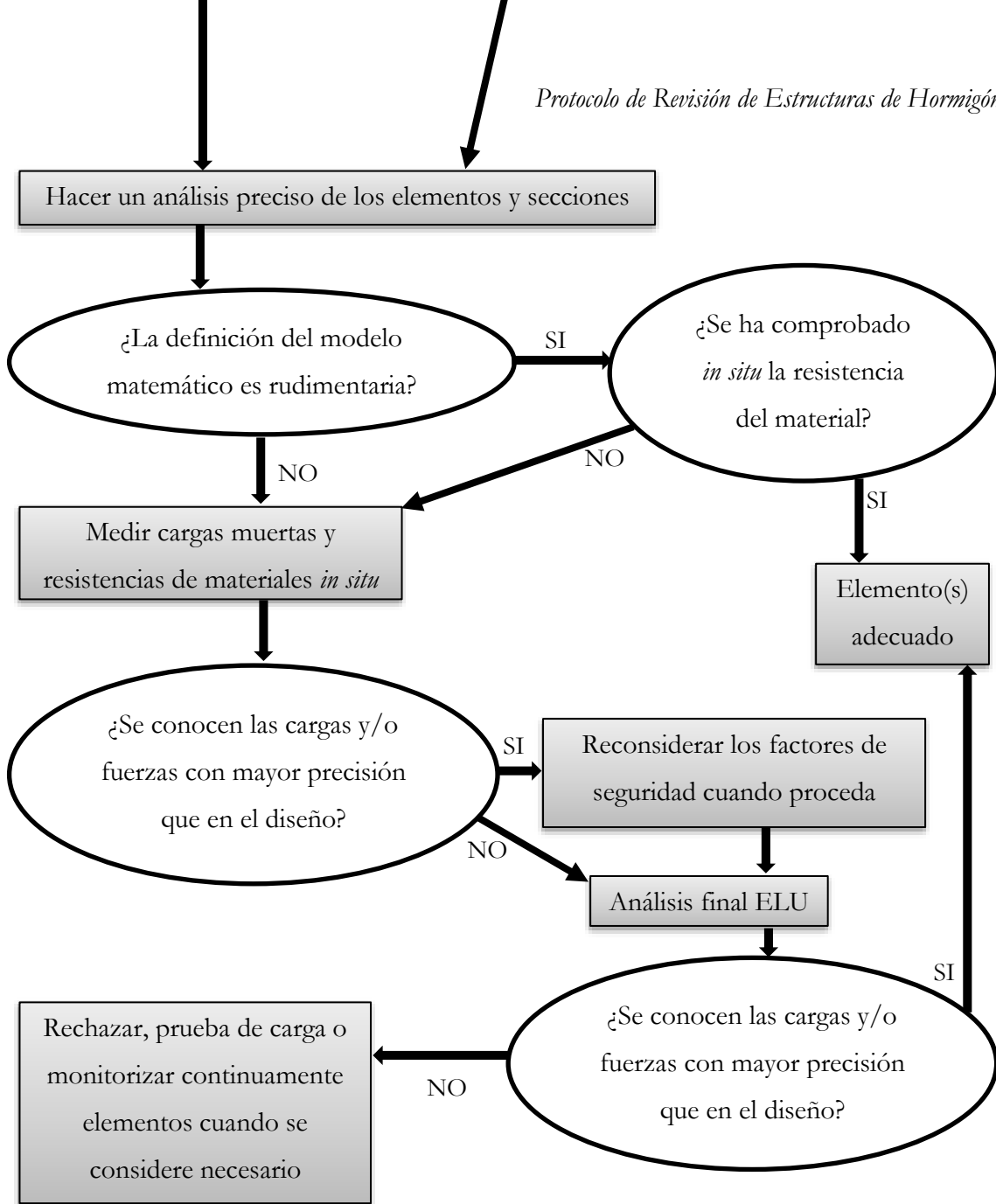


Figura 3.3. Procedimiento de evaluación detallado parte 2 (Appraisal of Existing Structures, tercera edición)

3.3. Proceso de evaluación avanzado

Se trata del tercer y último proceso de evaluación, e incluye métodos de análisis de la seguridad. Por lo general, se pretende lograr como mínimo los siguientes objetivos:

- Determinación de las situaciones críticas de comprobación.
- Determinación de la necesidad de adquisición de datos sobre las características de los materiales o sobre las acciones desarrolladas.
- Realización de un análisis estructural.
- Identificación de los modelos de deterioro siempre que sea posible y aplique.
- Comprobación con métodos de seguridad.

El proceso de evaluación estructural de una construcción u obra existente debe ser una secuencia progresiva, esto quiere decir que el inicio pertenece a procedimientos sencillos de evaluación asociados a pocos datos para acudir sucesivamente, si es preciso, a formulaciones más sofisticadas y más existentes en volumen de información con el fin de ser capaces de emitir un informe final acerca de la aptitud de la estructura para aceptar con seguridad suficiente unas acciones definidas.

La validación cualitativa, exigida por el Código Estructural, se refiere solo al caso de algunas estructuras para las que no existen o no se han determinado sanciones previas para el análisis cuantitativo, no se requieren incrementos de prestaciones y han presentado a lo largo de su vida útil un comportamiento previo positivo.

La Tabla 3.1 pretende ser un resumen de los niveles de análisis estructural detallados por la normativa española en la Tabla 25.4 del CE.

Nivel	Método
1	Comprobación de la estructura frente a las acciones que justifican la necesidad de la comprobación; por ejemplo, un cambio de uso.
2	Comprobación de la estructura para las acciones objeto de la comprobación, incluidas las acciones definidas en las bases de cálculo para obra nueva. Se aplican los códigos de materiales con unos coeficientes de por la incertidumbre que puede desencadenar una estructura existente a pesar de haber evidenciado un comportamiento previo positivo.
3	El marco de comprobación es similar al nivel 2, esto es, semiprobabilista, pero usa información actualizada en forma de características resistentes deducidas tras una inspección especial, auscultación o pruebas de carga. Se aplican de nuevo coeficientes de corrección ajustados con el fin de obtener la misma fiabilidad que para una obra nueva.
4	Aproximación sofisticada en forma de análisis no lineal tridimensional, normalmente alcanzado a través de un software de cálculo, en un contexto de formato de comprobación probabilista.

Tabla 3.1. Niveles de análisis estructural (Código Estructural)

Como conclusión a los procesos de evaluación explicados, se debe confirmar la capacidad portante y la aptitud al servicio de la estructura ensayada.

Por un lado, se considera que una estructura existente presenta una capacidad portante adecuada si se cumplen simultáneamente las siguientes condiciones:

- La estructura ha mostrado un comportamiento satisfactorio a lo largo de 5 años o más desde la última reparación, refuerzo o modificación.
- Una inspección detallada no ha revelado daños o deterioros significativos.
- Una inspección detallada ha permitido confirmar su esquema estático y el cálculo de este.
- El previsible deterioro de la estructura no ha puesto ni pondrá en peligro la seguridad estructural de la edificación, al menos haya la siguiente inspección programada.

- No se prevean modificaciones significativas de las acciones actuantes reales.

Por otro lado, se considera que una estructura existente es apta para el servicio que se le dará si se cumplen simultáneamente las siguientes condiciones:

- La estructura se ha comportado satisfactoriamente durante un periodo de tiempo suficientemente largo sin que hayan existido daños o anomalías en ninguno de los elementos estructurales o arquitectónicos (particiones, solados, etc). Además, no muestra síntomas indicativos de deformaciones excesivas ni se aprecian vibraciones molestas.
- Una inspección detallada no ha revelado daños o deterioros significativos. Más aún, no da cabida a deformaciones, desplazamientos o vibraciones excesivas.
- Durante el periodo de servicio restante no se prevén cambios que puedan alterar significativamente las acciones sobre la obra o influir en su durabilidad.
- En función del deterioro previsible de la estructura y del programa de mantenimiento programado, se puede anticipar una adecuada durabilidad.

4. ENSAYOS PARA EVALUAR LA RESISTENCIA DEL HORMIGÓN

La evaluación de la resistencia de una estructura de hormigón posee un carácter experimental, pero, como todo procedimiento, tiene su base en la teoría. Las siguientes líneas pretenden explicar las metodologías más utilizadas para alcanzar un resultado fiable acerca de la resistencia del hormigón, siempre siguiendo la normativa aplicable en España.

4.1. Generalidades

Si se habla de resistencia de hormigón en general, se refiere a la resistencia del hormigón a compresión ya que los valores alcanzados, comparados con la resistencia del hormigón a tracción, pueden ser incluso diez veces más en algunas ocasiones. Es por eso que se inserta el acero en la composición del material utilizado para las estructuras, pues es capaz de aumentar la resistencia a tracción de tal forma que la edificación sea más económica y eficaz.

A pesar de que es posible evaluar la resistencia del hormigón a compresión previamente a la puesta en obra del mismo, este proyecto trata de generar un procedimiento de ensayos en estructuras de hormigón existentes. Cabe destacar la variabilidad de los resultados en función de algunos parámetros como la composición, la edad de la estructura, la etapa de curado, el tipo de exposición durante su vida útil... etcétera.

A la hora de evaluar la resistencia de una estructura, conviene tener clara la definición de este parámetro y sus tipologías. A continuación, se explica brevemente la diferencia entre resistencia de proyecto, resistencia potencial y resistencia actual:

- La resistencia de proyecto es la mínima exigida para cumplir con la normativa legal. También se la conoce como resistencia característica.
- La resistencia potencial es la obtenida como resultado de ensayos con probetas realizadas en obra, utilizando moldes estandarizados y bajo condiciones controladas, es decir, es la resistencia que se desea obtener experimentalmente según las bases teóricas.

- La resistencia actual es la obtenida una vez haya sido finalizada la obra con lo que esto conlleva, ya que el paso del tiempo da pie a la aparición de humedad, diferencia de temperaturas, entre otros.

4.1.1. Ensayos de información

Cuando se habla del estudio de la resistencia de estructuras de hormigón, lo primero que se plantea es la decisión de los ensayos que se llevarán a cabo para ello. El Código Estructural, como otras normas antes, define estos exámenes como “ensayos de información” y se han convertido en métodos prácticos, en algunos casos, para predecir la resistencia del hormigón y, en otros casos, para descubrir características como defectos, grietas u otros indicios de deterioro de la obra. El Código Estructural en su apartado 57.8 (al igual que la EHE-08 en su apartado 86.8) señala que el objeto de los ensayos de información es estimar la resistencia del hormigón de una parte determinada de la estructura, a una cierta edad o tras un curado en condiciones análogas a las de la obra.

Además, explica que la dirección facultativa podrá decidir su empleo por solicitud de cualquiera de las partes, cuando existan dudas justificadas sobre la representatividad de los resultados obtenidos en el control experimental a partir de probetas de hormigón fresco.

Los ensayos de información del hormigón pueden consistir en:

- a) La rotura de probetas testigo extraídas del hormigón endurecido, conforme a la norma UNE EN 12504-1:2020 *Ensayos de hormigón armado en Estructuras. Parte 1: Testigos. Extracción, examen y ensayo a compresión*. Este ensayo no deberá realizarse cuando la extracción pueda afectar de un modo sensible a la capacidad resistente del elemento en estudio, hasta el punto de resultar un riesgo inaceptable.

En estos casos puede estudiarse la posibilidad de apejar previamente a la extracción, es decir, sostener los elementos constructivos que sufran más riesgo de sufrir daños mediante otras estructuras auxiliares temporales. Este tipo de ensayo nunca debe realizarse en hormigones cuya edad sea inferior a los 28 días.

- b) El empleo de métodos no destructivos fiables, como complemento del anteriormente descrito y debidamente correlacionados con el mismo. Entre los ensayos no destructivos se distingue la determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos y la determinación del índice de rebote; ambos se explican a lo largo de este capítulo.

Cada método tiene sus limitaciones, procedimientos y valoración de resultados según diversas normativas contempladas en el Código Estructural. Más aún, la dirección facultativa juzgará en cada caso los resultados, teniendo en cuenta que para la obtención de resultados fiables la realización, siempre delicada en estos ensayos, deberá estar a cargo de personal especializado.

4.1.2. Características y propiedades de los aceros

Los apartados 83.1 y 83.2 del Código Estructural establecen las características y propiedades para los aceros destinados a productos laminados, a perfiles de sección hueca y a perfiles de sección abierta.

Primeramente, se identifican muchos tipos de acero en función de su composición y desempeño. Entre otras distinciones, la más habitual es organizar este material en dos grupos: aceros no aleados y aceros aleados (también llamados aceros especiales). Aunque entrando más en detalle en el caso que nos ocupa asignado a estructuras, cabe la posibilidad de organizarlo en función de su armadura de la siguiente manera: aceros de armaduras pasivas y aceros de armaduras activas.

Aceros laminados en caliente:

Se llaman aceros laminados en caliente a los aceros no aleados, sin características especiales de resistencia mecánica o resistencia a la corrosión, y con una microestructura normal.

La Tabla 4.1 recoge los valores indicados en el Código Estructural del límite elástico y resistencia a tracción (N/mm^2) para cada tipo de acero no aleado en función del espesor nominal de producto.

Además, existen grados en función de la resiliencia mínima exigida por norma dependiendo de nuevo del espesor de producto. La temperatura de ensayo de resiliencia es constante para cada grado y no todos los tipos de acero cuentan con todos los grados (Ver Tabla 4.2).

Tipo	Espesor nominal del producto, t (mm)			
	t ≤ 40 mm		40 < t ≤ 80 mm	
	Límite elástico, fy	Resistencia a tracción, fu	Límite elástico, fy	Resistencia a tracción, fu
S 235	235	360 < fu < 510	215	360 < fu < 510
S 275	275	430 < fu < 580	255	410 < fu < 560
S 355	355	490 < fu < 680	335	470 < fu < 630
S 450	450	550 < fu < 720	410	530 < fu < 700

Tabla 4.1. Características mecánicas de los aceros no aleados (Código Estructural)

Como se puede ver en la tabla anterior, la norma no contempla los valores mínimos de límites elásticos y resistencia a tracción para productos con un espesor superior a 80 milímetros.

Grado	Temperatura del ensayo (°C)	Resiliencia (J)		
		t ≤ 150 mm	150 < t ≤ 250 mm	250 < t ≤ 400 mm
JR	20	27	27	-
J0	0	27	27	-
J2	-20	27	27	27
K2	-20	40 (*)	33	33

(*) Equivale a una resiliencia de 27 J a -30 °C

Tabla 4.2. Resiliencia según el espesor nominal del producto y la temperatura de ensayo (Código Estructural)

Todos los grados son aptos para ser soldados siendo creciente su eficacia de los aceros JR a los aceros K2.

Aceros con características especiales:

Se trata de un grupo más amplio que el anterior ya que la norma cataloga seis tipos de aceros con características especiales.

- Aceros soldables de grano fino en la condición de normalizado.

La norma especifica los valores mínimos de límite elástico, así como de resistencia a la tracción en función de los mismos intervalos de espesor del producto que en el caso de los aceros no aleados. La Tabla 4.3 muestra las propiedades mecánicas de los aceros especiales soldables de grano fino (N/mm²)

Tipo	Espesor nominal del producto, t (mm)			
	t ≤ 40 mm		40 < t ≤ 80 mm	
	Límite elástico, fy	Resistencia a tracción, fu	Límite elástico, fy	Resistencia a tracción, fu
S 275	275	370 < fu < 510	255	370 < fu < 510
S 355	355	470 < fu < 630	335	410 < fu < 630
S 420	420	520 < fu < 680	390	520 < fu < 680
S 460	460	540 < fu < 720	430	540 < fu < 720

Tabla 4.3. Características mecánicas de los aceros soldables de grano fino en la condición de normalizado (Código Estructural)

En este caso, el ensayo de resiliencia se desarrolla para diferentes direcciones a lo largo (L) o ancho (T) del elemento, pero en ningún caso para un espesor de producto (Ver Tabla 4.4).

Grado	Dirección	Temperatura del ensayo (°C)						
		20	0	-10	-20	-30	-40	-50
N	L	55	47	43	40 (*)	-	-	-
	T	31	27	24	20	-	-	-
NL	L	63	55	51	47	40	31	27
	T	40	34	30	27	23	20	16

(*) Equivale a una resiliencia de 27 J a -30 °C

Tabla 4.4. Resiliencia según la dirección del producto y la temperatura de ensayo (Código Estructural)

Todas las tipologías deben ser aptas para soldeo y, salvo que el pliego de prescripciones técnicas particulares disponga algo diferente, la verificación de valores se efectuará sobre ensayos efectuados en la dirección longitudinal (L) y a una temperatura de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ si se trata del grado N, mientras que se deberá llevar a cabo a una temperatura de $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ si es NL.

- Aceros soldables de grano fino laminados termo mecánicamente.

Las especificaciones de propiedades mecánicas al igual que las especificaciones de resiliencia a efectos del Código Estructural para los aceros soldables de grano fino laminados termo mecánicamente se detallan en las Tablas 4.5 y 4.6.

Tipo	Espesor nominal del producto, t (mm)			
	$t \leq 40\text{ mm}$		$40 < t \leq 80\text{ mm}$	
	Límite elástico, fy	Resistencia a tracción, fu	Límite elástico, fy	Resistencia a tracción, fu
S 275	275	$370 < fu < 530$	255	$360 < fu < 520$
S 355	355	$470 < fu < 630$	335	$450 < fu < 610$
S 420	420	$520 < fu < 680$	390	$500 < fu < 660$
S 460	460	$540 < fu < 720$	430	$530 < fu < 710$

Tabla 4.5. Características mecánicas de los aceros soldables de grano fino laminados termomecánicamente (Código Estructural)

Apenas existen diferencias entre los requerimientos normalizados para los aceros soldables de grano fino en la condición de normalizado y los laminados termomecánicamente. Eso quiere decir que las Tablas 4.4 y 4.6 son análogas salvo en la nomenclatura utilizada.

Grado	Dirección	Temperatura del ensayo ($^{\circ}\text{C}$)						
		20	0	-10	-20	-30	-40	-50
M	L	55	47	43	40 (*)	-	-	-
	T	31	27	24	20	-	-	-
ML	L	63	55	51	47	40	31	27
	T	40	34	30	27	23	20	16

(*) Equivale a una resiliencia de 27 J a $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tabla 4.6. Resiliencia según la dirección del producto y la temperatura de ensayo (Código Estructural)

La verificación de valores se efectuará, siempre que no haya impedimento, en las mismas condiciones que los aceros soldables de grano fino en la condición de normalizado, sobre ensayos realizados en la dirección longitudinal (L) y a una temperatura de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ si se trata del grado M, mientras que se deberá llevar a cabo a una temperatura de $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ si es ML.

- Aceros con resistencia mejorada a la corrosión atmosférica

También llamados aceros patinables o autoprotectores debido a que, por la presencia de algunos elementos como níquel, cromo, cobre, molibdeno... etc, en su composición química hace que se forme una capa superficial de óxido o pátina autoprotectora que protege al material de la corrosión atmosférica. En las siguientes líneas se introducirá una W en los grados de los aceros que hace referencia a la existencia de esa pátina. Continuando con la misma dinámica, las Tablas 4.7 y 4.8 muestran las características mecánicas más relevantes a la hora de seleccionar un acero de este tipo.

Tipo	Espesor nominal del producto, t (mm)			
	$t \leq 40\text{ mm}$		$40 < t \leq 80\text{ mm}$	
	Límite elástico, fy	Resistencia a tracción, fu	Límite elástico, fy	Resistencia a tracción, fu
S 235	235	$360 < f_u < 510$	215	$360 < f_u < 510$
S 355	355	$490 < f_u < 680$	335	$470 < f_u < 630$

Tabla 4.7. Características mecánicas de los aceros con resistencia mejorada a la corrosión atmosférica (Código Estructural)

Grado	Temperatura del ensayo ($^{\circ}\text{C}$)	Resiliencia (J)
J0W	0	27
J2W	-20	27
K2W	-20	40 (*)

(*) Equivale a una resiliencia de 27 J a $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tabla 4.8. Resiliencia según el grado del acero (Código Estructural)

Destacar que el ensayo de resiliencia no depende del espesor del elemento a ensayar, únicamente depende del grado del acero y de la temperatura a la que se realiza.

Por otro lado, el motivo por el cual no se realizan ensayos a mayor temperatura reside en el aumento que sufre el efecto de la corrosión a medida que aumenta dicho parámetro en la superficie de un material.

Antes de realizar la soldadura, se debe eliminar la pátina autoprotectora formada en la zona próxima al cordón. Todos los tipos son soldables pero su soldabilidad no es ilimitada, por lo tanto, el suministrador deberá facilitar los procedimientos recomendados para su uso.

- Aceros de alto límite elástico, en la condición de templado y revenido.

Tipo	Espesor nominal del producto, t (mm)			
	t ≤ 40 mm		40 < t ≤ 80 mm	
	Límite elástico, fy	Resistencia a tracción, fu	Límite elástico, fy	Resistencia a tracción, fu
S 460 Q S 460 QL S 460 QL1	460	550 < fu < 720	440	550 < fu < 720

Tabla 4.9. Características mecánicas de los aceros de alto límite elástico en la condición de templado y revenido (Código Estructural)

Grado	Dirección	Temperatura del ensayo (°C)			
		0	-20	-40	-60
S 460Q	L	40	30	-	-
	T	30	27	-	-
S 460 QL	L	50	40	30	-
	T	35	30	27	-
S 460 QL1	L	60	50	40	30
	T	40	35	30	27

Tabla 4.10. Resiliencia según la dirección del producto y la temperatura de ensayo (Código Estructural)

La verificación de valores se realizará a priori sobre ensayos efectuados en la dirección longitudinal (L); y a una temperatura de -20°C, -40 °C o -60 °C para los grados Q, QL y QL1 respectivamente.

El suministrador tendrá la labor de informar acerca de la dirección y el procedimiento más eficaz que se debe llevar a cabo para concluir una soldabilidad de mayor calidad.

- Aceros con resistencia mejorada a la deformación en la dirección perpendicular a la superficie del producto.

Los aceros con resistencia mejorada a la deformación en la dirección perpendicular a la superficie del producto, es decir, resistencia mejorada a la tracción, deben cumplir con los porcentajes mínimos de estricción especificado a continuación en función del número de ensayos.

Se conoce por estricción a la reducción en área de la sección tras la rotura respecto al área inicial al ser sometido a un esfuerzo del axil.

La Tabla 4.11 recopila los datos correspondientes.

Grado	Estricción (%)	
	Valor mínimo medio de 3 ensayos	Valor mínimo de 1 ensayo
Z 15	15	10
Z 25	25	15
Z 35	35	25

Tabla 4.11. Estricción en función del grado de acero con resistencia mejorada a la tracción (Código Estructural)

- Aceros inoxidables laminados en caliente.

Este último grupo es uno de los más utilizados en la industria estructural pues recoge muchas de las propiedades mecánicas que se recopilan en los aceros especiales anteriores, entre ellas pueden destacar la protección contra corrosión y la oxidación, y su alta resistencia.

La Tabla 4.12 recoge algunas de las tipologías que existen de aceros inoxidables en función de los porcentajes máximos en carbono, fósforo y azufre...etc. En particular se detallan 4 grados junto a sus límites elásticos y rangos de resistencias a la tracción (N/mm²).

Tipo	Espesor nominal del producto, t (mm)			
	t ≤ 13,15 mm		13,15 < t ≤ 75 mm	
	Límite elástico, fy	Resistencia a tracción, fu	Límite elástico, fy	Resistencia a tracción, fu
1.4003	280 (L)	450 - 650	250 (L)	450 - 650
	320 (T)		280 (T)	
1.4482	480	660 – 900	450	650 – 850
1.4362	400	650 – 850	400	630 – 800
1.4462	460	700 – 950	460	640 – 840

Tabla 4.12. Características mecánicas de los aceros inoxidable (Código Estructural)

Para los tipos señalados en la Tabla 4.12, el ensayo de resiliencia se realiza a una temperatura de 20 °C mientras que los requisitos mínimos para validar dicho ensayo se corresponden con 100 J si se prueba en la dirección longitudinal (L) y 60 J si se ensaya en la dirección transversal (T).

Una vez más, todos los aceros inoxidables son soldables, pero se deberán seguir las recomendaciones de fabricante para adquirir un cordón de soldadura de más calidad.

Como se mencionaba al principio de este punto, la selección de los aceros puede ser dispar según el comportamiento que se desee encontrar. Es por este motivo que se considera relevante explicar los tipos de armaduras utilizados y especificados en el Código Estructural: armaduras activas y armaduras pasivas.

Aceros de armaduras activas:

El Código Estructura denomina armaduras activas a las disposiciones de elementos de acero de alta resistencia mediante las cuales se introduce la fuerza de pretensado en la estructura. Además, la norma dispone de los siguientes productos de acero para este tipo de armaduras:

- Alambre: Producto de sección maciza suministrado normalmente en rollo.
- Barra: Producto de sección maciza suministrado en forma de elementos rectilíneos.
- Cordón: Producto formado por varios alambres enrollados helicoidalmente, con el mismo paso y el mismo sentido de torsión sobre un eje ideal común.

Son muchas las características mecánicas que engloban las armaduras activas pero el suministrador del material debe garantizar al menos las siguientes para un correcto desempeño en la vida útil del acero: carga unitaria máxima a tracción, límite elástico convencional, módulo de elasticidad, relajación, resistencia a fatiga y susceptibilidad a la corrosión bajo tensión.

Aceros de armaduras pasivas:

Se entiende por armadura pasiva el resultado de montar, en el correspondiente molde o encofrado el conjunto de armaduras normalizadas, ferrallas elaboradas o ferrallas armadas que, convenientemente solapadas y con los recubrimientos adecuados, tiene una función estructural. A efectos del Código Estructural, se dispondrá de los consecutivos productos para armaduras pasivas:

- Barras rectas o rollos de acero corrugado o grafilado.
- Alambres de acero corrugado o grafilado.

No se permite el uso de alambres lisos para la elaboración de armaduras pasivas, excepto como elementos de conexión de armaduras básicas electrosoldadas en celosía. La sección equivalente del acero utilizado no será inferior al 95,5% de la sección normal mientras que las secciones nominales y las masas nominales por metro se especifican en normativas europeas.

4.2. Condicionantes para la evaluación de la resistencia del hormigón

Merece especial atención la definición de los parámetros que pueden afectar a la resistencia del hormigón y, por lo tanto, a su vida útil. Estas variables no son relevantes en estructuras de nueva construcción pues ya se tienen en cuenta en su proceso de análisis y construcción, pero en el procedimiento que aplica a este proyecto, ensayos en estructuras existentes, es primordial tener en cuenta los siguientes puntos.

4.2.1. Edad de la estructura

La edad de la estructura revela la teoría y normativa aplicable en el momento en el que se calculó la estructura, los materiales que se emplearon y los métodos de construcción seguidos en ese momento, entre otras cosas.

Además de la variabilidad que hayan podido sufrir los requisitos constructivos desde el momento de la obra hasta el momento del ensayo, desde el punto de vista de la resistencia del hormigón se entiende que aumenta poco a poco con el tiempo pues depende de la cantidad de compuestos de hidratación formados. A pesar de que la resistencia se desarrolla durante toda la vida del elemento, a partir de los 28 días lo hace tan lentamente que no se tiene en cuenta en el diseño o la ejecución de las estructuras, aunque puede llegar a cobrar relevancia en la intervención de estructuras existentes. La Figura 4.1 representa la evolución de la resistencia del hormigón a lo largo de sus primeros 28 días.

La resistencia que alcanza el hormigón a 28 días en condiciones estandarizadas controladas, y reducida según criterios estadísticos a efectos de garantizar un nivel adecuado de seguridad, es la denominada resistencia característica. Este valor de resistencia es el que se emplea como dato de proyecto y mediante el cual se designa el hormigón por propiedades.

Destacar también que algunas normas especifican la relación efectiva entre la temperatura ambiente de exposición del hormigón y el desarrollo con el paso del tiempo de su resistencia.

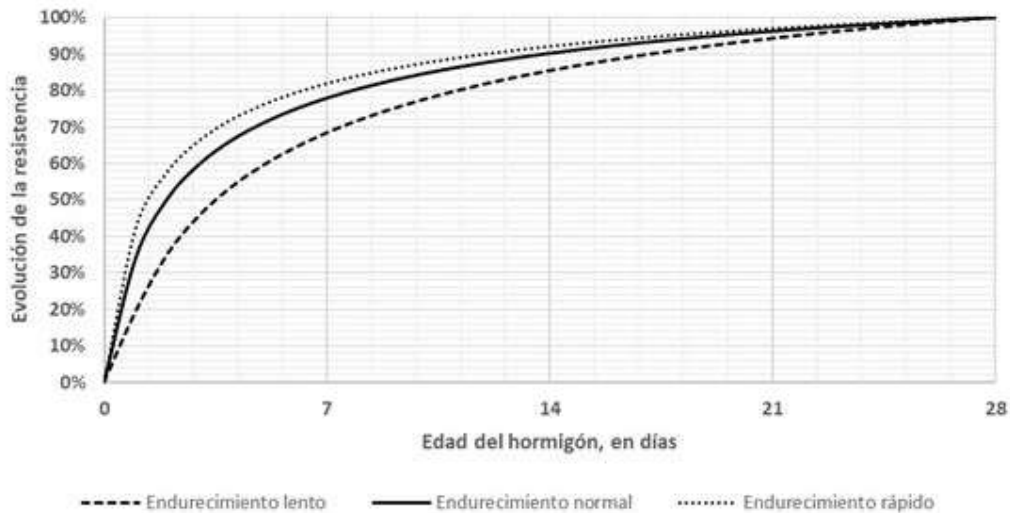


Figura 4.1. Evolución de resistencia del hormigón respecto al tiempo

Cabe tener en cuenta cuándo comenzaron a realizarse las primeras obras de hormigón armado y pretensado. Las siguientes líneas pretenden resumir algunos de los hitos más influyentes en cuanto a descubrimiento e implementación de este material:

- El descubrimiento del hormigón armado se le atribuye a Joseph-Louis Lambot en 1848. Sin embargo, la primera patente llegó de la mano de Joseph Monier en 1868 cuando fabricó recipientes de jardinería en composiciones similares y, más tarde, construyó vigas y otras estructuras en obras ferroviarias. Unas décadas más adelante, en 1875 Joseph Monier construyó el primer puente arco de hormigón armado en Francia.
- Respecto al hormigón pretensado, Eugene Freyssinet patentó en 1928 su teoría sobre este material y la publicó con título “*Una revolución en el arte de construir*”.

En lo que se refiere a España, los primeros usos del hormigón armado registrados son los siguientes:

- En 1899 se edifica la estructura de la Fábrica de Harinas “La Ceres” en Bilbao. Se trata de un edificio industrial de cuatro plantas construido con el sistema Hennebique difundido por José Eugenio Ribera como comentado anteriormente en este documento.

- Entre 1901 y 1902 se construye el Puente de “La Peña” en Bilbao para el paso del tranvía sobre el río Saja.

Determinación de la edad de la estructura:

La hidratación del hormigón durante su ciclo de vida depende de las condiciones medioambientales a las que está sometido el material; por ejemplo, la humedad, temperatura, viento... etc. Asimismo, obedece a las prestaciones presentadas por su composición y la dosificación del hormigón.

Debido a la evolución particular de cada hormigón y, por lo tanto, de cada estructura, no es posible establecer una relación directa entre la edad del hormigón y sus características físicas, químicas o mecánicas, Dicho de otra manera, no es posible calcular la edad de la obra basándose en propiedades.

No obstante, puede obtenerse información sobre la época de edificación mediante el análisis de la microestructura, el empleo de diversas técnicas para la hidratación del cemento o la presencia de aditivos.

4.2.2. Ambiente en que se encuentra la estructura de hormigón

Antes de realizar los ensayos previstos a la estructura de hormigón armado, se deberá identificar el tipo de ambiente al que ha sido expuesta. En función del tipo de elemento, la clase de exposición se determinará de acuerdo con los apartados 27.1 o 80.1 del Código Estructural, según se trate de elementos de hormigón o acero respectivamente.

Adicionalmente, el Artículo 110 de la misma norma define como clases de exposición las relativas a las estructuras mixtas compuestas por hormigón y acero, y guiadas por los apartados mencionados anteriormente según proceda.

Criterios específicos para hormigón:

La Tabla 4.13 lista las clases de exposiciones relativas al hormigón estructural según el Código Estructural, se trata de un resumen de la Tabla 27.1.a de esta norma.

Designación	Descripción del entorno
1. Sin riesgo de ataque por corrosión	
X0	Hormigón en masa: todas las exposiciones salvo que exista ataque hielo/deshielo, abrasión o ataque químico. Hormigón con armaduras en un ambiente muy seco.
2. Corrosión inducida por carbonatación	
XC1	Seco o permanentemente húmedo
XC2	Húmedo, raramente seco
XC3	Humedad moderada
XC4	Sequedad y humedad cíclicas
3. Corrosión inducida por cloruros de origen no marino	
XD1	Humedad moderada
XD2	Húmedo, raramente seco
XD3	Ciclos humedad y secado
4. Corrosión inducida por cloruros de origen marino	
XS1	Expuestos a aerosoles marinos, sin contacto directo con el agua del mar
XS2	Permanentemente sumergida en agua de mar
XS3	Zonas de carrera de mareas afectadas por el oleaje o salpicaduras
5. Ataque hielo / deshielo	
XF1	Saturación moderada, sin sales fundentes
XF2	Saturación moderada, con sales fundentes
XF3	Saturación alta, sin sales fundentes
XF4	Saturación alta, con sales fundentes o agua del mar
6. Ataque químico	
XA1	Ambiente con débil agresividad química según la Tabla 27.1.b del CE
XA2	Ambiente con moderada agresividad química según la Tabla 27.1.b del CE
XA3	Ambiente con alta agresividad química según la Tabla 27.1.b del CE
7. Erosión	
XM1	Elementos sometidos a erosión / abrasión moderada
XM2	Elementos sometidos a erosión / abrasión intensa
XM3	Elementos sometidos a erosión / abrasión extrema

Tabla 4.13. Clases de exposiciones del hormigón estructural (Código Estructural)

En función de la clase de exposición definida para la estructura de hormigón, el Código Estructural especifica la máxima relación agua/cemento, el contenido mínimo de cemento en kg/m³ y la resistencia característica en N/mm² requeridos para hormigones en masa, armado y pretensado.

Criterios específicos para acero:

Las Tablas 4.14 y 4,15 listan las clases de exposiciones relativas al acero estructural según el Código Estructural, se trata de un resumen de las Tablas 80.1.a y 80.1.b de esta norma.

Designación	Corrosividad	Pérdida de masa por unidad de superficie / pérdida de espesor (tras el primer año de exposición)			
		Acero de bajo contenido en carbono		Cinc	
		Pérdida de masa (g/cm ²)	Pérdida de espesor (µm)	Pérdida de masa (g/cm ²)	Pérdida de espesor (µm)
C1	Muy baja	≤ 10	≤ 1.3	≤ 0.7	≤ 0.1
C2	Baja	> 10 y hasta 200	> 1.3 y hasta 25	> 0.7 y hasta 5	> 0.1 y hasta 0.7
C3	Media	> 200 y hasta 400	> 25 y hasta 50	> 5 y hasta 15	> 0.7 y hasta 2.1
C4	Alta	> 400 y hasta 650	> 50 y hasta 80	> 15 y hasta 30	> 2.1 y hasta 4.2
C5	Muy alta	> 650 y hasta 1500	> 80 y hasta 200	> 30 y hasta 60	> 4.2 y hasta 8.4
CX	Extrema	> 1500 y hasta 5500	> 200 y hasta 700	> 60 y hasta 180	> 8.4 y hasta 25

Tabla 4.14. Clases de exposiciones del acero estructural por corrosión atmosférica (Código Estructural)

Designación	Clase de exposición
lm1	Agua dulce
lm2	Agua de mar o salobre sin protección catódica
lm3	Suelo
lm4	Agua de mar o salobre con protección catódica

Tabla 4.15. Clases de exposiciones del acero estructural relativa al agua y suelo (Código Estructural)

4.3. Ensayos a estructuras existentes de hormigón armado

Es importante insistir en que los ensayos de penetración o dureza superficial no pueden sustituir a los ensayos clásicos de rotura a compresión de probetas testigo extraídas del hormigón endurecido, especificado en la norma UNE EN 12504-1:2020 ya citada anteriormente. La resistencia del hormigón solo se puede plantear con correlaciones cuya fiabilidad dependerá de la calidad del hormigón *in situ*, de la calidad de las probetas testigo y de la calidad de realización de los ensayos. Esto último depende del profesional que lleve a cabo la acción.

Las siguientes páginas tratarán de explicar los ensayos destructivos y no destructivos realizados a estructuras de hormigón existentes para determinar la resistencia de ésta y su aptitud de uso.

4.3.1. Resumen métodos de ensayo no destructivos

La Tabla 4.16, adaptada del libro “J.H.Bungey y S.G.Millard”, es un resumen de dos de los métodos no destructivos a realizar para estimar la resistencia del hormigón. En ella se evalúa la representatividad, la precisión y el daño causado a la estructura con cada ensayo.

Método	Coste	Rapidez de ensayo	Daño causado a la estructura	Representatividad	Precisión determinación resistencia
Control por ultrasonidos	Bajo	Rápido	Ninguno	Buena	Baja
Indice de rebote	Muy bajo	Rápido	Mínimo	Solo en superficie	Baja

Tabla 4.16. Características de los END (J.H.Bungey y S.G.Millard)

Respecto al ensayo no destructivo restante que será interpretado, ensayo de profundidad de carbonatación, no existen parámetros estrictos como los indicados arriba pues la respuesta de las estructuras frente a este examen es muy inestable.

4.3.2. Toma de muestras

En los tipos de ensayos que se explicarán a continuación es prioritario disponer de un número mínimo de resultados con los que poder generar una correlación o, más comúnmente llamado, una media, de cara a que la conclusión sea lo más precisa posible.

La Tabla 4.17 trata de ser una recomendación al número de muestras a tomar para el ensayo de extracción de probetas testigo y el intervalo de confianza del valor obtenido de la resistencia *in situ*; todo ello para un nivel de confianza recomendado del 95%.

Número de probetas	Intervalo de confianza del valor obtenido de la resistencia <i>in situ</i> al 95%
1	12% aproximadamente
4	6% aproximadamente
9	4% aproximadamente
16	3% aproximadamente

Tabla 4.17. Límites de intervalo de confianza ensayos de probetas testigo

En cuanto al número de zonas a ensayar para el ensayo esclerométrico y de ultrasonidos, corresponden a valores de 12 y 1 respectivamente.

La dispersión de los resultados generalmente es alta, excepto en el caso del ensayo de velocidad de impulsos de ultrasonidos (UT) según el libro de J.H.Bungey y S.G.Millard. Por ese motivo, es importante evaluar la aptitud de los parámetros influyentes (coste, rapidez de ensayo, daño causado a la estructura...etc) con respecto a la propiedad investigada, como indicado en la Tabla 4.16.

Cabe destacar que objetivo del procedimiento de toma de muestras debe ser el de obtener una muestra estadísticamente representativa. Para ello, debe prestarse atención a cualquier diferencia entre ellas pues podría afectar a los resultados del ensayo.

Los factores más comunes que influyen en este proceso son los siguientes:

- Dimensiones y tolerancias
- Materiales y fabricación de prototipos
- Procedimientos de muestreo
- Número de probetas de ensayo

La Tabla 4.18 indica el porcentaje de error en la toma de muestras de cada ensayo. Por un lado, la segunda columna representa el coeficiente de variación de las medidas alcanzadas con cada examen. Por otro lado, la tercera columna especifica la probabilidad de que la resistencia demostrada con cada ensayo sea la correcta con un margen de error del 5% o menos. Respecto a lo último, se especifica el porcentaje para el número de muestras o partidas realizadas según recomendaciones comentadas en las Tablas 4.17 y 4.18.

Ensayo	Coeficiente de variación de las medidas por cada elemento estructural de buena calidad	Estimación del valor de la resistencia característica con una probabilidad de fallo igual o inferior al 5%
Extracción de testigos de hormigón	10 %	10% (3 probetas) aproximadamente
Control por ultrasonidos	2,5%	20% (1 ensayo) aproximadamente
Índice de rebote	4%	25% (12 ensayos aproximadamente)

Tabla 4.18. *Dispersión de las medidas in situ y precisión máxima para los principales ensayos no destructivos.*

Si se considera que las estimaciones obtenidas de la resistencia tienen un carácter muy conservador, se recomienda la extracción de más testigos o el uso de una aproximación de técnicas combinadas para obtener más resultados de ensayo, por ejemplo, los ensayos de información explicados en el punto 4.1.1.

4.3.3. Extracción de testigos de hormigón

Fundamento teórico:

La estimación de la resistencia a compresión del hormigón armado mediante la extracción de testigos conlleva una delicada interpretación de los resultados para concluir con exactitud. Se trata del único ensayo destructivo que se explicará en este pliego por ser el único de su categoría contemplado por el Código Estructural. Los testigos proporcionan información directa sobre el hormigón en una estructura existente pues no solo aporta datos sobre el hormigón fabricado sino su comportamiento en función del elemento estructural que esté representando, a lo largo de su vida útil tras la puesta en servicio de la estructura por parte del constructor o tras un curado en condiciones análogas a las de la obra.

Resulta interesante destacar la variabilidad de conclusiones que se pueden extraer de este ensayo debido a parámetros como el curado del hormigón, las humedades que hayan podido existir en los elementos estructurales tras su construcción, las distintas temperaturas alcanzadas en la masa de hormigón... etc. Tal es el caso de los pilares o muros, cuya resistencia medida entre los testigos extraídos en la parte inferior y aquellos extraídos en la parte superior difiere entre un 15 y un 30%.

El punto 4.3.2 recoge un resumen de las variables involucradas en el ensayo y en este punto se desarrollarán más las distintas condiciones impuestas por diversas legislaciones para la extracción de probetas.

Selección del número de muestras:

- La norma española UNE EN 12504-1:2020: *Ensayos de hormigón armado en Estructuras. Parte 1: Testigos. Extracción, examen y ensayo a compresión*; proporciona dos métodos de cálculo de la resistencia estimada en función del número de testigos: El primer caso, selecciona probetas de 100 milímetros de diámetro extraídos de un lugar concreto siempre que existan mínimo 3 testigos por zona. El segundo caso, obliga a triplicar el número de probetas si el diámetro de las mismas se reduce a la mitad.

- CSTR 11 (Concrete Society Technical Report) presenta procedimientos para el cálculo de la resistencia estimada del hormigón *in situ* y a pie de obra. La recomendación del número de muestras y la precisión para el cálculo de la resistencia es de un mínimo de cuatro testigos tomados de cada lote de hormigón. La fiabilidad de la resistencia estimada a partir de cuatro o más testigos es de un $\pm 15\%$. Por tanto, se considera que no merece la pena la extracción de más de cuatro testigos por lote sospechoso ya que la estimación no mejora al aumentar el número de probetas y es perjudicial para la estructura analizada.

- La norma americana ASTM (American Society for Testing and Materials) requiere obtener mínimo 5 testigos por cada hormigón especificado.

- La norma americana ACI (American Concrete Institute) también da valores del 12% para un único testigo, pero ofrece un número recomendado de éstos según el coeficiente de variación estimado de la resistencia *in situ* (V) y el error máximo (e), que se quiera obtener en los resultados (Ver Figura 4.2)

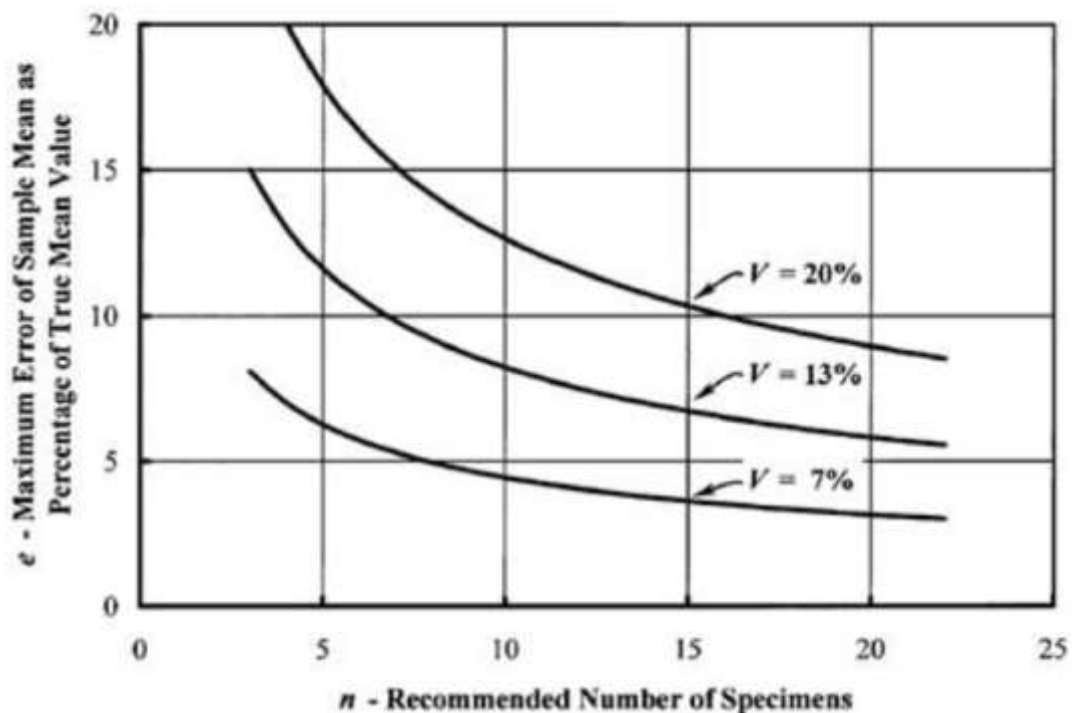


Figura 4.2. Recomendación del número de testigos en función de la variación de la resistencia y error máximo (ACI)

Selección del diámetro del testigo:

Por lo general, un mayor tamaño de la muestra desemboca en unos mejores resultados basándose en que la variabilidad introducida por el procedimiento de extracción disminuye. En función de los factores de corrección especificados por algunas normas para convertir los valores de resistencia a los característicos de una probeta estándar, el testigo ideal tiene un diámetro de 150 milímetros y una longitud de 300 milímetros. No obstante, no se ajusta a medidas estándar de testigos exentos de barras de refuerzo y, por lo tanto, es difícil encontrar este tipo de piezas. Sin embargo, siempre se debe mantener la relación de esbeltez del testigo de 1.5 a 2, es decir, la altura de la probeta será desde 1.5 hasta 2 veces el diámetro.

Reconocimiento mediante pachómetro:

Es muy habitual y recomendable realizar un ensayo de pachometría a la construcción para detectar las armaduras existentes y evitar el corte de estas en la fase de extracción de testigos. El principio del ensayo de sonda magnética, también llamado ensayo de pachometría, se basa en la Ley de Faraday que formula la medida de la resistencia al flujo magnético generado por una sonda. La proporcionalidad que rige el método indica que cuanto más se acerca la sonda magnética a un elemento magnético, más pequeña es la resistencia a dicho flujo; es decir, existe una proporcionalidad directa entre distancia de medida y resistencia magnética.



Figura 4.3. Pachómetro

Material y equipo:

Los materiales utilizados son variados en función de la precisión del ensayo y se definen a lo largo de la explicación del fundamento teórico y del procedimiento de este ensayo, pero a continuación se listan para mayor comodidad de la interpretación de este proyecto:

- Pachómetro.
- Máquina de pulido de testigos de hormigón.
- Máquina de refrentado de testigos de hormigón.
- Prensa de hormigón.

Más adelante se explicará cuáles de ellas son estrictamente necesarias para la ejecución del examen y cuáles son opcionales. Por el momento, destacar que la prensa de hormigón es indispensable y la Figura 4.4 muestra la forma que tiene.



Figura 4.4. Prensa

Procedimiento:

Una vez extraída la probeta se debe identificar y trasladar al laboratorio donde se conservará en unas condiciones similares a las que tenía como elemento estructural de la construcción hasta su prueba de compresión. Los testigos deben permanecer 24 horas a temperatura ambiente del laboratorio antes de proceder a su rotura.

Los laboratorios acreditados disponen de cámaras húmedas donde preservar las probetas de hormigón fresco a una temperatura de 20 °C y una humedad relativa igual o mayor al 95%

Las superficies destinadas a cargarse deben ser preparadas para garantizar la ausencia de irregularidades que puedan suponer una variabilidad no deseada en la medida. Para ello, el método más utilizado es el pulido. La Figura 4.5 muestra una imagen de este equipo.



Figura 4.5. *Máquina de pulido de testigos de hormigón*

Tras la eliminación de anomalías, se coloca la probeta en la máquina de ensayos. Además, se elimina cualquier resto de material extraño de los platos para que el contacto entre el plato y el testigo sea lo más completo posible.

A continuación, entrando en el propio procedimiento del ensayo de compresión de los testigos de hormigón, se define la velocidad de carga constante que se aplicará siempre dentro del rango de 0,2 a 1 MPa/s, se aplica la carga a la probeta sin generar choque entre superficies y se aumenta la velocidad continuamente ($\pm 10\%$ de la velocidad seleccionada) hasta la rotura de la probeta. Cabe destacar que el ensayo se lleva a cabo con equipos sofisticados mediante los cuales es posible registrar la carga máxima soportada y la tensión de rotura del elemento con una precisión muy alta.

Es importante observar la morfología de la rotura de la probeta para garantizar la validez del ensayo, prestando especial atención a fallos prematuros por defectos internos:

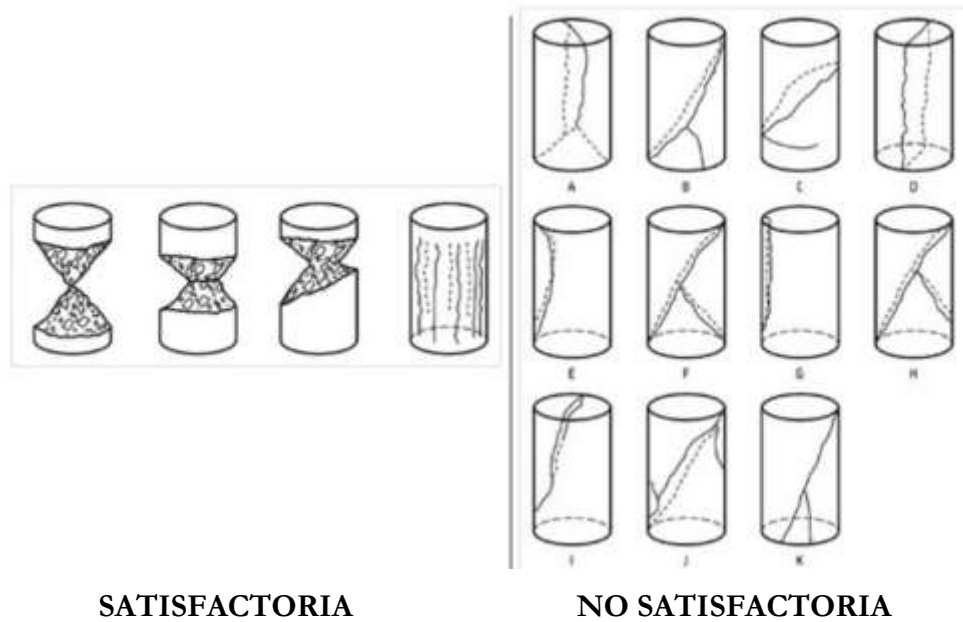


Figura 4.6. Determinación de la condición de probetas cilíndricas ensayadas en satisfactorias y no satisfactorias

Resultados:

Como hemos mencionado con anterioridad, la norma que recoge los requisitos básicos para las operaciones de extracción y preparación para el ensayo de rotura de probetas testigo extraídas del hormigón endurecido es la norma UNE EN 12504-1:2020 aceptada por el CE y sustitutiva de la norma española UNE 83302:1984: *Ensayos de hormigón. Extracción y conservación de probetas testigo*. Sin embargo, para desarrollar el examen e interpretar los resultados adecuadamente es necesario fijar el foco en otras normas, como la UNE EN 13791:2020 *Evaluación de la resistencia a compresión in situ en estructuras y elementos prefabricados de hormigón*, que desarrolla los factores que afectan a la resistencia del testigo en su Anexo A del que más tarde hablaremos.

La resistencia característica del hormigón es la entendida como la resultante obtenida del ensayo de probetas normalizadas, fuera del alcance de este proyecto, mientras que la resistencia de los testigos extraídos y sometidos a compresión hasta su rotura suele ser inferior debido a la propia fase de extracción, el tamaño de la probeta representativo del elemento estructural, las condiciones de conservación y ensayo del bloque... etcétera.

Por eso, cuando se trata de evaluar los resultados del ensayo que nos ocupa, es crítico estimar los factores más relevantes, como los siguientes, y tenerlos en cuenta para comparar ambas resistencias explicadas:

Tamaño del testigo: Se recomiendan diámetros iguales o superiores a 75 mm e inferiores a 150 mm, con una relación entre longitud y diámetro (esbeltez) de 1,5 a 2. La Tabla 4.19 marca los factores de corrección aplicables para el rango de esbeltez.

Esbeltez	2	1,75	1,5	1,25	1
Factor de corrección según UNE EN 13791:2020	1	0,98	0,96	0,94	0,80

Tabla 4.19. Factor de corrección aplicable a los testigos de hormigón en función de su esbeltez según UNE EN 13791:2020

Armadura identificada: En caso de aparecer restos de armadura en la probeta testigo, el resultado en la resistencia calculada es inferior según indica la siguiente fórmula:

$$f = f_{\text{testigo}} \cdot \left(1 + 1,5 \cdot \sum_i \left(\frac{\varnothing_b}{\varnothing_t} \cdot \frac{h_i}{l} \right) \right)$$

siendo,

\varnothing_b = Diámetro de la barra

\varnothing_t = Diámetro del testigo

h_i = Distancia del eje de la barra al extremo más cercano del testigo

l = Longitud del testigo

Contenido de humedad: Se considera que las probetas secas poseen una resistencia superior a las húmedas. Se estima una diferencia de un 10 a un 15%.

Influencia de las acciones en la etapa de extracción: Durante la extracción del testigo de hormigón se pueden generar microfisuraciones que disminuyan su resistencia hasta un 10% respecto al valor real en obra.

Dirección relativa al hormigonado: La resistencia de testigos extraídos en la dirección perpendicular al vertido se ve reducida en un rango de valores del 5 al 8%.

Altura de extracción: Afecta al grado de compactación y, como consecuencia, a la densidad del hormigón. Con la idea de que la muestra debe ser representativa del conjunto se debe contar con que la resistencia *in situ* decrece hacia la parte superior del vertido y esta diferencia respecto al núcleo del bloque de hormigón puede alcanzar el 25%. Entrando más en detalle, las resistencias se verán especialmente afectadas en los 30 centímetros superiores o 20% del canto.

La resistencia real del hormigón *in situ* será calculada aplicando a la resistencia de cada testigo individual los factores de corrección de cada uno de los puntos explicados en función de la aplicación que estos tengan en unas u otras normas.

Como criterio general, se trata de buena práctica representar gráficamente los resultados obtenidos con el fin de poder interpretar la distribución de éstos y comprobar que forman parte de una única población. En el caso de observarse que existen dos poblaciones, la región podría dividirse en dos regiones de ensayo y, por lo tanto, evaluar la estructura como términos independientes según la zona.

De acuerdo con el Anexo A de la UNE EN 13791:2020 antes mencionado, en función del número de muestras disponibles es posible calcular la resistencia característica *in situ* del hormigón ($f_{ck, is}$) a través de dos vías diferentes:

- Enfoque A (15 o más testigos): La resistencia característica *in situ* estimada de la región de ensayo es la menor entre las diferentes opciones:

$$f_{ck, is} = f_{media(n), is} - k_a \cdot s = f_{media(n), is} - 1,645 \cdot s$$

$$f_{ck, is} = f_{is, min} + 4$$

donde,

$f_{m(n), is}$ = Valor medio de la resistencia de los n resultados de los ensayos de resistencia a compresión

k_a = Disposiciones nacionales. En España corresponde a un valor de 1,645

s = Desviación estándar de los resultados de los ensayos

$f_{is, min}$ = Resistencia mínima obtenida de los n resultados de los ensayos de resistencia a compresión.

- Enfoque B (de 3 a 14 testigos): Como antes, la resistencia característica *in situ* estimada de la región de ensayo es la menor entre las diferentes opciones:

$$f_{ck, is} = f_{media(n), is} - k_b$$

$$f_{ck, is} = f_{is, min} + 4$$

siendo k_b ,

- o 5 para un número de muestras de 10 a 14
- o 6 en el caso de ser de 7 a 9 muestras.
- o 7 si se trata de un rango de 3 a 6 probetas ensayadas.

Una vez obtenida ($f_{ck, is}$), se debe comparar con la resistencia característica mínima *in situ* ($f_{ck, is, min}$), y decidir la aceptación del lote. Para calcular esta resistencia mínima:

$$f_{ck, is, min} = 0,85 \cdot f_{ck, is}$$

Es decir, según este apartado de la norma, la resistencia aceptable mínima que se puede esperar *in situ* puede ser hasta un 15% inferior a la característica en probeta normalizada (resistencia a pie de obra).

La UNE EN 13791:2020 también contiene en su Apartado 9, otros criterios para la evaluación de hormigones si existiesen dudas sobre la conformidad del material durante la ejecución. Estos condicionantes son más permisivos que los expuesto en el Apartado 7 para la evaluación de resistencia *in situ* en estructuras o elementos existentes, sin embargo, pueden ser utilizados ante la incertidumbre de aceptación en obra y se dividen en 3 casos:

- a) Región con 15 o más resultados de testigos.
- b) Región con 15 o más resultados de ensayos indirectos sin correlacionar + 2 testigos en los lugares con los resultados absolutos (índice de rebote, velocidad de ultrasonido) más bajos obtenidos.
- c) Región pequeña, seleccionando 2 lugares.

La fiabilidad estructural que proporcionan los criterios del Apartado 9 (para resolver problemas de aceptación en obra) es sensiblemente inferior a la proporcionada por los del Apartado 7 (evaluación de resistencia in situ en estructuras o elementos existentes). Por ese motivo, no se entrará en detalle de los cálculos aplicables a cada uno de los 3 casos anteriores.

Como conclusión final del ensayo de extracción y compresión de probetas testigo de hormigón, se puede confirmar que el procedimiento matemático es sencillo pero el número de variables que afectan al resultado final es tan amplio que entorpece desarrollar una deducción fiable a pesar de haber empleado un criterio técnico riguroso y experimentado.

4.3.4. Control por ultrasonidos

Fundamento teórico:

En 1929 el profesor S. Sokolov destapa que las vibraciones ultrasónicas de alta frecuencia son capaces de penetrar en piezas de grandes espesores y ser transmitidas a grandes distancias. En ese momento, pensó que podrían utilizarse para descubrir imperfecciones en algunos materiales, solo faltaba descubrir cómo.

Tras mucho trabajo de investigación, ideó un instrumento que denominó “defectoscopio” y lo aplicó al estudio de las cualidades estructurales de varios compuestos con el fin de averiguar cuáles de ellos eran susceptibles de medición. Además, trató de revelar la presencia de objetos contenidos en bloques opacos de material, es decir, logró detectar y ver a través de una pantalla objetos ocultos no divisibles por el ojo humano.

A continuación, se muestra una imagen de los primeros equipos de ultrasonidos que existieron:



Figura 4.7. *Equipo de ultrasonidos (1928)*

No obstante, hasta 1942, con el descubrimiento y aplicación del sonar por Firestone, para localización de buques y medida de profundidades marinas, no empezó el despegue en la utilización de los ultrasonidos en la detección de heterogeneidades en los materiales con la técnica de impulso-eco.

Antes de continuar, cabe mencionar que el ultrasonido (UT) no es un invento, sino un evento físico natural que puede ser provocado por el hombre. Siempre estuvo presente, sólo faltaban ojos observadores y mentes brillantes de expertos en distintas ramas de la ciencia para guiar su utilización.

La técnica de ultrasonidos se basa en la propagación del sonido en el medio que constituye la pieza a analizar siempre y cuando éste sea elástico, es decir, debe cumplir la Ley de Hooke. Las ondas acústicas de alta frecuencia adoptan un sentido altamente direccional y viajan a través del medio hasta encontrarse con un límite que suele ser otro medio. A partir de ese punto, se reflejarán y vuelven a la fuente de emisión.

Las ondas ultrasónicas son provocadas a partir de una frecuencia determinada y no son audibles al oído humano. Las ondas se clasifican de la siguiente manera en función de su frecuencia:

- Subsónicas: $f < 16 \text{ Hz}$ (inferior al umbral auditivo del ser humano)
- Sónica: $16 \text{ Hz} < f < 20 \text{ kHz}$
- Ultrasónicas: $f > 20 \text{ kHz}$

Los rangos ultrasónicos más empleados se dan entre 0,5 a 25 MHz, aunque se ha llegado a alcanzar frecuencias hasta 1000 MHz.

Material y equipo:

Existen diversos equipos de generación de ultrasonidos, la selección de uno u otro depende de las características del material ensayado y de las propiedades que se pretenden medir, así como la frecuencia usada, el rendimiento que se desea obtener o el sistema de transmisión más apropiado.

A grandes rasgos, un equipo de ultrasonidos se compone por los siguientes elementos:

- Un generador electrónico de señales capaz de producir pulsos de corta duración.
- Un palpador, también conocido como transductor, encargado de las siguientes fases:
 - o Recibir los pulsos eléctricos y transformarlos en ondas de alta frecuencia.
 - o Emitir las ondas ultrasónicas.
 - o Recibir las ondas ultrasónicas reflejadas.
 - o Emitir las ondas recibidas y transformarlas en pulsos eléctricos.

Existen diferentes palpadores dependiendo de sus funciones ya que, en ocasiones existen dos palpadores: un emisor y un receptor; y en otros casos, un único palpador permite ambas funciones.

- Un acoplante compuesto por un líquido impulsado hacia la pieza de ensayo para que penetre en ella y así la onda generada por el palpador pueda propagarse por el interior de sus cavidades.
- Un dispositivo electrónico que transforme las señales explicadas anteriormente.
- Un dispositivo de lectura digital, es decir, una pantalla.
- Un reloj electrónico o contador para controlar la operación de los componentes del sistema, para servir como punto de referencia primario, y para proporcionar coordinación del sistema completo.
- A modo de prevención se usan bloques de calibración para asegurar la correcta lectura del instrumento.

La siguiente imagen representa los componentes enumerados anteriormente y el sistema de flujos básicos de operación para un equipo de ultrasonidos:

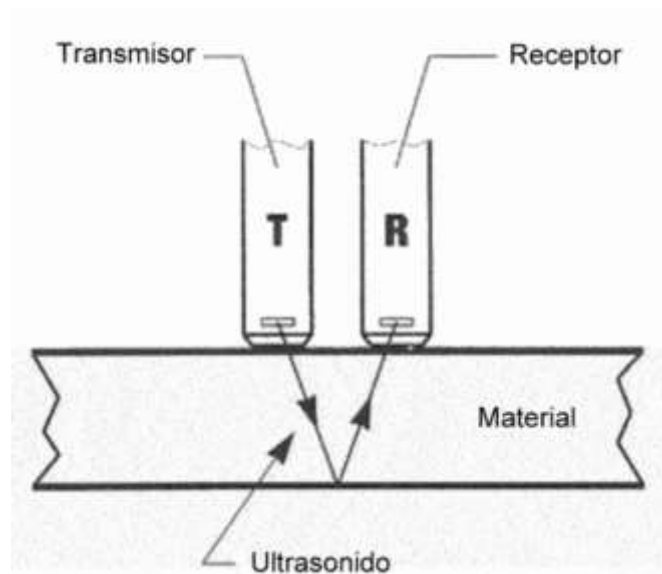


Figura 4.8. Sistema de flujos de un equipo de ultrasonidos

Procedimiento:

El ensayo de velocidad de ultrasonidos es un método de ensayo no destructivo que permite medir el tiempo de propagación de un pulso ultrasónico entre dos transductores colocados a ambos lados de un elemento constructivo o sobre una cara de este, a una distancia conocida. A partir de esta medida, se obtiene la velocidad de propagación de pulsos ultrasónicos que por lo general coinciden con su velocidad longitudinal.

El ensayo de ultrasonido tiene dos posibles finalidades: medir la velocidad de propagación de una onda a través de una pieza y captar defectos internos de esta (si los hubiese) a través de frecuencias, o emisiones, que están por encima del límite perceptible por el oído humano (0,5 – 20 MHz). A continuación, se desarrollarán los pasos a llevar a cabo para concretar los dos objetivos mencionados.

Los medidores de velocidades por ultrasonido deben ser calibrados en función del material seleccionado, y las aplicaciones que requieren la medición de un amplio rango de espesores o materiales acústicamente diversos pueden requerir múltiples configuraciones.

En primer lugar, es fundamental pulir la muestra de ensayo seleccionada pues no pueden existir restos de pintura, cemento, polvo... etcétera que puedan generar suposiciones erróneas. Una vez se haya procedido exitosamente en esta etapa, se debe sostener el palpador o palpadores (uno en caso de ser un único palpador el que emite y recibe, y dos en caso de tratarse de un palpador emisor y otro palpador receptor) sobre la pieza de muestra y se deben tomar tres lecturas a la vez que se anota el parámetro fundamental descrito anteriormente: el tiempo de propagación de la onda en el hormigón.

Hay que puntualizar que las distancias entre puntos de lectura no deben ser superiores a 400 mm por su posible falta de homogeneidad y se recomienda que sean lo más constantes posibles para asegurarse de que los resultados sean uniformes.

Una vez que la onda se transmite a través del hormigón, el transductor receptor capta la señal y transforma la energía mecánica de la onda en pulso electrónico para, más tarde, obtener el tiempo de propagación de la onda en el hormigón. Aplicando la siguiente ecuación, se obtiene la velocidad de propagación:

$$v = \frac{x}{t}$$

donde,

x = espesor del elemento estructural, por ejemplo, espesor de un pilar.

t = tiempo que tarda la onda ultrasónica en recorrer el espesor de hormigón desde el emisor y reflejarse de nuevo hasta el receptor.

v = velocidad a la que viaja la onda.

En el caso de que el objetivo del ensayo sea detectar imperfecciones, se deben posicionar el emisor y el receptor perfectamente alineados en caras opuestas de la pieza a inspeccionar. En ese momento, el emisor enviará una onda al receptor y, en presencia de un defecto, la intensidad sonora en el receptor disminuirá a causa de la reflexión parcial o se hará nula en caso de reflexión total.

No es relevante el uso de un sonido continuo o impulsos de sonido para el ensayo ya que el emisor y el receptor se encuentran separados entre sí.

Finalmente, la pantalla asociada al aparato de medida proporcionará un diagrama en el que se podrá apreciar el defecto interno como en las siguientes imágenes:

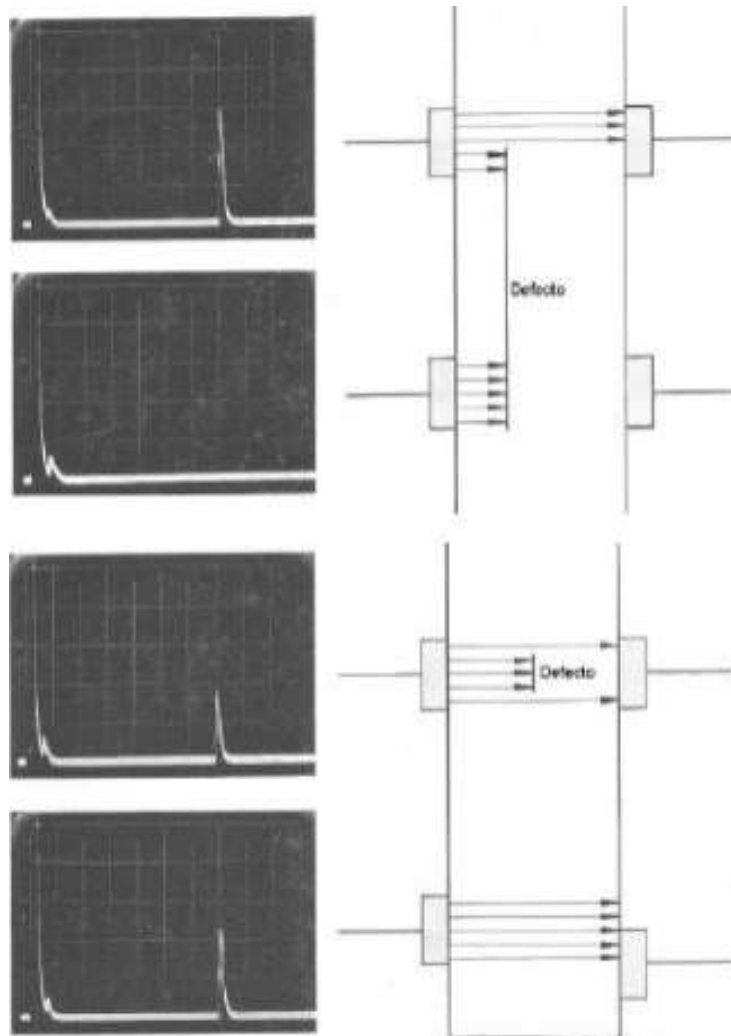


Figura 4.9. Representación gráfica de distintos defectos detectados por un equipo de ultrasonidos

También se pueden adoptar otras disposiciones si la muestra solo es accesible por una de las caras aprovechando la reflexión del haz ultrasónico en la cara opuesta de la pieza en ensayo:

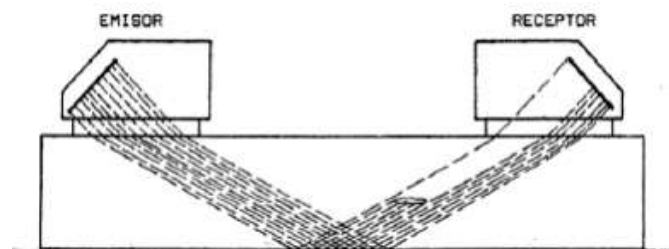


Figura 4.10. Croquis alternativo para realizar el ensayo de ultrasonidos

Resultados:

A pesar de que, como especifica el Código Estructural, los ensayos de control por ultrasonidos no son sustitutos de los métodos destructivos empleados para determinar la resistencia del hormigón, sino que más bien se trata de métodos adicionales o complementarios, hay algunos resultados que pueden ser pistas para definir la resistencia del hormigón.

- El tipo de árido, el tamaño máximo de árido y los cambios en la dosificación de los áridos en el hormigón tienen un efecto apreciable sobre la medida de la velocidad de propagación (Fernandez 2001). Para una misma resistencia, el hormigón con el mayor contenido de árido probablemente tendrá una velocidad de ultrasonidos más alta (Trtnik, 2009).
- El efecto de la humedad, tanto en la velocidad de ultrasonidos como en la resistencia del hormigón, es uno de los factores que genera dificultades de calibración, puesto que la humedad claramente disminuye con la edad del hormigón. Bungey & Millard (1996) señalan que la velocidad de ultrasonidos a través de un hormigón en condiciones saturadas puede ser hasta un 5% mayor que a través de un mismo hormigón en condiciones secas.
- Por otra parte, la velocidad de ultrasonidos medida en las proximidades de las barras de acero en un hormigón armado suele ser mayor que en el hormigón en masa con la misma composición. La *International Atomic Energy Agency* (2002) explica que la velocidad de ultrasonidos en el acero puede ser hasta el doble de la velocidad en el hormigón en masa. Además, señala que esto depende de la proximidad de las mediciones a la barra de acero, del diámetro y número de barras y, finalmente, de la orientación con respecto a la trayectoria de la propagación.
- Con relación al efecto de la edad, *The Concrete Society Technical Report* (1976), hace referencia a estudios que analizaron la velocidad de ultrasonidos en diferentes estructuras y lugares de Reino Unido y comenta que se obtuvo un incremento en la resistencia aproximadamente del 30% en 28 días a 6 meses y cerca del 3% de 6 meses a 1 año.

Notar que, no existe una relación física directa entre la resistencia del hormigón y la velocidad de ultrasonidos (VU), pero ésta última tiene relación con las propiedades elásticas del hormigón que se ensaya, que están conectadas a su vez con sus parámetros resistentes y de densidad (Fernandez et al.2001).

En cuanto a normativa se refiere, el Código Estructural establece que el ensayo se realice según la UNE EN ISO 17640:2018: *Ensayo no destructivo de uniones soldadas. Ensayo por Ultrasonidos. Técnicas, niveles de ensayo y evaluación*; y siguiendo los criterios de aceptación de la norma UNE EN ISO 11666:2018: *Ensayo no destructivo de uniones soldadas. Ensayo por Ultrasonidos. Niveles de Aceptación*.

La UNE EN ISO 11666:2018 especifica dos niveles de aceptación ultrasónica conocidos como nivel de aceptación 2 (AL2) y nivel de aceptación 3 (AL 3) para uniones soldadas de penetración total en aceros ferríticos correspondientes a los niveles de calidad B y C según UNE EN 5817:2014: *Soldeo. Uniones soldadas por fusión en acero, níquel, titanio y sus aleaciones* (los aceros de calidad D no se incluyen en este documento de aceptación de END puesto que generalmente no se solicitan pruebas ultrasónicas para esta soldadura).

La norma UNE EN ISO 11666:2018 se aplica a los ensayos de soldaduras de acero ferrítico de penetración total, con espesores de 8 a 100 milímetros. También se puede utilizar para otro tipo de soldaduras, materiales y espesores, siempre que los ensayos se hayan realizado teniendo en cuenta la geometría y las propiedades acústicas del componente, y se pueda emplear una sensibilidad adecuada para permitir que se apliquen los niveles de aceptación de este documento. La frecuencia nominal de las sondas utilizadas en este documento está entre 2 MHz y 5 MHz, valores menores que la atenuación o la resolución normalmente requeridas por otros elementos. Es importante considerar cuidadosamente el uso de estos niveles de aceptación junto con frecuencias fuera de este rango.

4.3.5. Ensayo esclerométrico

Fundamento teórico:

El ensayo esclerométrico o de índice de rebote mediante esclerómetro es una prueba no destructiva (NDT) cuyo origen se remonta a los años 40, concretamente a 1948, y fue el ingeniero suizo Ernest Schmidt quien patentó la idea llamada “martillo Schmidt”, o esclerómetro (Neville, 1995).

El elemento básico es una masa de metal que, impulsada con una energía de percusión, choca con un vástago de acero en contacto con la pieza de hormigón que queremos ensayar y rebota. Dicha energía es transmitida a la masa, también llamada punzón de impacto, mediante un muelle interno del útil, cuyo objetivo es proporcionar una energía cinética suficiente para realizar las mediciones.

El parámetro medido es la energía de deformación plástica perdida en la pequeña superficie de impacto del martillo, es decir, la dureza de la superficie ensayada sobre una escala graduada de 10 a 100 acoplada al aparato. Operando esta variable, obtenemos el rebote formulado de la siguiente manera:

$$R = 100 \cdot \sqrt{\frac{E_{\text{final}}}{E_{\text{inicial}}}}$$

Suponiendo movimiento horizontal del vástago y despreciando la energía de fricción, ya que ya está contemplada en el diseño y medición del propio dispositivo aplicamos las dos siguientes ecuaciones y deducimos “R”.

$$E_{\text{inicial}} = \frac{1}{2} \cdot k \cdot x_0^2$$

$$E_{\text{final}} = \frac{1}{2} \cdot k \cdot x_f^2$$

En el caso de que la medición sea vertical, no se debe olvidar añadir la energía potencial al sumatorio de energías iniciales y finales, como se muestra:

$$E_{\text{inicial}} = \frac{1}{2} \cdot k \cdot x_0^2 + m \cdot g \cdot x_0$$

$$E_{\text{final}} = \frac{1}{2} \cdot k \cdot x_f^2 + m \cdot g \cdot x_f$$

siendo,

k = Constante elástica del muelle interno.

x_0 = desplazamiento inicial respecto al origen de referencia.

x_f = Desplazamiento final recorrido respecto al origen de referencia.

m = Masa de la pieza metálica que choca con la superficie examinada.

g = gravedad ($9,8 \text{ m/s}^2$)

Nótese que, dividiendo ambas energías, podemos reducir los cálculos teniendo en cuenta dentro de la raíz cuadrada únicamente los desplazamientos.

$$R = 100 \cdot \sqrt{\frac{x \text{ final}}{x \text{ inicial}}}$$

Para mayor precisión es necesario multiplicar el índice de rebote por un factor de corrección que depende del ángulo de aplicación del esclerómetro pues las energías y, consecuentemente, las distancias, se ven afectadas por este valor.

$$R = f(\alpha) \cdot 100 \cdot \sqrt{\frac{x \text{ final}}{x \text{ inicial}}}$$

En su defecto, podemos utilizar esclerómetros que operen solo con las velocidades, pero se trata de elementos más costosos y sofisticados cuyo uso suele ser menor en la industria del hormigón. En este caso, no sería necesaria la aplicación de un factor de corrección “ $f(\alpha)$ ”

Material y equipo:

El diseño de los esclerómetros usados a lo largo de la historia desde su descubrimiento no ha variado demasiado. La siguiente imagen indica todas las partes por las que está compuesto este tipo de instrumento:

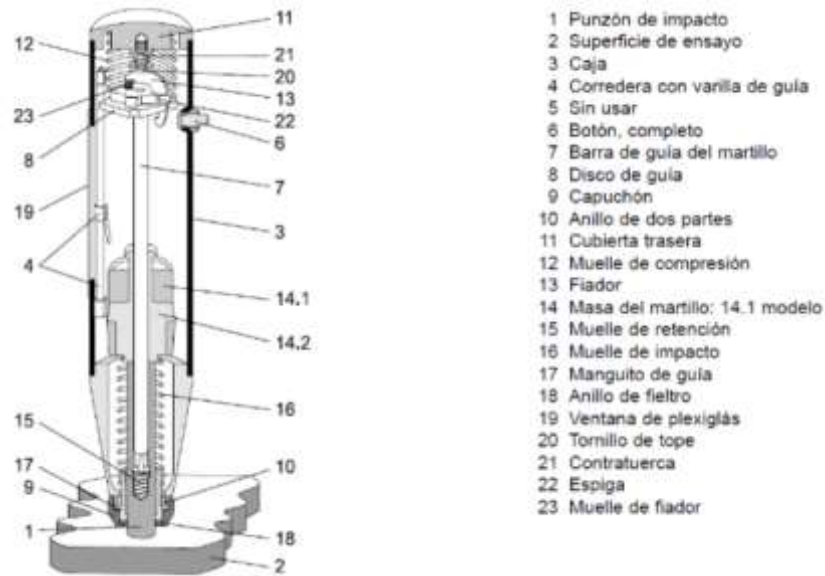
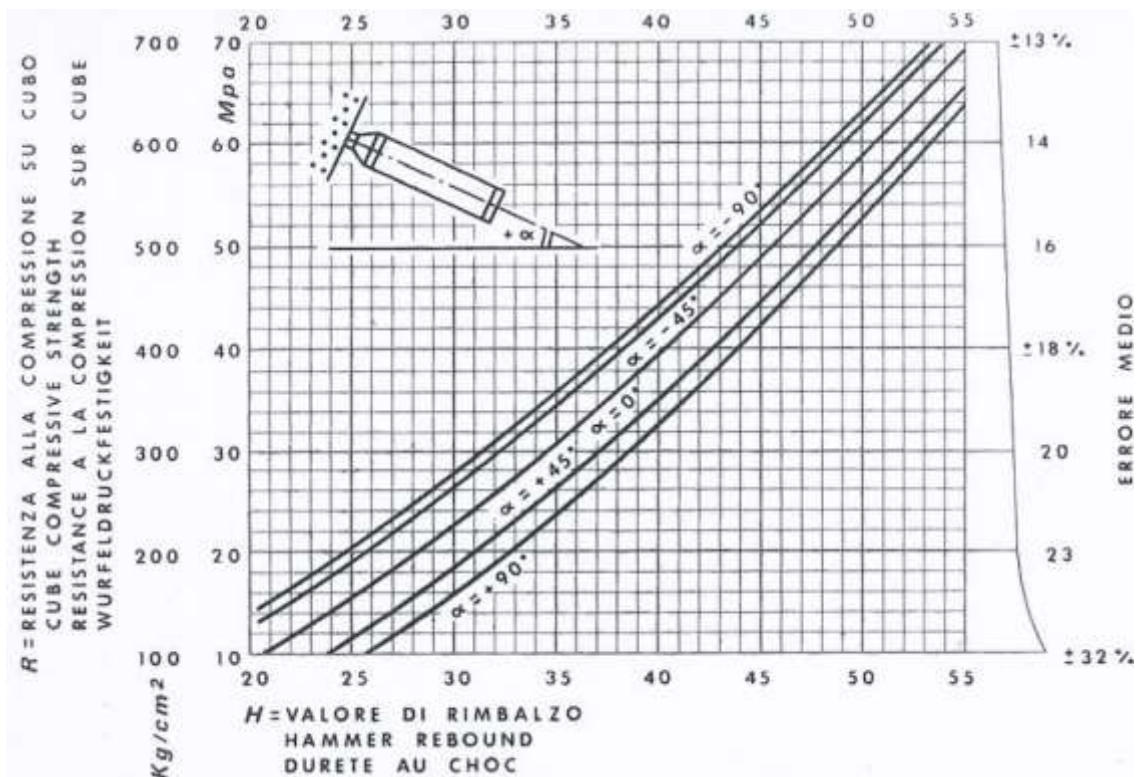


Figura 4.11. Martillo para ensayos de hormigón

Además del propio elemento de medición, los fabricantes suelen generar unas gráficas, como la que se muestra abajo, que correlacionan el índice de rebote con la resistencia a compresión simple. En otros apartados se explicará cómo usar estas y otras gráficas.



Gráfica 4.1. Correlación del índice de rebote en función de la resistencia a compresión simple en probeta cilíndrica

Procedimiento:

Una vez conocido el fundamento teórico del ensayo y los materiales necesarios para su ejecución, se procede a exponer los pasos ordenados para llevarlo a cabo:

1. Calibración del esclerómetro
2. Reconocimiento de la zona mediante un detector de armaduras, también llamado pachómetro.
Es importante conocer qué material estamos probando para evitar fallos en la lectura final de los resultados obtenidos.
3. Preparación de la superficie cuyo principal objetivo es eliminar elementos que el hormigón tenga adheridos; por ejemplo, piedras, humedades, revestimientos...etc.
Recordamos que para cualquier ejercicio de este calibre y sobre cualquier material, la superficie a inspeccionar debe ser completamente lisa. De hecho, en algunos casos, los esclerómetros pueden contar con una piedra de pulido.
4. Establecer una cuadrícula sobre la que se realizarán sucesivas iteraciones. Para que una medición sea real, como mínimo se deberían realizar 9 repeticiones manteniendo una distancia de 25mm o más entre los bordes próximos de dos impactos diferentes. Cuanto más reducida sea la zona de prueba, más reales serán los resultados obtenidos ya que la diferencia de composición del hormigón será casi despreciable.
5. Apoyar el esclerómetro sobre la superficie del hormigón y realizar las mediciones pautadas. Si más del 20% de los datos difieren un 30% o más de la mediana, la zona se considerará no válida y habrá que repetir el proceso en otra área.

La Figura 4.12 representa el funcionamiento interno de un esclerómetro:

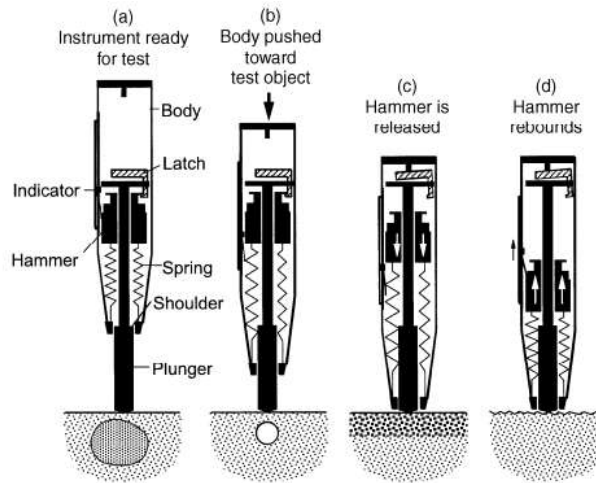


Figura 4.12. Funcionamiento del ensayo esclerométrico (ACII 228.1R-03)

Resultados:

La profundidad del hormigón endurecido afectada por el ensayo oscila entre 2 y 3 cm, dependiendo del tipo de esclerómetro y de la resistencia del hormigón. Es por eso por lo que, al tener solo incidencia sobre la capa superficial del hormigón, este ensayo no permite detectar ninguna anomalía situada en el interior de la masa; por ejemplo, huecos, fisuras... etc. Además, es sensible a las variaciones locales del hormigón, tales como la presencia de partículas grandes de árido grueso, dando como resultados índices de rebote muy altos, o, por el contrario, la presencia de áridos frágiles o de una cavidad que conllevaría obtener un índice de rebote anormalmente bajo. De la misma manera, si se realiza el ensayo en zonas en las que existen armaduras, los resultados del ensayo también pueden verse afectados.

Teniendo en cuenta lo importantes que son los resultados a la hora de realizar un cálculo, se debe saber interpretarlos. En el caso que nos ocupa, acotar el uso del estudio del índice de rebote es vital ya que es muy común realizarlo con la finalidad de obtener directamente la resistencia del hormigón. Sin embargo, debido a las heterogeneidades y anisotropías de este material, extrapolar la resistencia obtenida en un punto al resto de la prueba, es cuanto menos inverosímil.

Retomando la Gráfica 4.1, ejemplo del tipo de gráficas que los fabricantes de esclerómetros suelen aportar para relacionar el índice de rebote calculado con la resistencia a compresión simple en probetas de distinta geometría, es primordial destacar tres particularidades:

- Debe escogerse la curva en función del ángulo de inclinación, la cual integra la correlación de la energía potencial para ángulos diferentes a 0°
- Debe tenerse claro para qué tipo de probeta normalizada (cilíndrica o cúbica) se realiza la correlación, es decir, su geometría.
- El valor de la dispersión del resultado es igual de importante o más que el valor de la resistencia a compresión hallado.

Respecto al último punto, este método no permite una determinación definitiva de la resistencia del hormigón ya que, en líneas generales, existe una variabilidad de aproximadamente un 25% según diversos autores si no se ha realizado una calibración directa y de aproximadamente un 10% si se ha realizado, aunque puede llegar a ser superior en ambos casos. Esta versatilidad puede deberse a muchos factores; entre los más importantes se encuentran:

- La humedad del hormigón, sobre todo en estructuras existentes como obras portuarias, piscinas, depósitos...etc.
- Los tipos de cemento y su dosificación.
- Los diferentes elementos estructurales ya que presentan una variación significativa de sus propiedades especialmente por el grado de compacidad durante el hormigonado.
- La carbonatación pues genera un gran incremento del índice de rebote que es muy difícil de cuantificar por la dificultad que supone retirar el espesor carbonatado y preparar la superficie para realizar el ensayo. Algunas guías muestran gráficas que indican el índice de rebote en función de la profundidad de la carbonatación.

La Tabla 4.20 indica los requisitos establecidos por la norma UNE EN 12504-2:2022: *Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 2: Ensayos no destructivos. Determinación del índice de rebote para el ensayo de índice de rebote.*

Condicionantes	UNE EN 12504-2:2022
Elementos de hormigón a ensayar	Espesor ≥ 10 mm
Estado de la superficie	Superficie lisa y sin presencia de agua
Posición del instrumento	Perpendicular a la superficie
Distancia entre ensayos	≥ 25 mm
Número de lecturas	≥ 9 lecturas
Medida de centralización	Mediana
Lecturas descartadas	Si más del 20% de todas las lecturas difieren de la mediana en 6 unidades, se debe descartar la totalidad de las lecturas
Precisión	No existen datos concretos

Tabla 4.20. *Parámetros de aceptación de resultados para el ensayo de índice de rebote según norma UNE EN 12504-2:2022*

La propia UNE EN 12504-2:2022 establece que la prueba no fue creada como una alternativa a la determinación de la resistencia a compresión del hormigón, pero confirma que, con una adecuada correlación, se puede obtener una estimación de la resistencia a compresión *in situ*.

4.3.6. Profundidad de carbonatación

Fundamento teórico:

Es sabido que el transcurso del tiempo ocasiona la aparición de una serie de reacciones químicas, fundamentalmente ocasionadas por la combinación entre la cal del hormigón y el dióxido de carbono presente en la atmósfera para formar carbonato cálcico que ocasiona alteraciones desde la superficie del hormigón hacia su interior. El carbonato de calcio supone en el hormigón una reducción progresiva de su alcalinidad.

En buen estado, este material dispone de un pH con valores de 12 o 13 pero la reducción comentada puede llegar a indicar valores de 9.5 o menos, en cuyo caso, se considera que la capa de óxido protectora de las armaduras de acero pierde su condición de pasividad y, bajo la acción de la humedad y el oxígeno, puede comenzar a desarrollarse el efecto de la corrosión. En estas condiciones de alcalinidad, el hormigón en cuestión se conoce como hormigón carbonatado.

Es crítico identificar la presencia de carbonatación cuando también hay cloruros en el hormigón. Al igual que antes se definía un pH de 12 o 13 para hormigones en buen estado, se requiere aproximadamente de 7.000 a 8.000 partes por millón (ppm) de cloruros para que florezca la corrosión en el acero embebido en el bloque hormigonado. Por esta razón, un análisis de aptitud de una estructura de hormigón existente debe contar con un análisis de la profundidad de carbonatación en sus elementos.

La carbonatación depende del tiempo, siguiendo la próxima ley de tipo parabólico:

$$d = kc \cdot \sqrt{t}$$

siendo,

d = espesor carbonatado (mm)

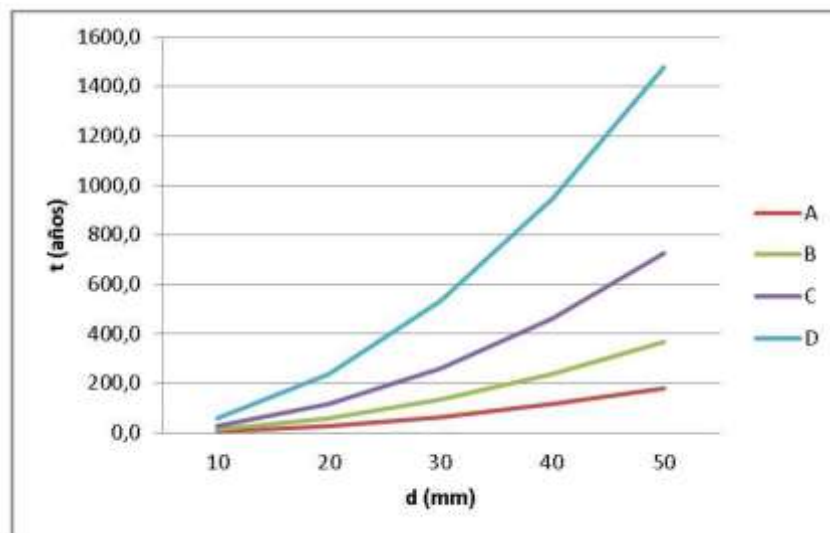
t = tiempo requerido para que la carbonatación alcance el espesor de recubrimiento según distintos escenarios ambientales y características del material (años)

kc = constante de carbonatación (mm/año^{0,5})

El Código Estructural establece 4 casos para definir la constante de carbonatación. Estos son:

- CASO A: Hormigón protegido de la lluvia con un contenido de aire ocluido inferior al 4,5%. Corresponde un valor $k_c = 3,712$
- CASO B: Hormigón protegido de la lluvia con un contenido de aire ocluido superior al 4,5%. Corresponde un valor $k_c = 2,599$
- CASO C: Hormigón expuesto a la lluvia con un contenido de aire ocluido inferior al 4,5%. Corresponde un valor $k_c = 1,856$
- CASO D: Hormigón expuesto a la lluvia con un contenido de aire ocluido superior al 4,5%. Corresponde un valor $k_c = 1,299$

La Gráfica 4.2 es un resumen de los distintos casos y la profundidad de carbonatación en función del tiempo transcurrido.



Gráfica 4.2. Profundidad de carbonatación (mm) en función del tiempo (años)

Material y equipo:

Antes de determinar la profundidad de carbonatación, es preciso comprobar si el hormigón efectivamente está carbonatado. La comprobación mediante el uso de una disolución de fenolftaleína al 1% disuelta en alcohol etílico al 70% es la más utilizada ya que ofrece resultados seguros casi de forma inmediata. La fenolftaleína es un indicador de alcalinidad y, tras aplicarlo, el hormigón que contiene a las armaduras toma una coloración rosa si este ha mantenido un pH suficientemente alto como para que los cloruros se presten a teñirse. En el caso de que exista este fenómeno, lo cual es una mala noticia pues es síntoma de pérdida de calidad de la estructura, el hormigón no se teñirá de ningún color.

La Figura 4.13 es una representación gráfica del color que alcanza un bloque cilíndrico de hormigón tras absorber la disolución.

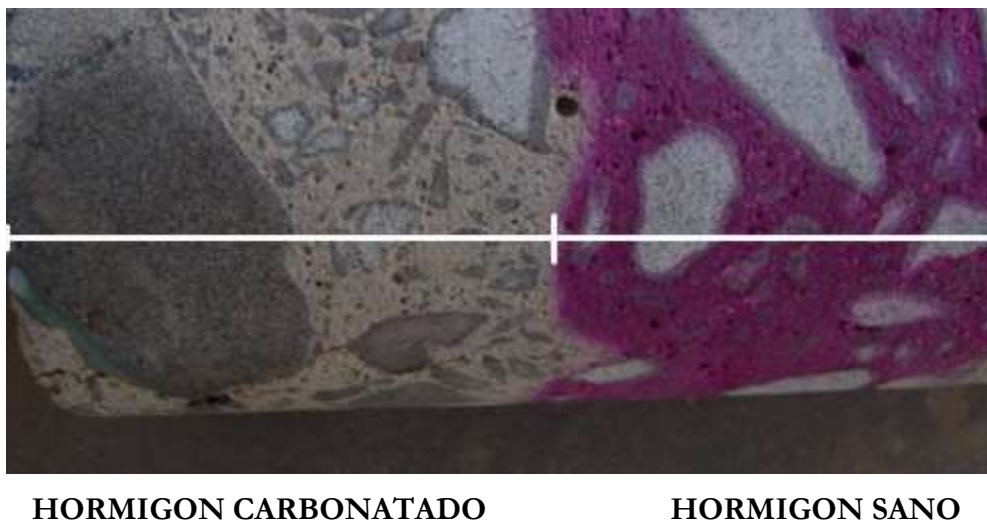


Figura 4.13. Ejemplo prueba de carbonatación del hormigón

Procedimiento:

La medida de la penetración del frente carbonatado deberá realizarse sobre porciones extraídas directamente del elemento objeto de estudio, inmediatamente después de la toma de muestras y una vez se haya eliminado el polvo superficial que pueda existir. Mientras que no es relevante la geometría de la pieza de hormigón, cabe destacar que si es importante que las dimensiones sean lo suficientemente generosas como para que los resultados sean perceptibles al ojo humano.

Más aún, es posible realizar el ensayo sobre un orificio en seco cuya cavidad debe poseer la abertura adecuada para permitir la medida. Suponiendo que solo interese conocer si la carbonatación ha alcanzado o no a las armaduras, el ensayo puede llevarse a cabo eliminando la capa de hormigón hasta el nivel del acero y aplicando en dicha zona o, en su lugar, en los fragmentos sueltos, la disolución de indicador. Hay que tener en cuenta que para las determinaciones *in situ*, las muestras no deben tomarse en zonas donde el recubrimiento de hormigón se encuentre suelto o existan fisuras, excepto cuando exactamente interese comprobar si estas regiones se encuentran carbonatadas.

En todos los casos, la medida debe realizarse sobre una superficie limpia, pulida y recientemente fracturada. Si esta última condición no fuese viable, la muestra ha de ser conservada en un recipiente hermético, cuyo porcentaje de oxígeno sea lo mínimo factible, hasta que pueda ser examinada, recomendándose que nunca supere las 24 horas.

La disolución de fenolftaleína puede aplicarse con pulverizador, mediante goteo, o cualquier otro procedimiento que permita extender una capa relativamente fina y uniforme sobre la superficie de la estructura hormigonada.

Resultados:

Ni la normativa vigente en España ni la vigente en la Unión Europea, especifican una tabla de valores dentro de los cuales se puede catalogar un resultado u otro para el ensayo de profundidad de carbonatación. En el caso de este último ensayo, el Código Estructural únicamente detalla dos normas que explican cómo llevar a cabo el examen satisfactoriamente. Dicho de otra manera, se trata de un examen meramente informativo tras el cual solo es posible definir si el hormigón se encuentra carbonatado o no y, en caso afirmativo, una vez conocido que la calidad de éste se ha visto reducida, se procederá al mantenimiento, reparación y protección de la estructura de hormigón armado.

Para evitar la corrosión del acero, se deben ejecutar unos recubrimientos mínimos de hormigón alrededor de las barras de acero. Estos recubrimientos frenan la penetración frente a la carbonatación que al principio es muy rápida, pero que se va frenando conforme avanza.

Las siguientes dos normas determinan los pasos a seguir de cara a realizar el ensayo comentado:

- UNE 83993-1:2013: *Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la velocidad de penetración de la carbonatación en el hormigón endurecido. Parte 1: Método natural.*

- UNE EN 14630:2007: *Productos y sistemas para la reparación y protección de estructuras de hormigón. Parte 1: Métodos de ensayo. Determinación de la profundidad de carbonatación en un hormigón endurecido por el método de la fenolftaleína.*

5. CONCLUSIONES Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACION

La evaluación estructural de una estructura existente requiere de un conocimiento amplio de los materiales empleados, sistemas estructurales y constructivos, así como tener una visión global de la estructura, sin olvidar los detalles que son los que finalmente acaban generando el fallo de la estructura.

En cuanto a los ensayos explicados a lo largo de este proyecto, una vez más, se considera trascendental llevar a cabo el ensayo de extracción y compresión de probetas testigo de hormigón para evaluar su resistencia y poder asemejar el resultado a la resistencia del resto de la estructura *in situ*. No obstante, los ensayos de información basados en la teoría no destructiva son igual de importantes para considerar la aptitud de la edificación. Más aún, existen métodos y normas que los respaldan para entrar en más detalle a la hora de desarrollar un protocolo de revisión de estructuras de hormigón, un ejemplo de ello puede ser, el estudio de fisuras existentes detallado en el Código Estructural.

Para finalizar este TFG, hacer especial hincapié en lo fundamental que resulta ensayar una estructura de hormigón armado periódicamente a lo largo de su vida útil pues la seguridad que supone en los seres humanos no debe verse condicionada, y mucho menos puesta en riesgo, por un fallo estructural posible de ser detectado con anterioridad.

6. BIBLIOGRAFIA

Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, por el que se aprueba el Código Estructural (CE).

Boletín Oficial del Estado, 190, de 10 de agosto de 2021.

<<https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2021-13681>>

Real Decreto 2661/1998, de 11 de diciembre, por el que se aprueba la Instrucción de

Hormigón Estructural (EHE). *Boletín Oficial del Estado*, 11, de 13 de enero de 1999.

<<https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1999-783>>

Real Decreto 1247/2008, de 18 de julio, por el que se aprueba la Instrucción de Hormigón

Estructural (EHE-08). *Boletín Oficial del Estado*, 203, de 22 de agosto de 2008.

<<https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2008-14167>>

Real Decreto 1829/1995, de 10 de noviembre, por el que se aprueba la norma básica de la

edificación NBE EA-95 Estructuras de acero en edificación. *Boletín Oficial del Estado*, 16, de

18 de enero de 1996. <<https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1996-1223>>

Real Decreto 751/2011, de 27 de mayo, por el que se aprueba Instrucción de Acero

Estructural (EAE). *Boletín Oficial del Estado*, 149, de 23 de junio de 2011.

<<https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2011-10879>>

Rodríguez, R. (2019). *Evaluación de Estructuras de Hormigón Armado*. ACHE (Asociación

Española de Ingeniería Estructural).

ITeC (2022). *Principales cambios y novedades del nuevo Código Estructural (CE)*. ITeC.

<<https://itec.es/infoitec/sostenibilidad/principales-cambios-y-novedades-del-nuevo-codigo-estructural-ce/>>

Castaño, A. (2023). *Ensayo Mediante Esclerómetro*. Prontubeam.

<<https://www.prontubeam.com/articulos/2023-10-12-Ensayo-mediante-esclerometro>>

Rojas, L.M. (2012). *Ensayos de Información y Extracción de Probetas Testigo en Hormigones Autocompactantes*. [Tesis Doctoral]. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.

González, E. y Alloza, A.M. (2011). *Corrosión en Armaduras. Determinación de la Profundidad de Carbonatación en Hormigones Endurecidos y Puestos en Servicio*. [Proyecto universitario]. Universidad de La Laguna, Tenerife.

García, V. (2013). *Ultrasonidos. Técnica No Destructiva para el Estudio de Monumentos*. [Proyecto universitario de Fin de Grado]. Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla, Sevilla.

Porto, J. (2005). *Técnicas de Investigación, Dictamen e Intervención en las Estructuras de Hormigón*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, Universidad da Coruña, Coruña.

7. ANEXO A - CASO PRACTICO

El caso práctico que engloba este TFG tiene como objetivo poner a prueba el protocolo de revisión de estructuras de hormigón desarrollado. Para ello, se empleará como base teórica y práctica un proyecto real llevado a cabo en una estructura existente inacabada de hormigón en la segunda fase de la obra de 105 viviendas, locales comerciales, garajes y trasteros localizados en la siguiente ubicación: Avenida de Madrid, 13, Laguna de Duero, Valladolid.

Antes de comenzar, se pondrá en conocimiento del lector la situación estructural de la edificación antes de realizar los ensayos que comprobarán su aptitud de servicio, así como los pasos previos al comienzo de estos que se deben realizar, en cualquier caso, con el objetivo de agrupar toda la información existente sobre la obra. Finalmente se expondrá el impacto económico que supone ejecutar un informe de estas características y las conclusiones extraídas tras realizar a la estructura todas las revisiones que se especificarán, es decir, la decisión técnica de la aptitud para el uso del edificio.

De forma análoga a lo comentado en el desarrollo teórico del TFG, el caso práctico estudiado contará con una introducción de la normativa aplicable al proyecto, el EHE-98 y el Código Técnico de la Edificación (CTE), y la adaptación de los resultados a la normativa vigente en la actualidad, el Código Estructural.

Para el desarrollo del Anexo A en el que se ubican estas líneas, caso práctico, se seguirá el siguiente índice:

- Antecedentes de la obra y normativa aplicable
- Objeto
- Metodología
- Datos e hipótesis de partida
- Descripción del sistema estructural
- Ensayo de extracción y rotura de testigos de hormigón
- Ensayo esclerométrico y velocidad de ultrasonidos
- Ensayo de carbonatación del hormigón en vigas
- Conclusión del informe de revisión de estructuras de hormigón armado.
- Presupuesto de los trabajos

7.1. Antecedentes de la obra y normativa aplicable

La edificación proyectada se ajusta a la tipología de vivienda plurifamiliar compuesta por seis plantas (4 plantas en altura, 1 planta baja y 1 planta subterránea). Debido a la paralización de la obra en fase de ejecución estructural en octubre de 2012, todo el edificio quedó expuesto durante años a los agentes atmosféricos.

Se pretende analizar la viabilidad de continuar con la ejecución del edificio comprobando mediante ensayos destructivos y no destructivos si los pilares en espera de los forjados nuevos a realizar mantienen unas condiciones óptimas para su función.

Para verificar el cumplimiento de las exigencias básicas del CE puede ser necesario, en determinados casos, realizar ensayos y pruebas sobre algunos elementos estructurales, según lo establecido en la reglamentación vigente, o bien según lo especificado en el proyecto u ordenados por la dirección facultativa.

La realización de este control se efectuará de acuerdo con los criterios establecidos en el proyecto o indicados por la dirección facultativa al respecto, los ensayos a realizar, los criterios de aceptación y rechazo, y las acciones a adoptar.

Para el caso de hormigones estructurales el control mediante ensayos se realizará conforme con el Código Estructural como venimos explicando hasta ahora.

Por poner un poco en contexto, hay que informar de que la obra de la edificación involucrada quedó completamente paralizada en octubre de 2012. La construcción se dividió en dos fases de las cuales la primera quedó prácticamente terminada en la fecha de parada, sin embargo, la segunda fase se encontraba en fase de ejecución. Es en el área de esta última fase en el que se centrará el estudio y posterior informe.

7.2. Objeto

El presente informe recoge la información necesaria para determinar el estado de los pilares y su capacidad para dar cumplimiento a las exigencias de la normativa vigente para el uso de viviendas analizando cuantitativa y cualitativamente cada uno de los elementos estructurales objeto de estudio y de los materiales por los que están compuestos.

7.3. Metodología

Empleando la información facilitada por el peticionario de la inspección como punto de partida de este informe, la metodología llevada a cabo para el desempeño de los trabajos a realizar es la siguiente:

- Inspección preliminar del estado estructural y de la conservación actual del edificio con el fin de ubicar las zonas a estudiar y la localización de los diferentes ensayos y extracción de muestras.
- Extracción y rotura a compresión de testigos de hormigón en pilares seleccionados.
- Ensayo de determinación del índice de rebote.
- Comprobación de la carbonatación del hormigón.
- Informe recopilatorio según los resultados de los ensayos.

7.4. Datos e hipótesis de partida

Para desarrollar un plan de actuación se debe recopilar toda la información existente de la estructura de hormigón armado de la que se habla. En concreto, se han recopilado y desarrollado los siguientes documentos:

- Documentación existente tal como planos de emplazamiento, planos y secciones de la estructura, descripción detallada de la edificación... etc.
- Inspección visual con toma de datos en obra.

7.5. Descripción del sistema estructural

Los aspectos básicos que se han tenido en cuenta a la hora de adoptar y diseñar el sistema estructural para la edificación son principalmente: resistencia mecánica y estabilidad, seguridad, durabilidad, economía, facilidad constructiva y modulación. En cuanto a la seguridad estructural, su finalidad es que no se produzcan en el edificio, o en partes del mismo, daños que tengan su origen o afecten a la cimentación, los pilares, las vigas, los forjados, los muros de carga u otros elementos estructurales que puedan comprometer la resistencia mecánica de la obra y, por lo tanto, la seguridad de las personas que se encuentren dentro o cerca de esta.

La cimentación del edificio es de tipo superficial con zapatas corridas y zapatas rígidas de hormigón armado. La estructura está compuesta por un entramado de pilares de hormigón armado de sección cuadrada y rectangular, vigas planas y/o de canto en función de las luces a salvar sobre los que apoyan forjados unidireccionales con viguetas semirresistentes y bovedillas de hormigón en todas las plantas.

7.6. Ensayo de extracción y rotura de testigos de hormigón

Para llevar a cabo los distintos ensayos, se tuvo en cuenta el material de la estructura compuesta por hormigón armado, HA-25/B/20, cuya edad superaba los 28 días. Además, durante la inspección visual, se observó que las muestras no presentaban fisuras, pero sí armaduras que fueron eliminadas durante el tallado.

Para el ensayo de extracción y rotura a compresión de probetas de hormigón se extrajeron un total de 7 probetas testigo de hormigón armado pertenecientes a diferentes pilares de la estructura objeto de estudio, empleando para ello una sonda rotativa marca Hilti provista de corona de diamante y refrigeración de agua. Respecto a las probetas, se obtuvieron de dos diámetros diferentes:

- 4 probetas testigo de 75 milímetros de diámetro.
- 3 probetas testigo de 100 milímetros de diámetro.

Hasta el momento del examen, se conservaron las muestras en ambiente de laboratorio. Posteriormente se realizó la medición de las probetas extraídas en su estado original y consecutivamente, se inició el tallado de esta con una sierra de disco de diamante. El equipo utilizado es capaz de realizar un corte con la precisión dimensional y geométrica requerida, obteniéndose probetas cilíndricas que fueron ensayadas hasta su rotura según la norma UNE 83302:1984: y evaluadas según la UNE EN 13791:2020.

Recordamos que la normativa UNE 83302:1984 fue sustituida por la norma UNE EN 12504-1:2020 en el momento de publicación de Código Estructural. No obstante, como el procedimiento de revisión de estructuras se llevó a cabo cuando la primera norma aún era vigente, se utilizarán los valores obtenidos para el ensayo a través de los procedimientos especificados en dicha ley. Igualmente, la norma que detalló las condiciones de aceptación de los resultados del ensayo, UNE EN 13791:2020, es la vigente hoy en día.

Las próximas dos tablas muestran los resultados obtenidos una vez realizado el ensayo con probetas de 75 mm de diámetro, más tarde se analizarán. En este caso, la dirección de la carga se realizó en la dirección perpendicular a la dirección de hormigonado.

Referencia	Dimensiones probetas cilíndricas (mm)				Peso (kg)
	Altura			Diámetro	
	Original	Tallada	Pulida / Refrentada		
Probeta 1	256,00	185,20	170,00	74,70	1,901
Probeta 2	197,20	156,40	160,30	74,50	1,553
Probeta 3	246,00	172,10	156,50	74,70	1,718
Probeta 4	218,20	152,50	140,90	74,70	1,520

Tabla A1. Medidas tomadas a testigos de hormigón de 75 mm de diámetro

Referencia	Relación h/D	Factor de corrección de esbeltez, f	Características mecánicas del ensayo a compresión		
			Carga de rotura (kN)	Resistencia a compresión	
				(MPa)	(MPa) (1)
Probeta 1	2,18	1,00	116,43	26,10	26,10
Probeta 2	2,15	1,00	113,54	25,50	25,50
Probeta 3	2,10	1,00	121,07	27,10	27,10
Probeta 4	1,89	0,99	118,20	26,40	26,14

(1) Resultado con el factor de esbeltez aplicado

Tabla A2. Resultados de la prueba de rotura por compresión de los testigos de 75 mm de diámetro

Las próximas dos tablas muestran los resultados obtenidos una vez realizado el ensayo con probetas de 100 mm de diámetro, más tarde se analizarán. Como antes, la dirección de la carga se realizó en la dirección perpendicular a la dirección de hormigonado.

Referencia	Dimensiones probetas cilíndricas (mm)				Peso (kg)
	Altura			Diámetro	
	Original	Tallada	Pulida / Refrentada		
Probeta 5	163,90	155,00	137,50	98,30	2,418
Probeta 6	178,20	166,00	149,50	98,30	2,770
Probeta 7	232,90	115,70	110,20	98,40	1,839

Tabla A3. Medidas tomadas a testigos de hormigón de 100 mm de diámetro

Referencia	Relación h/D	Factor de corrección de esbeltez, f	Características mecánicas del ensayo a compresión		
			Carga de rotura (kN)	Resistencia a compresión	
				(MPa)	(MPa) (1)
Probeta 5	1,40	0,95	204,30	26,40	25,08
Probeta 6	1,52	0,96	207,71	26,80	25,73
Probeta 7	1,12	0,87	224,80	29,00	25,23

(1) Resultado con el factor de esbeltez aplicado

Tabla A4. Resultados de la prueba de rotura por compresión de los testigos de 100 mm de diámetro

Tal y como se puede apreciar, en los primeros ensayos de testigos de 75 mm de diámetro se obtuvieron algunos resultados de resistencia a compresión muy bajos para un hormigón estructural, por ello se realizaron de nuevo ensayos de testigos de 100 mm de diámetro.

La utilización de testigos de mayor diámetro tiene una doble ventaja: las resistencias son, generalmente, algo superiores y la dispersión de los resultados es menor. En cualquier caso, el tamaño máximo del árido debe ser menor que un tercio del diámetro del testigo, es decir, 25 mm para la primera tanda y 33,33 para la segunda tanda. En nuestro caso, el árido era de 20 milímetros.

Acogiéndonos a la norma UNE EN 13791:2020 para la evaluación de la resistencia a compresión *in-situ* en estructuras y elementos prefabricados de hormigón, para una región de ensayo reducida que comprenda de uno a tres elementos y un volumen total que no exceda aproximadamente los 10 m³, se deben extraer al menos tres testigos de diámetro igual o superior a 75 milímetros, incluyendo al menos uno representativo de cada región de ensayo, es decir, de cada elemento estructural cuestionado.

La dirección de extracción o la presencia de armaduras interceptadas alteran la resistencia de los testigos. Sin embargo, de acuerdo con la UNE EN 13791:2020, la primera no debería ser corregida al estar incorporada en el coeficiente de comparación con la resistencia característica, y la segunda debe de ser evitada con el uso de equipos de detección de armaduras. Si no fuera posible evitar la presencia de armaduras en algunos testigos, se tendrá en cuenta su presencia y no se utilizará el dato de resistencia obtenida si es anormalmente bajo (13% con respecto del esperado o de la media de la zona).

Como se ha comentado antes, las armaduras existentes en el testigo de hormigón fueron eliminadas antes de la compresión.

Si las ubicaciones del ensayo representan un hormigón que va a permanecer en la estructura, como es el caso, se toma el valor más bajo de resistencia de los obtenidos para un mismo diámetro de probeta, siempre y cuando la dispersión entre todos ellos no sea más del 15% del valor medio.

Trasladando esta teoría a nuestro estudio, se concluye que existe una resistencia característica mínima de los pilares ensayados de 25,08 MPa, superior a 25 MPa, cumpliendo la normativa vigente y concluyendo que los elementos estructurales son aptos para su servicio.

Por último, se comprobó la carbonatación del hormigón mediante la prueba de la fenolftaleína con el fin de verificar que se encontraba en buen estado. Efectivamente, las barras de acero no habían perdido sección ni contenían oxidación. Las siguientes imágenes lo muestran:



Figura A1. *Comprobación de la sección de una armadura en elemento estructural*



Figura A2. Comprobación del estado de la cavidad de un testigo mediante carbonatación

Además, se comprobó que la cavidad de la probeta en el pilar tenía unas dimensiones aproximadas a la sección de éste, 75 o 100 mm dependiendo del testigo, a pesar de dar por hecho que durante la extracción se producen factores que generan una variabilidad en esta medida. Seguidamente apreciamos que para el caso de la probeta número 3 de 75 mm de diámetro, la sección de su cavidad es similar a la del testigo.



Figura A3. Medición de la sección de la cavidad de un testigo de hormigón de 75 mm

Por último, con el fin de apreciar gráficamente el impacto físico que tiene el ensayo de extracción y rotura de testigos de hormigón, se adjunta el antes y el después de una probeta sometida a compresión, en concreto, se trata de la probeta número 6 de 100 mm de diámetro.



Figura A4. PROBETA 6. Antes y después del ensayo

7.7. Ensayo esclerométrico y velocidad de ultrasonidos

Los ensayos de determinación del índice de rebote mediante esclerómetro de partículas se realizaron en las zonas marcadas por la Dirección Facultativa de la obra y siguiendo la norma UNE EN 12504-2:2022.

El objeto del estudio de esclerometría consiste en determinar el índice de dureza de una superficie determinada de hormigón endurecido a partir de la energía residual de impacto sobre dicha superficie. Con este ensayo se pretende determinar la dureza superficial de los pilares de la obra de referencia.

Una vez confirmado que los elementos de hormigón a ensayar contaban con un espesor igual o superior a 10 mm, se comprobó que la superficie de análisis era completamente lisa y seca para tomar las medidas que, según normativa, debían distanciarse una longitud igual o superior a 25 mm para mayor precisión.

Las mediciones realizadas se indican en la tabla siguiente:

Elemento obra	Lecturas esclerómetro en cada iteración												Valor medio
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
PILAR 4ª Planta	36	40	36	34	42	44	38	36	34	40	42	42	38,67
PILAR 3ª Planta	42	40	40	38	38	40	42	38	40	40	40	40	39,83
PILAR 1ª Planta	36	34	36	42	34	34	40	38	38	40	40	42	37,83

Tabla A5. Lecturas ensayo de esclerometría

En todos los casos, el esclerómetro se posicionó en un ángulo de 90° respecto al pilar, es decir, en sentido perpendicular al mismo. También destacar que las medidas se realizaron en la zona media de cada elemento estructural pues es la zona que menor resistencia posee y, por lo tanto, sitúa al analizador en la peor situación. En última estancia se reitera que la edad del hormigón es superior a 28 días y que, a diferencia del ensayo de extracción y rotura de testigos de hormigón, las acciones desarrolladas en el ensayo de esclerometría no incluyen la carbonatación de las zonas implicadas.

Antes de evaluar los resultados, se debe comprobar que todas las lecturas son válidas. Para ello se aplicarán las siguientes pautas:

- Se rechazarán aquellos valores que difieran en más de seis unidades del valor medio. La media de los restantes valores se define como índice de rebote de la zona ensayada.
- Se rechazará el ensayo sobre un elemento cuando más del 20% de las lecturas difieran de la media en más de seis unidades.
- El valor de la media de las lecturas debe ser el resultante de aplicar al original la corrección correspondiente al ángulo de incidencia del esclerómetro, conforme a las tablas del fabricante.

- Para cada punto de ensayo se dará un valor indicativo de la dispersión de los resultados del ensayo.

Tomando como base la tabla del inicio de esta página, ninguna medida y ningún ensayo fueron rechazados por diferir en exceso del valor medio de las lecturas.

La siguiente tabla detalla el factor de corrección aplicado según el fabricante del esclerómetro y la dispersión de los resultados del ensayo:

Elemento obra	Dispersión, x	Índice de rebote medio, R	Factor de corrección	Índice de rebote medio corregido, Ra	Resistencias (kp/cm ²)	
					W _m (1)	W _{min} (2)
PILAR 4 ^a Planta	3,40	38,70	0,894	34,60	270,50	212,80
PILAR 3 ^a Planta	1,30	39,80	0,902	35,90	289,10	230,50
PILAR 1 ^a Planta	3,00	37,80	0,891	33,70	257,50	200,50

(1) Resistencia estimada a compresión conforme a las tablas proporcionadas por el fabricante del esclerómetro.

(2) Resistencia mínima conforme a las tablas proporcionadas por el fabricante del esclerómetro.

Tabla A6. Resultado ensayo de esclerometría: índice de rebote y resistencias del concreto

Analizando las dos últimas columnas, se confirma que la resistencia estimada a compresión conforme a las tablas proporcionadas por el fabricante del esclerómetro siempre es mayor que la resistencia mínima conforme a las tablas proporcionadas por el mismo, es decir, los valores de resistencia estimada, obtenidos mediante el índice de rebote de los ensayos de esclerometría realizados, pueden considerarse satisfactorios para el tipo de hormigón inspeccionado.

Respecto a los valores de velocidad de propagación, éstos se encuentran en los normales para un hormigón de este tipo. Las medidas realizadas en cada una de las zonas auscultadas obtienen valores de velocidad de propagación sin cambios importantes, que indican la homogeneidad interior de los elementos inspeccionados. No se detectan cambios a ninguna altura que pudiesen indicar la presencia de fisuras o segregaciones del hormigón en el interior de las estructuras inspeccionadas.

Los valores de resistencia estimada, obtenidos mediante el índice de rebote de los ensayos de esclerometría realizados, pueden considerarse satisfactorios para el tipo de hormigón inspeccionado.

7.8. Ensayo de carbonatación del hormigón en vigas

Por lo explicado con anterioridad, parece evidente que para llevar a cabo el desarrollo del ensayo de carbonatación mediante una disolución de fenolftaleína al 1% disuelta en alcohol etílico al 70%, previamente se debe tener acceso a las armaduras ubicadas en el interior de los elementos de hormigón. Con el propósito de alcanzar esa franja, el primer paso es realizar una calicata en la viga testada hasta observar el acero con precaución de no causar daños en el mismo.

Se realizaron un total de 6 ensayos de carbonatación en diferentes pilares de la estructura objeto de estudio, mediante la realización de calicatas en la viga y la aplicación por pulverización de fenolftaleína, para comprobar si el hormigón ha sufrido carbonatación o se encuentra en las condiciones adecuadas.

Como en el caso de los testigos extraídos de pilares del edificio para la prueba de compresión hasta rotura y las cavidades que estos dejan en el mismo elemento, las armaduras de las vigas se encuentran en buen estado pues no han perdido sección ni contienen oxidación al realizar las calicatas. Acogiéndonos a los ensayos realizados podemos concluir que la estructura se encuentra en buen estado en cuanto a la carbonatación del hormigón y al estado de las armaduras en el interior de las vigas.

Se recomienda que las armaduras de acero corrugado de las vigas se cepillen con cepillo de alambre para retirar la capa superficial de suciedad.

Finalizado el ensayo y previamente al hormigonado, se deberían pasivar las armaduras mediante un producto de revestimiento de adherencia y protección de armaduras.

Se propone emplear Sika Monotop-910 S, o similar, siendo este un producto a base de cemento, de un componente, mejorado con resina sintética y humo de sílice.

Las armaduras deben de estar limpias antes de su aplicación, se recomienda aplicar dos capas, con un tiempo de secado mínimo entre ambas de 5 horas.

Para la reconstitución de las oquedades causadas por las calicatas en vigas se recomienda rellenar con mortero de reparación estructural, se propone Sika Monotop 612, o similar, que es un mortero de reparación estructural de reparación, de un componente reforzado con fibras y humo de sílice, que cumple la clase R3 de la norma UNE EN 1504-3:2006: *Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón. Definiciones, requisitos, control de calidad y evaluación de la conformidad. Parte 3: Reparación estructural y no estructural.*

Previamente al relleno, se deberá aplicar un puente de adherencia, como el Sika Monotop-610, o similar. Este se deberá aplicar con brocha o rodillo sobre el soporte humedecido hasta saturación capilar. Estando el producto fresco se comprobará que no haya elementos sueltos y, en ese caso se eliminarán. Después se procederá al relleno.

Las siguientes imágenes son un resumen de los resultados obtenidos y, a modo informativo, la tabla detalla exactamente el lugar en el que se realizaron los picajes para el ensayo:

Nº Cata	Portal	Planta
1	4	Techo Planta Baja
2	3	Techo Planta Baja
3	2	Techo Planta Segunda
4	1	Techo Planta Primera
5	11	Techo Planta Baja
6	10	Techo Planta Baja

Tabla A7. Localización de las armaduras en pilares sometidas al ensayo de carbonatación



Figura A5. CATA 1. Antes y después del ensayo



Figura A6. CATA 2. Antes y después del ensayo

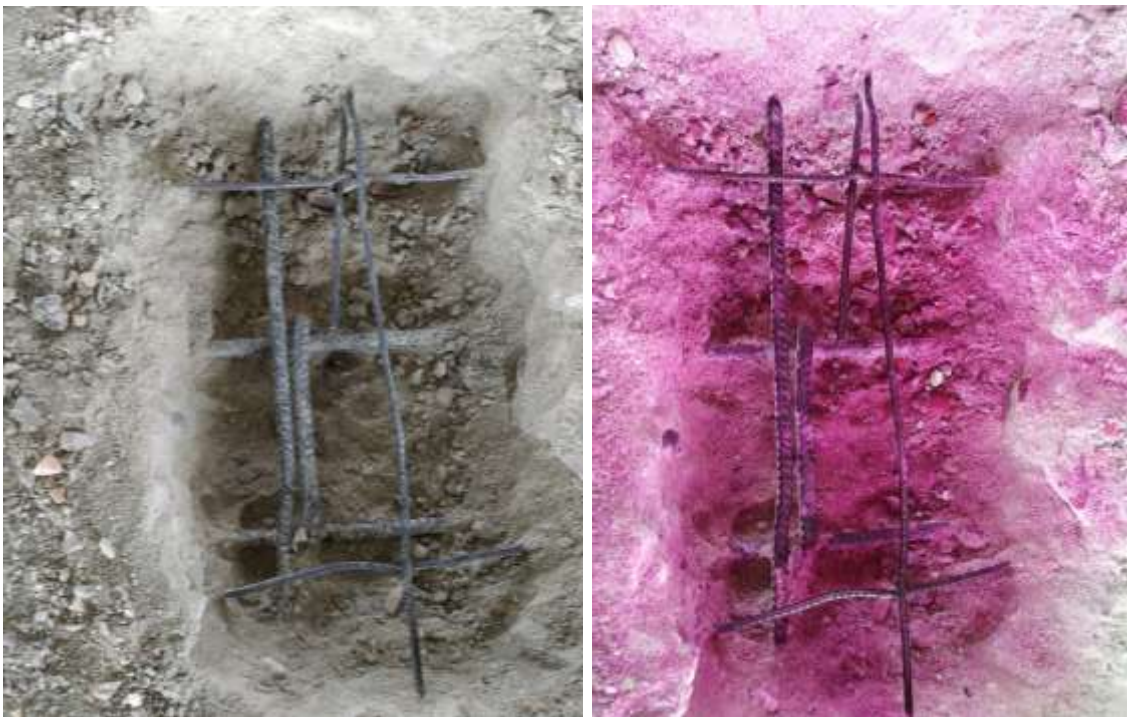


Figura A7. CATA 3. Antes y después del ensayo



Figura A8. CATA 4. Antes y después del ensayo



Figura A9. CATA 5. Antes y después del ensayo



Figura A10. CATA 6. Antes y después del ensayo

Además de comprobar la carbonatación del hormigón en 6 de las vigas de la estructura, se realizaron calicatas en 2 de sus zapatas. La ubicación de las mismas se detalla en la Tabla A8:

Nº Cata	Código	Planta
7	Z01	Sótano 2
8	Z02	Sótano 2

Tabla A8. Localización de las armaduras en zapatas sometidas al ensayo de carbonatación

En el primer caso, la excavación se tuvo que parar al alcanzar 1,2 metros pues encontramos terreno saturado de agua, por lo que los trabajos de carbonatación no se pudieron continuar.

La Figura A11 es una vista en perspectiva de la calicata Z01:



Figura A11. CATA 7

En el segundo caso sucedió algo parecido, se excavó hasta una profundidad de 1,2 metros donde se encontró la arista inferior de la zapata. Sin embargo, e terreno también se encontraba saturado.

Las Figuras A12 y A13 son unas vistas en perspectiva de la calicata Z02:



Figura A12. CATA 8: 1 Parte



Figura A13. CATA 8: 2 Parte

Las dimensiones principales de ambas zapatas se muestran en la Tabla A9.

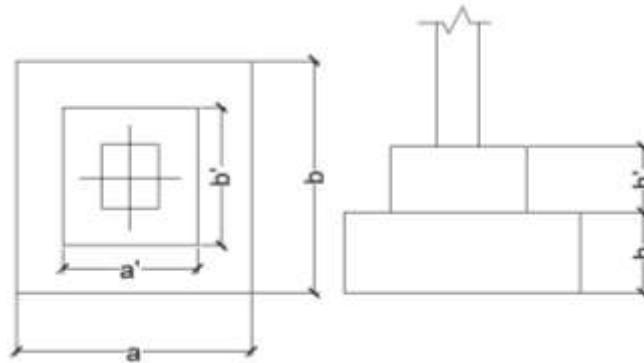


Figura A14. Esquema dimensiones secciones de zapatas

Dimensiones de la sección (m)						
	a	b	h	a'	b'	h'
Z01	2.6	2.6	0.6	1.2	1.2	0.6
Z02	2.4	2.4	0.6	1.05	1.05	0.6

Tabla A9. Dimensiones de las secciones de las zapatas Z01 y Z02

7.9. Conclusión del informe de revisión de estructuras de hormigón armado

Todas las pruebas realizadas al edificio ubicado en la Avenida de Madrid, 13, Laguna de Duero, Valladolid, presentaron resultados favorables teniendo en cuenta que todos los exámenes han sido realizados y evaluados según la normativa vigente en España.

Tanto el ensayo de extracción y rotura de probetas de hormigón por compresión (ensayo destructivo) como el resto de los ensayos de información explicados (ensayos no destructivos), concluyen que la resistencia del hormigón es suficiente para continuar con la construcción de la obra y que ésta sea puesta al servicio del comprador.

Además del hormigón, se analizó la aptitud de las armaduras del elemento estructural del hormigón, cuya respuesta también fue favorable.

Por todo y esto, se concluye que la edificación es **APTA** para su uso.

7.10. Presupuesto de los trabajos

Para el desarrollo de la oferta económica se solicitaron los sucesivos documentos:

- Planos de localización de la obra
- Características básicas de la edificación (tipología, número de plantas... etc)
- Planos y secciones tipo de la construcción proyectada.

El presupuesto incluye los plazos de progreso, las salvedades en el alcance (inexistentes en este caso).

Descripción	Cantidad	Precio (€)	Total (€)
Ensayo de extracción y compresión hasta rotura de testigos de hormigón	7 testigos	225.00	1575.00

Subtotal TESTIGOS DE HORMIGON 7 UD. 1575.00 €

Descripción	Cantidad	Precio (€)	Total (€)
Comprobación de armadura en pilares y de la carbonatación del hormigón en rozas. La realización de las catas, elementos o medios de apoyo como luz, andamiajes, plataformas, elevadoras... etc. corren por cuenta del peticionario	10	90.00	900.00

Subtotal ARMADURA 900.00 €

Descripción	Cantidad	Precio (€)	Total (€)
Ensayo esclerométrico y de ultrasonidos según UNE EN 12504-2:2022 y UNE EN ISO 17640:2018	10	110	1100.00

Subtotal ESCLEROMETRIA Y ULTRASONIDOS 1100.00 €

Descripción	Cantidad	Precio (€)	Total (€)
Redacción del informe con los resultados obtenidos	1	900.00	900.00

Subtotal INFORME 900.00 €

Subtotal DOCUMENTACION Y ENSAYOS 4475.00 €

TOTAL (SIN INCLUIR IMPUESTOS) 4475.00 €

TOTAL (IVA INCLUIDO) 5414.75 €

Finalizado y presentado el estudio preliminar de las tareas que supondrían una correcta evaluación de la edificación, por ejemplo, el tipo y número de ensayos necesarios, queda de la mano del peticionario aceptar la propuesta. Firmadas las aclaraciones económicas, comenzaría el protocolo de revisión de estructuras de hormigón.

En el caso práctico que se expone se aceptaron todas las condiciones arriba mencionadas, por lo tanto, el coste de los trabajos suma un total de 5414.75 €.