

# REDUCCIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN EN PIEZAS HORMIGONADAS VERTICALMENTE

Autora: Eva María Cantero López

Grado en fundamentos de la arquitectura

Curso 2017-2018

Tutor: Manuel Octavio Valcuende Payá



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCOLA TÈCNICA  
SUPERIOR  
D'ARQUITECTURA

## RESUMEN (ABSTRACT, RESUM)

Este trabajo trata de justificar la desaparición del factor de reducción de la resistencia a compresión en piezas hormigonadas verticalmente, que fue obligatorio utilizar en España en los cálculos de estructuras desde el año 1968 (norma EH-68) hasta el año 1998 (norma EH-98). Dicho factor suponía una minoración del 10% de la resistencia debido a la segregación de los materiales que componen el hormigón, que provoca una distribución no uniforme de las propiedades mecánicas.

Para ello, se han realizado 6 pilares a escala reducida con diferentes calidades y consistencias del hormigón, y tres probetas de cada uno. A la edad de 28 días se procedió a realizar varios ensayos en cada pilar con el fin de analizar la distribución de resistencia a lo largo de la altura: unos no destructivos (esclerómetro y ultrasonidos), habitualmente utilizados en trabajos de inspección, y otros destructivos (se sacaron testigos cada 15 cm a lo largo de la altura).

Con los ensayos realizados se justifica la desaparición de este factor de reducción, ya que las diferencias de resistencia registradas entre la cabeza y la base de los distintos pilares estudiados han sido despreciables, inferiores al 7%.

## PALABRAS CLAVE

hormigón; hormigonado vertical; resistencia a compresión; segregación.

## ABSTRACT

This work tries to justify the disappearance of the reduction factor of the compressive strength in vertical casting pieces, which was mandatory to use in Spain in the structural calculations since 1968 (standard EH-68) until the year 1998 (standard EH- 98). This factor involved a reduction of 10% of the strength due to the segregation of the materials that compose the concrete, which causes a non-uniform distribution of the mechanical properties.

For this, 6 scaled-down columns have been made with different qualities and consistences of the concrete, and three specimens of each one. At the age of 28 days, several tests have been carried out on each column in order to analyze the distribution of strength along the height: non-destructive ones (sclerometer and ultrasound), usually used in inspection works, and other destructive ones (core samples will be taken every 15 cm along the height).

With the tests carried out, the disappearance of this reduction factor is justified because the differences obtained between the top and the bottom of the different columns studied have been negligible, less than a 7%.

## KEYWORDS

Concrete; vertical casting; compressive strength; segregation.

## RESUM

Aquest treball tracta de justificar la desaparició del factor de reducció de la resistència a compressió en peces formigonades verticalment, que va ser obligatori utilitzar a Espanya en els càlculs d'estructures des de l'any 1968 (norma EH-68) fins a l'any 1998 (norma EH 98). Aquest factor suposava una minoració del 10% de la resistència a causa de la segregació dels materials que componen el formigó, que provoca una distribució no uniforme de les propietats mecàniques.

Per a això, s'han realitzat 6 pilars a escala reduïda amb diferents qualitats i consistències del formigó, i tres provetes de cada un. A l'edat de 28 dies es va procedir a realitzar diversos assaigs en cada pilar per tal d'analitzar la distribució de resistència al llarg de l'altura: uns no destructius (escleròmetre i ultrasons), habitualment utilitzats en treballs d'inspecció, i altres destructius (es van treure testimonis cada 15 cm al llarg de l'altura).

Amb els assajos realitzats es justifica la desaparició d'aquest factor de reducció, ja que les diferències de resistència registrades entre el cap i la base dels diferents pilars estudiats han estat menyspreables, inferiors al 7%.

## PARAULES CLAU

Formigó; formigonat vertical; resistència a compressió; segregació.

## INDICE

1.	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO .....	7
2.	EL HORMIGÓN.....	8
2.1.	Evolución histórica .....	8
2.2.	Segregación y sangrado del hormigón .....	10
3.	EVOLUCIÓN DE LA NORMATIVA.....	14
3.1.	Normativa Española .....	14
3.2.	Borrador de la nueva normativa española.....	20
3.3.	Normativa Europea .....	20
3.4.	Código modelo .....	21
3.5.	Norma americana (ACI).....	21
4.	PLAN EXPERIMENTAL .....	22
4.1.	Dosificaciones.....	22
4.1.1.	Caracterización de los áridos.....	23
4.1.2.	Dosificaciones.....	27
4.2.	Proceso de hormigonado .....	36
4.3.	Ensayos.....	40
4.3.1.	Métodos no destructivos .....	40
4.3.2.	Métodos destructivos .....	42
4.3.3.	Procedimiento .....	42
4.4.	Discusión y resultados.....	51
5.	CONCLUSIONES .....	58
6.	AGRADECIMIENTOS.....	59
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	60

## INDICE DE FIGURAS

Ilustración 1. Hormigón autocompactante sin segregación (Fuente: Rafa Calabuig, 2015). .....	11
Ilustración 2. Hormigón autocompactante con claros signos de segregación. Además del halo de agua exterior se ve cómo los áridos no están bien cohesionados con la mezcla (Fuente: Rafa Calabuig, 2015).....	11
Ilustración 3. Hormigón con relación a/c=0,9 elaborado para el trabajo, se forma a una capa de agua superior por exudación .....	13
Ilustración 4. Muestra inicial seca.....	23
Ilustración 5. Dosificación de la arena .....	25
Ilustración 6. Medidor de humedad .....	36
Ilustración 7. Encofrados pilares y probetas.....	37
Ilustración 8. Proceso de curado .....	38
Ilustración 9. Retracción del hormigón.....	38
Ilustración 10. Ensayo esclerométrico .....	41
Ilustración 11. Ultrasonidos .....	41
Ilustración 12. Pulido de las probetas.....	42
Ilustración 13. Ensayo a compresión de las probetas .....	43
Ilustración 14. Rotura probetas .....	43
Ilustración 15. Forma de rotura de una probeta cilíndrica bajo compresión simple .....	44
Ilustración 16. Extracción de los testigos.....	48
Ilustración 17. Restos de los pilares una vez sacados los testigos .....	48
Tabla 1. Análisis granulométrico de la arena .....	24
Tabla 2. Análisis granulométrico de la grava.....	25
Tabla 3. Parábola de Fuller .....	26
Tabla 4. Resultados cono de Abrams.....	39
Tabla 5. Rotura probetas a compresión simple a los 7 días.....	43
Tabla 6. Rotura probetas a compresión simple a los 7 días (a/c=0,90).....	43
Tabla 7. Resultados ultrasonidos .....	45
Tabla 8. Resultados esclerómetro.....	46
Tabla 9. Resultados esclerómetro.....	47
Tabla 10. Resultados ultrasonidos (a/c=0,90).....	48
Tabla 11. Resultados esclerómetro (a/c=0,90) .....	49
Tabla 12. Rotura testigos a compresión simple.....	50
Gráfica 1. Curvas granulométricas.....	27
Gráfica 2. Rotura de testigos y probetas a compresión simple, a/c = 0,45.....	51
Gráfica 3. Rotura de testigos y probetas a compresión simple, a/c = 0,65.....	52
Gráfica 4. Rotura de testigos y probetas a compresión simple, a/c = 0,90.....	53
Gráfica 5. Resultado ultrasonidos a/c = 0,45 .....	54
Gráfica 6. Resultado ultrasonidos a/c = 0,65 .....	55
Gráfica 7. Resultado ultrasonidos a/c = 0,90 .....	55
Gráfica 8. Resultado esclerómetro a/c = 0,45.....	56
Gráfica 9. Resultado esclerómetro a/c = 0,65.....	57
Gráfica 10. Resultado esclerómetro a/c = 0,90.....	57

## 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO

El hormigón es un material de construcción utilizado desde hace siglos. Antiguamente no se realizaba ningún tipo de cálculo de la estructura, sino que se utilizaban muros de gran sección y poca altura. Sin embargo, hoy en día el hormigón es muy distinto, así como los sistemas de cálculo de las estructuras y los métodos de construcción, con lo que se consiguen mejores resultados con menos cantidad de material. Esto se regula mediante unas normativas que definen todos los cálculos necesarios para dimensionar las estructuras. En España, la primera normativa relacionada con el hormigón aparece en 1939 y ha ido evolucionando hasta la actual.

Desde el siglo XX se ha utilizado un factor de reducción en piezas hormigonadas verticalmente (generalmente en soportes), ya que pueden presentar una distribución no uniforme de resistencias entre la base y la cabeza debido a la segregación de los materiales que lo constituyen.

Actualmente, la utilización de aditivos y mejoras de las técnicas de puesta en obra y compactación del hormigón han llevado a una mejora en la homogeneidad de los soportes en altura. Es por ello que esta reducción, que se consideraba del 10% en la normativa española hasta la EH-91, ya no se tiene en cuenta.

La finalidad de este trabajo es justificar la desaparición de este factor, determinando mediante una serie de ensayos la reducción de resistencia que sufren las piezas hormigonadas verticalmente y viendo si sería necesaria la aplicación de dicho 10%.

Asimismo, el otro objetivo de este trabajo es poner en práctica los conocimientos teóricos vistos en algunas asignaturas de la carrera para poder fabricar hormigón, poder realizar los ensayos que habitualmente se hacen en obra para el control de calidad, así como aplicar las técnicas de inspección que se realizan en una obra de intervención para estimar o conocer la calidad y propiedades del hormigón de una construcción existente.

## 2. EL HORMIGÓN

El hormigón es un material de construcción formado principalmente por una mezcla de agua, cemento, áridos finos (arena) y gruesos (grava) que se obtiene por fraguado y endurecimiento del cemento al reaccionar con el agua. Además de los componentes básicos, se pueden introducir algún tipo de aditivos y/o adiciones para mejorar sus características. Si el tamaño máximo del árido no supera los 4 mm, la mezcla resultante se llama mortero en lugar de hormigón.

### 2.1. Evolución histórica

El hormigón de hoy en día, entendido como una mezcla de áridos, agua y cemento, es un material bastante actual. Sin embargo, el concepto de aglomeración de varios materiales es mucho más antiguo.

Los egipcios, hace 4.500 años, ya empleaban hormigones primitivos utilizando yeso cocido como aglomerante. También fue empleado por Fenicios y Griegos, estos últimos utilizando como aglomerante tierra volcánica, hace más de 2.300 años. En Latinoamérica también hay indicios de desarrollo de enormes estructuras y materiales cementantes, por ejemplo en las ciudades construidas por los Mayas y los Aztecas.

No obstante, fueron los romanos quienes lograron un gran desarrollo de este material. Al principio utilizaban cal como aglomerante, pero tras muchas pruebas empíricas descubrieron que la arena procedente de ciertas rocas volcánicas ofrecía más resistencia y duración incluso bajo el agua. Estas cenizas, constituidas básicamente por sílice, al mezclarlas con cal y agua dio lugar al cemento romano (cemento puzolánico), que es un aglomerante hidráulico (capaz de endurecer bajo el agua). Desarrollaron el conocido “opus caementicium”, que utilizaban para sus construcciones en las que colocaban hiladas de piedra sobre las que vertían este mortero.

Muchas construcciones de esta época están perfectamente conservadas, por lo que de esta larga duración se deduce que calculaban las dosificaciones y empleaban técnicas para mejorar la resistencia, como la compactación o el apisonado. Uno de los mejores ejemplos de construcción con este material es el teatro de Pompeya.

Para reforzar sus estructuras diseñaban las obras para aguantar cargas de compresión, por lo que obtenían estructuras con muros muy gruesos y pesados. Para aligerar este hormigón



incluían materiales de baja densidad en la masa. Con este nuevo material fueron construidas grandes obras, como algunos arcos del Coliseo o la cúpula del Panteón.

Con la caída del Imperio Romano se da un declive en el uso del hormigón, ya que muchos de los conocimientos que éstos desarrollaron desaparecieron. Durante la Edad Media y el Renacimiento el hormigón fue muy poco utilizado por su mala calidad, debida a una incompleta cocción de la cal, dejadez de la mano de obra y la falta de rocas volcánicas. Además, en la Edad Media las puzolanas eran consideradas calizas impuras, por lo que dejaron de utilizarse completamente.

Durante los siguientes siglos se dieron pocos avances. A principios de la Edad Moderna se da una reducción general de la calidad hasta que se acaba con la fabricación y uso del cemento.

Es en el siglo XVIII, época en la que revive el auge por la investigación, se utiliza piedra unida con un mortero producido con cal calcinada para la construcción de un faro en Inglaterra sometido constantemente a la acción de las olas y los vientos. En los años posteriores, a mediados de siglo, se empieza a ser consciente de la importancia de la arcilla para la elaboración de conglomerantes hidráulicos, por lo que mejora la calidad de los morteros y empieza el desarrollo del hormigón.

En 1824 Joseph Aspdin descubre el cemento Portland al calcinar en un horno piedra caliza con arcilla y más tarde molerla y pulverizarla. Sin embargo, sólo se empleaba para producir ladrillo y no fue hasta 1845 cuando Isaac Johnson descubre el Clinker al quemar una mezcla de caliza y arcilla a más altas temperaturas. Con estos descubrimientos comienza el desarrollo del hormigón propiamente dicho.

Eugène Freyssinet patenta e impulsa el uso del hormigón pretensado en 1879, pero es en la década de 1940 cuando se utiliza debido a la carencia de acero en Europa tras la Segunda Guerra Mundial y el comienzo de la reconstrucción.

## 2.2. Segregación y sangrado del hormigón

El hormigón fresco es un material heterogéneo, ya que en él conviven la fase sólida (cemento y áridos), la líquida (agua) y la gaseosa (aire ocluido). Al mismo tiempo, la fase sólida también es heterogénea, ya que sus componentes son de dimensiones y naturaleza variable (Jiménez et al., 2000).

Éste tiene la capacidad de poder moldearse. Tiene una vida comprendida entre el momento en que abandona la hormigonera hasta cuando se inicia el fraguado del cemento.

Cuando el hormigón está fresco, al ser heterogéneo, sus componentes están sueltos y pueden separarse por un incorrecto transporte y puesta en obra, dando lugar a problemas de segregación y exudación. Tanto la composición del material como su consistencia, entendida como la oposición que presenta el hormigón fresco a experimentar deformaciones (Fernández Cánovas, 1996), son factores de gran importancia frente a estos problemas.

No obstante, la propiedad más importante frente a dichos problemas es la homogeneidad. Decir que un hormigón debe ser homogéneo se refiere a que debe ser uniformemente heterogéneo, es decir, sus componentes deben estar regularmente distribuidos en toda su masa. Esta propiedad se consigue mediante un buen amasado y para mantenerse requiere un cuidadoso transporte, colocación en obra y compactación. Si se pierde la homogeneidad, los componentes de la mezcla se separan y decantan según su tamaño y densidad, fenómeno conocido como **segregación**. Este fenómeno provoca hormigones con superficies mal acabadas, con poros o coqueras o, por el contrario, con exceso de mortero, afectando a la durabilidad y resistencia mecánica del hormigón.

La falta de homogeneidad está directamente relacionada con la falta de cohesividad del hormigón (inadecuada granulometría, elevado tamaño máximo de árido, elevado contenido de agua...)

La segregación puede evitarse con un buen estudio de la granulometría y teniendo cuidado en el manejo del hormigón. Durante el transporte se deben evitar vibraciones y choques, exceso de agua, que se seque la mezcla, transportes de grandes distancias... Otro factor importante para evitar la segregación es la puesta en obra, debiendo evitar vertidos desde gran altura y procurando el vertido en vertical dirigido para evitar choques libres. También se ha de evitar vibrados muy prolongados.



*Ilustración 1. Hormigón autocompactante sin segregación (Fuente: Rafa Calabuig, 2015).*

El empleo de áridos de distintas densidades favorece la segregación. Además, los áridos rodados son más propensos a separarse que los de machaqueo. También puede tener lugar por falta de cemento, exceso de agua, déficit de partículas finas o exceso de elementos gruesos. Las causas más usuales de segregación del hormigón son la variedad del tamaño de los áridos y su granulometría.



*Ilustración 2. Hormigón autocompactante con claros signos de segregación. Además del halo de agua exterior se ve cómo los áridos no están bien cohesionados con la mezcla (Fuente: Rafa Calabuig, 2015)*

Por tanto, la segregación se puede evitar o reducir de muchas formas:

- Realizando un minucioso estudio de la granulometría y atendiendo al manejo del hormigón. El empleo de áridos de distintas densidades favorece la segregación.
- Disminuyendo el agua de amasado.
- Mediante un transporte adecuado.

- Transporte a pequeña distancia y vertido directo a baja altura.
- Incorporando aditivos aireantes, que frenarán la segregación. También reduce este fenómeno el empleo de cenizas volantes.
- Reduciendo la cantidad de masa transportada.
- Si compacta con vibrador, es recomendable utilizar un hormigón poco fluido con una relación agua/cemento baja.
- Controlar el tiempo de vibrado, ya que un vibrado muy prolongado produce segregación e incluso la conformación de capas de pasta en la superficie, lo que puede provocar fisuraciones por retracción.
- Colocar el hormigón directamente en la posición final.
- No utilizar el vibrador para extender el hormigón.
- Cuidando el tipo de cemento empleado: cuanto más fino sea el cemento, menor será la exudación producida.
- Aumentando el contenido de cemento, lo que reduce la exudación.

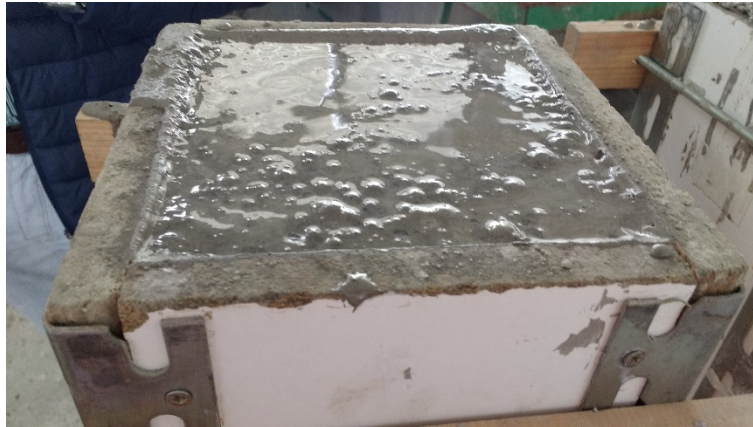
La **exudación o sangrado** del hormigón es una forma de segregación en la que el agua tiende a subir hacia la superficie debido a la incapacidad de los áridos de llevarla con ellos durante la compactación. Además, la diferencia de densidades de sus componentes provoca una decantación de los áridos más pesados y la subida del agua, menos densa. El proceso se inicia al colocar y consolidar el hormigón en su encofrado correspondiente, y continúa durante su fraguado.

Al ascender, el agua arrastra al cemento y se crea una delgada capa en la superficie del hormigón, débil y porosa que carece de resistencia y durabilidad. El agua que llega a la superficie se va evaporando lentamente, pero si la velocidad de evaporación es mayor que la de su desplazamiento del interior hacia la superficie, aparecerán fisuras de retracción plástica.

La pérdida de agua provocada por este fenómeno tiene una parte positiva: reduce la relación agua/cemento ( $a/c$ ), lo que puede mejorar la resistencia del hormigón. No obstante, al desplazarse las partículas de agua desde el interior, van creando conductos capilares que aumentan la permeabilidad del hormigón, reduciendo su durabilidad especialmente frente a las heladas. Esto es importante sobre todo en elementos que prima la superficie frente al volumen, como pavimentos y forjados.

La exudación depende del tipo de cemento que se haya usado: cuanto más fino sea el cemento, menor exudación se producirá. Los hormigones ricos en cemento presentan menor exudación que los pobres, del mismo modo que ocurre con aquellos que contienen aditivos aireantes o cenizas volantes (Fernández Cánovas, 1996),

Según la Instrucción de Hormigón Estructural (EH-08), la exudación no debe superar el 2% del volumen pasadas tres horas desde la preparación de la mezcla.



*Ilustración 3. Hormigón con relación a/c=0,9 elaborado para el trabajo, se forma a una capa de agua superior por exudación*

### 3. EVOLUCIÓN DE LA NORMATIVA

#### 3.1. Normativa Española

La normativa española referente al hormigón ha ido evolucionando desde 1939, cuando se publicó la primera instrucción que fue una norma muy general. Poco a poco ha ido concretándose cada vez más hasta llegar a la actual Instrucción Española del Hormigón Estructural (EHE-08), que es el nombre que recibe hoy en día la normativa española sobre el cálculo y seguridad en estructuras de hormigón.

Es de obligado cumplimiento para todas las estructuras de hormigón en España, aunque también se pueden calcular utilizando la normativa europea correspondiente, el Eurocódigo 2.

El factor de reducción de la resistencia característica del hormigón para piezas hormigonadas verticalmente, objeto de nuestro estudio, también ha ido evolucionando a lo largo del tiempo, aunque en las últimas instrucciones no se especifica ningún valor.

#### **Instrucción para el proyecto y ejecución de obras de hormigón, 1939.**

La instrucción (Obras Públicas, 1939) se refiere a todo tipo de construcción con hormigón en masa o armado, pero no se refiere a hormigones especiales (centrifugados, celulares, porosos o compuestos). Esta instrucción era obligatoria en todas las obras públicas.

En ella no se determinaba ninguna resistencia mínima del hormigón, sino que señalaba que la resistencia se fijaría en cada proyecto de modo que se alcanzasen unos coeficientes de seguridad tal que, en general, el estado de tensión en cualquier punto fuera tal que el cociente entre las cargas exteriores o causas de los esfuerzos por las características resistentes del material se pueda triplicar sin superar las condiciones de rotura del hormigón, y duplicar sin superar el límite elástico del acero.

Como era de esperar, el factor de reducción no aparece como tal, pero sí que especifica en el artículo 18 - Puesta en obra del hormigón- que *“el transporte y vertido del hormigón se hará de modo que no se disgreguen sus elementos, volviendo a amasar, al menos con una vuelta de pala, los que acusen señales de disgregación.”*

### **Normas para el cálculo y ejecución de estructuras metálicas, hormigón armado y forjados de ladrillo armado, 1941.**

Esta nueva norma (Gobernación, 1941), publicada por la dirección general de arquitectura, ya hace referencia a estructuras de hormigón armado, es una norma más específica que su predecesora. Contemplaba dos tipos de hormigón en función del cemento que se utilizase, que podía ser "cemento corriente" o "alta resistencia". Se mencionan cargas mínimas dependiendo del cemento utilizado.

En esta norma tampoco aparece el factor de reducción, pero al igual que la anterior, en el artículo 5 - Ejecución – punto 1º dice: *“El hormigón se verterá en los moldes inmediatamente después de su fabricación, rebatiéndolo antes de su empleo si hubiese pasado algún tiempo desde su preparación y procurando que no se disgreguen sus elementos en el vertido.”*

### **Instrucción para el proyecto de obras de hormigón, 1944.**

Se trata de una revisión de la norma de 1939 (Obras Públicas, 1944), redactada una vez se tuvo una suficiente adaptación de los métodos y leyes por un estudio continuado. Introduce variaciones en algunos artículos, pero no afecta al artículo 18 antes nombrado.

### **HA-61. Instrucción especial para estructuras de hormigón armado.**

Esta primera norma especial para estructuras de hormigón armado en España (IETCC, 1961) fue realizada por Eduardo Torroja y un equipo de investigadores del Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento bajo su dirección. Fue publicada tras la repentina muerte de Eduardo Torroja y por ello denominada “norma Eduardo Torroja” en homenaje a su autor.

Pese a no ser de carácter obligatorio, fue utilizada para la mayoría de proyectos de hormigón de la época.

Formado por dos tomos: el primero se publicó realmente en 1958 (HA-58), de materiales; el segundo de cálculo, publicándose la obra completa en 1961.

En esta Instrucción, la resistencia característica (nuevo concepto introducido) estaba unida a las características mecánicas del acero.

En la tercera parte del documento, referido al cálculo de piezas lineales planas, el artículo 3.2.4. expone que *“la resistencia minorada se reducirá en un 10% cuando se trate de calcular piezas hormigonadas verticalmente (caso de soportes), para tener en cuenta los defectos producidos por causa de la desigual compactación”*.

Por tanto, en esta norma aparece por primera vez el requisito de la reducción de resistencia, objeto del trabajo.

#### **EH-68. Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado.**

Es la primera instrucción de obligado cumplimiento (Obras Públicas, 1968). Se funda la Comisión Permanente del Hormigón y del Cemento, órgano colegiado radicado en el Ministerio de Fomento a través de la Secretaría General Técnica, que ejerce sus funciones en el área de las obras de construcción que utilicen hormigón o cemento.

En el título II, de la realización del proyecto, capítulo V, características de los materiales, artículo 26, características del hormigón, punto 26.4, resistencia de cálculo del hormigón (página 9 del documento). Al final del punto especifica que *“cuando se trate de piezas de cierta altura, hormigonadas verticalmente (caso de soportes, por ejemplo), la resistencia de cálculo deberá reducirse en un 10 por 100.”*

#### **EHPRE-72. Instrucción para la fabricación y suministro de hormigón preparado.**

No afecta al presente estudio.

#### **EH-73. Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado.**

Su ámbito de aplicación (Obras Públicas, 1973) se extiende con carácter obligatorio a todo el territorio nacional y deroga las disposiciones de igual o inferior rango en lo que se oponen al presente Decreto.

En la página 10 del documento, artículo 24, en el pie de la tabla de coeficientes de minoración, indica que se tendrá en cuenta que, en el caso de soportes y piezas en general que se hormigonen en vertical, la resistencia característica de partida debe reducirse en un 10 por 100.



En el artículo 28, características del hormigón, concretamente en el punto 28.5, resistencia de cálculo del hormigón, dice así: *“Se considerará como resistencia de cálculo del hormigón (en compresión  $f_{cd}$  o en tracción  $f_{ct,d}$ ) el valor de la resistencia de proyecto correspondiente, dividido por un coeficiente de minoración  $Y_c$  que adopta los valores indicados en el artículo 24 (coeficientes de seguridad).”*

*“Cuando se trate de soportes o elementos análogos hormigonados verticalmente, la resistencia de cálculo deberá reducirse en un 10 por 100, para tener en cuenta la disminución de resistencia que el hormigón de estas piezas experimenta por efecto de su forma de puesta en obra y compactación.”*

#### **EP-77, EP-80 y EP-93. Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón pretensado.**

No afecta al estudio.

#### **EH-80. Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado.**

Su ámbito de aplicación (Obras Públicas, 1980) se extiende con carácter obligatorio a todo el territorio nacional y deroga las disposiciones de igual o inferior rango en lo que se oponen al presente Decreto.

En el punto 26.5 (pag 22), resistencia de cálculo del hormigón, dice que *“se considerará como resistencia de cálculo del hormigón (en compresión  $f_{cd}$  o en tracción  $f_{ct,d}$ ) el valor de la resistencia de proyecto correspondiente dividido por un coeficiente de minoración  $V_e$ , que adopta los valores indicados en el artículo 31 (coeficientes de seguridad).”*

*“Cuando se trate de soportes o elementos análogos hormigonados verticalmente, la resistencia de cálculo deberá reducirse en un 10 por 100, para tener en cuenta la disminución de resistencia que el hormigón de estas piezas experimenta por efecto de su forma de puesta en obra y compactación.”*

En los comentarios del punto especifica que la reducción del 10 por 100 ha sido comprobada experimentalmente y se debe a la desigual compactación de la masa a todo lo alto del elemento. En la página 30, en el cuadro de coeficientes de minoración de los materiales,

recuerda en el pie de tabla dicha minoración específica de los elementos hormigonados verticalmente.

#### **EH-82. Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado.**

Esta norma (Obras Públicas, 1982) se publica como modificación de la anterior EH-80, pero no afecta al coeficiente que se está tratando, por lo que se seguirá reduciendo en un 10%.

#### **EH-88. Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado**

Se trata de una serie de modificaciones a la Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado (EH-82), que figuran como Anejo I del Real Decreto 824/1988 (Obras Públicas, 1988). Se consideran nuevos criterios de durabilidad, delimitando tres tipos de ambiente, al igual que unas relaciones máximas de agua/cemento y unos contenidos mínimos de cemento para cada ambiente.

No aparece nada relacionado con ese coeficiente. Sin embargo, sí que hay algo que puede resultar de interés para el estudio: en los comentarios del artículo 16, puesta en obra del hormigón, punto 16.1, colocación, dice así: *“El vertido del hormigón en caída libre, si no se realiza desde pequeña altura, produce, inevitablemente, la disgregación de la masa. Por tanto, si la altura es apreciable (del orden de los dos metros), deben adoptarse disposiciones apropiadas para evitar que se produzca el efecto mencionado. En general, el peligro de disgregación es mayor cuanto más grueso es el árido y menos continua su granulometría, y sus consecuencias son tanto más graves cuanto menor es la sección del elemento que se trata de hormigonar.”*

#### **EH-91. Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado.**

Esta normativa (Obras Públicas, 1991) está constituida por la EH-88 con una serie de modificaciones que figuran como anexo. Su ámbito de aplicación comprende con carácter obligatorio todas las obras, tanto de las Administraciones Públicas como las de carácter privado, así como los productos prefabricados de hormigón.

En el artículo 26.5 -resistencia de cálculo del hormigón-, determina lo siguiente: *“Cuando se trate de soportes o elementos análogos hormigonados verticalmente, la resistencia de cálculo deberá reducirse en un 10 por 100, para tener en cuenta la disminución de resistencia*

*que el hormigón de estas piezas experimenta por efecto de su forma de puesta en obra y compactación.”*

Además, en el apartado de coeficientes de seguridad, artículo 31, hay una tabla de los valores según el nivel de control y los daños previsibles. En el pie de tabla, refiriéndose al control del hormigón, dice que *“se tendrá en cuenta, en cada caso de soportes u otras piezas hormigonadas en vertical, que la resistencia de proyecto debe además minorarse en el 10%.”*

**EF-96. Instrucción para el proyecto y la ejecución de forjados unidireccionales de hormigón armado o pretensado.**

No afecta al presente estudio.

**EHE-98. Instrucción de hormigón estructural.**

En esta normativa deja de considerarse este coeficiente por primera vez (Fomento, 1998).

**EFHE. Instrucción para el proyecto y la ejecución de forjados unidireccionales de hormigón estructural realizados con elementos prefabricados.**

No afecta a este estudio.

**EHE-08. Instrucción de Hormigón Estructural.**

El consejo de Ministros aprobó la Instrucción de Hormigón Estructural (Fomento, 2008) el 18 de julio de 2008; fue publicada en el Boletín Oficial del Estado (BOE) con fecha 22 de agosto de 2008. Esta normativa entró en vigor el 1 de diciembre de 2008, quedando derogada la EHE del año 1998 y la EFHE (Instrucción Española de Forjados Unidireccionales de Hormigón Estructural) del año 2002.

En esta última normativa tampoco aparece nada relacionado con este coeficiente.

Actualmente, quedan definidos gran variedad de ambientes, relaciones a/c y contenido mínimo de cemento en función de la consistencia, ambiente, resistencia deseada... valores mínimos de resistencia en función de múltiples factores, tipos de cemento, adiciones... Todo queda bien delimitado en la normativa, tanto relaciones directas como el proceso de cálculo para proyectos más específicos.

### 3.2. Borrador de la nueva normativa española

Próximamente se publicará el Código Estructural (Fomento, 2018), la nueva normativa española. No obstante, existe un borrador que se puede consultar en el que tampoco se tiene en cuenta la reducción de la resistencia a compresión en piezas verticales.

### 3.3. Normativa Europea

Los **Eurocódigos** estructurales son un conjunto de normativas europeas de carácter voluntario, elaboradas por el Comité Europeo de Normalización (CEN), cuyo objetivo es unificar criterios y normas para calcular la resistencia mecánica de los elementos que tienen una función estructural en el ámbito de la construcción.

Los Eurocódigos pueden ser utilizados en los países europeos en sustitución de las normativas nacionales. Para ello debe cumplirse el Eurocódigo, además de un Documento Nacional de Aplicación (DNA) que indica las características que se debe seguir en cada país para su aplicación.

Existen 3 eurocódigos publicados, **EC-78**, **EC-90** y **EC-02**. Éste último (AENOR, 2016) es el que está actualmente en vigor y el que utilizan muchos países europeos como única normativa. Sin embargo, tampoco aparece el coeficiente.

### 3.4. Código modelo

El Código Modelo es un conjunto de normas de carácter voluntario cuyo objetivo es servir de modelo para otras normas. Por ejemplo, el Eurocódigo 02 ha tomado varias referencias de este código.

A lo largo del tiempo se han publicado tres códigos modelo, **MC-78**, **MC-90**, **MC-10**, y en ninguno de ellos se habla del factor de reducción objeto de nuestro estudio.

### 3.5. Norma americana (ACI)

El American Concrete Institute (ACI) o Instituto Americano del Hormigón es una organización de los Estados Unidos de América que expone recomendaciones y normas técnicas referentes al hormigón, y publica información fiable sobre el hormigón y sus aplicaciones.

Los “Requisitos de Reglamento para concreto estructural” (ACI, 2008) comprende el diseño y construcción del hormigón estructural en edificios y otras construcciones. También trata la evaluación de resistencia de estructuras existentes de hormigón reforzado.

Esta norma tampoco habla de una reducción de la resistencia para piezas verticales, pero sí que habla de un correcto mezclado, transporte y colocación del hormigón para evitar la segregación

## 4. PLAN EXPERIMENTAL

El plan experimental para este TFG se ha realizado en el laboratorio de materiales de construcción que el Departamento de Construcciones Arquitectónicas tiene en la ETSI de Edificación de la UPV con la ayuda de medios y personal técnico de dicho laboratorio.

Los ensayos que se han realizado tienen por objetivo comprobar si realmente esta distribución no uniforme de la resistencia en piezas hormigonadas verticalmente puede ser despreciada. Para ello, se han hecho varios pilares a escala reducida de 15 x 15 x 120 cm con hormigones de diferente calidad y consistencia, y tres probetas más de cada uno de ellos de  $\varnothing 10 \times 20$  cm, posteriormente cortadas para dejarlas en  $\varnothing 10 \times 15$  cm, para determinar su resistencia a compresión. Se ha estudiado el comportamiento en hormigones de muy distinta calidad, para lo que se ha dosificado:

Hormigón de muy mala calidad.....  $f_c \approx 20$  MPa .....  $a/c = 0,90$

Hormigón de calidad media.....  $f_c \approx 35$  MPa .....  $a/c = 0,65$

Hormigón de buena calidad.....  $f_c \approx 50$  MPa .....  $a/c = 0,45$

Cada uno de estos hormigones se ha dosificado para una consistencia plástica (3-5 en el cono de Abrams) y para una consistencia líquida ( $\approx 20$  en el cono de Abrams), por lo que se tiene un total de 6 hormigones.

Una vez han endurecido, se mide la resistencia a diferentes alturas mediante ensayos no destructivos: ultrasonidos y esclerómetro. Después se sacan varios testigos de cada pilar de  $\varnothing 10 \times 15$  cm, y se cortan las probetas para que tengan una altura de 15 cm y así tener las mismas dimensiones y esbeltez que los testigos extraídos de los pilares.

Por último, se comprueba la diferencia de resistencias a lo largo de la altura de los pilares rompiendo testigos y probetas, y con ello se puede concluir si ha sido una buena elección dejar de utilizar este coeficiente de reducción.

### 4.1. Dosificaciones

Dosificar el hormigón consiste en calcular la proporción de los materiales que lo componen para conseguir las características deseadas de compacidad, resistencia, durabilidad...

Existen varios métodos de dosificación, que pueden dividirse fundamentalmente en dos grupos: aquellos que utilizan como dato principal y de partida la dosificación del cemento, y otros que se basan en las resistencias mecánicas del hormigón. Dentro del primer grupo, los métodos más utilizados son el de Fuller, el de Bolomey y el de Faury (Fernández Cánovas, 1996). El método utilizado para el cálculo de las dosificaciones de este trabajo es el de Fuller.

#### 4.1.1. Caracterización de los áridos

El análisis granulométrico de un árido consiste en definir la distribución de las partículas que lo forman por tamaños, es decir, en separar al árido en diferentes divisiones de partículas del mismo tamaño, o de tamaños comprendidos dentro de unos límites establecidos, y en encontrar el porcentaje de cada uno de estos en el árido. Esta distribución por tamaños se hace cribando el árido a través de una serie de tamices normalizados.

Las granulometrías de la arena y la grava se determinan por separado, calculando la granulometría de cada uno de ellos.



*Ilustración 4. Muestra inicial seca*

Tomando una muestra de arena en una bandeja, se deja en una estufa a 100°C para que esté completamente seca. Al día siguiente, se pasa la muestra por un cuarteador hasta quedar 430,00 gramos. Se lava bien la muestra para quitar los finos (partículas menores de 63  $\mu$ ), para que no se queden pegados a los áridos, y se vuelve a secar en la estufa a 100°C.

Al día siguiente, se procede al estudio de la granulometría de la arena. En primer lugar, se vuelve a pesar la muestra, esta vez lavada, para obtener el peso de los finos que se habían

quitado. La nueva muestra pesa ahora 375,00 gramos, por lo que había 55 gramos de finos. Se va pasando la muestra por los diferentes tamices y se va completando la tabla del análisis granulométrico.

Análisis granulométrico de la ARENA	
Muestra: 430,00 g	$m_{ar} = 4,03$
Tamaño máximo: 4	
Tamaño mínimo: 0	

Tamiz UNE	Retenido (g)	Retenido (%)	Retenido acumulado (%)	Pasa (%)
63	0	0	0	100
31,5	0	0	0	100
16	0	0	0	100
12,5	0	0	0	100
10	0	0	0	100
8	0	0	0	100
4	22,6	5,256	5,256	94,744
2	125,0	29,069	34,325	65,675
1	86,7	20,163	54,488	45,512
0,5	53,6	12,465	66,953	33,047
0,25	35,4	8,233	75,186	24,814
0,125	25,0	5,814	81,000	19,000
0,063	21,1	4,907	85,907	14,093
Pasa (finos)	55+5,6*	14,093		

Tabla 1. Análisis granulométrico de la arena

\*Al lavar la muestra inicial, no se habían ido todos los finos, sino que quedaron 5,6 gramos que pasaron por el tamiz de 63  $\mu$ , por eso se le suman a la diferencia entre la muestra inicial y la lavada.

Las filas marcadas en gris claro no forman parte de la serie normalizada de tamices, por lo que no contarán para el cálculo del módulo granulométrico, pero se incluyen para dar más información.



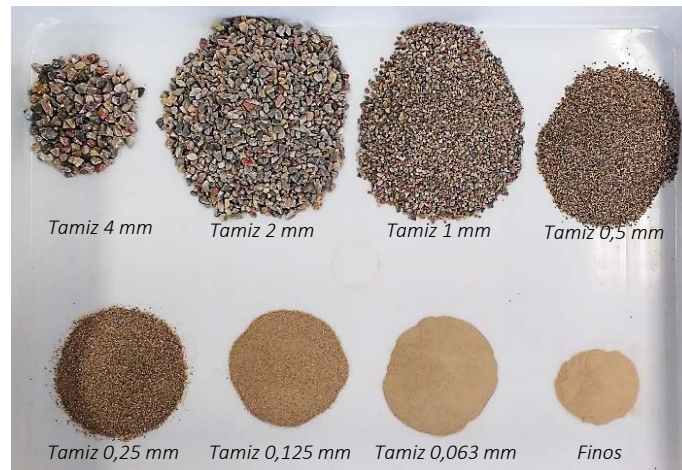


Ilustración 5. Dosificación de la arena

Análisis granulométrico de la GRAVA	
Muestra: 1727,40 g	$m_{gr} = 7,52$
Tamaño máximo: 10	
Tamaño mínimo: 2	

Tamiz UNE	Retenido (g)	Retenido (%)	Retenido acumulado (%)	Pasa (%)
63	0	0	0	100
31,5	0	0	0	100
16	0	0	0	100
12,5	0	0	0	100
10	138,8	8,04	8,04	91,96
8	876,8	50,76	58,79	41,21
6,3	439,3	25,43	84,22	15,78
4	250,8	14,52	98,74	1,26
2	5,9	0,34	99,09	0,91
Finos	15,8	0,91	100,00	0,00

Tabla 2. Análisis granulométrico de la grava

Para un tamaño máximo de árido de 12,5 mm, que es el tamaño máximo de árido con el que se va a trabajar, la parábola de Fuller, necesaria para el cálculo de los porcentajes de arena y grava en las mezclas, quedaría de la siguiente forma:

Parábola de Fuller, m = 5,44		
Tamiz UNE	Pasa (%)	Retenido acumulado (%)
63	100	0,00
31,5	100	0,00
16	100	0,00
8	80,0	20,00
4	56,6	43,43
2	40,0	60,00
1	28,3	71,72
0,5	20,0	80,00
0,25	14,1	85,86
0,125	10,0	90,00
0,063	7,1	92,90

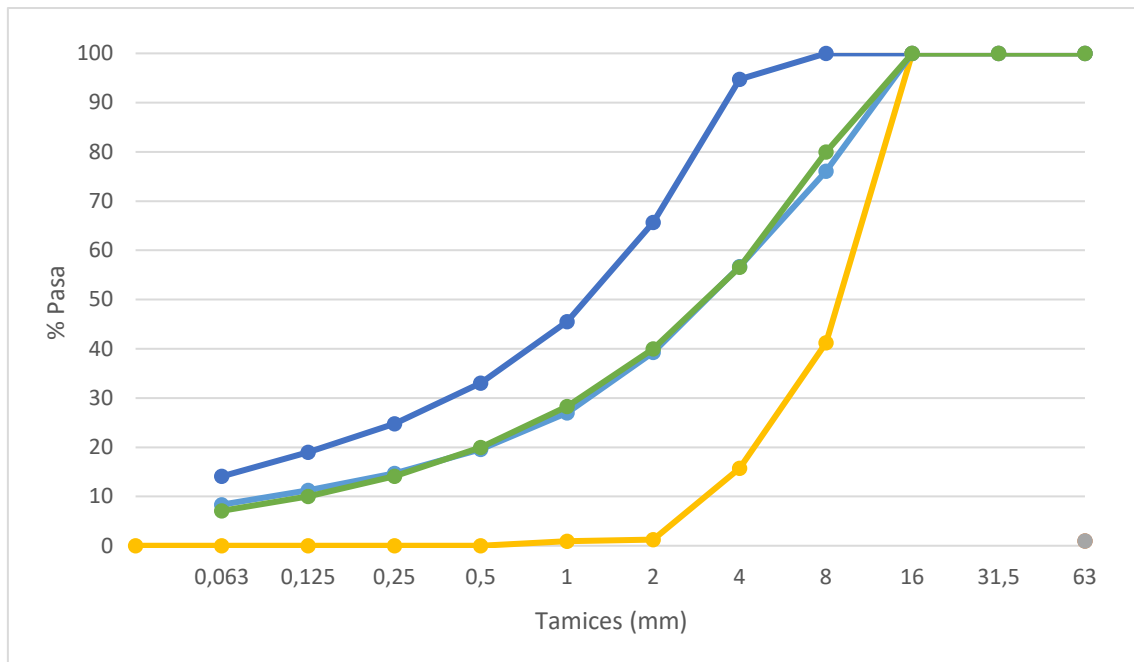
Tabla 3. Parábola de Fuller

Los porcentajes x e y, en peso, de arena y grava respectivamente, se determinan a partir de sus módulos granulométricos  $m_{ar}$  y  $m_{gr}$  planteando el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{cases} m_{ar} \frac{x}{100} + m_{gr} \frac{y}{100} = m \\ x + y = 100 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{4,03 x}{100} + \frac{7,49 y}{100} = 5,44 \\ x + y = 100 \end{cases} \longrightarrow \begin{cases} x = 59,7 \% \\ y = 40,3 \% \end{cases}$$

Las curvas granulométricas de la arena (curva azul) y de la grava (amarilla), y la parábola de Fuller (verde), son necesarias para poder trazar la curva granulométrica del árido total (curva azul claro).



Gráfica 1. Curvas granulométricas

#### 4.1.2. Dosificaciones

El cemento que se va a utilizar es CEM II 32,5 N, con una densidad  $\gamma_c = 3,10 \text{ kg/dm}^3$ .

Tanto el árido grueso triturado 4/12,5 como el árido fino triturado 0/4 tienen una densidad  $\gamma_{\text{áridos}} = 2,65 \text{ kg/dm}^3$ , y módulos granulométricos de  $m_{\text{gr}} = 7,52$  y  $m_{\text{ar}} = 4,03$ , respectivamente.

Para conseguir la consistencia deseada, vamos a utilizar un aditivo superplastificante de alto rendimiento (Sika Viscocrete 3425), que permite una reducción de agua del 20%. Su densidad es de  $\gamma_{\text{aditivo}} = 1,05 \text{ kg/dm}^3$ .

Tabla 5. Litros de agua por metro cúbico (en ausencia de aditivos).

Consistencia	Cono de Abrams (cm)	Árido rodado		Árido triturado	
		20	40	20	40
Seca	0 a 2	175	155	195	175
Plástica	3 a 5	190	170	210	190
Blanda	6 a 9	205	185	225	205
Fluida	10 a 15	220	200	240	220

**a) Hormigón  $f_c \approx 20$  MPa,  $a/c = 0,90$ , consistencia plástica.**

Consistencia plástica (tabla 5) para un árido triturado de tamaño máximo  $12,5 \approx 220$  L de agua. Como el aditivo supone una reducción del 20%, la cantidad de agua será  $220 \times 0,8 = 176$  L.

$$\text{Cemento} \rightarrow a/c = 0,9 \rightarrow c = 176/0,9 = 195,6 \text{ kg de cemento.}$$

Como el aditivo supone un 1% del peso del cemento, éste será de  $195,6 \times 0,01 = 1,96$  L, y al ser líquido, habrá que descontarlo del volumen de agua, por lo que la cantidad de agua final será  $176 - 1,96 = 174,04$  L de agua.

Para determinar las cantidades necesarias de cada material, suponiendo el cálculo para un metro cúbico de hormigón, hay que tener en cuenta la retracción que sufre el hormigón fresco, que puede suponerse del 2,5%. Es decir, que para obtener 1000 L de hormigón endurecido tendremos que fabricar 1025 L de hormigón fresco.

Por lo tanto, la suma del volumen de cada material debe ser 1025 L para obtener un metro cúbico de hormigón:

$$V_{\text{agua}} + V_{\text{cem}} + V_{\text{aditivo}} + V_{\text{áridos}} = 1025 \text{ L}$$

Por lo tanto:

$$V_{\text{áridos}} = 1025 - V_{\text{agua}} - V_{\text{cem}} - V_{\text{aditivo}} = 1025 - \frac{P_{\text{agua}}}{\gamma_{\text{agua}}} - \frac{P_{\text{cem}}}{\gamma_{\text{cem}}} - \frac{P_{\text{aditivo}}}{\gamma_{\text{aditivo}}}$$

$$V_{\text{áridos}} = 1025 - \frac{174,04}{1} - \frac{195,6}{3,10} - \frac{1,96}{1,05} = 786 \text{ dm}^3$$

Los áridos están formados por arena y grava, y como en este caso ambos tienen la misma densidad, el peso total de los áridos será igual al volumen total por la densidad.

$$P_{\text{total}} = V_{\text{áridos}} \times \gamma_{\text{áridos}} = 786 \times 2,65 = 2082,9 \text{ kg}$$

Por lo tanto, la cantidad de arena y de grava será igual al peso total de los áridos por el porcentaje de cada uno de ellos, antes calculado:

$$P_{\text{arena}} = 59,7\% \text{ de } 2082,9 = 1242,5 \text{ kg}; P_{\text{grava}} = 40,3\% \text{ de } 2082,9 = 840,43 \text{ kg}$$

El día 18/04/18, día que se va a hormigonar, se mide el contenido de humedad de la arena. El contenido de humedad es del 2,2%, y teniendo en cuenta que el coeficiente de

absorción de los áridos es del 1%, hay un exceso de agua del 1,2%. Una vez corregida la dosificación con estos datos, se calcula la cantidad de cada componente para 35 L de hormigón y el resultado final es:

	Dosificación inicial (kg)	Dosificación con corrección de humedad (kg)	Dosificación para 35L de hormigón (kg)
Agua	174,04	159,13	5,57
Cemento	195,6	195,6	6,84
Aditivo	1,96	1,96	0,068
Arena	1242,5	1257,41	44,01
Grava	840,43	840,43	29,42

**b) Hormigón  $f_c \approx 20$  MPa,  $a/c = 0,90$ , consistencia líquida.**

Consistencia líquida (tabla 5) para un árido triturado de tamaño máximo 12,5  $\approx$  260 L de agua. Como el aditivo supone una reducción del 20%, la cantidad de agua será  $260 \times 0,8 = 208$ L.

Cemento  $\rightarrow a/c = 0,9 \rightarrow c = 208/0,9 = 231,1$  kg de cemento.

Como el aditivo supone un 1% del peso del cemento, éste será de  $231,1 \times 0,01 = 2,31$  kg, y al ser líquido, habrá que descontarlo del volumen de agua, por lo que la cantidad de agua final será  $208 - 2,311 = 205,69$  L de agua.

La suma del volumen de cada material debe ser 1025 L para obtener un metro cúbico de hormigón:

$$V_{\text{agua}} + V_{\text{cem}} + V_{\text{aditivo}} + V_{\text{áridos}} = 1025 \text{ L}$$

Por lo tanto:

$$V_{\text{áridos}} = 1025 - V_{\text{agua}} - V_{\text{cem}} - V_{\text{aditivo}} = 1025 - \frac{P_{\text{agua}}}{\gamma_{\text{agua}}} - \frac{P_{\text{cem}}}{\gamma_{\text{cem}}} - \frac{P_{\text{aditivo}}}{\gamma_{\text{aditivo}}}$$

$$V_{\text{áridos}} = 1025 - \frac{205,689}{1} - \frac{231,11}{3,10} - \frac{2,311}{1,05} = 742,56 \text{ dm}^3$$

Los áridos están formados por arena y grava, y como en este caso ambos tienen la misma densidad, el peso total de los áridos será igual al volumen total por la densidad.

$$P_{\text{total}} = V_{\text{áridos}} \times \gamma_{\text{áridos}} = 742,56 \times 2,65 = 1967,78 \text{ kg}$$

Como se van a utilizar los mismos áridos en todos los hormigones, los porcentajes de cada uno de ellos del total del peso de árido va a ser constante: 59,7% para la arena y 40,3% para la grava.

$$P_{\text{arena}} = 59,7\% \text{ de } 1967,78 = 1173,81 \text{ kg}; P_{\text{grava}} = 40,3\% \text{ de } 1967,78 = 793,97 \text{ kg}$$

El día 18/04/18, día que se va a hormigonar, se mide el contenido de humedad de la arena. El contenido de humedad es del 2,2%, y teniendo en cuenta que el coeficiente de absorción de los áridos es del 1%, hay un exceso de agua del 1,2%. Una vez corregida la dosificación con estos datos, se calcula la cantidad de cada componente para 35 L de hormigón y el resultado final es:

	Dosificación inicial (kg)	Dosificación con corrección de humedad (kg)	Dosificación para 35L de hormigón (kg)
Agua	205,69	191,6	6,71
Cemento	231,1	231,1	8,09
Aditivo	2,31	2,31	0,081
Arena	1173,81	1187,89	41,58
Grava	793,97	793,97	27,79

**c) Hormigón  $f_c \approx 35 \text{ MPa}$ ,  $a/c = 0,65$ , consistencia plástica.**

Consistencia plástica (tabla 5) para un árido triturado de tamaño máximo 12,5  $\approx$  220 L de agua. Como el aditivo supone una reducción del 20%, la cantidad de agua será  $2205 \times 0,8 = 176 \text{ L}$ .

$$\text{Cemento} \rightarrow a/c = 0,65 \rightarrow c = 176/0,65 = 270,8 \text{ kg de cemento.}$$

Como el aditivo supone un 1% del peso del cemento, éste será de  $270,8 \times 0,01 = 2,71 \text{ kg}$ , y al ser líquido, habrá que descontarlo del volumen de agua, por lo que la cantidad de agua final será  $176 - 2,71 = 173,29 \text{ L de agua}$ .

La suma del volumen de cada material debe ser 1025 L para obtener un metro cúbico de hormigón:

$$V_{\text{agua}} + V_{\text{cem}} + V_{\text{aditivo}} + V_{\text{áridos}} = 1025 \text{ L}$$

Por lo tanto:

$$V_{\text{áridos}} = 1025 - V_{\text{agua}} - V_{\text{cem}} - V_{\text{aditivo}} = 1025 - \frac{P_{\text{agua}}}{\gamma_{\text{agua}}} - \frac{P_{\text{cem}}}{\gamma_{\text{cem}}} - \frac{P_{\text{aditivo}}}{\gamma_{\text{aditivo}}}$$

$$V_{\text{áridos}} = 1025 - \frac{173,29}{1} - \frac{270,8}{3,10} - \frac{2,71}{1,05} = 761,785 \text{ dm}^3$$

Los áridos están formados por arena y grava, y como en este caso ambos tienen la misma densidad, el peso total de los áridos será igual al volumen total por la densidad.

$$P_{\text{total}} = V_{\text{áridos}} \times \gamma_{\text{áridos}} = 761,785 \times 2,65 = 2018,73 \text{ kg}$$

Como se van a utilizar los mismos áridos en todos los hormigones, los porcentajes de cada uno de ellos del total del peso de árido va a ser constante: 59,7% para la arena y 40,3% para la grava.

$$P_{\text{arena}} = 59,7\% \text{ de } 2018,73 = 1204,2 \text{ kg}; P_{\text{grava}} = 40,3\% \text{ de } 2018,73 = 814,53 \text{ kg}$$

El día 17/04/18, día que se va a hormigonar, se mide el contenido de humedad de la arena. El contenido de humedad es del 2,5%, y teniendo en cuenta que el coeficiente de absorción de los áridos es del 1%, hay un exceso de agua del 1,5%. Una vez corregida la dosificación con estos datos, se calcula la cantidad de cada componente para 35 L de hormigón y el resultado final es:

	Dosificación inicial (kg)	Dosificación con corrección de humedad (kg)	Dosificación para 35L de hormigón (kg)
Agua	173,29	155,23	5,43
Cemento	270,8	270,8	9,48
Aditivo	2,71	2,71	0,095
Arena	1204,2	1222,26	42,78
Grava	814,53	814,53	28,51

**d) Hormigón  $f_c \approx 35$  MPa,  $a/c = 0,65$ , consistencia líquida.**

Consistencia líquida (tabla 5) para un árido triturado de tamaño máximo 12,5  $\approx 260$  L de agua. Como el aditivo supone una reducción del 20%, la cantidad de agua será  $260 \times 0,8 = 208$  L.

Cemento  $\rightarrow a/c = 0,65 \rightarrow c = 208/0,65 = 320$  kg de cemento.

Como el aditivo supone un 1% del peso del cemento, éste será de  $320 \times 0,01 = 3,2$  kg, y al ser líquido, habrá que descontarlo del volumen de agua, por lo que la cantidad de agua final será  $208 - 3,2 = 204,8$  L de agua.

La suma del volumen de cada material debe ser 1025 L para obtener un metro cúbico de hormigón:

$$V_{\text{agua}} + V_{\text{cem}} + V_{\text{aditivo}} + V_{\text{áridos}} = 1025 \text{ L}$$

Por lo tanto:

$$V_{\text{áridos}} = 1025 - V_{\text{agua}} - V_{\text{cem}} - V_{\text{aditivo}} = 1025 - \frac{P_{\text{agua}}}{\gamma_{\text{agua}}} - \frac{P_{\text{cem}}}{\gamma_{\text{cem}}} - \frac{P_{\text{aditivo}}}{\gamma_{\text{aditivo}}}$$

$$V_{\text{áridos}} = 1025 - \frac{204,8}{1} - \frac{320}{3,10} - \frac{3,2}{1,05} = 713,93 \text{ dm}^3$$

Los áridos están formados por arena y grava, y como en este caso ambos tienen la misma densidad, el peso total de los áridos será igual al volumen total por la densidad.

$$P_{\text{total}} = V_{\text{áridos}} \times \gamma_{\text{áridos}} = 713,93 \times 2,65 = 1891,91 \text{ kg}$$

Como se van a utilizar los mismos áridos en todos los hormigones, los porcentajes de cada uno de ellos del total del peso de árido va a ser constante: 59,7% para la arena y 40,3% para la grava.

$$P_{\text{arena}} = 59,7\% \text{ de } 1891,91 = 1128,55 \text{ kg}; P_{\text{grava}} = 40,3\% \text{ de } 1891,91 = 763,36 \text{ kg}$$

El día 17/04/18, día que se va a hormigonar, se mide el contenido de humedad de la arena. El contenido de humedad es del 2,5%, y teniendo en cuenta que el coeficiente de absorción de los áridos es del 1%, hay un exceso de agua del 1,5%. Una vez corregida la dosificación con estos datos, se calcula la cantidad de cada componente para 35 L de hormigón y el resultado final es:



	Dosificación inicial (kg)	Dosificación con corrección de humedad (kg)	Dosificación para 35L de hormigón (kg)
Agua	204,8	187,87	6,58
Cemento	320	320	11,2
Aditivo	3,2	3,2	0,112
Arena	1128,55	1145,48	40,09
Grava	763,36	763,36	26,72

**e) Hormigón  $f_c \approx 50$  MPa,  $a/c = 0,45$ , consistencia plástica.**

Consistencia plástica (tabla 5) para un árido triturado de tamaño máximo 12,5  $\approx$  220 L de agua. Como el aditivo supone una reducción del 20%, la cantidad de agua será  $220 \times 0,8 = 176$  L.

Cemento  $\rightarrow a/c = 0,45 \rightarrow c = 176/0,45 = 391,1$  kg de cemento.

Como el aditivo supone un 1% del peso del cemento, éste será de  $391,1 \times 0,01 = 3,91$  kg, y al ser líquido, habrá que descontarlo del volumen de agua, por lo que la cantidad de agua final será  $176 - 3,91 = 172,09$  L de agua.

La suma del volumen de cada material debe ser 1025 L para obtener un metro cúbico de hormigón:

$$V_{\text{agua}} + V_{\text{cem}} + V_{\text{aditivo}} + V_{\text{áridos}} = 1025 \text{ L}$$

Por lo tanto:

$$V_{\text{áridos}} = 1025 - V_{\text{agua}} - V_{\text{cem}} - V_{\text{aditivo}} = 1025 - \frac{P_{\text{agua}}}{\gamma_{\text{agua}}} - \frac{P_{\text{cem}}}{\gamma_{\text{cem}}} - \frac{P_{\text{aditivo}}}{\gamma_{\text{aditivo}}}$$

$$V_{\text{áridos}} = 1025 - \frac{172,09}{1} - \frac{391,1}{3,10} - \frac{3,91}{1,05} = 723,023 \text{ dm}^3$$

Los áridos están formados por arena y grava, y como en este caso ambos tienen la misma densidad, el peso total de los áridos será igual al volumen total por la densidad.

$$P_{\text{total}} = V_{\text{áridos}} \times \gamma_{\text{áridos}} = 723,023 \times 2,65 = 1916,01 \text{ kg}$$

Como se van a utilizar los mismos áridos en todos los hormigones, los porcentajes de cada uno de ellos del total del peso de árido va a ser constante: 59,7% para la arena y 40,3% para la grava.

$$P_{\text{arena}} = 59,7\% \text{ de } 1916,01 = 1142,93 \text{ kg}; P_{\text{grava}} = 40,3\% \text{ de } 1916,01 = 773,08 \text{ kg}$$

El día 17/04/18, día que se va a hormigonar, se mide el contenido de humedad de la arena. El contenido de humedad es del 2,5%, y teniendo en cuenta que el coeficiente de absorción de los áridos es del 1%, hay un exceso de agua del 1,5%. Una vez corregida la dosificación con estos datos, se calcula la cantidad de cada componente para 35 L de hormigón y el resultado final es:

	Dosificación inicial (kg)	Dosificación con corrección de humedad (kg)	Dosificación para 35L de hormigón (kg)
Agua	172,09	154,95	5,42
Cemento	391,1	391,1	13,69
Aditivo	3,91	3,91	0,137
Arena	1142,93	1160,07	40,6
Grava	773,08	773,08	27,06

**f) Hormigón  $f_c \approx 50 \text{ MPa}$ ,  $a/c = 0,45$ , consistencia líquida.**

Consistencia líquida (tabla 5) para un árido triturado de tamaño máximo 12,5  $\approx$  260 L de agua. Como el aditivo supone una reducción del 20%, la cantidad de agua será  $260 \times 0,8 = 208$  L.

$$\text{Cemento} \rightarrow a/c = 0,45 \rightarrow c = 208/0,45 = 462,2 \text{ kg de cemento.}$$

Como el aditivo supone un 1% del peso del cemento, éste será de  $462,2 \times 0,01 = 4,62$  kg, y al ser líquido, habrá que descontarlo del volumen de agua, por lo que la cantidad de agua final será  $208 - 4,62 = 203,38$  L de agua.

La suma del volumen de cada material debe ser 1025 L para obtener un metro cúbico de hormigón:

$$V_{\text{agua}} + V_{\text{cem}} + V_{\text{aditivo}} + V_{\text{áridos}} = 1025 \text{ L}$$

Por lo tanto:

$$V_{\text{áridos}} = 1025 - V_{\text{agua}} - V_{\text{cem}} - V_{\text{aditivo}} = 1025 - \frac{P_{\text{agua}}}{\gamma_{\text{agua}}} - \frac{P_{\text{cem}}}{\gamma_{\text{cem}}} - \frac{P_{\text{aditivo}}}{\gamma_{\text{aditivo}}}$$

$$V_{\text{áridos}} = 1025 - \frac{203,378}{1} - \frac{462,22}{3,10} - \frac{4,622}{1,05} = 668,117 \text{ dm}^3$$

Los áridos están formados por arena y grava, y como en este caso ambos tienen la misma densidad, el peso total de los áridos será igual al volumen total por la densidad.

$$P_{\text{total}} = V_{\text{áridos}} \times \gamma_{\text{áridos}} = 668,117 \times 2,65 = 1770,51 \text{ kg}$$

Como se van a utilizar los mismos áridos en todos los hormigones, los porcentajes de cada uno de ellos del total del peso de árido va a ser constante: 59,7% para la arena y 40,3% para la grava.

$$P_{\text{arena}} = 59,7\% \text{ de } 1770,51 = 1056,13 \text{ kg}, P_{\text{grava}} = 40,3\% \text{ de } 1770,51 = 714,37 \text{ kg}$$

El día 17/04/18, día que se va a hormigonar, se mide el contenido de humedad de la arena. El contenido de humedad es del 2,5%, y teniendo en cuenta que el coeficiente de absorción de los áridos es del 1%, hay un exceso de agua del 1,5%. Una vez corregida la dosificación con estos datos, se calcula la cantidad de cada componente para 35 L de hormigón y el resultado final es:

	Dosificación inicial (kg)	Dosificación con corrección de humedad (kg)	Dosificación para 35L de hormigón (kg)
Agua	203,38	187,54	6,56
Cemento	462,2	462,2	16,18
Aditivo	4,62	4,62	0,162
Arena	1056,13	1071,98	37,52
Grava	714,37	714,37	25

## 4.2. Proceso de hormigonado

Como se ha comentado anteriormente, las dosificaciones se corrigen teniendo en cuenta la humedad de los áridos, medida con un medidor de humedad.



Ilustración 6. Medidor de humedad

Debido a que sólo se dispone de 4 encofrados, el hormigonado se divide en dos días: el primero se hormigonan 4 pilares (17/04/18) y al día siguiente se desencofran dos de ellos para proceder al hormigonado de los dos últimos.

El proceso de hormigonado es el siguiente:



1. Se pesa cada uno de los componentes secos del hormigón con la balanza y se echa en la hormigonera.



2. Se mezclan la grava, la arena y el cemento con la hormigonera.



3. Se echa la mitad de agua a lo anterior y se sigue mezclando.

La otra mitad de agua se echa junto con el superplastificante.



4. una vez amasado todo, se procede a la comprobación de la consistencia mediante el cono de Abrams.



5. Se echa una parte de hormigón y se pica 25 veces. Después se echa un poco más y se vuelve a picar 25 veces para coser con lo anterior. Se termina de llenar y se vuelve a picar 25 veces.



6. Se levanta el cono poco a poco y rectamente. Se mide lo que ha bajado el hormigón\*.



7. Se va vertiendo el hormigón en el encofrado poco a poco mientras se vibra.



8. Se rellenan 3 probetas de cada dosificación y se vibran ligeramente.



*Ilustración 7. Encofrados pilares y probetas*

Al día siguiente, en el caso de los hormigones  $a/c = 0,45$  y  $a/c = 0,65$ , se desencofran tanto los pilares como las probetas y se envuelven en papel film para un mejor curado.

En el caso del hormigón  $a/c = 0,9$ , se desencofra a los 5 días para asegurar que ha endurecido lo suficiente.



*Ilustración 8. Proceso de curado*

Se puede observar que el hormigón  $a/c = 0,9$  de consistencia líquida, ha retraído notablemente en un solo día.



*Ilustración 9. Retracción del hormigón*

\*Los resultados obtenidos del cono de Abrams para las diferentes dosificaciones son:

Dosificación	Resultado cono de Abrams (cm)
a/c = 0,45, consistencia plástica	5
a/c = 0,45, consistencia líquida	25
a/c = 0,65, consistencia plástica	4
a/c = 0,65, consistencia líquida	19
a/c = 0,90, consistencia plástica	3
a/c = 0,90, consistencia líquida	20

*Tabla 4. Resultados cono de Abrams*

### 4.3. Ensayos

#### 4.3.1. Métodos no destructivos

El objetivo de estos ensayos es determinar la calidad del hormigón en obra sin romper ni destruir la estructura interna del mismo. Estos ensayos son objeto de estudio en gran parte de los laboratorios especializados y se encuentran en continuo desarrollo y perfeccionamiento. Se utilizan para medir resistencias en una estructura real, bien para saber su condición debido al uso, o bien tras un incendio, sismo... para determinar los daños que haya sufrido.

Existe un amplio rango de métodos de ensayo no destructivos, pero todos comparten el mismo objeto: determinar aquellas características (dureza, densidad, humedad...) que ofrecen la posibilidad de estimar la resistencia del hormigón. En este estudio se emplearon dos métodos, el esclerométrico y el ultrasonidos.

##### a) Métodos esclerométricos:

El ensayo esclerométrico permite determinar la dureza superficial del hormigón mediante tres formas: a través de la medición de un rebote, es decir, de la energía residual de un impacto sobre la superficie de hormigón; a través de la marca resultante del choque de una bola con dicha superficie; o bien a través de la profundidad de penetración de un clavo. El instrumento utilizado se denomina esclerómetro, y existen diferentes tipos en función del método empleado: el martillo Schmidt, el martillo Frank y el esclerómetro Windsor.

El aparato que se ha empleado en este trabajo ha sido el martillo Schmidt, que debido a su sencillez y a su reducido coste es el más común. Se determina la dureza superficial en función del rechazo de un martillo de acero al chocar con la superficie del hormigón. El índice de rebote se obtiene calculando la mediana de un conjunto de medidas, tras limpiar y alisar previamente la superficie que se va a ensayar. Los resultados obtenidos dependen de muchas variables, por lo que puede conducir a conclusiones erróneas (Jiménez Montoya, 2000).

En este estudio se han tomado 18 medidas de cada tramo de los pilares, 9 por cada una de las dos caras opuestas.





*Ilustración 10. Ensayo esclerométrico*

b) Ensayo por ultrasonidos:

El fundamento de este ensayo es la relación existente entre la velocidad de propagación de una onda progresiva a través de un material homogéneo e isótropo y las constantes elásticas del medio, que están ligadas con su resistencia. Es decir, se basa en la propagación de las ondas acústicas a través del material.

La velocidad de propagación de dichas ondas depende de la densidad del material, y una alta densidad puede asociarse a una alta resistencia. Además, este ensayo permite detectar discontinuidades en el material, tanto superficiales como internas.



*Ilustración 11. Ultrasonidos*

#### 4.3.2. Métodos destructivos

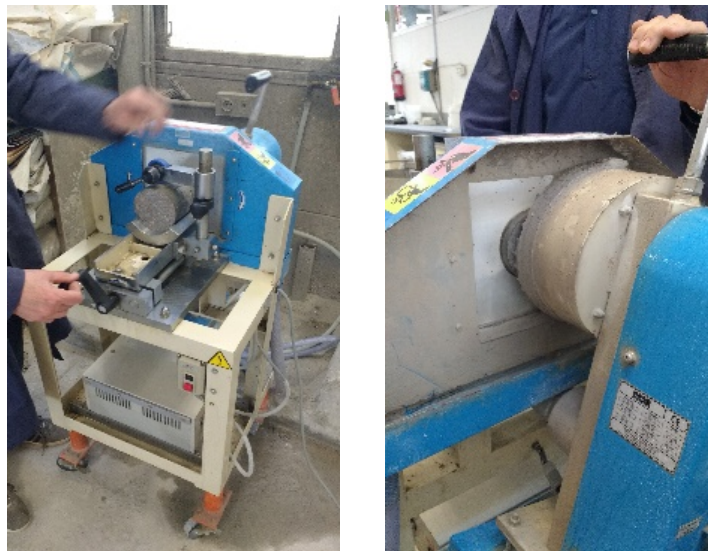
Son aquellos que determinan la resistencia del hormigón mediante la rotura de probetas o piezas de mayor tamaño. Estas probetas pueden fabricarse en moldes con el objeto de ser ensayados, o bien extraerse de una estructura ya construida.

Para este trabajo se sacarán varios testigos a lo largo de cada pilar para conocer la resistencia a lo largo de su altura. Además, se van a romper tres probetas, una a los 7 y dos a los 28 días, tras haberlas cortado para que su altura sea de 15 cm, igual que los testigos extraídos de los pilares.

#### 4.3.3. Procedimiento

El día 24 de abril se pulen todas las probetas con el fin de conseguir una superficie perfectamente lisa y perpendicular a la superficie donde se colocarán para su rotura.

Las que no se van a romper ese día, se vuelven a envolver en papel film para su correcto endurecimiento.



*Ilustración 12. Pulido de las probetas*

Ese mismo día, a los 7 días de haber hormigonado los cuatro primeros pilares, se procede a la rotura de una probeta correspondiente a cada uno de ellos. Los resultados obtenidos son los siguientes:

Hormigón	Fuerza (kN)	Resistencia (MPa)	Tiempo (s)
a/c = 0'45, plástico	436'2	55'54	94
a/c = 0'45, líquido	397'9	50'66	85
a/c = 0'65, plástico	287'7	36'63	62
a/c = 0'65, líquido	259'9	33'1	57

Tabla 5. Rotura probetas a compresión simple a los 7 días



Ilustración 13. Ensayo a compresión de las probetas

Al día siguiente, 25 de abril, se rompen las dos probetas restantes, ya que se habían hormigonado un día más tarde. Los resultados obtenidos son:

Hormigón	Fuerza (kN)	Resistencia (MPa)	Tiempo (s)
a/c = 0'90, plástica	147'2	18'74	34
a/c = 0'90, líquida	108'1	13'77	25

Tabla 6. Rotura probetas a compresión simple a los 7 días (a/c=0,90)



Ilustración 14. Rotura probetas

En las probetas del hormigón de peor calidad ( $a/c=0'9$ ) se puede observar perfectamente el modo de rotura de una probeta cilíndrica a compresión simple: se forman dos conos unidos por su vértice.

Esto se debe a que la base superior e inferior de la probeta no deforma, ya que los platos que la comprimen son más grandes que ellas. Por tanto, el aplastamiento se produce en diagonal, desde el perímetro de las bases hasta el centro de la probeta, produciendo esos dos conos enfrentados.



*Ilustración 15. Forma de rotura de una probeta cilíndrica bajo compresión simple*

El día 15 de mayo, a los 28 días de hormigonar los cuatro primeros pilares, se realizan los ensayos no destructivos: ultrasonidos y esclerómetro. Se dividen los pilares en tramos de 15 cm, dando lugar a 8 zonas de ensayo en cada uno de ellos, siendo el tramo 1 la base del pilar y el tramo 8 la zona superior.

Para el ensayo de ultrasonidos se toman 3 medidas dentro de cada tramo para luego sacar la media aritmética y llegar al resultado correcto, en  $\mu s$ . Una vez calculado el tiempo que tardan las ondas en atravesar cada tramo, se comparan los resultados: en los primeros tramos, en la base del pilar, el tiempo es menor, ya que al ser más compacto la onda atraviesa el material con más facilidad. Estos tiempos se pasan a m/s.

ULTRASONIDOS								
<b>0,45 BLANDO</b>	TRAMO 1	TRAMO 2	TRAMO 3	TRAMO 4	TRAMO 5	TRAMO 6	TRAMO 7	TRAMO 8
150,5	34,7	35,7	35,6	35,3	35,6	37,3	35,9	37,2
151,2	34,9	35,8	35,3	35,2	35,6	37	36	35,2
151,3	35,1	35,5	34,9	35,2	37,2	36	35,4	36,2
151	34,9	35,66667	35,26667	35,23333	36,13333	36,76667	35,76667	36,2
velocidad (m/s)	4326,648	4233,645	4281,664	4285,714	4178,967	4106,981	4221,808	4171,271
<b>0,45 SECO</b>	TRAMO 1	TRAMO 2	TRAMO 3	TRAMO 4	TRAMO 5	TRAMO 6	TRAMO 7	TRAMO 8
150,2	35,5	34,9	35,2	35,2	34,8	35,7	35,2	35,4
150,4	34,6	34,3	34,5	34,2	34,7	35	35,2	34,7
150,4	35,1	34,7	34,7	35,2	34,7	35,8	35,1	35,7
150,3333333	35,06667	34,63333	34,8	34,86667	34,73333	35,5	35,16667	35,26667
velocidad (m/s)	4287,072	4340,712	4319,923	4311,663	4328,215	4234,742	4274,882	4262,76
<b>0,65 BLANDO</b>	TRAMO 1	TRAMO 2	TRAMO 3	TRAMO 4	TRAMO 5	TRAMO 6	TRAMO 7	TRAMO 8
151	37,1	37,7	37,4	36,2	36,7	36,2	37,2	37,9
150,7	36,6	36	36,7	36,4	36,6	36,3	37,1	37,5
150,7	36	38,7	36,7	36,7	36,7	36,2	36,7	37,4
150,8	36,56667	37,46667	36,93333	36,43333	36,66667	36,23333	37	37,6
velocidad (m/s)	4123,974	4024,911	4083,032	4139,067	4112,727	4161,914	4075,676	4010,638
<b>0,65 SECO</b>	TRAMO 1	TRAMO 2	TRAMO 3	TRAMO 4	TRAMO 5	TRAMO 6	TRAMO 7	TRAMO 8
150,3	36,6	37,2	36	36,4	35,7	36,2	35,5	35,8
150,5	36	36,5	36,2	35,7	36,4	34,7	35,8	36,1
151,3	35,6	36,1	35,5	36,2	36	35,8	35,4	36,3
150,7	36,06667	36,6	35,9	36,1	36,03333	35,56667	35,56667	36,06667
velocidad (m/s)	4178,373	4117,486	4197,772	4174,515	4182,239	4237,113	4237,113	4178,373

Tabla 7. Resultados ultrasonidos

Para el ensayo esclerométrico se toman 9 medidas de cada tramo de los pilares en dos de sus caras, es decir, un total de 18 medidas en cada tramo, para luego sacar la mediana de dichos valores y obtener un índice de rebote, a partir del cual se podrá calcular la resistencia del material.

		ESCLERÓMETRO																								
		TRAMO 1		TRAMO 2		TRAMO 3		TRAMO 4		TRAMO 5		TRAMO 6		TRAMO 7		TRAMO 8										
0,45 BLANDO	cara 1	35,1	36,4	36,7	36,2	35,4	38,1	35,1	39	37,1	36,9	37,1	35,8	32,7	39,6	36,9	38,9	35,8	36,4	39,8	34,8	38,3	37	30,7	34,4	
		33,7	34,4	37,9	41,4	37,7	38,6	37,4	36,7	40,9	37,4	37,4	34,7	37,1	39,3	36,3	38,5	36,9	36,1	38,8	35,3	38,4	37,7	35,2	35	
		32,5	35	32,8	34,6	37,3	39,1	39,7	36,5	40,2	36,2	38,5	32,2	37,2	36	36,3	37,4	35,5	33	39,1	35,2	37,1	36,4	34,8	33,9	
	IR		35,0			37,7			37,4				36,9		36,9			36,4			38,3				35,0	
	cara 2																									
0,45 SECO	TRAMO 1	32,4	32	36,4	37,4	34,3	37	39,6	36,7	38,7	38,8	37,9	40,9	36,6	38	41,8	39	36,7	39,3	38,6	34,6	35,5	41,5	36,8	33,5	
		33,3	37,2	37,6	32	35,4	37,7	39,8	39,7	42,6	39,5	39,9	39,2	40,3	41,3	38,5	38,9	34,8	42	38,4	36,7	38,6	38,7	34,6	35,9	
		34,3	35,5	36,3	40	41	40	41,5	36,8	38,8	39,7	40	38,7	43,7	40,5	39,5	41,1	38,2	37,4	39,8	36,7	41,9	38,7	37,7	34,2	
	IR		35,5			37,4			39,6			39,5		40,3			38,9			38,4				36,8		
	IR medio		<b>35,3</b>			<b>37,6</b>			<b>38,5</b>			<b>38,2</b>		<b>38,6</b>			<b>37,7</b>			<b>38,4</b>			<b>38,4</b>		<b>35,9</b>	
0,45 SECO	TRAMO 1	33,5	38,9	38,3	40,3	38	39,1	40,1	38	39	42,5	35,3	42,2	39,7	41,9	40,5	37,2	39	39,7	42,6	40,6	39,6	37,6	34,8	36,1	
	cara 1	35,3	34,4	40,5	42,1	39,7	41	40,8	39,8	41,5	40,1	41	40,6	41,6	42,6	41,8	35,3	39,8	40,5	40,2	39,9	37,2	41,2	42,1	37,7	
		34,3	38	34,8	41,2	41,9	40,9	41,7	39,5	41	37,1	40,7	39,2	39,5	37,9	40,9	41,5	40,2	34,7	39,4	41,2	38,7	39,2	41,5	34,5	
	IR		35,3		40,9			40,1			40,6			40,9			39,7			39,9			37,7			
	cara 2																									
0,45 SECO	TRAMO 1	32,9	36,5	39,6	40,9	41,9	40	43,5	41,1	39,6	42,9	41,5	41,2	39,1	36,3	40,3	41	39,5	40,2	40,8	39,8	36,4	42,8	37,3	39,7	
		34,1	40,6	37,7	43,8	41	42,8	41,6	38,6	40,4	41,5	41,5	39,7	43,2	39,3	36,7	40,6	39,1	40,2	39,9	36,6	39,9	40,9	35,9	38,7	
		34,4	38,9	40,6	40,1	42,3	42	41	39,4	42,3	41,2	42,9	38,6	40,6	40,1	38,6	38,6	36,9	40,9	40,6	38,9	37	38,7	37,9	41,2	
	IR		37,7		41,9			41,0			41,5			39,3			40,2			39,8			38,7			
	IR medio		<b>36,5</b>		<b>41,4</b>			<b>40,6</b>			<b>41,1</b>			<b>40,1</b>			<b>40,0</b>			<b>39,9</b>			<b>39,9</b>		<b>38,2</b>	

Tabla 8. Resultados esclerómetro

<b>0,65 BLANDO</b>	cara 1	TRAMO 1	TRAMO 2	TRAMO 3	TRAMO 4	TRAMO 5	TRAMO 6	TRAMO 7	TRAMO 8																				
		26,5	26,5	30,2	30,4	24,2	32,5	27,2	32,1	28,7	29,7	30,9	28,7	32,7	27,4	29,7	28,4	32,6	29,9	27,7	28,2	32,1	31,9	31,8	27				
		27,6	25,7	26,2	25,8	31,3	26,5	30,1	31,6	28,2	27,3	29,7	28,2	29,4	29,7	29	28,1	32,5	30	31,5	25,3	32	28,3	31,7	28,8				
		26,5	33,7	28,8	30	29,2	29,2	31,8	32,4	30,1	32,2	33,9	30,1	30,4	30	30,3	29,7	32,4	32,4	29,7	34,1	31,6	31,4	27,8	26,4				
		IR	26,5			29,2		30,1			29,7				29,7		30,0				31,5						28,8		
<b>0,65 SECO</b>	cara 1	TRAMO 1	TRAMO 2	TRAMO 3	TRAMO 4	TRAMO 5	TRAMO 6	TRAMO 7	TRAMO 8																				
		35,2	32,7	31,8	34,7	36	35,2	36	33,9	37,1	32,9	32,8	34,7	36,6	32,6	35,8	31,3	34,3	33	40,7	31,6	33,1	31,7	30,4	31,7				
		31,4	33,3	34,8	34,9	30,8	34,6	33,7	33,8	30,9	30,7	33,7	37,9	33,4	36,8	37,3	35	35,3	35,4	34,2	35,5	30,5	36,6	30	29,5				
		33,3	32,3	34,5	34,6	33,6	35,9	32,4	34,7	34,7	32,5	36,4	37,2	35,3	34,1	35,1	32,3	31,6	34,4	35,3	34,4	37,1	32,9	30,9	30,3				
		IR	33,3		34,7		33,9				33,7			35,3		34,3					34,4						30,9		
<b>0,65 BLANDO</b>	cara 2	TRAMO 1	TRAMO 2	TRAMO 3	TRAMO 4	TRAMO 5	TRAMO 6	TRAMO 7	TRAMO 8																				
		27,7	26,7	26,4	29,6	29,1	27,7	31,1	31,8	33,9	29,5	30	31,5	30,6	29	27,8	29,2	27,4	27,3	27,2	28,2	27,2	27,3	26,3	29,5				
		33,7	23,5	29,6	32,6	29,7	26	30,4	29,1	27,3	28,6	33,4	31,2	37,5	27,2	32	29,1	25,7	28,4	26,8	27,1	25,9	29,5	25,6	29				
		25,2	26,4	29,5	30,7	29,4	29,4	27,3	28	29,6	34,1	26,6	31,3	31,1	29,7	27,5	27,6	29,2	28,7	29	26,1	28,2	27,7	27,7	26,9				
		IR	26,7			29,4		29,6		29,6		31,2		29,7		29,7		28,4			27,2				27,7				
		IR medio	26,6			29,3		29,9		30,5		29,7		29,7		29,7		29,2			29,4				28,3				
<b>0,65 BLANDO</b>	cara 2	TRAMO 1	TRAMO 2	TRAMO 3	TRAMO 4	TRAMO 5	TRAMO 6	TRAMO 7	TRAMO 8																				
		37,6	31,3	37,2	38	31,5	36,2	38,4	32	34,1	31	32,4	28,4	40,1	32,5	32,8	31,9	32,7	34,2	28	29,2	31,7	32,6	34	26,4				
		32,4	28,8	37,4	37,8	34,9	37,3	33,9	32,6	39,4	34,9	36,9	32,8	38,9	31,7	32,8	32,5	29,6	36,2	32,9	33,5	35,6	34,7	33,1	29,5				
		32,4	32,1	36,9	32,4	27,1	36,7	37,1	32	34,8	31,2	33	36,7	33,6	30	32	34,6	35,2	30,5	32,2	34,4	33,4	34,8	31,8	30,7				
		IR	32,4			36,2		34,1			32,8			32,8		32,8		32,7			32,9				32,6				
		IR medio	32,9			35,5		34,0			33,3			34,1		33,5					33,7				31,8				

Tabla 9. Resultados esclerómetro

Al día siguiente, 16 de mayo, se terminan los ensayos no destructivos en los dos pilares restantes, y se sacan los 8 testigos de cada pilar para poder ensayarlos a compresión.

ULTRASONIDOS								
0,90 BLANDO	TRAMO 1	TRAMO 2	TRAMO 3	TRAMO 4	TRAMO 5	TRAMO 6	TRAMO 7	TRAMO 8
151,3	38,2	38,4	37,7	39	38,1	39,6	39,3	39,2
150,8	38,6	38,3	38	38,6	38,1	38,4	39,7	39,6
151,5	38,2	38,7	40,6	39,2	39,6	39,8	40,7	39,2
151,2	38,33333	38,46667	38,76667	38,93333	38,6	39,26667	39,9	39,33333
velocidad (m/s)	3944,348	3930,676	3900,258	3883,562	3917,098	3850,594	3789,474	3844,068
0,90 SECO	TRAMO 1	TRAMO 2	TRAMO 3	TRAMO 4	TRAMO 5	TRAMO 6	TRAMO 7	TRAMO 8
150,8	38,6	38	37,7	37,3	38,9	38,6	37,7	38,4
151,2	37,2	37,4	37,1	36,8	38,2	37,6	37,5	38,8
151,3	37,7	37,8	38	40,2	37,6	38,2	39,1	39,7
151,1	37,83333	37,73333	37,6	38,1	38,23333	38,13333	38,1	38,96667
velocidad (m/s)	3993,833	4004,417	4018,617	3965,879	3952,049	3962,413	3965,879	3877,673

Tabla 10. Resultados ultrasonidos ( $a/c=0,90$ )



Ilustración 16. Extracción de los testigos



Ilustración 17. Restos de los pilares una vez sacados los testigos



<b>0,90 BLANDO</b>	TRAMO 1	TRAMO 2	TRAMO 3	TRAMO 4	TRAMO 5	TRAMO 6	TRAMO 7	TRAMO 8																
cara 1	25,5	21,5	20,7	21,9	21	23,6	22	22,4	23,7	21,1	17,2	19,8	22,2	15,7	19,3	22,6	21,5	21,9	20,7	21,5	22,7	21	19,1	19,5
	24,4	23,1	21,2	23,3	25,9	22,9	20,7	21,6	21,2	21,7	21,5	21	23,2	21,2	22,2	20,4	21,9	21,9	20,5	17,7	25,1	20,8	20	20,5
	21,4	19,9	21	20,1	19,8	21,4	21,9	21	20,3	23,4	19,8	19,6	20,8	21,1	21,2	24,9	18,5	19,4	21,9	21,7	23,2	21,4	20,5	21,2
IR	21,4			21,9				21,6			21,0					21,9				21,7				20,5
cara 2	TRAMO 1	TRAMO 2	TRAMO 3	TRAMO 4	TRAMO 5	TRAMO 6	TRAMO 7	TRAMO 8																
	21,9	22,3	25,9	21,4	21,4	21,8	22,9	21,9	20,5	23,2	18,6	21,3	19,7	21,6	20,1	20	20,3	24,3	20,3	21,3	20	22	20	19,9
	24,2	19,1	25,1	25,8	24,4	26,6	20,9	20,9	24,3	25,7	21	22,9	21	21,6	24	22	21,6	21	23,5	21,8	23,2	23,2	19,9	21,1
	24,5	20,9	23,9	22,8	15,4	23,8	21,9	19,3	22,7	22,3	19,9	22,5	21	20,6	22	23,2	20,1	24,2	22,9	23,4	21,8	19,9	21,3	19,6
IR	23,9			22,8				21,9			22,3		21,0			21,6				21,8			20,0	
IR medio	<b>22,7</b>			<b>22,4</b>				<b>21,8</b>			<b>21,7</b>		<b>21,1</b>			<b>21,8</b>				<b>21,8</b>			<b>20,3</b>	
<b>0,90 SECO</b>	TRAMO 1	TRAMO 2	TRAMO 3	TRAMO 4	TRAMO 5	TRAMO 6	TRAMO 7	TRAMO 8																
cara 1	21,5	21,9	26	22,4	25,2	24,3	26,5	25,8	24,4	26,6	25,7	23,9	26,3	24,6	22,3	24,7	22,7	27,1	23,3	25,6	24,6	24,5	23,2	17,6
	21	23,3	22	25,1	23,2	27	24,2	23,6	25	21,7	25	26,2	23,9	24,5	24,6	26,9	24,3	24,1	22,1	21,3	24,6	24,5	23,2	20,2
	22,6	23,7	24	24,4	22,7	23,5	24,2	22,7	22,5	25,2	22,3	26,9	26,4	22,3	24,7	25	21,5	26,6	25,5	21,7	25,3	22	20,8	17,8
IR	22,6			24,3				24,2			25,2		24,6			24,7				24,6				22,0
cara 2	TRAMO 1	TRAMO 2	TRAMO 3	TRAMO 4	TRAMO 5	TRAMO 6	TRAMO 7	TRAMO 8																
	20,6	20,6	19,9	21,6	22,9	23,4	23,1	22,2	22,9	23,2	22,9	24,1	24	17,9	23,7	23,9	19,9	20,2	24,1	21,9	21,2	24,7	22,4	24,8
	25,4	21	24,4	23,8	21,5	24,1	27,8	25,2	25,6	25,9	22,9	24,4	24	22,9	23,5	22,4	23,5	26,7	25	22,4	23,6	21,8	17	22,9
	22,7	23,4	23,9	20,1	23,2	21,9	24,6	23,7	23,3	24,3	22,5	23,2	24,7	21,6	25,1	24	23,5	21,8	23,6	25	24	23,9	20,8	22,4
IR	22,7			22,9				23,7			23,2		23,7			23,5				23,6			22,4	
IR medio	<b>22,7</b>			<b>23,6</b>				<b>24,0</b>			<b>24,2</b>		<b>24,2</b>			<b>24,1</b>				<b>24,1</b>			<b>22,2</b>	

Tabla 11. Resultados esclerómetro (a/c=0,90)

Los días 17 y 18 de mayo se rompen las probetas y testigos a compresión simple, primero las correspondientes a las cuatro primeras dosificaciones y al día siguiente el resto. Los resultados son los siguientes:

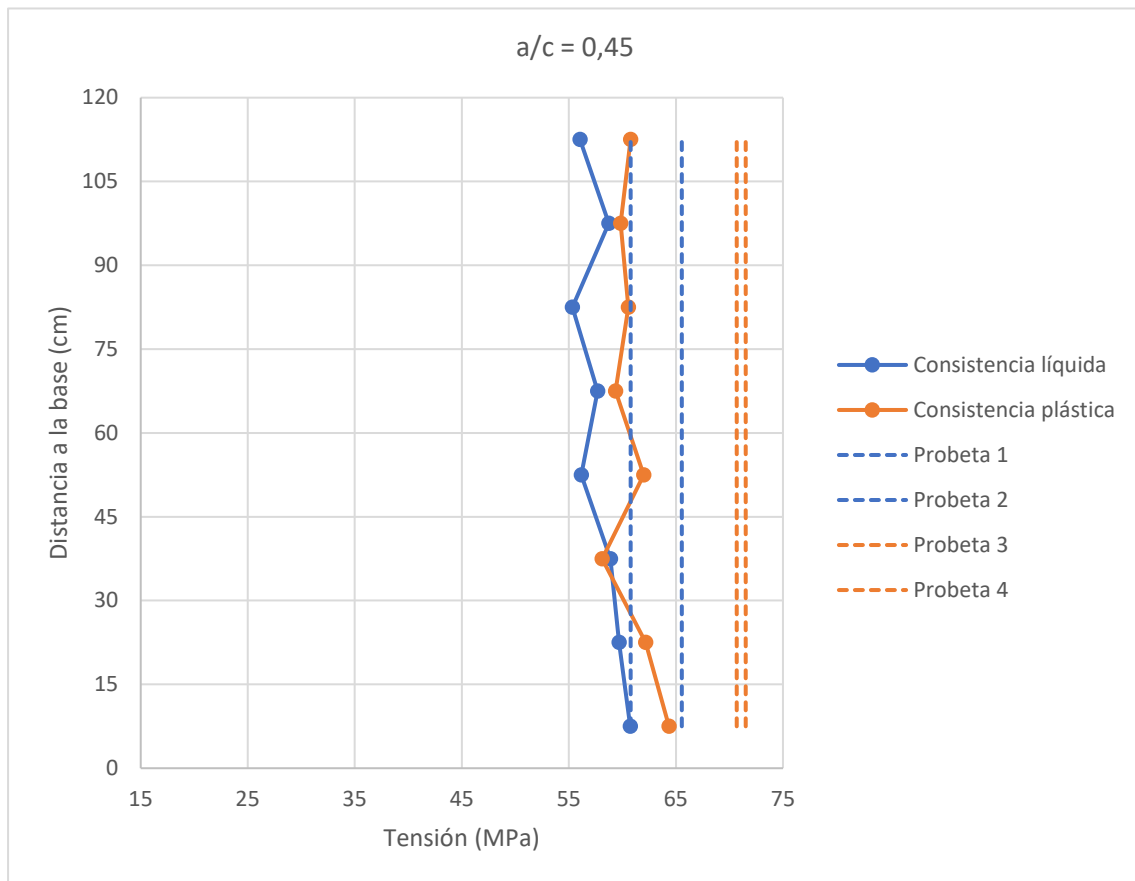
		ROTURA									
		Probeta 1	Probeta 2	Testigo 1	Testigo 2	Testigo 3	Testigo 4	Testigo 5	Testigo 6	Testigo 7	Testigo 8
<b>0,45 Blanda</b>	Fuerza (kN)	514,8	477,3	476,9	468,7	462,4	441,2	452,9	434,6	461,2	440
	Tensión (Mpa)	65,55	60,77	60,73	59,68	58,87	56,17	57,67	55,33	58,72	56,03
<b>0,45 Seca</b>	Fuerza (kN)	555,2	561,7	505,4	488,2	456,4	468,8	466,3	475,6	469,9	477,2
	Tensión (Mpa)	70,68	71,52	64,35	62,16	58,11	61,98	59,37	60,55	59,83	60,76
<b>0,65 Blanda</b>	Fuerza (kN)	329,6	310,9	325,4	305,9	307,8	306,6	308	301,4	304,1	295,5
	Tensión (Mpa)	41,96	39,58	41,43	38,95	39,19	39,04	39,21	38,38	38,72	37,63
<b>0,65 Seca</b>	Fuerza (kN)	357,8	349,2	350,4	331,7	334,7	326	336,6	329	343,4	295,6
	Tensión (Mpa)	45,56	44,46	44,61	42,24	42,61	41,51	42,85	41,89	43,72	37,64
<b>0,90 Blanda</b>	Fuerza (kN)	144,7	127,7	151,7	150,3	155,2	157,3	162,4	161,3	159,1	150,9
	Tensión (Mpa)	18,42	16,26	19,31	19,14	19,77	20,03	20,67	20,54	20,26	19,22
<b>0,90 Seca</b>	Fuerza (kN)	188,3	190,8	175,1	164,8	168,1	168,8	171,5	158,8	161,7	169
	Tensión (Mpa)	23,97	24,29	22,29	20,98	21,4	21,49	21,84	20,21	20,58	21,52

Tabla 12. Rotura testigos a compresión simple

#### 4.4. Discusión y resultados

##### a) Rotura de testigos y probetas a compresión simple

Una primera conclusión, aunque no era el objetivo del trabajo, es que la consistencia plástica tiende a dar algo más de resistencia, tanto en las probetas como en los testigos, que en la líquida. Esta diferencia es del orden de un 5% a un 7% para todas las dosificaciones.



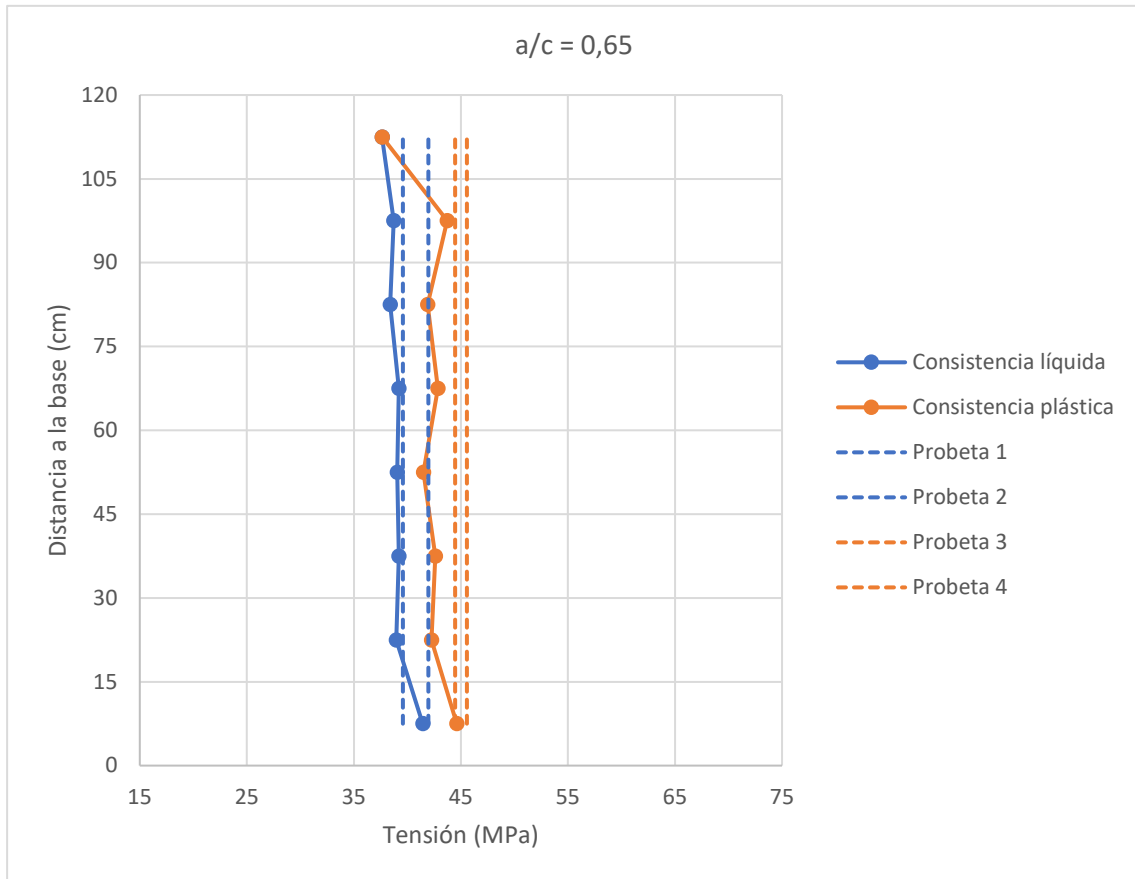
Gráfica 2. Rotura de testigos y probetas a compresión simple,  $a/c = 0,45$

Para la relación  $a/c = 0,45$ , se observa que en la dosificación de consistencia plástica, el valor de rotura de las probetas es el 15% mayor que los testigos, mientras que la consistencia líquida se obtienen diferencias del 10%.

Respecto a la variación de la resistencia con la altura, que es el objetivo del trabajo, se van a analizar ambas consistencias por separado:

- Para la consistencia líquida (gráficas azules), el valor medio de los dos testigos de la base del pilar es 60,21 MPa, el de los testigos intermedios 57,01 MPa y el de los dos testigos de la cabeza 57,38 MPa. Por tanto, se puede apreciar una reducción de la resistencia entre la base y la cabeza del orden de un 4,7%. Las diferencias con la zona central son del mismo orden.

- Para la consistencia plástica (gráficas naranjas), el valor medio de los dos testigos de la base del pilar es 63,26 MPa, el de los testigos intermedios 60,01 MPa y el de los dos testigos de la cabeza 60,30 MPa. Por tanto, también se aprecia una reducción de la resistencia del orden de un 4,7% a lo largo de toda la altura del pilar.



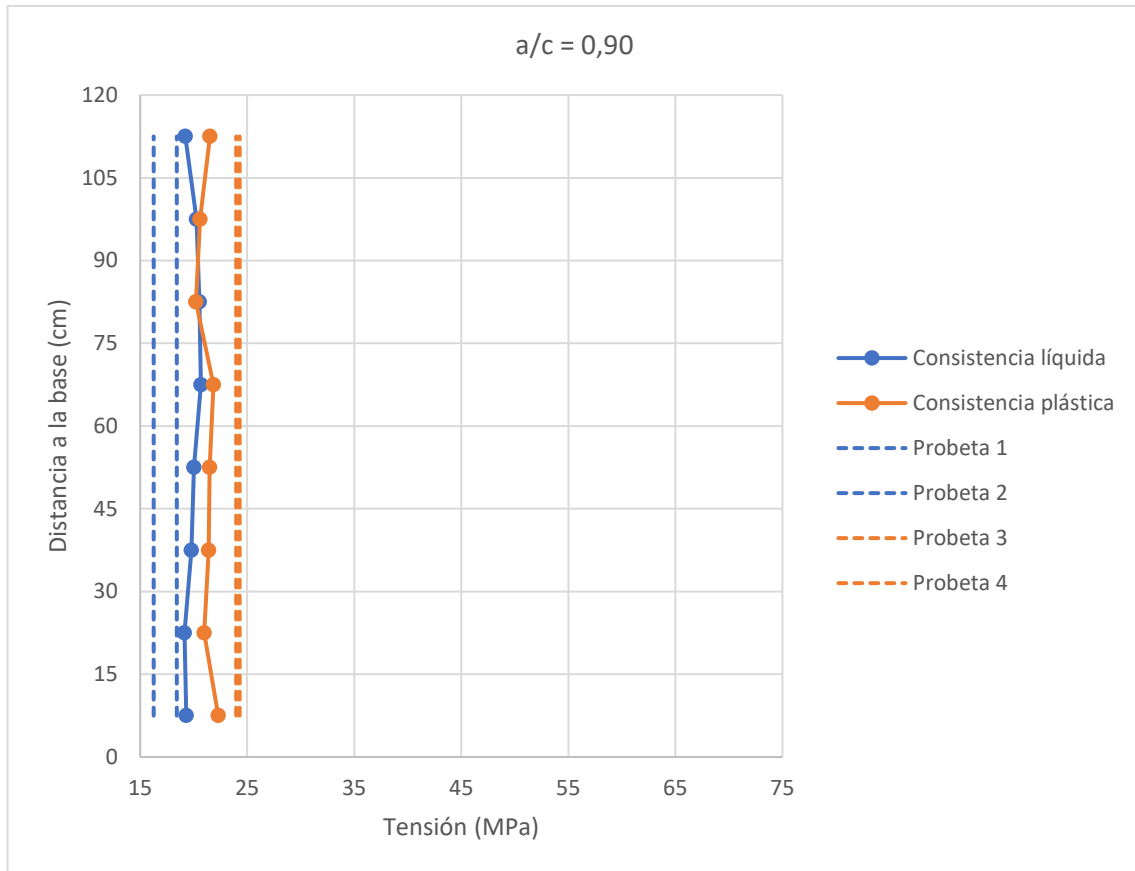
Gráfica 3. Rotura de testigos y probetas a compresión simple,  $a/c = 0,65$

Para la relación  $a/c = 0,65$ , se observa que para ambas dosificaciones, el valor de rotura de las probetas es del orden del 5% mayor que los testigos.

Respecto a la variación de la resistencia con la altura se van a analizar ambas consistencias por separado:

- Para la consistencia líquida (gráficas azules), el valor medio de los dos testigos de la base del pilar es 40,19 MPa, el de los testigos intermedios 38,96 MPa y el de los dos testigos de la cabeza 38,18 MPa. Por tanto, se puede apreciar una reducción de la resistencia del orden de un 5% a lo largo de toda la altura del pilar.
- Para la consistencia plástica (gráficas naranjas), el valor medio de los dos testigos de la base del pilar es 43,43 MPa, el de los testigos intermedios 42,22 MPa y el de

los dos testigos de la cabeza 40,68 MPa. Por tanto, se aprecia una reducción de la resistencia del orden de un 6,32% a lo largo de toda la altura del pilar.



Gráfica 4. Rotura de testigos y probetas a compresión simple,  $a/c = 0,90$

Para la relación  $a/c = 0,90$ , se observa que para la consistencia plástica, el valor de rotura de las probetas es del orden del 10% mayor que los testigos; mientras que para la consistencia líquida es del 10% menor

Respecto a la variación de la resistencia con la altura, que es el objetivo del trabajo, se van a analizar ambas consistencias por separado:

- Para la consistencia líquida (gráficas azules), el valor medio de los dos testigos de la base del pilar es 19,23 MPa, el de los testigos intermedios 20,25 MPa y el de los dos testigos de la cabeza 19,74 MPa. Por tanto, se aprecia una reducción de la resistencia del orden de un 2,6 % a lo largo de toda la altura del pilar.
- Para la consistencia plástica (gráficas naranjas), el valor medio de los dos testigos de la base del pilar es 21,64 MPa, el de los testigos intermedios 21,24 MPa y el de los dos testigos de la cabeza 21,05 MPa. Por tanto, se aprecia una reducción de la resistencia del orden de un 2,7 % a lo largo de toda la altura del pilar.

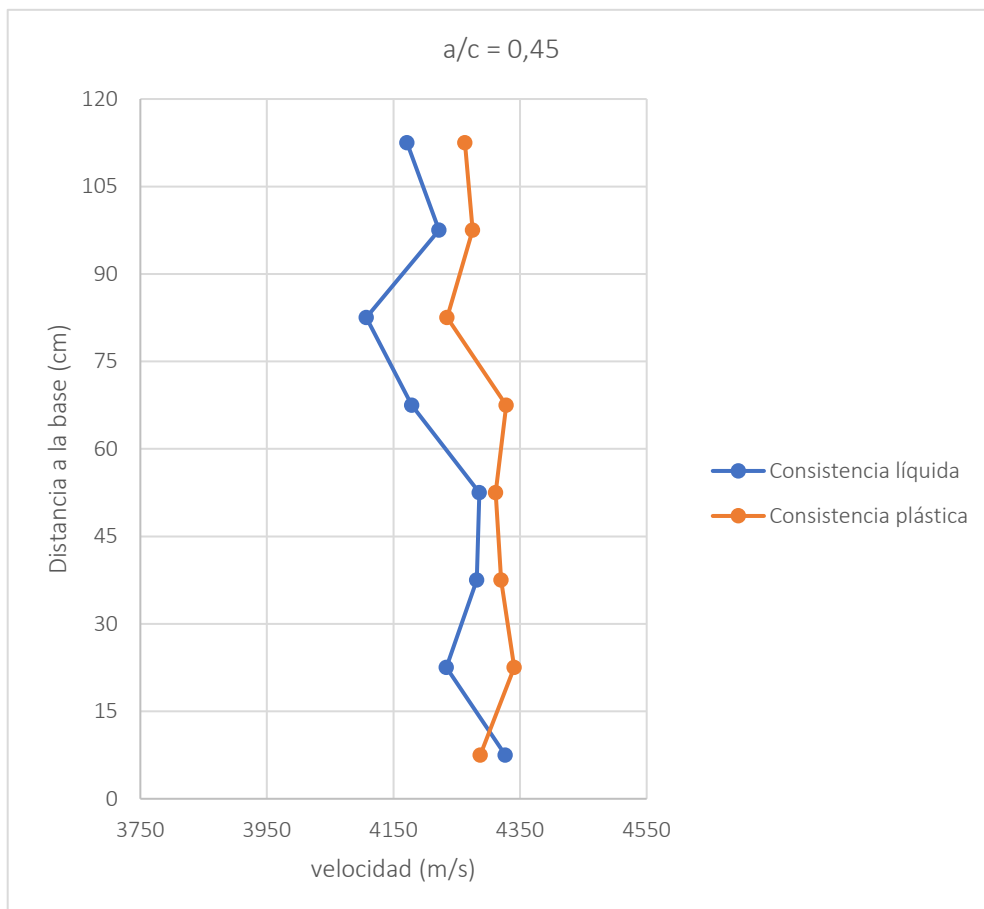
Por tanto, para la dosificación  $a/c = 0,90$  no se produce una reducción significativa de resistencia a lo largo de la altura.

b) Ultrasonidos

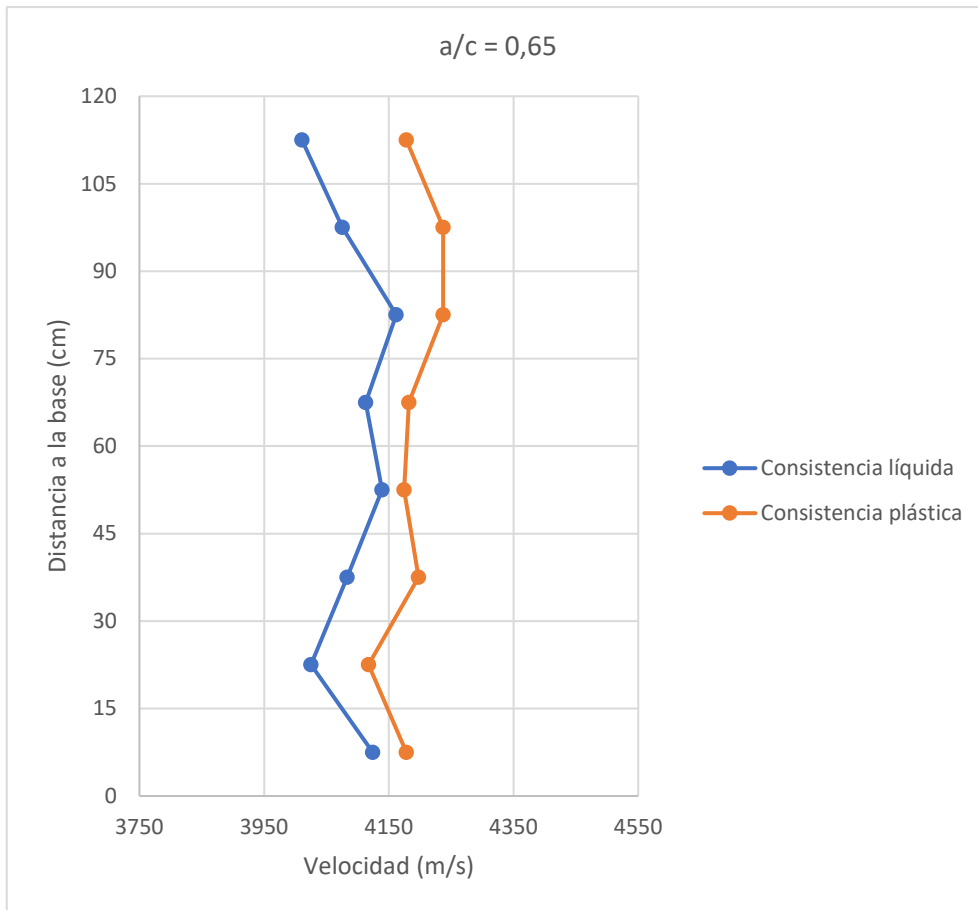
Como se observa en las gráficas, los resultados de los ensayos no destructivos son mucho más dispersos.

En el ensayo de ultrasonidos teóricamente la velocidad debe aumentar con la altura: en los tramos de la base del pilar la velocidad debería ser menor, ya que suponiendo que los áridos tienden a ir hacia esta parte, el pilar debería ser más compacto y por tanto la onda atravesaría con más dificultad.

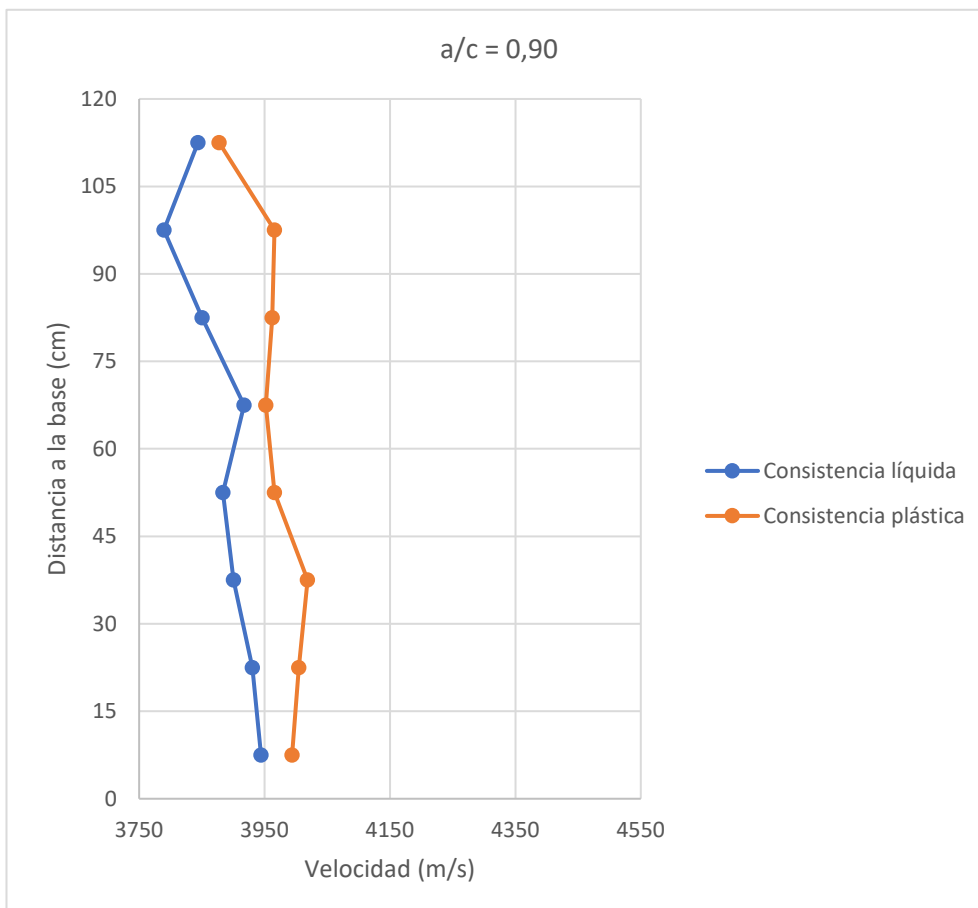
Para todas las dosificaciones, una primera conclusión es que las consistencias plásticas dan resistencias mayores, al igual que se observaba con la rotura de testigos en compresión simple. Sin embargo, la diferencia de valores no va disminuyendo con la altura, sino que los resultados oscilan en cada tramo.



Gráfica 5. Resultado ultrasonidos  $a/c = 0,45$



Gráfica 6. Resultado ultrasonidos  $a/c = 0,65$



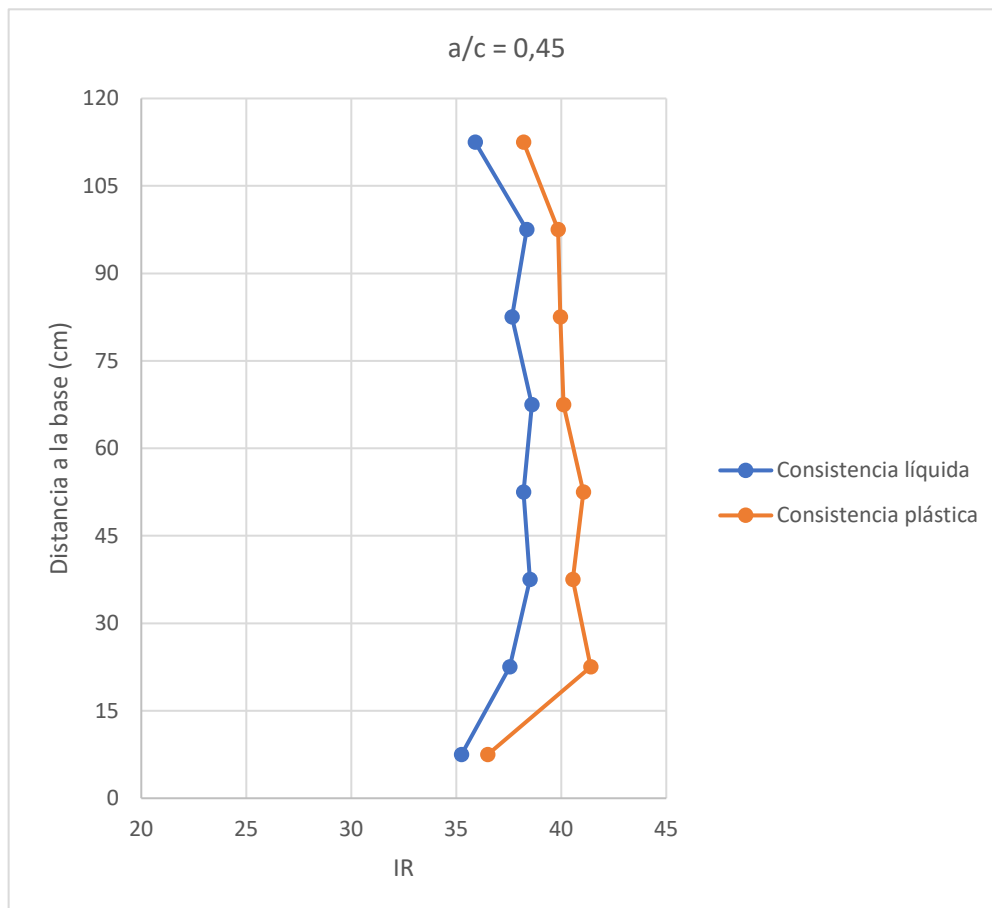
Gráfica 7. Resultado ultrasonidos  $a/c = 0,90$

### c) Esclerómetro

En el ensayo esclerométrico, el índice de rebote (IR) es directamente proporcional a la resistencia del hormigón, por tanto, a mayor IR, más resistencia. Los resultados obtenidos, reflejados en las siguientes gráficas, oscilan siempre alrededor de un eje vertical y no van disminuyendo con la altura, es decir, mantienen unos valores aproximadamente constantes.

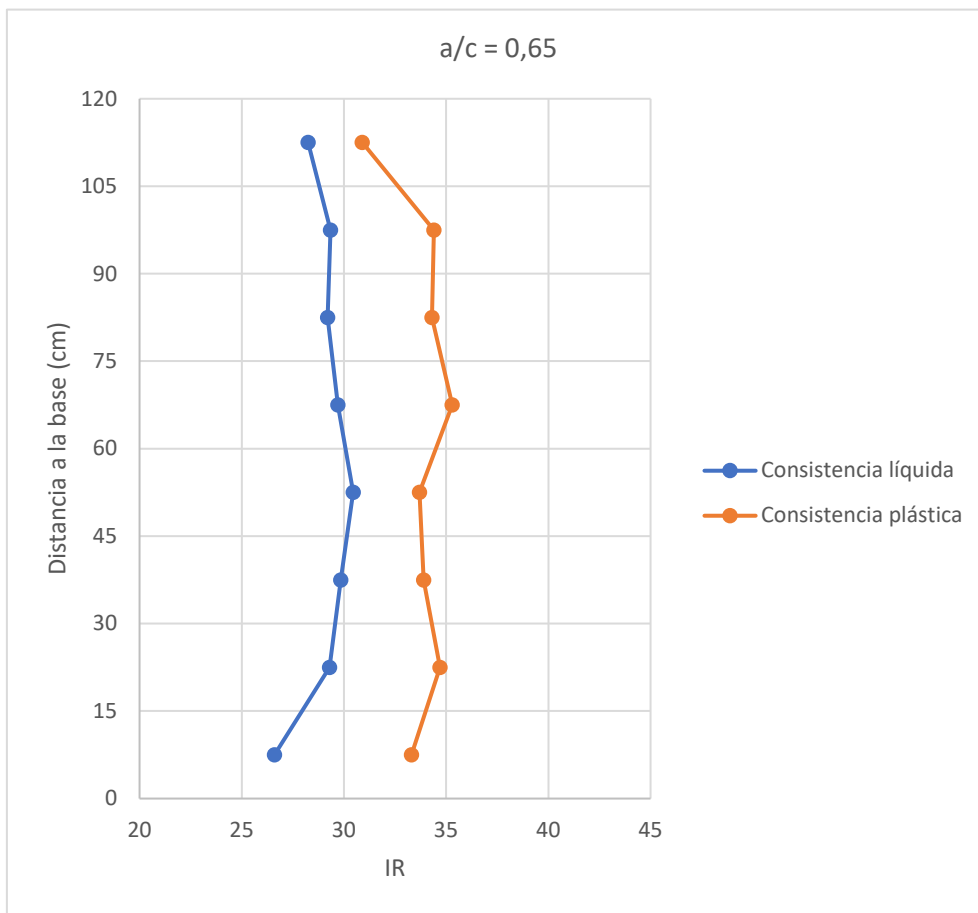
En este ensayo también se aprecia que los hormigones de consistencia plástica alcanzan mayores resistencias que los de consistencia líquida, al igual que en los anteriores ensayos.

No obstante, los ensayos no destructivos no son totalmente fiables, ya que solo permiten estimar la resistencia del hormigón y dependen de muchas variables, como por ejemplo, el contenido de humedad del hormigón, la edad del material, la presencia de armaduras...

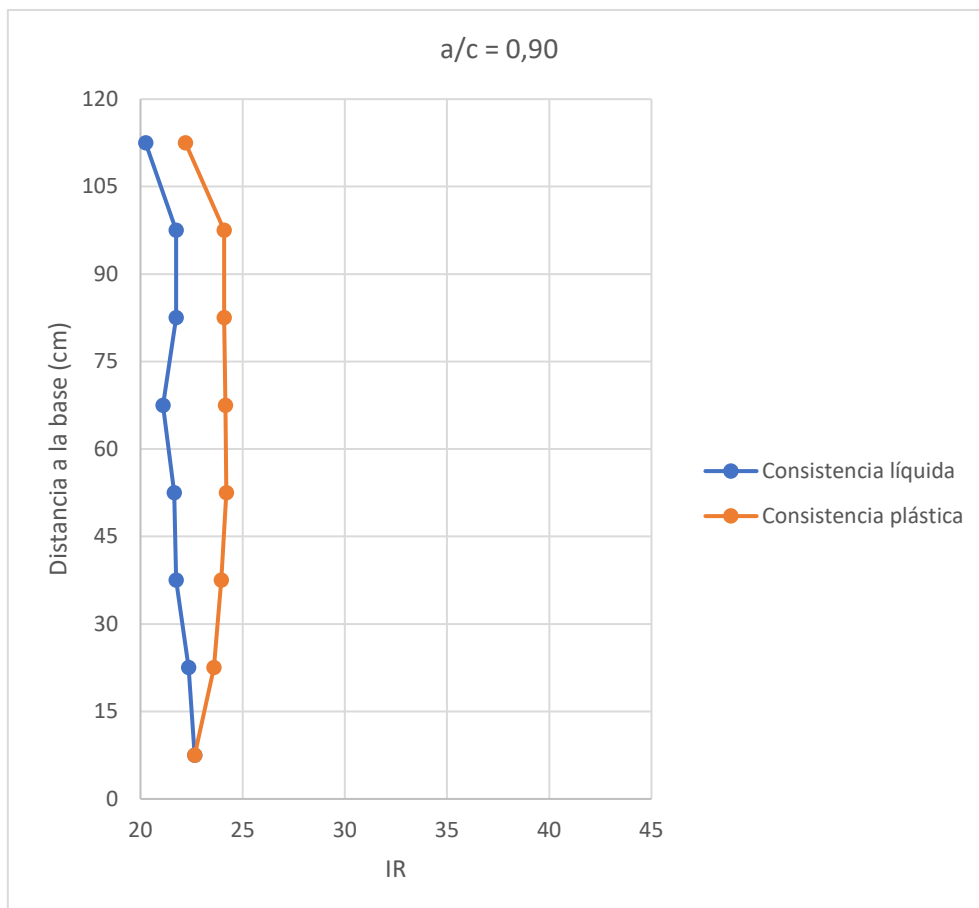


Gráfica 8. Resultado esclerómetro  $a/c = 0,45$





Gráfica 9. Resultado esclerómetro  $a/c = 0,65$



Gráfica 10. Resultado esclerómetro  $a/c = 0,90$

## 5. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones de este trabajo son:

- La consistencia plástica tiende a dar algo más de resistencia, tanto en las probetas como en los testigos, que en la líquida. Esta diferencia es del orden de un 5% a un 7% para todas las dosificaciones.
- El valor de rotura de las probetas es del orden del 5% al 15% mayor que la resistencia obtenida de los testigos extraídos de los pilares.
- Para la rotura de probetas y testigos a compresión simple, la reducción de la resistencia con la altura es del orden del 2-6%, por lo que se considera despreciable.
- Los resultados de los ensayos no destructivos son mucho más dispersos.

Con todo ello se justifica la desaparición del factor de reducción para piezas hormigonadas verticalmente, objeto de estudio de este trabajo.

No obstante, es cierto que los pilares ensayados son del orden de 3 veces menor que los pilares reales, por lo que al estudiar soportes de entre 3 y 4 metros de altura, quizá esta diferencia de resistencias no sea despreciable. Además, hay que tener en cuenta la influencia de las dosificaciones discontinuas, que eran habituales antiguamente ya que no había un control de la granulometría de los áridos, y este era un factor importante en la segregación de los hormigones.

## 6. AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría dar las gracias a mi tutor Manuel Valcuende Payá por su valiosa ayuda. Siempre ha estado pendiente de mí y me ha guiado con mucho interés y cariño a lo largo de estos meses de trabajo. Estoy muy agradecida por su atención, tanto personal como académica, y por conseguir que disfrute tanto como lo he hecho con la realización de este trabajo.

También me gustaría agradecer al laboratorio de materiales de construcción del departamento de construcciones arquitectónicas por prestarme su servicio y sus materiales. Particularmente agradecer a Rafael Calabuig Pastor y a Jesús Martínez Sanz, por estar siempre pendientes de mí y ayudarme en todo lo que he necesitado.

También agradecer a mis amigos y compañeros de la escuela por su apoyo, sobre todo a Josep Ramón Lliso Ferrando por toda su ayuda en el laboratorio, que no ha sido poca.

Finalmente, no podía faltar agradecer a toda mi familia, especialmente a Javi y a mis padres por sus ánimos y por su apoyo incondicional.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

ACI. *Norma ACI 318S-08. Requisitos de reglamento para concreto estructural*. ACI. Michigan, 2008.

AENOR. *Norma UNE-EN 1992-1-1. Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón*. Ed. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR. Madrid, 2016.

Calabuig Pastor, R. (2015). *Efecto de la adición de cal en las propiedades mecánicas y durabilidad de hormigones con altos contenidos en cenizas volantes silíceas* (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Valencia.

Escuela de Ingeniería Técnica Civil. Arquitectura Técnica (2007). *Historia del hormigón*. [Archivo PDF]. Recuperado de [http://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/6202/mod\\_resource/content/1/Hormigon\\_01.\\_Historia.pdf](http://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/6202/mod_resource/content/1/Hormigon_01._Historia.pdf)

Fernández Cánovas, M. *Hormigón*. Ed. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, 1996.

IETCC. *HA-61. Instrucción especial para estructuras de hormigón armado*. Ed. Colección de normas y manuales del Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento. Patronato Juan de la Cierva, 1961.

Jiménez Montoya P., García Meseguer A., Morán Cabré F. *Hormigón Armado*. 14ª edición. Ed. Gustavo Gili. Barcelona, 2000.

Ministerio de Fomento, Comisión permanente del hormigón. *EH-98. Instrucción de hormigón estructural*. Ed. Centro de Publicaciones de la Secretaría Técnica del Ministerio de Fomento. Madrid, 1998.

Ministerio de Fomento. *EHE. Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08*. Ed. Centro de Publicaciones de la Secretaría Técnica del Ministerio de Fomento. Madrid, 2008.

Ministerio de Fomento. *Código Estructural*. Borrador. Madrid, 2018.

Ministerio de la Gobernación. *Normas para el cálculo y ejecución de estructuras metálicas, hormigón armado y forjados de ladrillo armado*. Ed. s/n. Madrid, 1941.

Ministerio de Obras Públicas. *Instrucción para el proyecto y ejecución de obras de hormigón*. Ed. Hijos de Santiago Rodríguez. Burgos, 1939.

Ministerio de Obras Públicas. *Instrucción para el proyecto de obras de hormigón*. Ed. s/n. Madrid, 1944.

Ministerio de Obras Públicas. *EH-68. Instrucción para el proyecto de obras de hormigón en masa o armado*. Ed. Centro de Publicaciones de la Secretaría Técnica del Ministerio de Fomento. Madrid, 1968.

Ministerio de Obras Públicas, Comisión permanente del hormigón. *EH-73. Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado*. Ed. Centro de Publicaciones de la Secretaría Técnica del Ministerio de Fomento. Madrid, 1973.

Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. *EH-80. Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado*. Ed. Centro de Publicaciones de la Secretaría Técnica del Ministerio de Fomento. Madrid, 1980.

Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Comisión permanente del hormigón. *EH-82. Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado*. Ed. Centro de Publicaciones de la Secretaría Técnica del Ministerio de Fomento. Madrid, 1982.

Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. *EH-88. Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado*. Ed. Centro de Publicaciones de la Secretaría Técnica del Ministerio de Fomento. Madrid, 1988.

Ministerio de Obras Públicas y Transporte. *EH-91. Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado*. Ed. Centro de Publicaciones de la Secretaría Técnica del Ministerio de Fomento. Madrid, 1991.

Valcuende Payá, M.O. *Componentes básicos del hormigón*. Apuntes de la asignatura Construcción III. UPV, curso 2017-2018.