



TRABAJO FIN DE MÁSTER

Estudio experimental de condiciones de anclajes de armaduras lisas en estructuras de hormigón históricas.

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE CAMINOS CANALES Y PUERTOS

Raúl Mantilla García

Dirigido por:

Dr. D. Raúl Rubén Rodríguez Escribano

Madrid, 2025

AGRADECIMIENTOS

Ningún trabajo de investigación es fruto de un esfuerzo individual, sino del apoyo y la colaboración de muchas personas que lo hacen posible.

Desde estas líneas deseo reconocer y agradecer el trabajo, la dedicación y el esfuerzo de todas aquellas personas que, a lo largo de los años, han contribuido al avance y difusión del conocimiento en el ámbito de la ingeniería estructural. Sus aportaciones han servido de base para poder seguir aprendiendo y afrontar nuevos retos de investigación, como el que en este proyecto hemos llevado a cabo, abordando y contrastando un gran número de normativas históricas y actuales, lo que ha supuesto un desafío apasionante y enriquecedor.

Asimismo, quiero expresar mi gratitud por estos dos años de formación en el Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, que han requerido un notable esfuerzo, pero que también han significado una etapa muy especial de aprendizaje, crecimiento y consolidación de mi vocación como ingeniero de caminos.

De manera particular, deseo agradecer a mi tutor, el profesor Raúl Rubén Rodríguez Escribano, por su inestimable apoyo, orientación y dedicación en todo momento. Extiendo también mi reconocimiento a la empresa dMol, que hizo posible la recuperación de armaduras lisas para la realización de los ensayos, así como a la dirección facultativa de INTEMAC por su contribución en la limpieza del acero, y al laboratorio de INTEMAC por el aporte y trabajo en la ejecución de las pruebas experimentales que han dado solidez a este estudio.

Finalmente, un agradecimiento muy especial a mi familia, y en particular a mis padres, por su constante apoyo y sacrificio a lo largo de todos estos años de estudios. Y a mi pareja, por su paciencia, ánimo y compañía en los momentos más exigentes de este camino académico y personal. Sin ellos, este logro no habría sido posible.

Este proyecto no solo marca el final de una etapa, sino el inicio de un camino profesional que asumo con la misma ilusión y compromiso con los que he desarrollado este trabajo.

RESUMEN

El presente Trabajo Fin de Máster aborda de manera experimental el comportamiento de anclaje de armaduras lisas en estructuras de hormigón armado histórico, ampliamente empleadas en España y Europa durante gran parte del siglo XX. A diferencia de las armaduras corrugadas, que garantizan la transferencia de esfuerzos mediante el engranamiento mecánico con la matriz de hormigón, las barras lisas dependen en gran medida de la disposición de ganchos en sus extremos para asegurar la adherencia y la correcta transmisión de tensiones. Esta particularidad plantea un desafío técnico en la evaluación estructural y en la rehabilitación de un patrimonio construido que aún hoy sigue en servicio.

La investigación se fundamenta en una revisión crítica de la evolución normativa española (desde la EH-39 hasta la EHE-08) y su comparación con marcos internacionales, en especial el Eurocódigo 2 y la normativa americana ACI 318. Este análisis revela la progresiva sustitución del acero liso por el corrugado y la notable disparidad en los criterios de anclaje y solape. En particular, la futura actualización del Eurocódigo 2 (2026) introduce longitudes de anclaje con incrementos superiores al doble respecto a las contempladas en normativas históricas, lo que contrasta con la ausencia de patologías generalizadas en estructuras ejecutadas con acero liso y en servicio desde hace décadas.

En la fase experimental se ha ejecutado el Pull-out Test, al ser el ensayo más adecuado para reproducir las condiciones de adherencia objeto de estudio. Los resultados obtenidos evidencian que el futuro Eurocódigo no contempla la función estructural del gancho como mecanismo de anclaje, a pesar de su papel determinante en el comportamiento real de las armaduras lisas. En este sentido, el trabajo propone la necesidad de nuevas campañas experimentales que permitan caracterizar de manera más precisa esta contribución.

El estudio concluye que, pese a las limitaciones intrínsecas del acero liso, la disposición adecuada de ganchos permite alcanzar resistencias equiparables a las exigidas por la normativa vigente. Este hallazgo resulta especialmente relevante en un contexto en el que la ingeniería estructural se orienta hacia la rehabilitación y conservación del parque construido, donde el conocimiento riguroso del comportamiento de las armaduras lisas se convierte en una herramienta clave para garantizar seguridad, sostenibilidad y eficiencia en futuras intervenciones.

ABSTRACT

This Master's Thesis experimentally investigates the anchorage behavior of plain reinforcement bars in historic reinforced concrete structures, which were extensively employed in Spain and Europe throughout much of the 20th century. Unlike deformed bars, which ensure stress transfer through mechanical interlock with the concrete matrix, plain bars rely largely on the provision of hooks at their ends to secure bond and achieve proper stress transmission. This peculiarity poses a technical challenge in the structural assessment and rehabilitation of heritage constructions that remain in service today.

The research is grounded in a critical review of the evolution of Spanish regulations (from EH-39 to EHE-08) and their comparison with international frameworks, particularly Eurocode 2 and the American standard ACI 318. This analysis reveals the progressive replacement of plain steel with deformed bars and the notable disparity in anchorage and lap splice criteria. Specifically, the forthcoming 2026 update of Eurocode 2 introduces anchorage lengths that are more than twice those considered in historical codes, contrasting with the absence of widespread pathologies in structures built with plain steel that have been in service for decades.

In the experimental phase, the Pull-out Test was performed, as it is the most suitable method to reproduce the bond conditions under investigation. The results indicate that the future Eurocode does not account for the structural function of hooks as an anchorage mechanism, despite their decisive role in the actual performance of plain bars. In this context, the study highlights the need for further experimental campaigns to more accurately characterize this contribution.

The study concludes that, despite the intrinsic limitations of plain steel, the appropriate provision of hooks can achieve strengths comparable to those required by current regulations. This finding is particularly relevant in a context where structural engineering is increasingly oriented toward the rehabilitation and conservation of the existing built environment, in which rigorous knowledge of plain reinforcement behavior becomes a key tool to ensure safety, sustainability, and efficiency in future interventions.

Contenido

1.	INTRODUCCIÓN	10
1.1.	ANÁLISIS	10
1.2.	OBJETIVOS	13
2.	ESTADO DEL ARTE.....	14
2.1.	Barras de acero liso	14
2.1.1.	Adherencia.....	15
2.1.2.	Anclaje	17
2.1.3.	Solape	20
2.2.	Evolución histórica de las condiciones de anclaje.....	22
2.2.1.	EH-39	22
2.2.2.	HA-61.....	25
2.2.3.	EH-68	27
2.2.4.	EH-73	31
2.2.5.	EH-80 y EH-82	34
2.2.6.	EH-88	38
2.2.7.	EH-91	41
2.2.8.	EHE-98	44
2.2.9.	EHE-08	47
2.2.10.	Eurocódigo 2 (UNE-EN 1992-1-1:2005)	50
2.2.11.	ACI 318 - Normativa Americana	54
3.	Ensayos de adherencia y anclaje	59
3.1.	Ensayo PULL-OUT TEST	59
3.1.1.	Introducción al ensayo	59
3.1.2.	Fundamento teórico.....	60
3.1.3.	Procedimiento experimental.....	63
3.1.4.	Variables de control y medición	65

3.1.5.	Análisis e interpretación de los resultados	67
3.2.	Ensayo BEAM TEST.....	70
3.2.1.	Introducción	70
3.2.2.	Fundamentos teóricos.....	72
3.2.3.	Procedimiento experimental.....	75
3.2.4.	Variables de control y medición	79
3.2.5.	Análisis e interpretación de los resultados	81
3.3.	Ensayo de Resistencia a Tracción por Hendimiento.....	84
3.3.1.	Introducción	84
3.3.2.	Fundamento teórico.....	85
3.3.3.	Procedimiento experimental.....	87
3.3.4.	Variables de control y medición	89
3.3.5.	Análisis e interpretación de los resultados	92
4.	ANÁLISIS DE LOS FUTUROS REQUISITOS NORMATIVOS. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	96
5.	PLANTEAMIENTO DE ENSAYOS	101
6.	REALIZACIÓN DE ENSAYOS	105
7.	INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	116
7.1.	PROPUESTA DE FORMULACIÓN	116
7.2.	SOSTENIBILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN	117
8.	CONCLUSIONES	121
8.1.	Conclusiones experimentales	121
9.	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	123
	ANEXO I. INFORME ORIGINAL DE LABORATORIO DE LOS ENSAYOS REALIZADOS.....	124
	BIBLIOGRAFÍA.....	128

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1 - Barra lisa con gancho (INTEMAC).....	10
Ilustración 2 - Barra de acero liso (2025)	14
Ilustración 3 - Representación de la adherencia en una barra (Ruiz, 2008)	15
Ilustración 4 - Fallo repentino de anclaje en viga (INTEMAC).....	18
Ilustración 5 - Anclaje de 90º (Ruiz, 2008)	19
Ilustración 6 - Ejemplo de distribución de carga puntual de solape (PRONTUBEAN) ()	20
Ilustración 7- Portada EH-39 (1939).....	22
Ilustración 8 - Dimensiones del anclaje (1939)	23
Ilustración 9 - Portada EH-61 (1961).....	25
Ilustración 10 - Primera página EH-68 (1968)	28
Ilustración 11 - Longitud de anclaje recto (1968)	28
Ilustración 12 - Dimensiones de los anclajes (1968)	29
Ilustración 13 - Primera página EH-73 (1973)	31
Ilustración 14 - Distancias de anclaje según disposición de las barras (1973).....	32
Ilustración 15 - Primeras Páginas EH-80 y EH-82 (1980) (1982)	34
Ilustración 16 - Disposición de la barra a tracción con gancho (1980) (1982).....	35
Ilustración 17 - Tabla de valores de n (1980) (1982).....	35
Ilustración 18 - Radio de curvatura de los ganchos y patillas (1980) (1982)	36
Ilustración 19 - Primera página EH-88 (1988)	38
Ilustración 20 - Diagrama del límite elástico del acero (1988).....	40
Ilustración 21 - Portada EH-91 (Ministerio de Obras Públicas y Transportes, 1991).....	41
Ilustración 22 - Portada EHE-98 (1998)	44
Ilustración 23 - Longitudes de anclaje en barras corrugadas (1998)	45
Ilustración 24 - Portada EHE-08 (2008)	47
Ilustración 25 - longitudes de anclaje para barras corrugadas (2008).....	48
Ilustración 26 - Longitudes de anclaje para barras corrugas (Comité Europeo de Normalización (CEN), 2004).....	51
Ilustración 27 - Portada norma ACI 318 (American Concrete Institute, 2019)	55
Ilustración 28 - Ensayo PULL-OUT (INTEMAC)	59
Ilustración 29 - Ensayo PULL-OUT en laboratorio (Ruiz, 2008)	64
Ilustración 30 - Ensayo Beam-Test (INTEMAC).....	70

Ilustración 31 - Esquema de ensayo de flexión en 4 puntos (Resistencia a flexión y porosidad de la tiza, 2004).....	73
Ilustración 32 - Parámetros de medición en el ensayo Beam Test (Tenacidad a la fractura de cementos de uso petrolero).....	74
Ilustración 33 - Ensayo de flexión en vigas tipo T (UPM, 2015)	76
Ilustración 34 - Ensayo Beam Test en viga de hormigón armado (Arteta, 2007)	79
Ilustración 35 - Ensayo a tracción por hendimiento (UPC)	84
Ilustración 36 - Ensayo a tracción indirecta (Efecto del tamaño de la probeta y condiciones de carga en el ensayo de tracción indirecta, 2009)	87
Ilustración 37 - Simulación de fallo del Ensayo Brasileño (Modelación y simulación del ensayo de tracción indirecta o ensayo Brasileño, empleando el Método de los Elementos Distintos (MED))	91
Ilustración 38 - Estado visual de la probeta posterior al ensayo de tracción indirecta (Efecto de la Incorporación de Pequeñas Dosis de Emulsión Asfáltica en el Comportamiento de Estabilizaciones de Suelo con Cemento Portland, 2020)	93
Ilustración 39 - Demolición y extracción de armaduras en Gran Vía 3 (INTEMAC)	101
Ilustración 40 - Demolición y extracción de armaduras en Gran Vía 3 (INTEMAC)	102
Ilustración 41 - Probetas cilíndricas y cúbicas para el ensayo (INTEMAC).....	105
Ilustración 42 - Esquema dimensional del modelo. Cotas expresadas en mm (INTEMAC)	106
Ilustración 43 - Amasadora Vertical tipo ARCEN (INTEMAC)	107
Ilustración 44 - Prensa hidráulica de laboratorio (INTEMAC)	108
Ilustración 45 - Aspecto general del bloque de hormigón 1 tras ensayo (INTEMAC).....	110
Ilustración 46 - Aspecto interior del bloque de hormigón 1 tras ensayo (INTEMAC).....	110
Ilustración 47 - Aspecto general del bloque de hormigón 2 tras ensayo (INTEMAC).....	111
Ilustración 48 - Aspecto interior del bloque de hormigón 2 tras ensayo (INTEMAC).....	112
Ilustración 49- Aspecto general del bloque de hormigón 3 tras ensayo (INTEMAC).....	113
Ilustración 50 - Aspecto interior del bloque de hormigón 3 tras ensayo (INTEMAC).....	114
Ilustración 51 - Aspecto general del bloque de hormigón 4 tras ensayo (INTEMAC).....	114
Ilustración 52 - Aspecto interior del bloque de hormigón 4 tras ensayo (INTEMAC).....	115
Ilustración 53 - Interpretación de los resultados (contribución propia).....	116
Ilustración 54 - Menos es más (elaboración propia).....	120

Índice de Tablas

Tabla 1 - Tabla comparativa de longitudes de anclaje actual (elaboración propia)	96
Tabla 2 - Comparativa de longitudes de anclaje con la nueva actualización del Eurocódigo 2 (2026) (elaboración propia).....	97
Tabla 3 - Resumen de los resultados (INTEMAC)	109

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANALISIS

La presente investigación se centra en la **valoración experimental del comportamiento de anclaje de armaduras de acero liso**, un tipo de material que tuvo un uso generalizado en las estructuras de hormigón armado construidas desde los inicios de esta tecnología hasta las décadas de 1960 y 1970. Durante este extenso periodo, las barras lisas fueron el material predominante en la edificación residencial, en obras públicas y en numerosas infraestructuras de transporte. Ejemplos representativos de este patrimonio son los grandes bloques de viviendas levantados en los años de la posguerra y del desarrollismo urbano, así como puentes, fábricas y estaciones ferroviarias cuya ejecución se llevó a cabo con este tipo de armadura. Todo ello configura hoy un **importantísimo parque de edificación y obra civil en servicio**, que sigue cumpliendo funciones esenciales en nuestras ciudades y que, en consecuencia, debe ser objeto de una evaluación técnica rigurosa.



Ilustración 1 - Barra lisa con gancho (INTEMAC)

El acero liso, a diferencia de las barras corrugadas que se impusieron posteriormente, carece de resaltes que favorezcan la transferencia de esfuerzos por engranamiento mecánico con la matriz de hormigón. En consecuencia, sus **mecanismos de adherencia** se fundamentan en tres procesos básicos: la fricción en la interfaz acero-hormigón, la adherencia química inicial entre ambos materiales y, de forma más decisiva, la **disposición de ganchos en los extremos de las barras**, que actúan como anclaje mecánico. Esta dependencia de los ganchos explica que, históricamente, las normativas exigieran su uso sistemático en los extremos de las armaduras. Sin embargo, la efectividad real de estos mecanismos frente a las solicitaciones estructurales ha sido objeto de debate técnico desde hace décadas.

Las versiones más recientes de la **Instrucción de Hormigón Estructural (EHE)** ya recogían esta problemática de manera explícita, relegando progresivamente a las barras lisas a un uso residual y limitando sus condiciones de anclaje y empalme frente a las barras corrugadas. Este cambio se debe a que la adherencia del acero corrugado proporciona una resistencia superior, más predecible y mejor correlacionada con la formulación analítica, lo que simplifica el dimensionamiento y mejora la seguridad frente al fallo.

La situación adquiere una dimensión aún más compleja con la **futura versión del Eurocódigo 2**, actualmente en fase de revisión y prevista para su publicación en 2026. En este nuevo marco normativo de ámbito europeo, las disposiciones referentes a las longitudes de anclaje y solape se vuelven más conservadoras y, en la práctica, penalizan de manera muy significativa a las barras lisas frente a lo que contemplaban las formulaciones de normas precedentes. Dicho enfoque plantea una consecuencia inmediata: **las soluciones constructivas históricas, basadas en barras lisas con ganchos, pueden quedar cuestionadas bajo el prisma de la normativa actual**, a pesar de que muchas de estas estructuras llevan más de medio siglo en servicio sin presentar patologías críticas.

Esto abre una doble línea de reflexión. Por un lado, la necesidad de **verificar experimentalmente** si las condiciones de anclaje de las barras lisas son capaces de satisfacer las exigencias de seguridad que hoy se consideran ineludibles. Por otro, la urgencia de aportar criterios técnicos objetivos para guiar la **evaluación estructural de las construcciones existentes**, un campo cada vez más relevante dado que la actividad en ingeniería civil y edificación se orienta crecientemente hacia la rehabilitación y el refuerzo, más que hacia la construcción de obra nueva.

Debe subrayarse que el **anclaje entre acero y hormigón constituye un aspecto esencial para el comportamiento conjunto del material compuesto**. El hormigón aporta resistencia a compresión y rigidez estructural, mientras que el acero asume las tensiones de tracción, de las que el hormigón adolece. La adecuada transmisión de esfuerzos entre ambos materiales se logra mediante la adherencia y el anclaje. Si este mecanismo falla, se compromete la seguridad estructural, independientemente de que las secciones estén correctamente dimensionadas para soportar las sollicitaciones. En consecuencia, el estudio del anclaje de armaduras lisas deja de ser un problema puramente académico para convertirse en un **requisito técnico de primer orden** a la hora de evaluar y decidir posibles estrategias de intervención en estructuras existentes.

En este contexto, el presente trabajo se enmarca en la problemática descrita, planteando una **campaña experimental específica** destinada a cuantificar la capacidad real de anclaje de las barras lisas y contrastarla con las exigencias actuales del marco normativo europeo. La investigación se

orienta a determinar si, mediante la disposición de ganchos en los extremos, es posible garantizar resistencias equivalentes o superiores a las mínimas exigidas, aun cuando se considere nula la contribución de la adherencia por fricción o química. Los resultados permitirán no solo **validar o refutar la validez de las soluciones históricas**, sino también ofrecer una base técnica sólida para futuras líneas de investigación relacionadas con el efecto del recubrimiento, la geometría de los ganchos y la interacción entre varias barras en disposición conjunta.

En definitiva, el análisis inicial muestra cómo una cuestión aparentemente concreta —el anclaje de las barras lisas en hormigón armado— tiene implicaciones directas sobre la **evaluación, el mantenimiento y el refuerzo de un parque estructural de enorme magnitud e importancia socioeconómica**. La revisión conservadora de los Eurocódigos y la creciente necesidad de intervenir sobre obra existente refuerzan la pertinencia de esta investigación, que busca dar respuesta experimental a un problema de plena actualidad en la ingeniería estructural europea.

1.2. OBJETIVOS

Hasta la problemática descrita en el apartado anterior, el presente trabajo se plantea con los siguientes objetivos principales:

- **Analizar la validez de la nueva formulación del Eurocódigo 2 en referencia a las condiciones de anclaje de barras de acero liso y proponer una formulación alternativa basada en resultados experimentales.**

Se evaluará hasta qué punto las expresiones de cálculo recogidas en el Eurocódigo 2 resultan conservadoras, adecuadas o insuficientes cuando se aplican al caso específico de armaduras lisas. Para ello, se contrastarán las exigencias normativas con resultados obtenidos mediante ensayos experimentales reproducidos en condiciones controladas.

Como objetivos parciales asociados se plantean:

- Realizar una revisión bibliográfica y normativa sobre el tratamiento histórico de las armaduras lisas y su evolución en la normativa española y europea.
- Comparar de forma crítica los resultados experimentales con los valores previstos por el Eurocódigo 2.

A partir de los datos obtenidos en ensayos de laboratorio, se desarrollarán expresiones empíricas que reflejen con mayor precisión la capacidad de adherencia entre el hormigón y el acero liso. Estas fórmulas estarán orientadas a cubrir situaciones reales no contempladas adecuadamente por la normativa vigente.

Para alcanzar este objetivo final se establecen los siguientes pasos intermedios:

- Diseñar y planificar los ensayos experimentales (Pull-out Test, Beam Test y tracción por hendimiento), definiendo las variables de control y los parámetros a medir.
- Ejecutar los ensayos en condiciones controladas, registrando la respuesta carga–desplazamiento y los modos de fallo.
- Ajustar expresiones empíricas basadas en los resultados experimentales.
- Verificar la validez y consistencia de la formulación propuesta frente a los casos analizados

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Barras de acero liso

Las barras de acero liso constituyen el antecedente directo de las armaduras corrugadas utilizadas en la actualidad en las estructuras de hormigón armado. Se caracterizan por presentar una superficie cilíndrica uniforme, sin resaltos ni deformaciones superficiales que favorezcan la adherencia mecánica con el hormigón. En consecuencia, el mecanismo resistente entre ambos materiales se basa principalmente en la adherencia química inicial y en el rozamiento por presión radial generado durante el fraguado y la retracción del hormigón, lo que las hace más vulnerables al deslizamiento y a la pérdida de anclaje frente a esfuerzos de tracción.



Ilustración 2 - Barra de acero liso (2025)

El empleo de barras lisas se remonta a las primeras décadas de desarrollo del hormigón armado, a finales del siglo XIX y principios del siglo XX. Durante este período, el material comenzaba a consolidarse como sistema estructural innovador frente a la construcción tradicional de acero, madera o fábrica, y las barras disponibles en el mercado carecían de tratamientos superficiales específicos. Su uso se generalizó en Europa y Norteamérica hasta aproximadamente mediados del siglo XX, momento en el que comenzaron a introducirse las barras corrugadas, diseñadas para mejorar significativamente la adherencia mediante la conexión mecánica con el hormigón.

En España, al igual que en otros países europeos, las armaduras lisas fueron las predominantes hasta la década de 1960. Numerosas estructuras históricas, tanto de edificación como de obra civil

(puentes, depósitos, forjados, etc.), se ejecutaron con este tipo de acero, lo que plantea en la actualidad importantes retos en términos de evaluación estructural, refuerzo y rehabilitación. De ahí la relevancia de estudiar sus condiciones de anclaje y adherencia a la luz de los conocimientos actuales y de las normativas vigentes.

2.1.1. Adherencia

La adherencia entre el acero y el hormigón es un fenómeno complejo que condiciona la eficiencia estructural de los elementos armados. En el caso de las barras lisas, su comportamiento difiere significativamente del de las barras corrugadas debido a la ausencia de resaltes mecánicos. (LEONHARDT, 1973) estableció un marco teórico fundamental para cuantificar este fenómeno, basado en tres mecanismos principales: adhesión química, fricción y resistencia por aplastamiento (este último irrelevante en barras lisas).

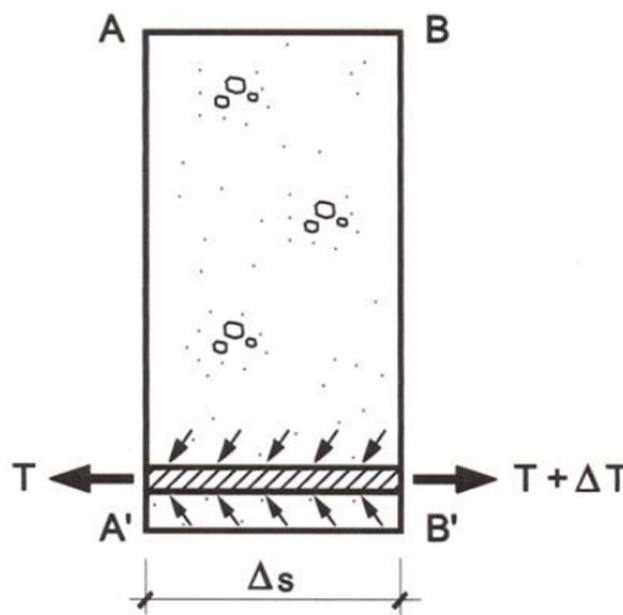


Ilustración 3 - Representación de la adherencia en una barra (Ruiz, 2008)

La adhesión química es el resultado de las fuerzas intermoleculares en la interfaz acero-hormigón. Leonhardt señala que esta componente:

- Proporciona una resistencia inicial de 0.5 a 1.5 MPa.
- Se pierde abruptamente ante deslizamientos superiores a 0.01 mm, tras lo cual solo actúa la fricción.

La resistencia por fricción depende de la rugosidad de la barra y de la presión de confinamiento generada por la contracción del hormigón o cargas externas. Aunque en las barras lisas se carece

de resaltos, suelen presentar irregularidades microscópicas que aumentan la fricción. La tensión de adherencia por fricción se expresa con la siguiente fórmula, donde μ (coeficiente de fricción) oscila entre 0.4 y 0.6 para las barras lisas:

$$\tau_{fric} = \mu \cdot \sigma_n$$

En las barras lisas la resistencia por aplastamiento se puede considerar nula ya que es exclusiva de las barras corrugadas (pues son los resaltos los que originan este aplastamiento sobre el hormigón).

Leonhardt estableció mediante investigación experimental que la tensión máxima de adherencia ($\tau_{b,max}$) para barras lisas embebidas en hormigón no fisurado puede calcularse mediante la expresión:

$$\tau_{b,max} = 0.28 \cdot \sqrt{f_{ck}}$$

- $\tau_{b,max}$: representa la tensión de adherencia máxima en MPa
- f_{ck} : es la resistencia característica del hormigón a compresión en MPa

El coeficiente 0.28, significativamente menor que el 0.47 aplicable a barras corrugadas, refleja la menor capacidad adherente de las barras lisas debido a la ausencia de resaltes mecánicos, a la dependencia exclusiva de la fricción superficial y a una mayor sensibilidad de los defectos de la barra.

La longitud necesaria para garantizar la transferencia completa de tensiones se determina mediante la siguiente expresión:¹

$$L_b = \frac{\phi \cdot \sigma_s}{4 \cdot \tau_{b,max}}$$

- ϕ : es el diámetro nominal de la barra en mm
- σ_s : es la tensión de trabajo del acero en MPa

¹ La fórmula incorpora factores de seguridad para cubrir la variabilidad en la calidad del hormigón, los fallos de colocación y los efectos de escala.

La tensión adherente efectiva debe modificarse mediante:

$$\tau_{b,adj} = \tau_{b,max} \cdot \left(\frac{c}{\phi} \right)^{0.25} \cdot \left(\frac{s}{\phi} \right)^{0.10}$$

Donde c y s son el recubrimiento y la separación entre barras respectivamente, cuando $c < 2\phi$ ó $s < 4\phi$, se producen reducciones de hasta el 50% debido a una mayor probabilidad de hendimiento, una pérdida de confinamiento efectivo y una interacción entre campos de tensiones adyacentes. (Ruiz, 2008)

Por otro lado, en regiones donde el hormigón presenta fisuración, la capacidad adherente se reduce entre un 30-60%, ya que se pierde la contribución de la adhesión química, se fricción disminuye la fricción al reducirse las tensiones de confinamiento y se concentran las tensiones en zonas localizadas.

2.1.2. Anclaje

El anclaje de las armaduras de acero en el hormigón es el mecanismo mediante el cual se asegura la transmisión de esfuerzos entre ambos materiales a lo largo de una determinada longitud de barra embebida. Para que la armadura pueda alcanzar la tensión de cálculo sin producir deslizamientos relativos con respecto al hormigón que la rodea, es imprescindible que la longitud de anclaje disponible sea suficiente para equilibrar las tensiones internas. Este concepto, aparentemente sencillo, resulta fundamental para garantizar que las secciones de hormigón armado trabajen de manera solidaria y que la capacidad resistente del conjunto no quede comprometida por fallos prematuros en la transferencia de esfuerzos.

El proceso de anclaje se explica como el resultado de la interacción entre la tensión que se desarrolla en la armadura y la capacidad del hormigón para transmitirla a través de su superficie de contacto. La formulación básica que gobierna este fenómeno se expresa mediante una relación de equilibrio entre la fuerza que debe ser transmitida por la barra y la resistencia a adherencia disponible. De forma general, esta expresión puede representarse como:

$$l_b = \frac{\phi \cdot \sigma_s}{4 \cdot \tau_{bd}}$$

donde l_b es la longitud de anclaje necesaria, ϕ el diámetro de la barra, σ_s la tensión solicitante en el acero y τ_{bd} la tensión de adherencia de cálculo, que recoge la capacidad resistente del hormigón

en condiciones de transferencia de esfuerzos. Esta relación pone de manifiesto que la longitud de anclaje es directamente proporcional al diámetro de la armadura y a la tensión que actúa en ella, e inversamente proporcional a la resistencia que el hormigón puede ofrecer frente al deslizamiento.

La adherencia entre ambos materiales no es uniforme a lo largo de la barra, sino que se distribuye progresivamente. Esto significa que en los primeros tramos del anclaje la transferencia de esfuerzos es mayor, reduciéndose gradualmente hasta que la tensión de la armadura queda equilibrada. Este comportamiento progresivo justifica que, en caso de no alcanzarse la longitud mínima requerida, se produzca un fallo por deslizamiento antes de que el acero logre desarrollar toda su capacidad resistente. En barras lisas, la problemática es más acusada al carecer de resaltes que favorezcan el engranamiento mecánico con el hormigón, por lo que la transferencia depende casi exclusivamente de la adherencia química y del rozamiento superficial.

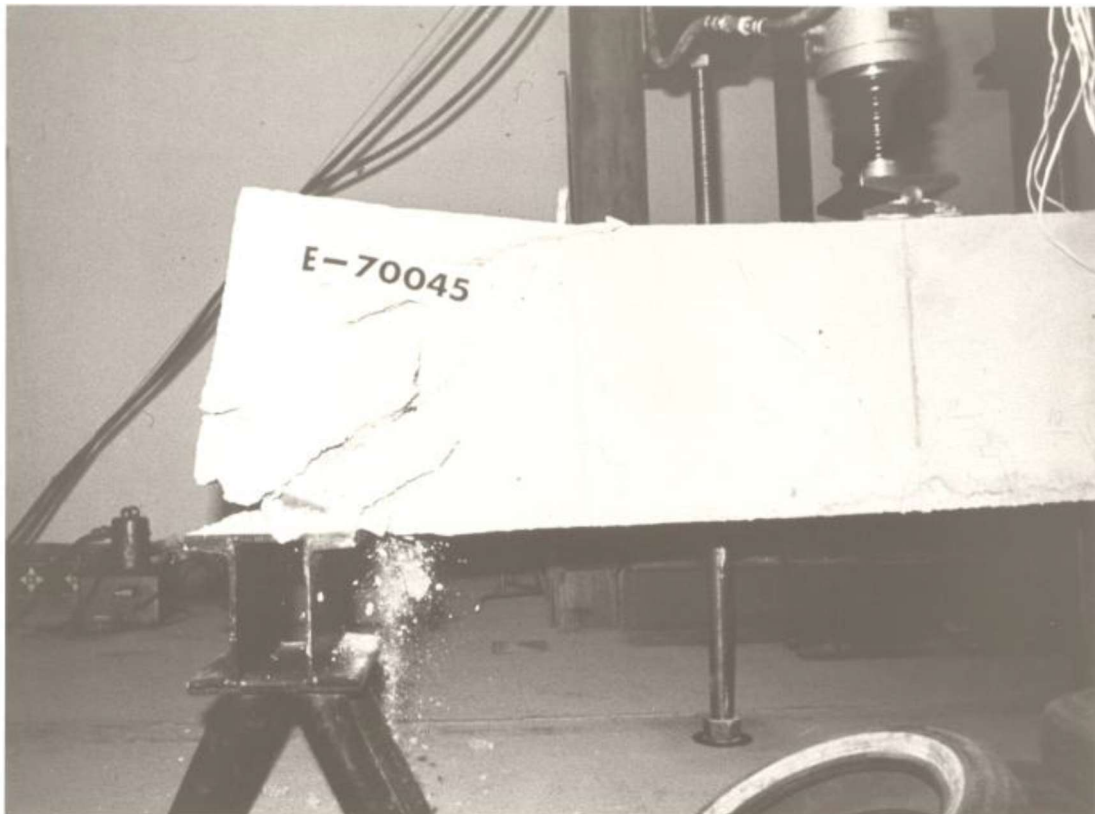


Ilustración 4 - Fallo repentino de anclaje en viga (INTEMAC)

Una de las soluciones tradicionales para compensar esta limitación en las barras lisas ha sido la ejecución de terminaciones en forma de gancho. El doblado de la barra introduce un mecanismo adicional de anclaje por bloqueo geométrico, ya que el esfuerzo de tracción en la armadura debe ser equilibrado no solo por la adherencia a lo largo de la longitud embebida, sino también por la reacción que se genera en el extremo doblado. De esta forma, el gancho actúa como un refuerzo al

anclaje directo, reduciendo el riesgo de deslizamiento y aumentando la seguridad frente al fallo. En la práctica, la inclusión de un radio de curvatura suficiente en el extremo de la barra asegura que la tracción se transmita mediante una combinación de adherencia superficial y efecto de confinamiento en la zona del gancho, lo que resulta especialmente relevante en elementos estructurales donde no es posible disponer de grandes longitudes rectas de anclaje.

El fallo del anclaje puede producirse de diferentes formas, ya sea por un deslizamiento progresivo de la barra dentro del hormigón, por la fisuración radial debida a la presión transmitida alrededor de la armadura (fallo por hendimiento), o por la apertura de grietas longitudinales que se propagan paralelamente a la barra. Todos estos modos de fallo se relacionan con la insuficiencia del anclaje y ponen de manifiesto que no basta con considerar la resistencia del acero y del hormigón de manera independiente, sino que es necesario garantizar que el mecanismo de transferencia entre ambos materiales sea adecuado.

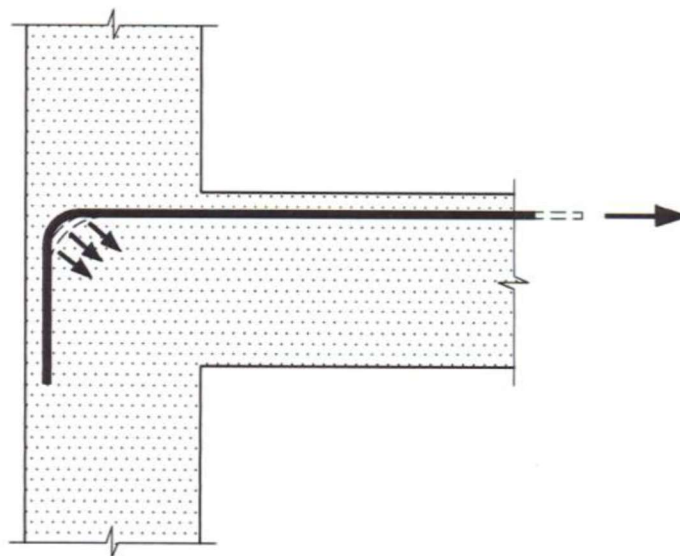


Ilustración 5 - Anclaje de 90º (Ruiz, 2008)

En definitiva, el anclaje constituye una condición indispensable para la eficacia del hormigón armado, ya que sin él el sistema no puede comportarse como un material compuesto. El estudio detallado de su funcionamiento, de las fórmulas que lo definen y de soluciones complementarias como los ganchos en las terminaciones, resulta esencial para comprender la verdadera capacidad de las estructuras construidas con barras lisas. La información desarrollada en este apartado ha sido elaborada a partir del análisis del capítulo de referencia, donde se estudian en profundidad los fundamentos teóricos y constructivos del anclaje en elementos de hormigón armado.

2.1.3. Solape

En barras lisas el solape es la superposición longitudinal entre dos armaduras para garantizar la transferencia de tensiones de una a otra mediante adherencia por fricción y confinamiento del hormigón. A diferencia de las barras corrugadas, las barras de acero liso requieren mayores longitudes de empalme ($40-60\phi$ como orden de magnitud) por la ausencia de resaltes mecánicos. Su eficiencia depende críticamente del recubrimiento, separación entre barras y presencia de estribos de confinamiento. Ha sido objeto de estudio desde los primeros desarrollos del hormigón armado. (LEONHARDT, 1973) y (Mönnig, 1973) establecieron los fundamentos mecánicos, destacando que *"La transferencia de tensiones en empalmes de barras lisas depende críticamente de la fricción desarrollada en la interfaz acero-hormigón, siendo necesario considerar los efectos tridimensionales de fisuración"*.

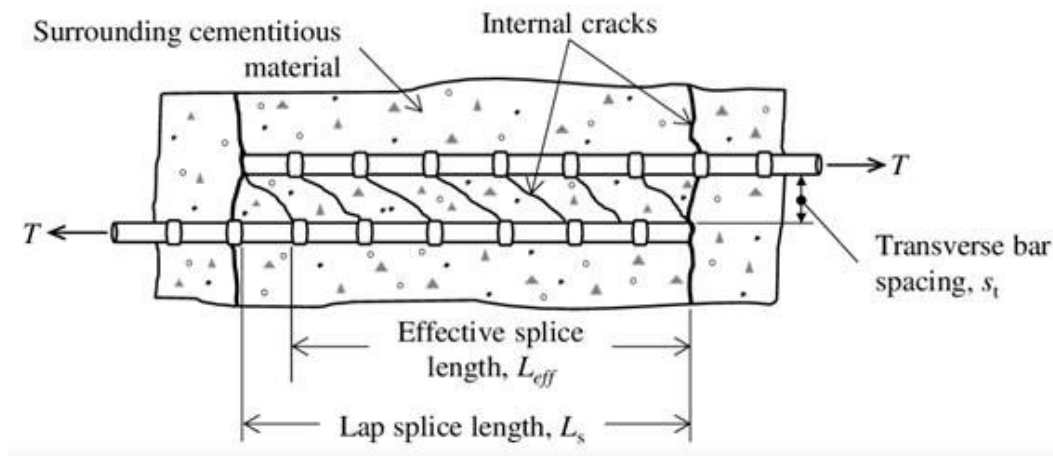


Ilustración 6 - Ejemplo de distribución de carga puntual de solape (PRONTUBEAN)

Posteriormente, (Tepfers, 1979) en su trabajo seminal para RILEM desarrolló el modelo de tensión radial que explica el hendimiento en zonas de solape:

$$\sigma_r = \frac{\tau \cdot \phi}{2 \cdot c}$$

σ_r : es la tensión radial

τ : es la tensión de adherencia

ϕ : es el diámetro de la barra

c : es el recubrimiento.

El desarrollo de los criterios normativos para el solape de armaduras lisas ha experimentado una notable evolución a lo largo del siglo XX, reflejando los avances en el conocimiento del comportamiento estructural. Durante el periodo pre-Eurocódigo, la normativa (Deutsches Institut für Normung, 1972) establecía prescripciones específicas para estos elementos, exigiendo una longitud mínima de solape de 40 diámetros (40ϕ) como base de cálculo. Esta exigencia respondía a la necesidad de compensar la menor capacidad adherente de las barras lisas en comparación con las corrugadas. La misma norma introducía un coeficiente de reducción de 0.7 cuando se disponían estribos de confinamiento espaciados cada 150 mm, reconociendo así el efecto beneficioso de la armadura transversal en el comportamiento del empalme.

Posteriormente, el (Comité Euro-International du Béton, 1985) propuso un enfoque más sofisticado para el cálculo de longitudes de solape mediante la expresión $L_{sol} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot L_{by}$. Esta formulación introducía tres coeficientes de ajuste que permitían considerar diferentes variables: α_1 para la calidad del hormigón, α_2 (con valor de 1.4 específicamente para barras lisas) para las condiciones de adherencia y α_3 para considerar el efecto de la presión transversal. Este modelo representó un avance significativo al incorporar factores cuantitativos que reflejaban mejor la realidad física del comportamiento estructural.

La transición hacia los Eurocódigos marcó un punto de inflexión en la normativa, con la publicación del (Comité Europeo de Normalización (CEN), 2004). Este documento eliminó las referencias explícitas a las barras lisas, reflejando su progresiva desaparición de la práctica constructiva moderna. Sin embargo, investigaciones como las realizadas por (Eligehausen, 1983) demostraron que, bajo condiciones adecuadas de confinamiento mediante estribos cerrados, los empalmes en barras lisas podían alcanzar eficiencias del 85% respecto a las corrugadas. Estos hallazgos mantuvieron su relevancia para el análisis y rehabilitación de estructuras históricas, donde estas armaduras fueron ampliamente utilizadas. La evolución normativa muestra así cómo los criterios técnicos han ido adaptándose al desarrollo de nuevos materiales y técnicas constructivas, sin perder de vista las lecciones aprendidas de las estructuras existentes.

La evolución histórica de la Normativa en España en lo referente al anclaje de armaduras lisas se recoge en el siguiente apartado.

2.2. Evolución histórica de las condiciones de anclaje

2.2.1. EH-39

Publicada en 1939 bajo el título "**Instrucción para el proyecto y ejecución de obras de hormigón armado**", la norma EH-39 representa el primer intento sistemático de establecer criterios unificados en España para el diseño estructural con hormigón armado. Se enmarca en un contexto técnico dominado por el empleo de **aceros lisos**, dado que las armaduras corrugadas aún no estaban implantadas en el mercado nacional. Por tanto, esta norma ofrece una visión normativa completamente adaptada al comportamiento adherente del acero liso, cuya fiabilidad dependía en gran medida de la longitud embebida y del uso sistemático de ganchos de anclaje.



Ilustración 7- Portada EH-39 (1939)

En lo que respecta al diseño de uniones y anclajes, la EH-39 asume un enfoque empírico, basado en proporciones geométricas constantes, sin considerar aún la adherencia como fenómeno mecánico cuantificable. Sin embargo, sus prescripciones constituyen la base de muchas soluciones constructivas que aún se conservan en estructuras de la posguerra.

- **Anclaje de armaduras lisas**

La norma establece que las armaduras deben estar suficientemente embebidas en el hormigón para asegurar la transmisión efectiva de tensiones. En el caso de **barras sometidas a tracción**, la longitud

de anclaje recomendada es de **20 diámetros de la barra**. Para barras **sometidas a compresión**, este valor se reduce a **15 diámetros**, considerando que las tensiones de compresión tienden a distribuirse de forma más uniforme y que la fisuración por tracción no está presente.

En todos los casos, se considera imprescindible el uso de **ganchos en los extremos de las barras**, de forma que se aumente el efecto de anclaje pasivo y se dificulte el deslizamiento. El **radio interior del gancho** debe ser de al menos **2 veces el diámetro de la barra**, garantizando así un curvado sin debilitamiento y suficiente capacidad de agarre del hormigón circundante. Este detalle resulta especialmente importante en los arranques de pilares, zunchos perimetrales o apoyos de vigas simplemente apoyadas.

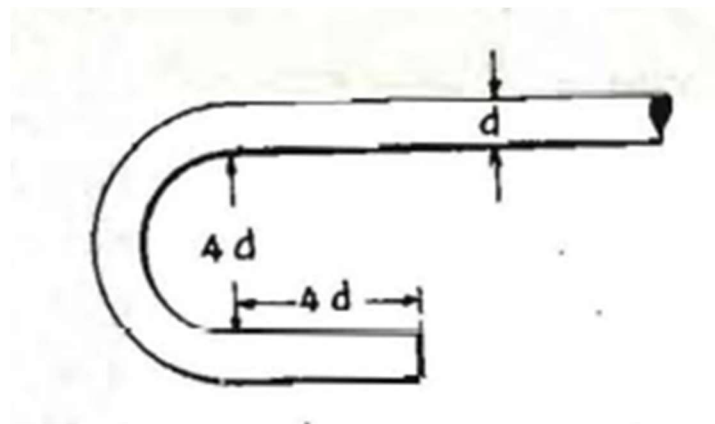


Ilustración 8 - Dimensiones del anclaje (1939)

La norma no introduce fórmulas basadas en tensiones adherentes ni distingue entre factores de posición, tipo de solicitación o condiciones de recubrimiento. El planteamiento es enteramente geométrico y uniforme para todo tipo de secciones.

- **Solapes**

En lo relativo a uniones entre armaduras por solape, la EH-39 indica que las barras deben solaparse una longitud **al menos igual a la de anclaje**, lo que implica **20·Ø en tracción** y **15·Ø en compresión**, aunque sin diferenciación explícita entre ambas solicitaciones. No se contemplan ajustes por confinamiento, recubrimiento, ni separación entre barras. Tampoco se incluyen recomendaciones para la disposición alternada de solapes ni para la proporción máxima de barras solapadas en una misma sección.

Este enfoque, aunque simple, fue funcional en una época donde predominaba la construcción masiva con medios artesanales, y donde el dimensionado por exceso ofrecía garantías en ausencia de herramientas de cálculo más avanzadas.

- **Empalmes**

El empalme entre armaduras se permitía exclusivamente mediante **solape directo**, considerado válido siempre que las barras se colocasen paralelas y a escasa distancia entre sí. No se establecían requisitos formales para empalmes soldados ni se regulaban dispositivos mecánicos de unión.

De manera implícita, la norma promovía una ejecución basada en la continuidad visual de la armadura, en un momento en que la inspección visual y la confianza en el “buen hacer del herrero” eran fundamentales. A pesar de su sencillez, este sistema de empalme fue extensamente utilizado, especialmente en elementos lineales como vigas, zunchos y riostras.

- **Resistencia del hormigón**

La EH-39 no define resistencias características tal como se entiende en la ingeniería estructural moderna, pero sí establece resistencias mínimas requeridas. En concreto, exige un valor **mínimo a compresión de 150 kg/cm²**, equivalente a aproximadamente **15 MPa**, para hormigones destinados a elementos estructurales.

No se menciona de forma explícita la resistencia a tracción del hormigón, aunque se asume su baja magnitud, y se incorpora de forma indirecta mediante la necesidad de controlar el armado mínimo y evitar la fisuración prematura.

El concepto de durabilidad y calidad del curado apenas se menciona, siendo habitual el empleo de mezclas de granulometría irregular, con áridos locales y relaciones agua/cemento elevadas.

- **Características mecánicas del acero**

Las armaduras empleadas bajo esta norma eran **barras lisas laminadas en caliente**, sin corrugas ni relieves. Se exigía que el acero presentara un **límite elástico no inferior a 2400 kg/cm² (\approx 235 MPa)** y una **resistencia última de 3700–4000 kg/cm² (\approx 360–390 MPa)**.

Las **tensiones admisibles en tracción** se limitaban al **60 % del límite elástico**, lo que equivale a unos **137 MPa**. No se prescriben requisitos sobre alargamiento a rotura, tenacidad ni ductilidad, y tampoco se establecen procedimientos de verificación sistemática mediante ensayos destructivos.

- **Ensayos en el hormigón**

La caracterización del hormigón se basaba únicamente en ensayos de **compresión sobre probetas cúbicas de 15 cm de lado**, realizadas in situ o en laboratorio. No se contempla ningún método para evaluar la adherencia, la resistencia a tracción directa ni la resistencia a tracción indirecta por hendimiento.

Los ensayos se centraban en garantizar que la resistencia a compresión superaba el umbral mínimo exigido, sin un control estadístico definido. La calidad del hormigón quedaba, en gran parte, supeditada a la experiencia del constructor y a la inspección visual de la mezcla y del fraguado.

2.2.2. HA-61

La publicación de HA-61, denominada “Instrucción para el proyecto y ejecución de obras de hormigón armado”, supuso una actualización respecto a la EH-39, en un contexto de consolidación de la reconstrucción tras la posguerra y en plena expansión de la edificación residencial en España. Esta norma mantuvo la utilización generalizada de armaduras lisas, ya que todavía no se había extendido de forma significativa la introducción de las barras corrugadas. El documento presenta un enfoque continuista con respecto a su predecesora, pero incorpora un lenguaje técnico algo más sistematizado, con referencias más claras a la necesidad de asegurar la colaboración entre el acero y el hormigón.

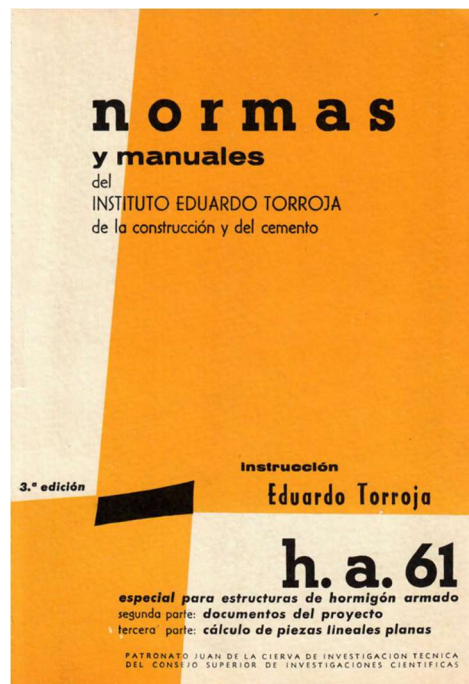


Ilustración 9 - Portada EH-61 (1961)

- **Anclaje de armaduras lisas:**

La longitud de anclaje mínima para barras lisas se fijaba en 20 diámetros de barra en tracción y 15 diámetros en compresión, siguiendo los criterios ya introducidos por la EH-39. Estos valores se consideraban suficientes para garantizar la transferencia de esfuerzos bajo hipótesis simplificadas de adherencia. La norma insistía en que, para asegurar la retención mecánica, las barras debían rematarse con ganchos, preferiblemente de 180° y con un radio mínimo de curvatura equivalente a $4\cdot\varnothing$. Este requisito respondía a la necesidad de reforzar el anclaje en situaciones donde la adherencia lineal no era suficiente, especialmente en apoyos o zonas sometidas a tracción elevada.

- **Solapes:**

La HA-61 establecía que la longitud de solape debía ser al menos igual a la longitud de anclaje. Al igual que en la instrucción precedente, no se consideraban factores adicionales relacionados con la disposición de las barras ni se introducían criterios de reducción. El solape era entendido como el procedimiento habitual para garantizar la continuidad de las armaduras longitudinales, sin alternativas como empalmes mecánicos o soldadura.

- **Empalmes:**

En lo relativo a empalmes, la HA-61 permitía la unión directa por contacto o con ligeras separaciones entre barras, siempre que se respetara la longitud mínima de solape. No se exigía alineación precisa ni condiciones especiales de sujeción, de modo que la calidad de la unión dependía en gran medida de la correcta ejecución en obra. Tampoco existían limitaciones explícitas sobre la cantidad de empalmes admisibles en una misma sección o tramo, aunque implícitamente se aconsejaba no agruparlos en exceso.

- **Resistencia del hormigón:**

En cuanto al hormigón, la HA-61 mantenía un enfoque empírico en el control de calidad. El valor mínimo de resistencia a compresión se fijaba en 150 kg/cm^2 , equivalente a unos 15 MPa, lo que permitía estructuras relativamente esbeltas, pero dentro de un rango de seguridad conservador. La resistencia se evaluaba exclusivamente mediante probetas cúbicas de 20 cm, sin referencia explícita a ensayos de tracción, fisuración o módulos elásticos. La norma seguía vinculando la calidad del material más a la dosificación y a la correcta puesta en obra que a parámetros mecánicos cuantificables.

- **Características mecánicas del acero:**

El único acero contemplado en la HA-61 era el liso laminado en caliente. La instrucción establecía como propiedades básicas un límite elástico mínimo de 2400 kg/cm^2 ($\approx 235 \text{ MPa}$) y una resistencia a tracción última superior a 3800 kg/cm^2 ($\approx 373 \text{ MPa}$). Estos valores reflejaban la calidad estándar de la época, suficiente para las tipologías constructivas dominantes. Las tensiones admisibles se limitaban a aproximadamente un 60 % del límite elástico, garantizando un comportamiento seguro, aunque poco eficiente en términos de aprovechamiento del material. No se regulaban ensayos de control en obra, siendo suficiente con la documentación de los fabricantes.

- **Ensayos en el hormigón:**

La instrucción mantenía como ensayo principal la rotura a compresión en probetas cúbicas, que era la práctica habitual en la ingeniería española del momento. No existían prescripciones sobre ensayos de adherencia ni sobre caracterización del comportamiento del acero más allá de los certificados de origen. Tampoco se contemplaban verificaciones sistemáticas de empalmes o ganchos. La norma confiaba en la correcta ejecución como mecanismo principal de control, en lugar de apoyarse en procedimientos experimentales específicos.

En resumen, la EH-61 representó un paso intermedio en la evolución normativa española. Aunque introdujo un lenguaje más técnico que la EH-39, su enfoque en materia de anclajes, solapes y empalmes continuó siendo esencialmente empírico, sin incorporar todavía modelos analíticos o dependientes de la calidad de los materiales.

2.2.3. EH-68

La publicación de la **EH-68**, titulada *"Instrucción para el proyecto y ejecución de obras de hormigón armado"*, representó una modernización importante respecto a su antecesora la HA-61. Enmarcada en el proceso de reconstrucción y crecimiento urbano de los años 60, esta norma mantiene el uso generalizado de **aceros lisos**, que seguían siendo predominantes en la industria española. Aun sin la aparición masiva de las barras corrugadas, se empieza a observar una cierta sensibilización técnica hacia la adherencia y la relación entre esfuerzos internos y comportamiento estructural.

Aunque la formulación sigue basada mayoritariamente en reglas geométricas, la EH-68 incorpora un lenguaje técnico más maduro, con referencias a condiciones de servicio y a criterios de seguridad más explícitos.

I. Disposiciones generales

PRESIDENCIA DEL GOBIERNO

DECRETO 2987/1968, de 20 de septiembre, por el que se aprueba la Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado.

La técnica de la construcción en general y la del hormigón en particular ha experimentado notable evolución en los últimos años. Una corriente renovadora universal, a la cual España contribuye con su propia investigación, ha dado ya lugar a la publicación de documentos básicos que constituyen una vía unificada por la que habrá de caminar la técnica del hormigón en los años venideros.

La Instrucción para el proyecto de obras de hormigón, hasta ahora vigente en el Ministerio de Obras Públicas, fue promulgada en el año mil novecientos treinta y nueve y revisada y puesta al día en el año mil novecientos cuarenta y cuatro. Las Normas para el cálculo y ejecución de estructuras de hormigón armado de la Dirección General de Arquitectura se remontan al año mil novecientos cuarenta y uno.

La garantía que para la calidad de las obras de hormigón puede conseguirse con la aplicación en su proyecto y construcción de los criterios técnicos contenidos en la Instrucción, justifica que ésta se extienda a toda clase de obras tanto públicas como privadas.

En su virtud, a propuesta de los Ministros de Obras Públicas, Ejército, Industria, Aire y Vivienda y previa deliberación del Consejo de Ministros en su reunión del día trece de septiembre de mil novecientos sesenta y ocho.

DISPONGO:

Artículo primero.—Se aprueba la presente Instrucción para el Proyecto y la Ejecución de Obras de Hormigón en Masa o Armado, cuyo ámbito de aplicación se extiende a todas las obras y proyectos que se realicen en el territorio nacional.

Artículo segundo.—Durante el plazo de dos años, a partir de su publicación en el «Boletín Oficial del Estado», se podrá aplicar indistintamente esta Instrucción o las actualmente vigentes. Pasado dicho plazo, y con las modificaciones a que hubiere lugar, el cumplimiento de la Instrucción será obligatorio.

Artículo tercero.—En el Ministerio de Obras Públicas se constituirá una Comisión Permanente, con representantes de los Ministerios de Obras Públicas, Ejército, Industria, Agricultura, Aire y Vivienda. Esta Comisión podrá ser ampliada por Orden ministerial con representantes de otros Ministerios interesados. Formará parte también de esta Comisión un especialista en hormigón designado por el Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento.

Artículo cuarto.—Serán funciones de la citada Comisión: a) Estudiar y recoger, si procede, los nuevos avances de la técnica del hormigón y las sugerencias recibidas como consecuencia de la aplicación de la Instrucción.

b) Utilizar la redacción de la Instrucción, antes de su establecimiento como de cumplimiento obligatorio, teniendo en cuenta los antecedentes recogidos, en los primeros dieciocho meses desde su publicación.

c) Revisar la Instrucción, cada cinco años como máximo, con objeto de proponer las modificaciones que procedan de acuerdo con la experiencia adquirida.

d) Estudiar y proponer normas e instrucciones sobre la técnica del hormigón.

e) Llevar a cabo cuantos trabajos sobre el hormigón le encomiende la superioridad.

Artículo quinto.—Los miembros de la expresada Comisión Permanente percibirán los derechos de asistencia con arreglo a lo determinado en el artículo veintidós del Reglamento de Dietas y Viáticos de siete de julio de mil novecientos cuarenta y nueve, en la cuantía de ciento veinticinco pesetas el Pres-

idente y el Secretario y de cien pesetas los demás Vocales con cargo a las partidas correspondientes consignadas en los presupuestos de los Ministerios de que dichos miembros dependan.

Artículo sexto.—Pasado el plazo de dos años indicado en el artículo segundo quedarán derogadas las siguientes disposiciones:

Orden dieciocho marzo mil novecientos cuarenta y uno (Ministerio Ejército). Edificaciones militares.

Orden diez septiembre mil novecientos cuarenta y uno (Ministerio Ejército). Normas técnicas de proyecto y construcción de edificios.

Normas para el cálculo y ejecución de estructuras de hormigón armado de la Dirección General de Arquitectura de Noviembre de mil novecientos cuarenta y uno.

Orden treinta noviembre mil novecientos cuarenta y tres (Presidencia). Preferencia de suministro a construcciones con alboro de hierro.

Orden ministerial veinte marzo mil novecientos cuarenta y cuatro (Ministerio Obras Públicas). Instrucción para el Proyecto de Obras de Hormigón.

Cualesquiera otras disposiciones de igual o inferior rango que se opongan al presente Decreto.

Así lo dispongo por el presente Decreto, dado en Madrid a veinte de septiembre de mil novecientos sesenta y ocho.

FRANCISCO FRANCO

El Vicepresidente del Gobierno
LUIS CARRERO BLANCO

Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado

PARTE PRIMERA

ARTICULADO

PREAMBULO

CAPITULO PRIMERO

Introducción

Artículo 1.º CAMPO DE APLICACIÓN DE LA INSTRUCCIÓN.

Se refiere la presente Instrucción a las construcciones, estructuras y elementos estructurales de hormigón, en masa o armado, fabricados con cualquiera de los tipos de cemento indicados en el artículo 5.º

Expresamente se excluyen del campo de aplicación de esta Instrucción:

- los hormigones especiales, tales como los ligeros, los pesados, los refractarios y los compuestos con amiantos, serbios u otras sustancias análogas.
- los hormigones fabricados con acero de límite elástico superior a 4.000 kilogramos/centímetro cuadrado.
- los hormigones que hayan de estar expuestos a temperaturas superiores a 70 grados centígrados.
- las estructuras de hormigón pretensado.

Se puede proyectar y construir con criterios distintos a los utilizados en esta Instrucción siempre que se justifiquen debidamente y se asuma la responsabilidad que de ello pudiera derivarse.

Art. 2.º NOTACIÓN Y UNIDADES.

La notación utilizada en la presente Instrucción cumple las normas generales al efecto establecidas por el Comité Europeo del Hormigón (C. E. B.).

Las unidades adoptadas corresponden a las del sistema metro, kilogramo-fuerza y segundo.

Ilustración 10 - Primera página EH-68 (1968)

• Anclaje de armaduras lisas

Establece una longitud de anclaje mínima para barras lisas de **40 veces el diámetro de la barra en tracción**. Sin embargo, se matiza con mayor claridad que el anclaje debe garantizar la transferencia de esfuerzos sin que se produzca deslizamiento relativo entre el acero y el hormigón.

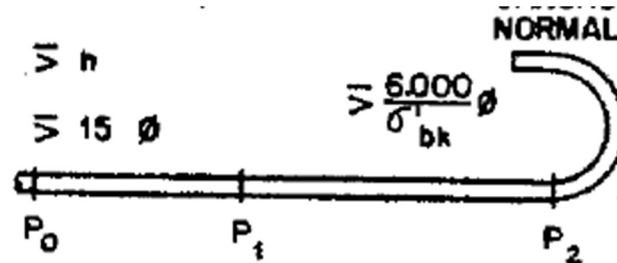


Ilustración 11 - Longitud de anclaje recto (1968)

Al igual que en la EH-39, se exige que las barras se rematen mediante **ganchos cerrados** (generalmente de **180°**) con un **radio interior no inferior a $2,5 \cdot \phi$** . Estos elementos siguen siendo esenciales, tanto desde el punto de vista mecánico como constructivo, para incrementar la resistencia al arrancamiento, especialmente en zonas de apoyo o extremos de tracción.

En esta etapa aún no se incorporan fórmulas dependientes de la calidad del hormigón, la posición de las barras o la tracción desarrollada. El modelo sigue siendo determinista y basado en proporciones fijas.

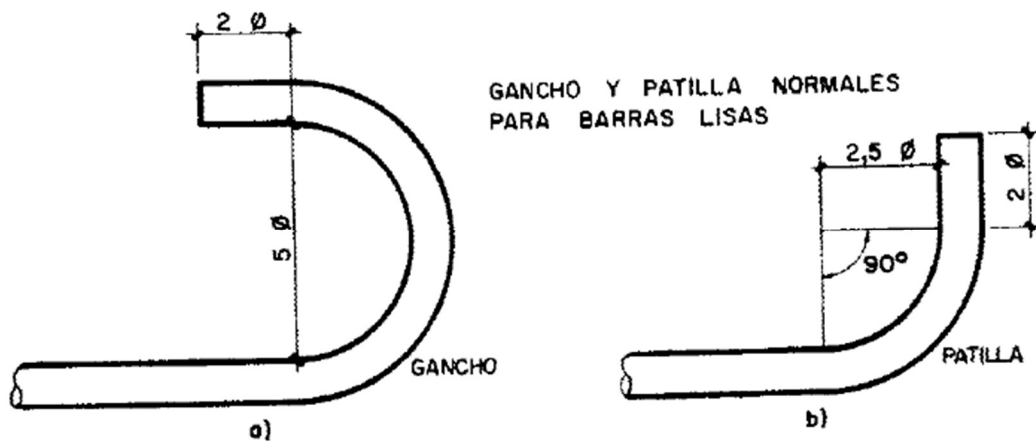


Ilustración 12 - Dimensiones de los anclajes (1968)

- **Solapes**

La normativa mantiene el criterio de que la **longitud de solape sea, como mínimo, igual a la longitud de anclaje**, sin introducir coeficientes reductores ni consideraciones de agrupamiento. Aunque no se tipifican combinaciones de solape alterno o escalonado, la EH-68 comienza a aludir a la importancia de la distribución adecuada de las uniones para evitar concentraciones de tensiones.

El solape se contempla como el método principal de empalme de armaduras longitudinales, ya que no se detallan soluciones alternativas como soldaduras o acoplamientos mecánicos.

- **Empalmes**

Se permite el **empalme por contacto o por ligera separación entre barras**, sin especificar requisitos de alineación, sujeción o protección contra la corrosión en la zona de solape. El documento mantiene un enfoque práctico, confiando en la ejecución correcta de las uniones más que en su verificación analítica.

No se exige un control específico del número de empalmes por sección o por metro lineal, aunque se recomienda implícitamente que no se concentren excesivamente, especialmente en tramos críticos como zonas de momento máximo o apoyo.

- **Resistencia del hormigón**

La EH-68 sigue sin definir el concepto moderno de **resistencia característica**, pero sí eleva los requisitos respecto a su antecesora. El **valor mínimo de resistencia a compresión se fija en 175 kg/cm²**, es decir, aproximadamente **17.5 MPa**, para elementos estructurales normales.

No se establecen procedimientos para medir la resistencia a tracción ni se incorporan métodos para evaluar la fisuración o el módulo de elasticidad. La calidad del hormigón sigue estando ligada a la dosificación empírica, el control visual del amasado y la resistencia en probetas cúbicas.

- **Características mecánicas del acero**

La norma contempla el uso exclusivo de **acero liso laminado en caliente**, y establece como requisito un **límite elástico mínimo de 2500 kg/cm² (\approx 245 MPa)**. La **resistencia a tracción última** debe ser superior a **4000 kg/cm² (\approx 392 MPa)**, garantizando así una ductilidad suficiente para redistribución de esfuerzos.

Las **tensiones admisibles** se fijan en torno al **60 % del límite elástico**, lo que en la práctica representa valores de **150 MPa** para diseño en tracción. No se exigen ensayos de tracción en obra, pero se considera obligatorio utilizar aceros certificados con propiedades homogéneas.

- **Ensayos en el hormigón**

La caracterización del hormigón se realiza mediante **ensayos de compresión sobre probetas cúbicas de 15 cm**, conservándose la tradición constructiva española. No se incluye ninguna referencia a **ensayos de adherencia**, ni tampoco se contemplan métodos de tracción indirecta (como el ensayo brasileño de hendimiento), aunque se empieza a reconocer la importancia de la adherencia como fenómeno relevante.

En cuanto al acero, se permite la aceptación documental de los certificados de fabricación, sin necesidad de ensayos destructivos en obra salvo en casos especiales. La trazabilidad del material se basa en el origen del lote, sin mecanismos de codificación o identificación individual de barras.

2.2.4. EH-73

La **EH-73**, publicada en plena expansión del sector de la edificación, reafirma y consolida los criterios desarrollados en las versiones anteriores, manteniéndose todavía el **uso predominante del acero liso**. A pesar de que las armaduras corrugadas comenzaban a aparecer con mayor frecuencia en Europa, en España su adopción era aún marginal en el momento de publicación de esta norma.

La EH-73 representa una evolución en el enfoque del diseño estructural, incorporando de forma más sistemática el concepto de tensiones admisibles y proponiendo requisitos más específicos sobre hormigones, aunque aún sin introducir el cálculo en estado límite ni parámetros estadísticos modernos.

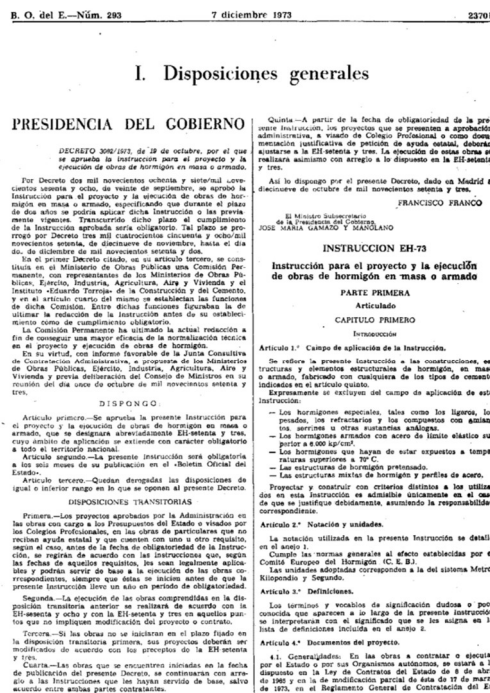


Ilustración 13 - Primera página EH-73 (1973)

- **Anclaje de armaduras lisas**

En lo relativo a anclajes, la norma **mantiene las mismas prescripciones que la EH-68**, estableciendo una longitud de anclaje de **40-Ø para tracción en el caso de la posición I**, aplicables exclusivamente a **barras lisas**. Este valor varía en función de la colocación de la barra y la disposición del gancho.

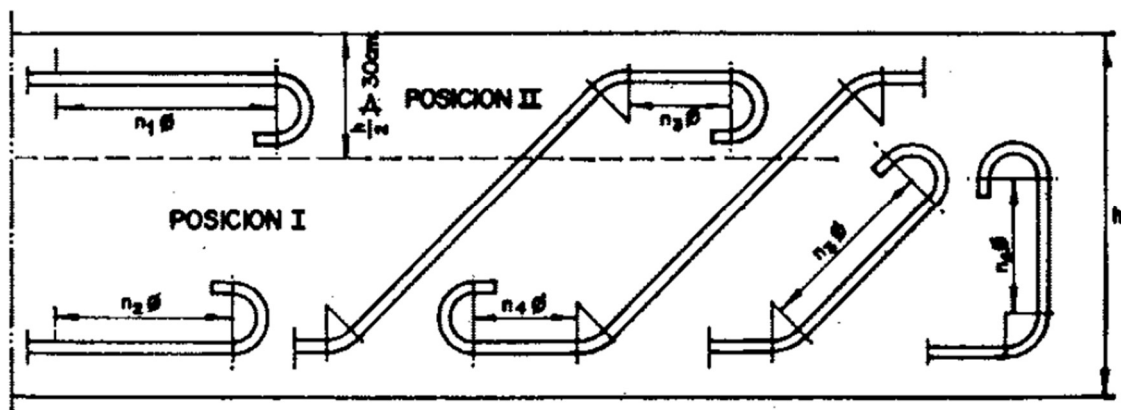


Ilustración 14 - Distancias de anclaje según disposición de las barras (1973)

Los **ganchos cerrados** continúan siendo obligatorios en los extremos de anclaje, especialmente en barras que terminan en zonas de tracción. Se sigue especificando un **radio mínimo del gancho igual a 2,5 veces el diámetro de la barra**, sin distinción por diámetros o tipos de acero. Este valor asegura una curvatura suave, evita concentraciones de tensiones en el acero y mejora la adherencia pasiva del hormigón en la zona curva.

- **Solapes**

Los **empalmes por solape** mantienen el mismo criterio que en normas anteriores: deben tener una longitud **igual a la de anclaje**, es decir, $40 \cdot \varnothing$. No se introducen coeficientes de corrección por separación entre barras, ni por disposición en haces, ni condiciones especiales para barras dispuestas en vertical o transversalmente.

La EH-73 tampoco incluye requisitos formales de limitación del número de solapes simultáneos en una sección, aunque ya se reconocen sus efectos negativos en la fisuración y en la congestión del refuerzo.

- **Empalmes**

Se permite que los empalmes se realicen mediante **solape directo o empalme por contacto**, sin exigencia de medios auxiliares de fijación ni condiciones especiales de ejecución. Los **empalmes soldados** no están contemplados de forma habitual, aunque sí se permite su uso bajo control técnico riguroso.

Los **acoplamientos mecánicos** siguen sin estar normalizados ni descritos, siendo esta una práctica que comenzará a implantarse en décadas posteriores.

- **Resistencia del hormigón**

La EH-73 introduce un **leve incremento en la resistencia mínima exigida del hormigón**, que pasa a ser de **200 kg/cm² (\approx 20 MPa)** para elementos estructurales.

Aunque no se introduce todavía el concepto de resistencia característica ni de cuantiles estadísticos, se reconoce la necesidad de un mayor control de fabricación del hormigón, comenzando a establecerse exigencias sobre consistencia, dosificación y tiempos de fraguado.

Tampoco se prescriben valores para la **resistencia a tracción directa o indirecta**, aunque se recomienda el uso de materiales con buena trabajabilidad y adecuado desarrollo de resistencias iniciales.

- **Características del acero**

La norma sigue basándose en el uso de **acero liso laminado en caliente**, fijando un **límite elástico mínimo de 2500 kg/cm² (\approx 245 MPa)** y una **resistencia última a tracción de 4000–4200 kg/cm² (\approx 392–412 MPa)**, valores muy similares a los establecidos anteriormente.

Se mantiene el criterio de **tensiones admisibles por debajo del 60 % del límite elástico**, lo que representa un margen de seguridad adecuado para evitar la plastificación en servicio.

No se establecen requisitos de alargamiento mínimo ni de control de calidad mediante ensayos en obra, aunque se empieza a incentivar el uso de certificados de calidad expedidos por el fabricante.

- **Ensayos en el hormigón**

El control del hormigón continúa basado en **ensayos de compresión sobre probetas cúbicas**, normalmente de 15×15×15 cm, curadas en condiciones normales. No se introduce el uso de probetas cilíndricas ni se establecen parámetros de homogeneidad, dispersión ni fiabilidad estadística.

La norma sigue sin incorporar **ensayos de adherencia**, lo que limita el entendimiento estructural del comportamiento a tracción del sistema hormigón-acero.

En cuanto a los aceros, se mantienen los procedimientos documentales de verificación mediante fichas técnicas del fabricante, sin obligatoriedad de ensayos destructivos salvo en caso de duda fundada o no conformidad.

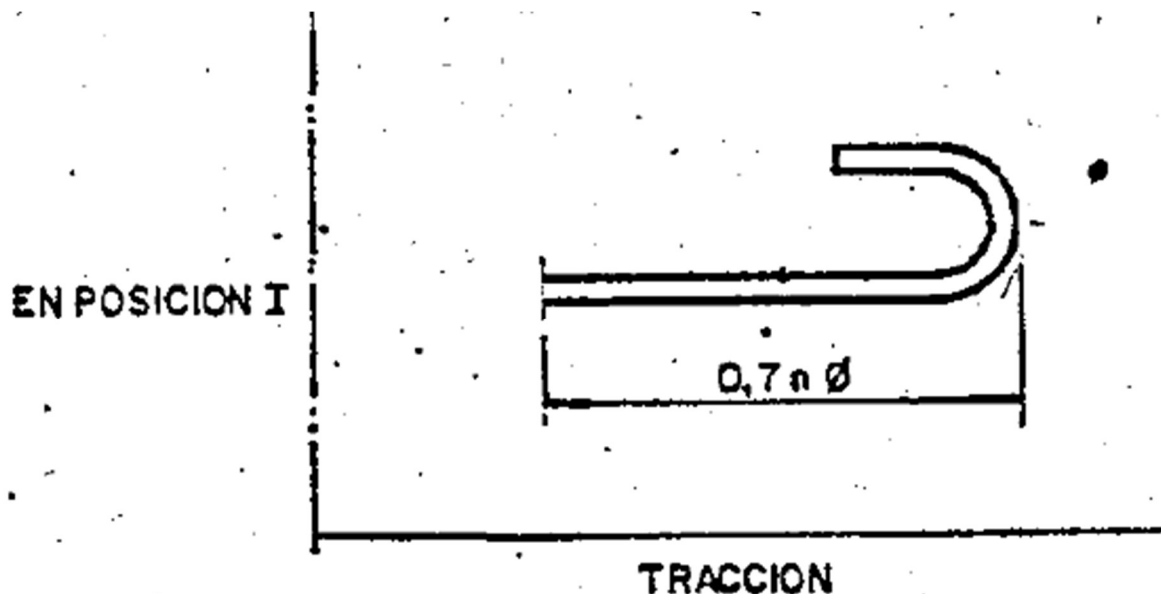


Ilustración 16 - Disposición de la barra a tracción con gancho (1980) (1982)

Hormigón	n
H-125	47
H-150	43
H-175	40
H-200	37
H-225	35
H-250	33
H-300 o mayor	30

Ilustración 17 - Tabla de valores de n (1980) (1982)

Se insiste en la necesidad de terminar las barras con **ganchos cerrados**, que deben formar un arco de **180°** y tener un **radio de curvatura no inferior a 2,5 veces el diámetro de la barra**. Esta configuración favorece la sujeción pasiva del acero mediante la masa de hormigón y sigue siendo una solución constructiva fundamental en zonas de anclaje crítico como arranques de pilares, apoyos de vigas o zunchos de arriostramiento.

Aunque la norma mejora la claridad de redacción, no se introducen aún formulaciones analíticas para el cálculo de longitudes de anclaje en función de tensiones desarrolladas, calidad del hormigón o geometría del elemento.

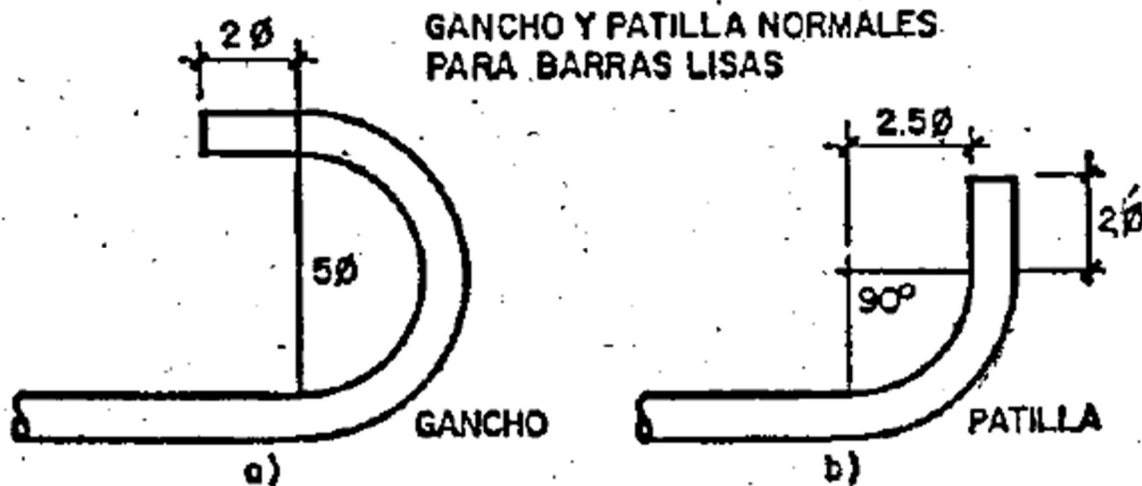


Ilustración 18 - Radio de curvatura de los ganchos y patillas (1980) (1982)

- **Solapes**

Se mantiene el criterio clásico: la **longitud de solape debe ser igual a la de anclaje**, aplicándose **43·φ como valor mínimo** para barras sometidas a tracción. La EH-80 tampoco introduce factores correctores por distribución, recubrimiento ni separación de barras, pero empieza a reconocer que los solapes deben evitarse en zonas de alta sollicitación o donde puedan agruparse demasiadas uniones.

Se recomienda la colocación alternada de los solapes y se desaconseja que un número elevado de empalmes se concentre en una misma sección transversal. Estas indicaciones, aunque cualitativas, muestran un creciente interés por la calidad estructural de las uniones.

- **Empalmes**

El **empalme por solape sigue siendo el método predominante** admitido por la norma. No se detallan procedimientos para uniones soldadas ni se regulan dispositivos mecánicos, aunque se admite su uso en casos específicos bajo condiciones controladas.

La norma exige que los solapes aseguren la continuidad estructural sin pérdida de sección resistente, pero no establece ensayos de control ni métodos de inspección más allá de la supervisión visual en obra.

- **Resistencia del hormigón**

En esta versión normativa, el **valor mínimo de resistencia a compresión se eleva a 210 kg/cm²**, lo que equivale a **21 MPa**. Si bien no se emplea aún el término “resistencia característica”, se observa un incremento progresivo en las exigencias de calidad del hormigón.

No se definen valores para la resistencia a tracción directa o por hendimiento, ni tampoco se cuantifica el módulo de elasticidad, pero se recomienda una dosificación cuidadosa y un control más riguroso de la consistencia, especialmente en elementos prefabricados o en condiciones ambientales desfavorables.

- **Propiedades del acero**

La EH-80 continúa aceptando **acero liso como material de uso corriente**, aunque ya comienza a referirse a productos corrugados como alternativa viable. Se exigen las siguientes propiedades mínimas para acero liso:

- **Límite elástico:** $\geq 2500 \text{ kg/cm}^2$ ($\approx 245 \text{ MPa}$)
- **Resistencia última:** entre 4000 y 4200 kg/cm² ($\approx 392\text{--}412 \text{ MPa}$)
- **Tensión admisible en tracción:** no debe superar el 60 % del límite elástico ($\approx 147 \text{ MPa}$)

Se sigue sin exigir valores mínimos de alargamiento a rotura ni se introducen conceptos como tenacidad o comportamiento plástico, que serían fundamentales en futuras normativas.

- **Ensayos en el hormigón**

El **ensayo de compresión sobre probetas cúbicas** continúa siendo la herramienta principal de caracterización del hormigón. La norma recomienda realizar ensayos periódicos y exige la conservación adecuada de probetas durante los primeros 28 días.

No se incorporan ensayos de adherencia, tracción directa ni hendimiento, aunque se intuye que la comunidad técnica empieza a cuestionar la suficiencia de los criterios geométricos para garantizar la seguridad en uniones.

Respecto al acero, la norma mantiene el uso de certificados de origen como medio de verificación, con posibilidad de realizar ensayos destructivos puntuales si se detectan inconformidades o dudas sobre el suministro.

2.2.6. EH-88

La **EH-88**, publicada por el Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo en 1988, representa un paso significativo hacia una concepción más moderna de la seguridad estructural en hormigón armado. Aunque el uso de armaduras corrugadas ya era ampliamente aceptado y recomendado en ese momento, la instrucción **seguía contemplando el empleo de barras lisas**, especialmente por su presencia en estructuras existentes o en obras de carácter tradicional o prefabricado.

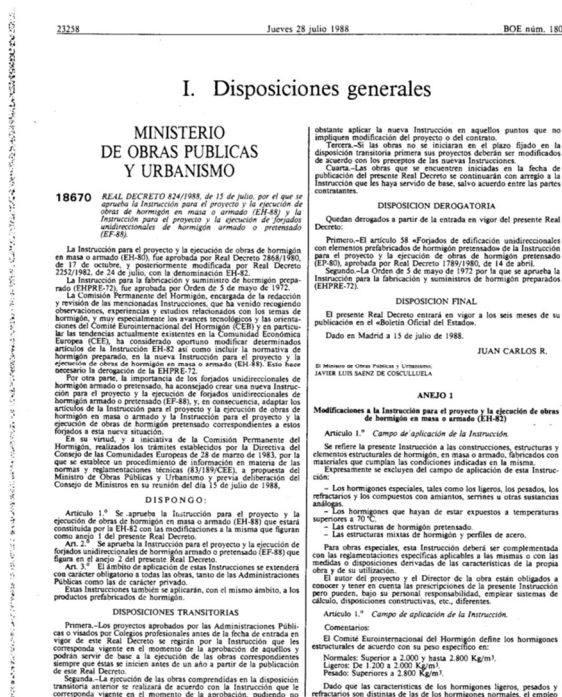


Ilustración 19 - Primera página EH-88 (1988)

Esta normativa continúa utilizando el **modelo de tensiones admisibles**, aunque con un desarrollo más racional y con criterios de diseño y control de calidad más precisos. A su vez, introduce el concepto de seguridad estructural desde un enfoque más global, con una redacción más técnica y próxima a las futuras instrucciones basadas en estados límite.

- **Anclaje de armaduras lisas**

La EH-88 mantiene como referencia para el anclaje de barras lisas los valores empíricos consolidados en los años anteriores: **30,1·Ø para barras a tracción**. Se siguen considerando válidas únicamente si el acero es liso y la adherencia depende fundamentalmente de la fricción superficial y del confinamiento del hormigón.

Se insiste nuevamente en la necesidad de disponer **ganchos cerrados de 180°** en los extremos libres de las armaduras de tracción, con un **radio interior mínimo de $2,5 \cdot \varnothing$** . Esta geometría busca asegurar la retención mecánica de la barra en caso de pérdida de adherencia por fisuración, y responde también a criterios constructivos de anclaje sencillo pero fiable.

Aunque se aprecia un mayor rigor en el lenguaje normativo, **no se introducen aún fórmulas analíticas** de cálculo de anclaje como las que aparecerían en el Eurocódigo posteriormente. La norma sigue basándose en valores geométricos fijos, sin relación directa con la calidad del hormigón ni con los esfuerzos actuantes.

- **Solapes**

Se mantiene el principio tradicional según el cual **la longitud de solape debe coincidir con la longitud de anclaje**, estableciendo por tanto los valores de **$30,1 \cdot \varnothing$ para tracción**. En el caso de barras de compresión, el mismo criterio geométrico se aplica sin considerar efectos de pandeo o pérdida de adherencia por esbeltez.

La EH-88 recomienda que **los solapes no se concentren en una misma sección**, promoviendo una distribución alterna que evite puntos débiles o fisuras localizadas. Aunque estas recomendaciones no se acompañan de requisitos cuantitativos, suponen un avance respecto a normas anteriores.

- **Empalmes**

El empalme por solape sigue siendo el método preferente para unir armaduras lisas. La norma comienza a mencionar la posibilidad de emplear **uniones soldadas** o **acoplamientos mecánicos**, aunque sin establecer aún criterios técnicos detallados para su ejecución.

El empalme mediante soldadura requiere autorización específica del proyectista y verificación del control de calidad. A pesar de que la EH-88 aún no normaliza estas técnicas, su inclusión anticipa su incorporación posterior en normas basadas en estados límite.

- **Resistencia del hormigón**

La EH-88 **incrementa los requisitos mínimos del hormigón estructural** a una **resistencia a compresión de 250 kg/cm^2 ($\approx 25 \text{ MPa}$)**, reflejando una evolución en las expectativas de comportamiento y durabilidad.

No se define aún el concepto estadístico de resistencia característica (f_{ck}), pero se empieza a emplear un lenguaje técnico más preciso, y se introduce la idea de adecuar el hormigón

a las condiciones ambientales, lo que implica una mayor atención al recubrimiento, dosificación y calidad de ejecución.

No se incluyen resistencias a tracción directa ni indirecta, aunque ya se empieza a mencionar la necesidad de evaluar la fisuración como fenómeno estructural relevante.

- **Propiedades del acero**

Aunque se recomienda el uso de armaduras corrugadas, la EH-88 sigue permitiendo el empleo de acero liso siempre que se cumplan ciertas condiciones. Se exige para el acero liso:

- **Límite elástico mínimo:** $2500 \text{ kg/cm}^2 (\approx 245 \text{ MPa})$
- **Resistencia última a tracción:** $4200 \text{ kg/cm}^2 (\approx 412 \text{ MPa})$
- **Tensión admisible en tracción:** aproximadamente **147 MPa** (60 % del límite elástico)

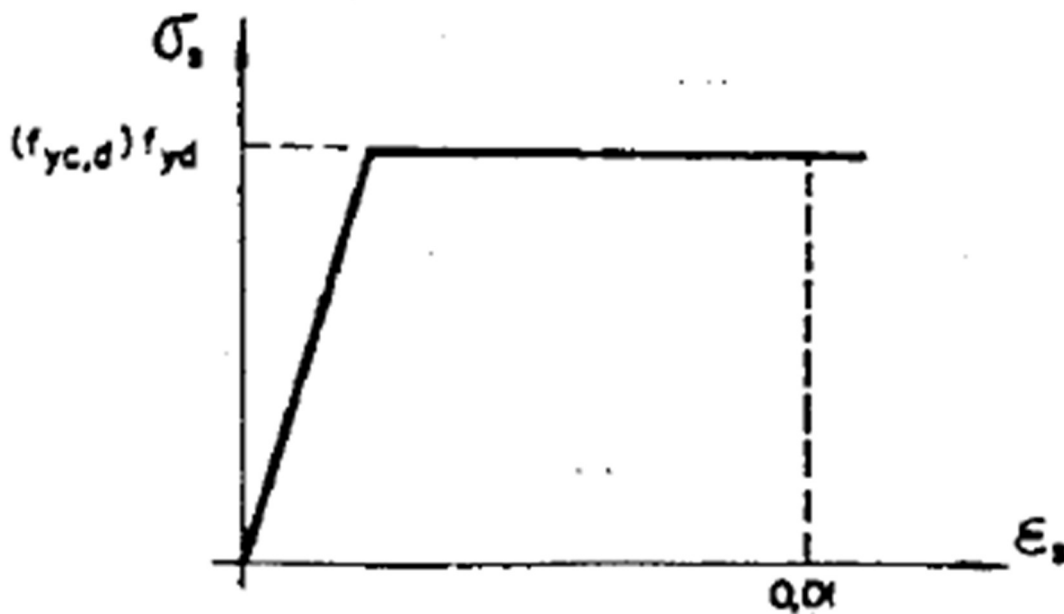


Ilustración 20 - Diagrama del límite elástico del acero (1988)

Se reconoce que el **mecanismo de adherencia del acero liso es menos eficiente**, por lo que se refuerza la necesidad de ganchos y longitudes generosas de anclaje o solape.

El acero debe contar con **certificación de origen**, y en caso de duda, debe someterse a ensayos de tracción para verificar sus propiedades mecánicas. Se empieza a exigir un **control de calidad documentado** más riguroso.

- **Ensayos característicos**

El hormigón debe ensayarse en **compresión sobre probetas cilíndricas o cúbicas**, y se empieza a mencionar la importancia de los métodos de curado, transporte y conservación de las muestras.

No se incluyen ensayos específicos de adherencia ni de tracción por hendimiento, pero se reconoce la importancia creciente de la relación acero-hormigón en el diseño y la durabilidad.

Respecto al acero, se permite aceptar los certificados de fábrica como garantía, aunque se abre la puerta a requerir **ensayos mecánicos destructivos aleatorios** para comprobar el cumplimiento de las propiedades declaradas.

2.2.7. EH-91

La **EH-91**, publicada por el Ministerio de Obras Públicas y Transportes, supone una inflexión normativa en el diseño de estructuras de hormigón armado en España. Esta versión **introduce oficialmente el modelo de cálculo en estados límite**, adoptando conceptos como resistencia característica y coeficientes parciales de seguridad. Aunque el uso de acero corrugado ya era predominante, la norma **conserva referencias explícitas a armaduras lisas**, tanto para estructuras existentes como en sistemas constructivos prefabricados o de baja exigencia.



Ilustración 21 - Portada EH-91 (Ministerio de Obras Públicas y Transportes, 1991)

La EH-91 se considera la base normativa moderna previa al Eurocódigo, y establece un marco más robusto para evaluar el comportamiento estructural, la adherencia y la durabilidad, aunque con algunas inercias reminiscencias de las formulaciones geométricas anteriores.

- **Anclaje de armaduras lisas**

Por primera vez en la normativa española, la longitud de anclaje deja de definirse como un valor fijo y se calcula mediante una **formulación basada en el equilibrio de tensiones entre el acero y el hormigón circundante**. No obstante, para armaduras lisas, se sigue prescribiendo una **longitud mínima de anclaje igual a $30,1 \cdot \varnothing$** si no se justifica su cálculo mediante adherencia real.

La norma exige que las barras lisas se terminen mediante **ganchos de 180°** con un **radio interior mínimo de $4 \cdot \varnothing$** , en particular cuando se ubican en zonas de tracción y no se garantiza una adherencia suficiente por longitud recta.

Aunque se introducen factores de reducción o incremento del anclaje en función del recubrimiento, la posición o el tipo de sollicitación, en el caso de acero liso se mantiene un enfoque más conservador, reflejando la menor eficiencia adherente respecto a las armaduras corrugadas.

- **Solapes**

La **longitud de solape para barras lisas** se calcula por analogía con el anclaje: si no se dispone de fórmulas basadas en adherencia, se adopta un **mínimo de $20 \cdot \varnothing$** para asegurar la transmisión de esfuerzos. La EH-91 señala que **los solapes deben distribuirse longitudinalmente y no coincidir en una misma sección crítica**, e introduce por primera vez el concepto de **agrupamiento de solapes**, recomendando su dispersión.

Se permite la aplicación de factores correctores si el acero presenta corrugas, pero **no se admiten reducciones para barras lisas**. Esto implica un enfoque normativo que comienza a diferenciar claramente entre tipos de armadura.

- **Empalmes**

Los **empalmes por solape siguen siendo admisibles para acero liso**, pero se recomienda su uso únicamente cuando no sea viable el empleo de soluciones más eficientes, como acoplamientos mecánicos o soldadura homologada. En el caso de **soldaduras**, se exigen condiciones controladas, verificación por el proyectista y ensayo de prototipos si es necesario.

Se introducen los conceptos de **continuidad mecánica verificada**, aunque no se detallan procedimientos específicos para validar empalmes en armaduras lisas. La norma sugiere que **la**

adherencia entre materiales no corrugados se considera poco fiable, y por tanto debe complementarse con gancho, solape largo o confinamiento adicional.

- **Resistencia del hormigón**

Se define por primera vez el valor de **resistencia característica a compresión del hormigón**, f_{ck} , con un **mínimo general de 25 MPa**. Este valor puede variar en función de la clase estructural, la exposición ambiental y las condiciones de ejecución.

La resistencia a tracción no se mide directamente, pero se emplean fórmulas que la relacionan con f_{ck} para estimar la **adherencia** o la **fisuración**. Además, se introduce el **control estadístico de calidad**, con intervalos de confianza y desviaciones estándar, permitiendo una mayor fiabilidad en la evaluación del material en obra.

Se considera la **durabilidad** como factor de diseño estructural, asociando mayor recubrimiento y clase de hormigón con condiciones ambientales severas.

- **Propiedades del acero**

En la EH-91, el **acero corrugado se convierte en la opción recomendada**, pero se mantienen referencias técnicas válidas para armaduras lisas, especialmente en obras de rehabilitación y control estructural del patrimonio.

Para acero liso, se exigen las siguientes propiedades:

- **Límite elástico mínimo:** ≥ 250 MPa
- **Resistencia a tracción:** ≥ 410 MPa
- **Tensión de diseño:** obtenida mediante coeficientes de seguridad, no como porcentaje fijo

Se empieza a requerir una **ductilidad mínima**, aunque no se define de forma específica para el acero liso, que queda más limitado en prestaciones frente al corrugado.

- **Ensayos característicos**

El **hormigón debe ensayarse** mediante probetas cilíndricas ($\varnothing 15 \times 30$ cm) o cúbicas, en condiciones normalizadas, a los 28 días. Se establece un marco completo de control estadístico: media, desviación estándar, resistencia característica y número de lotes.

Aunque no se prescriben aún **ensayos de adherencia estándar**, se reconoce la posibilidad de realizarlos en contextos experimentales. El comportamiento entre acero liso y hormigón se

considera **débilmente adherente**, por lo que se penaliza con mayores longitudes de anclaje y control más estricto.

En el caso del acero, se establecen **ensayos de tracción obligatorios por lotes**, y se exige certificación de fábrica, ensayos de tracción y límites de dispersión. Se introduce por primera vez el concepto de **ensayos de calidad obligatoria para obras de cierta entidad**, marcando una diferencia respecto a normas anteriores.

2.2.8. EHE-98

Instrucción de Hormigón Estructural "EHE"

REAL DECRETO 2661/1998, de 11-DIC,
del Ministerio de Fomento
B.O.E.: 13-ENE-99

Ilustración 22 - Portada EHE-98 (1998)

La **EHE-98 (Instrucción de Hormigón Estructural)** supuso una transformación profunda del marco normativo español, al adoptar de forma plena y obligatoria el **modelo de cálculo en estados límite**. La norma, en línea con las recomendaciones europeas previas al Eurocódigo, estableció criterios más estrictos de seguridad, durabilidad y control de calidad, además de introducir conceptos como **clases de exposición ambiental**, **resistencias características**, y una definición más rigurosa del comportamiento estructural del conjunto acero-hormigón.

Uno de los cambios fundamentales es el **abandono progresivo de las armaduras lisas**, que dejan de contemplarse como opción generalizada en estructuras nuevas. Aunque su uso no se prohíbe explícitamente, la norma **no desarrolla fórmulas ni criterios específicos** para este tipo de armaduras, salvo en el contexto de evaluación o intervención en estructuras existentes.

- **Anclaje de armaduras lisas**

La **EHE-98 no incluye fórmulas ni valores específicos de anclaje para armaduras lisas**. Todo el desarrollo normativo relativo al anclaje se centra en **aceros corrugados**, estableciendo fórmulas de

cálculo en función de la adherencia, el diámetro, la posición de la barra, la calidad del hormigón y el tipo de sollicitación (tracción o compresión).

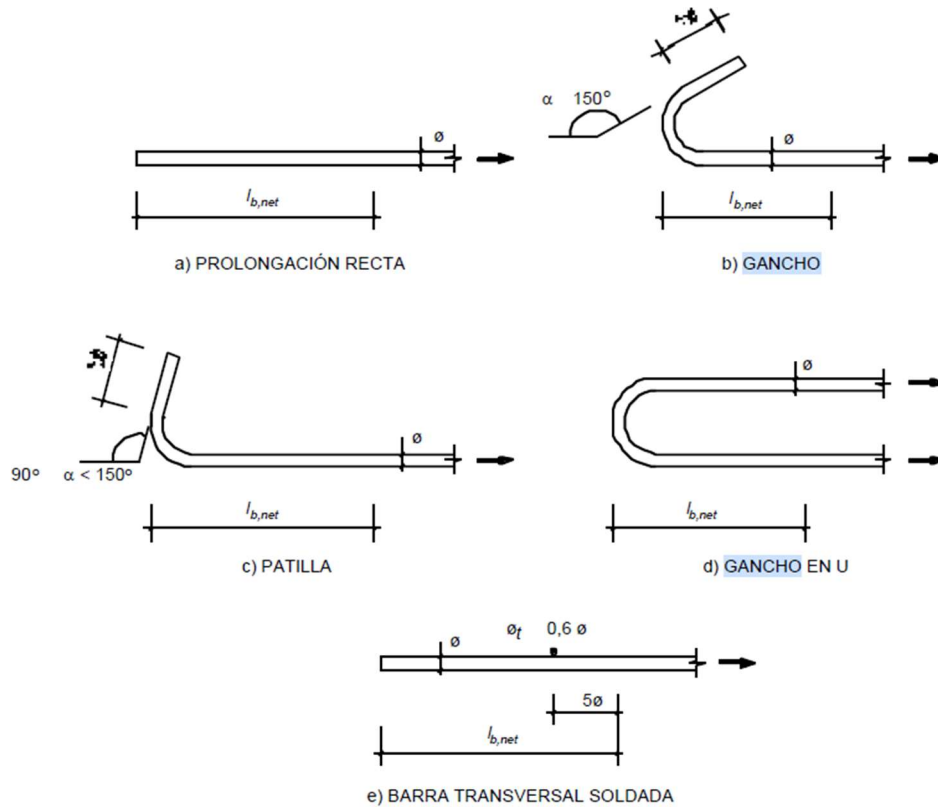


Ilustración 23 - Longitudes de anclaje en barras corrugadas (1998)

La razón de esta omisión es clara: **el acero liso se considera obsoleto en el diseño de nuevas estructuras** debido a su menor capacidad de adherencia y comportamiento inseguro frente a fisuración. Se sobreentiende que, si se utiliza excepcionalmente, deben aplicarse **criterios de proyecto específicos y conservadores**, generalmente más exigentes que los aplicables al acero corrugado.

En estructuras existentes, se recomienda que el anclaje se evalúe mediante métodos indirectos, como **ensayos de arrancamiento (pull-out tests)** o análisis histórico del detalle constructivo.

- **Solapes**

De forma análoga al anclaje, **la EHE-98 no establece longitudes de solape para armaduras lisas**, ya que se considera que su uso no es admisible en nuevas estructuras salvo justificación expresa. Todo el apartado de empalmes y solapes está orientado a barras corrugadas.

En intervenciones sobre estructuras antiguas, se señala que **los solapes de acero liso deben verificarse con precaución**, y solo deben considerarse válidos si se aseguran longitudes conservadoras (superiores a $60 \cdot \emptyset$) o se complementan con gancho, confinamiento o dispositivos mecánicos.

- **Empalmes**

En el caso de los empalmes, la EHE-98 **focaliza su desarrollo exclusivamente en barras corrugadas** y soluciones mecánicas (manguitos, soldaduras, conectores). Los empalmes por solape de armaduras lisas **no se contemplan en el diseño normativo** y, en caso de aparecer en estructuras existentes, se deben evaluar mediante inspección específica y, si procede, reforzarse.

La norma considera que **los empalmes entre barras lisas carecen de garantía adherente**, por lo que su validez depende estrictamente del grado de confinamiento, la longitud efectiva y las condiciones de ejecución histórica.

- **Resistencia del hormigón**

La EHE-98 introduce una **clasificación sistemática del hormigón por clases de resistencia**, identificadas mediante la notación f_{ck} (cilíndrica) y f_{cm} (media). El valor mínimo en estructuras permanentes es de **25 MPa**, aunque se reconocen hormigones de hasta **50 MPa o más**.

También se definen resistencias a tracción indirecta y se establece su valor mediante expresiones empíricas, por ejemplo:

$$f_{ctm} = 0.30 \cdot f_{ck}^{(2/3)}$$

Este valor sirve para el cálculo de adherencia y comportamiento a fisuración, pero no se aplica en armaduras lisas porque, al no estar contempladas, **no se les atribuyen coeficientes de adherencia normativos**.

- **Propiedades del acero**

La norma establece de forma inequívoca que **el acero estructural debe ser de tipo corrugado**, cumpliendo las especificaciones de ductilidad, resistencia y compatibilidad con el hormigón. **No se normalizan propiedades ni condiciones de uso para acero liso**, lo que implica una exclusión funcional del mismo.

En casos de evaluación de estructuras con acero liso, se permite considerar:

- Límite elástico: ≥ 250 MPa
- Tensión última: ≥ 410 MPa
- Ausencia de ductilidad significativa

Pero siempre bajo la condición de **justificación específica mediante inspección y ensayo**.

- **Ensayos característicos**

La norma exige un programa riguroso de ensayos para el hormigón: compresión, tracción indirecta, módulo elástico, durabilidad, permeabilidad, etc. También se introduce un sistema de **control por lotes estadísticos**, y se regulan los **ensayos de adherencia para investigación o validación experimental**.

En el caso del acero, solo se permite el uso de productos certificados, con ensayos obligatorios de tracción, doblado y composición química. **El acero liso queda fuera del marco normativo de producción**, salvo en estudios de patología estructural o análisis histórico.

2.2.9. EHE-08

La **EHE-08** (Instrucción de Hormigón Estructural de 2008) representa la culminación del tránsito normativo español hacia los **estados límite** y la plena armonización con las **normas europeas previas al Eurocódigo 2**. En este marco técnico y conceptual, el acero liso se considera completamente **obsoleto para nuevas construcciones**, y su mención se limita únicamente al análisis de estructuras existentes.



Ilustración 24 - Portada EHE-08 (2008)

La EHE-08 consolida el uso exclusivo de **armaduras corrugadas** como material de proyecto, por su mayor capacidad adherente, comportamiento dúctil y compatibilidad con los criterios de seguridad y durabilidad exigidos. Por tanto, toda la normativa se redacta con base en el empleo de acero con deformaciones superficiales. En la propia norma se hace mención a que no se permite el uso de barras lisas ya que las barras deben satisfacer los requerimientos de adherencia, características mecánicas mínimas, de fatiga y a cargas cíclicas de gran amplitud.

- **Anclaje de armaduras lisas**

La EHE-08 no incluye ningún criterio específico para el anclaje de barras lisas en estructuras nuevas. Toda la formulación normativa se basa en acero corrugado, con expresiones ajustadas al valor del diámetro, la tensión de cálculo, el tipo de barra, y el recubrimiento.

Se establece la **longitud básica de anclaje** mediante fórmulas derivadas del equilibrio de adherencia y resistencia del hormigón. Estas fórmulas presuponen que las barras poseen deformaciones que favorecen el anclaje mecánico. Por lo tanto, **las armaduras lisas no pueden calcularse directamente con esta formulación.**

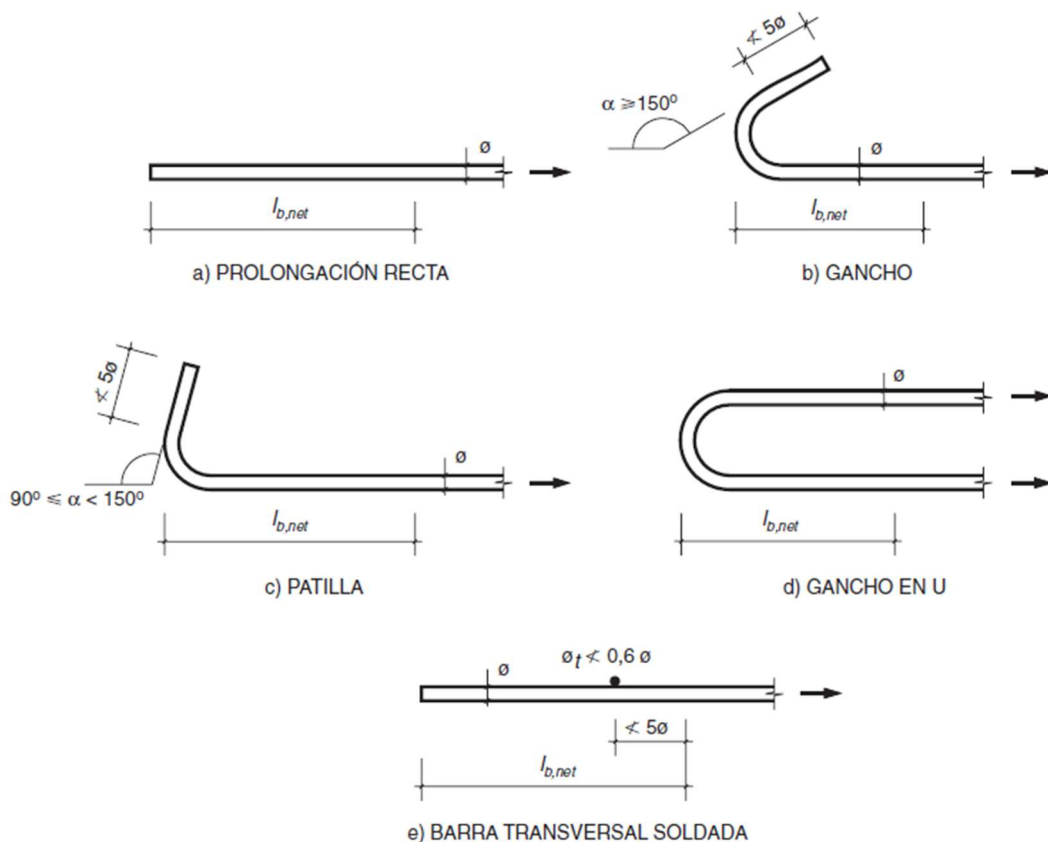


Ilustración 25 - longitudes de anclaje para barras corrugadas (2008)

En estructuras existentes, si se detectan barras lisas, se recomienda adoptar **longitudes de anclaje no inferiores a $60\cdot\varnothing$** , complementadas por ganchos y confinamiento. La norma sugiere utilizar **ensayos experimentales (como pull-out o beam tests)** para validar el comportamiento real.

- **Solapes**

Al igual que el anclaje, la EHE-08 **no permite el cálculo de solapes con acero liso**. Toda la regulación de empalmes por solape (ya sea en tracción, compresión o por elementos discontinuos) se realiza suponiendo un acero corrugado con adherencia normalizada.

No se prohíbe expresamente el solape con barras lisas en intervenciones sobre estructuras existentes, pero sí se exige una **justificación basada en verificación experimental o antecedentes constructivos bien documentados**. Se recomienda aplicar longitudes conservadoras, como **25–30· \varnothing** , y evaluar las condiciones de confinamiento y fisuración en el entorno del solape.

- **Empalmes**

La norma detalla ampliamente las condiciones para **empalmes soldados, mecánicos o por solape en acero corrugado**, pero **no incluye disposiciones técnicas aplicables al acero liso**. Se presupone que su uso no es aceptable sin justificación especial.

En caso de intervención en estructuras existentes, los empalmes entre barras lisas solo se consideran válidos si **van acompañados de ensayos o análisis estructurales auxiliares**. El proyectista debe asumir la responsabilidad del comportamiento post-intervención, incluyendo el refuerzo si el empalme no cumple condiciones mínimas de transmisión de esfuerzo.

- **Resistencia del hormigón**

La EHE-08 refuerza el criterio de cálculo con hormigones de alta calidad, estableciendo como valor mínimo de resistencia característica a compresión:

- **$f_{ck} \geq 25$ MPa** para elementos estructurales
- **Valores superiores (30–50 MPa)** para ambientes agresivos o elementos pretensados

La adherencia, fisuración y durabilidad se calculan en función de la clase de exposición, la trabajabilidad y la composición del hormigón. Se definen expresiones para el **módulo elástico**, la **resistencia a tracción indirecta (f_{ctm})** y la **capacidad de absorción de cargas dinámicas**, parámetros que **no pueden aplicarse directamente al acero liso** sin penalizaciones.

- **Propiedades del acero**

En el marco de la EHE-08, **las únicas armaduras admitidas son las corrugadas tipo B 400 S y B 500 S**, normalizadas según UNE 36068 y derivados. No se admiten aceros lisos como opción de proyecto.

Los requisitos mínimos incluyen:

- **Límite elástico ≥ 400 MPa**
- **Tensión última ≥ 500 MPa**
- **Alargamiento a rotura ≥ 10 %**
- **Ensayo de doblado-desdoblado sin fisuración**
- **Verificación de adherencia con el hormigón**

Cualquier otro tipo de acero (incluido el liso) **requiere homologación expresa** y solo puede usarse en **rehabilitación estructural**, bajo control técnico y documentación detallada.

- **Ensayos característicos**

La norma detalla los ensayos obligatorios para cada lote de hormigón y acero, incluyendo:

- **Compresión en probetas cilíndricas (f_{ck})**
- **Ensayos de adherencia, cuando se justifique experimentalmente**
- **Tracción, doblado y desdoblado para el acero**
- **Evaluación del módulo elástico, durabilidad y permeabilidad**

Aunque no se normativiza ningún ensayo para armaduras lisas, se reconocen como válidos para obras existentes los **ensayos de tracción de barras extraídas**, y las pruebas tipo **pull-out** para comprobar condiciones reales de adherencia y anclaje.

2.2.10. Eurocódigo 2 (UNE-EN 1992-1-1:2005)

La **norma UNE-EN 1992-1-1**, comúnmente conocida como **Eurocódigo 2**, constituye el marco europeo de referencia para el cálculo de estructuras de hormigón armado y pretensado. Publicada en 2005 y adoptada oficialmente en España con la denominación UNE-EN 1992-1-1:2005 (y su anexo nacional), establece un conjunto sistemático y coherente de criterios basados en los **estados límite**, los **coeficientes de seguridad parciales**, y una formulación detallada de la interacción entre hormigón y acero.

Esta norma **no contempla el acero liso como opción válida en estructuras nuevas**, limitando de facto su aplicación práctica. Sin embargo, al tratarse de una norma general, muchas de sus bases técnicas, especialmente en relación con la adherencia y el comportamiento estructural en zonas de anclaje o empalme, **pueden ser reinterpretadas experimentalmente** para justificar soluciones constructivas con armaduras lisas, especialmente en el contexto de intervención en patrimonio construido o estructuras históricas.

- **Anclaje de armaduras – Exclusión del acero liso y necesidad de validación experimental**

En la cláusula **8.4 del Eurocódigo 2**, se establecen las condiciones generales para la longitud de anclaje de armaduras en elementos de hormigón armado. Las fórmulas allí indicadas **presuponen la existencia de armaduras con relieves (corrugadas)** que permiten la transferencia de esfuerzos por mecanismos de fricción, enclavamiento mecánico y adherencia química.

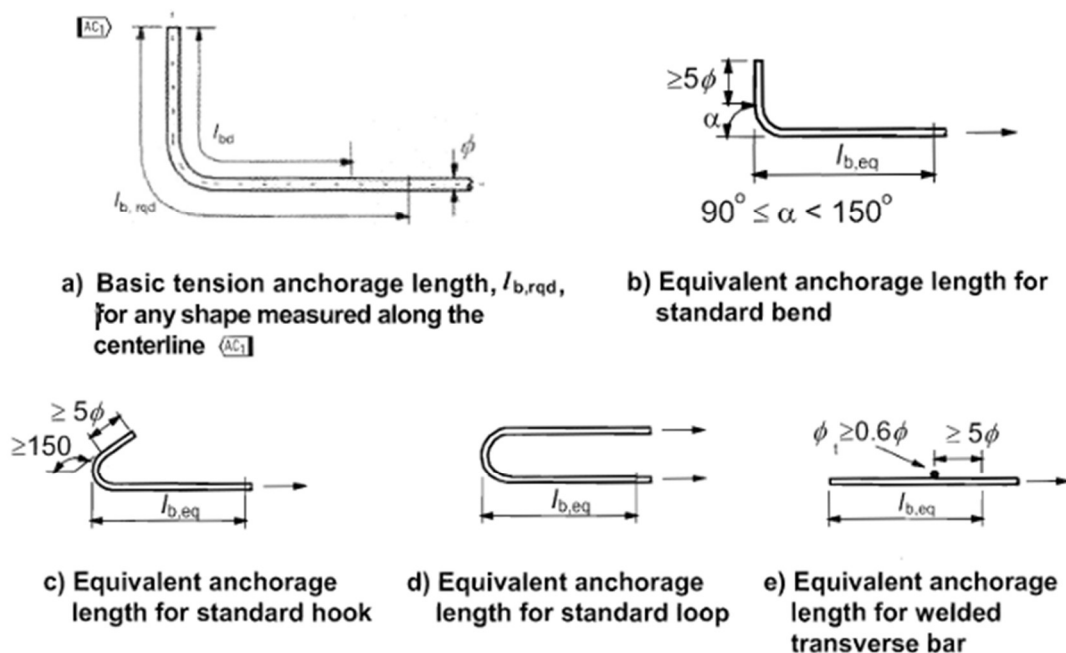


Figure 8.1: Methods of anchorage other than by a straight bar

Ilustración 26 - Longitudes de anclaje para barras corrugas (Comité Europeo de Normalización (CEN), 2004)

En consecuencia:

- El valor básico de adherencia (f_{bd}) se calcula como:

$$f_{bd} = 2.25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctd}$$

donde:

- η_1 = coeficiente que depende del tipo de barra (para barras lisas **no se establece valor**)
- η_2 = coeficiente por ubicación (superior o inferior)
- f_{ctd} = resistencia de diseño a tracción del hormigón
- Para barras **corrugadas**, se establece $\eta_1=1.0$. Para barras lisas, **no se proporciona valor**, lo que implica que no pueden ser usadas sin justificación adicional.

Este punto es fundamental: **no se impide explícitamente el uso de acero liso**, pero se obliga a justificar experimentalmente su comportamiento adherente. Por tanto, **la vía normativa para su utilización pasa por la validación mediante ensayos tipo “pull-out”**, conforme a criterios de adherencia efectiva y compatibilidad con el diseño en estados límite.

La longitud de anclaje básica $l_{b,rqd}$ se define como:

$$l_{b,rqd} = \frac{\Phi \cdot \sigma_{sd}}{4 \cdot f_{bd}}$$

Dado que f_{bdf} será mucho menor en barras lisas, **la longitud de anclaje deberá ser considerablemente mayor** o complementarse con soluciones constructivas (ganchos, confinamiento, zunchado).

- **Solapes – Aplicabilidad limitada del marco normativo**

El Eurocódigo 2 establece que los empalmes por solape solo deben utilizarse cuando el tipo de armadura garantice suficiente adherencia. Se especifican longitudes mínimas de solape para barras corrugadas en función del diámetro, el tipo de sollicitación y las condiciones geométricas (recubrimiento, separación, confinamiento), pero **no se admite el cálculo de empalmes por solape en barras lisas sin verificación experimental**.

Los solapes están regulados por la cláusula 8.7, que indica que deben cumplir:

- Longitud mínima $l_0 = \alpha \cdot l_{b,rqd}$
- Correcta disposición espacial (desfase, agrupamiento, dispersión)
- Ausencia de concentración de empalmes en secciones críticas

Como ocurre con el anclaje, **el coeficiente α y el valor f_{bdf}** dependen del tipo de armadura y, por tanto, no son directamente aplicables a acero liso sin revisión o justificación mediante ensayo.

De este modo, **la única vía válida para emplear solapes con barras lisas en el contexto del Eurocódigo es su demostración experimental, aplicando factores de penalización en base a resultados empíricos.**

- **Empalmes mecánicos y con ganchos – Alternativas normativas al uso de adherencia**

El Eurocódigo 2 contempla el uso de **empalmes mecánicos o soldaduras homologadas**, siempre que se garantice la transmisión completa de esfuerzos y se ensaye previamente el sistema. Para las armaduras lisas, esto abre una vía de justificación **por diseño asistido experimentalmente** en estructuras donde su sustitución no sea viable.

Se acepta que, si no se puede garantizar la adherencia del acero, **los esfuerzos deben transmitirse por otro mecanismo verificable**: contacto mecánico, fricción directa, o confinamiento controlado. En este sentido, **los ganchos de anclaje en barras lisas pueden considerarse mecanismos alternativos de empalme**, siempre que se validen mediante ensayo.

- **Resistencia del hormigón – Relación con adherencia**

El valor de adherencia f_{bd} está directamente relacionado con la **resistencia a tracción del hormigón** f_{ctd} , calculada como:

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk,0.05}}{\gamma_c}$$

Donde $f_{ctk,0.05}$ es la resistencia característica a tracción indirecta del hormigón y γ_c el coeficiente de seguridad (habitualmente 1.5).

Este parámetro es **crítico para estimar la adherencia residual en estructuras históricas con acero liso**, ya que su valor condiciona la transferencia de esfuerzos a través del hormigón.

En hormigones antiguos de $f_{ck} \leq 20$ MPa, la adherencia es considerablemente más baja, lo que **justifica el uso de ensayos reales en lugar de cálculos normativos** para comprobar la seguridad de la unión acero-hormigón.

- **Características del acero – Exclusividad de las armaduras corrugadas**

El Eurocódigo 2 establece que el acero estructural debe cumplir la norma **EN 10080**, que **excluye expresamente las barras lisas** como opción de fabricación autorizada para estructuras nuevas. Se exige:

- Límite elástico característico ≥ 500 MPa

- Relación entre tensión última y límite elástico > 1.08
- Alargamiento mínimo
- Cumplimiento de clases de ductilidad B o C

Como el acero liso no cumple estas condiciones (ni por geometría ni por comportamiento plástico), su uso en nuevas obras es **inviable normativamente**. No obstante, se permite su análisis como parte del diagnóstico estructural, especialmente mediante el uso de **ensayos de tracción y adherencia** para caracterizarlo individualmente.

- **Justificación experimental del uso de acero liso en estructuras existentes**

La única vía reconocida por el Eurocódigo para validar soluciones con acero liso es la justificación a través de **ensayos de adherencia, tracción por hendimiento o beam test**, que deben demostrar:

- Longitudes efectivas de anclaje
- Capacidad de transferencia de cargas
- Nivel de adherencia y su degradación con el tiempo
- Influencia del recubrimiento, el estado del hormigón y la geometría

Esto abre un **marco normativo flexible**, donde el proyectista puede documentar y validar el uso de armaduras lisas mediante procedimientos experimentales reproducibles, siempre que las condiciones estructurales y de seguridad lo permitan.

2.2.11. ACI 318 - Normativa Americana

En el contexto normativo norteamericano, la referencia fundamental para el diseño estructural en hormigón armado es la norma (American Concrete Institute, 2019). Esta normativa, vigente desde principios del siglo XX, ha experimentado múltiples revisiones que reflejan los avances técnicos en diseño estructural, materiales y criterios de seguridad. Uno de los aspectos que ha evolucionado significativamente en el tiempo es el tratamiento de las **armaduras lisas**, utilizadas de forma generalizada hasta mediados del siglo pasado.

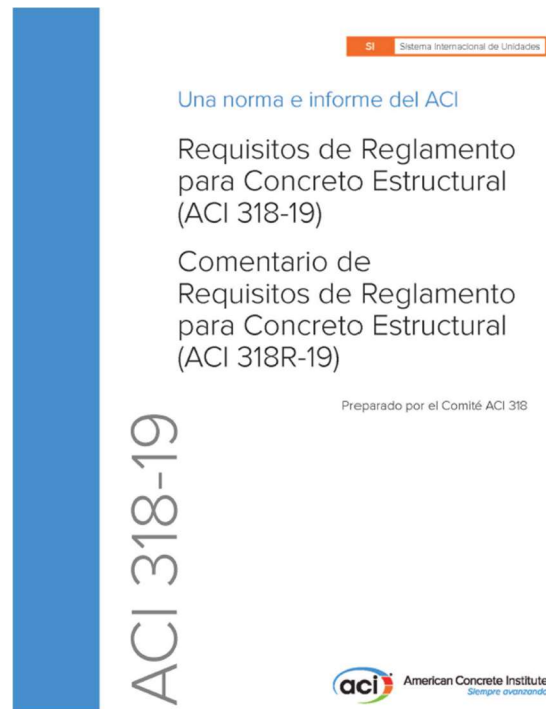


Ilustración 27 - Portada norma ACI 318 (American Concrete Institute, 2019)

Las primeras versiones del ACI 318 admitían y normalizaban el uso de acero liso en estructuras de hormigón, sin hacer distinciones con respecto a su adherencia o comportamiento frente a cargas repetidas. Sin embargo, a partir de investigaciones acumuladas en la segunda mitad del siglo XX, la normativa fue incorporando progresivamente criterios relacionados con el desarrollo de esfuerzos por adherencia, lo que derivó en una paulatina **exclusión práctica de las armaduras lisas** del diseño estructural moderno.

El objetivo de este apartado es analizar cómo ha sido tratado el uso de armaduras lisas en el ACI 318, centrándonos en siete aspectos clave: anclaje, solapes, empalmes, resistencia del hormigón, propiedades del acero, ensayos característicos y consideraciones para estructuras existentes.

(American Concrete Institute, 2019) El ACI 318 define como longitud de desarrollo aquella necesaria para que una barra de refuerzo desarrolle su resistencia a la tracción dentro del elemento de hormigón. Para armaduras corrugadas, esta longitud se calcula utilizando fórmulas empíricas basadas en el diámetro de la barra, la resistencia del hormigón, el tipo de recubrimiento, la ubicación y las condiciones de confinamiento. La fórmula base para la longitud de desarrollo en tensión es:

$$l_d = \frac{\psi_t \cdot \psi_e \cdot \psi_s \cdot d_b \cdot f_y}{25 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'_c}}$$

donde:

- d_b : diámetro de la barra
- f_y : límite elástico del acero
- f_c : resistencia característica a compresión del hormigón
- ψ : factores reductores (ubicación, recubrimiento, etc.)
- λ : factor de ligereza (porosidad del hormigón)

Para **armaduras lisas**, esta expresión no es válida directamente, ya que la norma **no proporciona un valor específico de adherencia para barras sin corrugas**. En consecuencia, las barras lisas requieren una longitud de anclaje considerablemente superior para compensar su escasa adherencia superficial. De hecho, **no se consideran aptas para desarrollos por adherencia** en elementos sometidos a cargas de servicio, y su uso queda limitado a aplicaciones con dispositivos mecánicos (ganchos, soldaduras o empalmes certificados).

En el diseño de estructuras nuevas, el uso de barras lisas en condiciones de anclaje está **desaconsejado explícitamente** en los comentarios del ACI 318, dada su deficiente transferencia de carga por fricción. Sin embargo, su presencia es común en construcciones previas a 1960, lo que hace necesario su estudio en procesos de diagnóstico y rehabilitación.

- **Solapes**

El empalme por solape es un procedimiento tradicional de unión entre barras que depende de la transferencia de esfuerzos por adherencia en la zona de superposición. El ACI 318 clasifica los solapes según el tipo de sollicitación (tensión o compresión) y define longitudes mínimas de solape que, al igual que en el anclaje, están formuladas exclusivamente para **armaduras corrugadas**.

En los solapes de tracción, la longitud mínima depende de factores como el tipo de hormigón, el tamaño de la barra, la disposición del armado, la presencia de confinamiento transversal y la condición de la barra (revestida o no). Las fórmulas incluyen factores reductores similares a los de anclaje.

En el caso de **barras lisas**, la normativa **no proporciona valores de solape recomendados**, y su uso en empalmes queda restringido a situaciones especiales, generalmente en estructuras existentes o en elementos no estructurales. Si se pretende su empleo, es necesario realizar una **justificación experimental**, o bien adoptar **alternativas como soldaduras o empalmes mecánicos**.

Es importante destacar que el ACI menciona explícitamente que **los solapes deben garantizar la transferencia total de los esfuerzos de diseño**, lo cual **no puede asumirse automáticamente en barras lisas sin ensayos previos**, especialmente bajo cargas dinámicas o sísmicas.

- **Empalmes**

Frente a la exclusión de las armaduras lisas en solapes adherentes, el ACI 318 contempla diversas soluciones de empalme que **no dependen de la adherencia**, como los empalmes mecánicos (mechanical couplers) o las soldaduras. Estos dispositivos permiten transmitir los esfuerzos de manera directa, sin requerir la fricción o el enclavamiento entre la barra y el hormigón.

El uso de **empalmes mecánicos** está permitido siempre que cumplan con la norma ASTM A970/A970M, y que su resistencia no sea inferior al 125 % del esfuerzo de fluencia de las barras conectadas. Estos sistemas son especialmente útiles en estructuras existentes con barras lisas, donde el recubrimiento, la geometría o la accesibilidad impiden una intervención tradicional.

En el caso de las **soldaduras**, el acero debe cumplir con requisitos de soldabilidad, que las armaduras lisas antiguas no siempre garantizan. Además, el procedimiento debe seguir lo estipulado en la norma AWS D1.4.

- **Resistencia del hormigón**

La adherencia entre acero y hormigón depende de múltiples factores, pero uno de los más relevantes es la **resistencia a compresión del hormigón (f'_c)**. El ACI 318 establece valores mínimos en función del tipo de estructura y su exposición, generalmente a partir de 20 MPa (≈ 3000 psi).

En el caso de **estructuras históricas con acero liso**, el hormigón puede presentar resistencias menores, presencia de microfisuración, o pérdida de cohesión interna. Dado que las barras lisas no generan un enclavamiento mecánico eficiente, dependen casi exclusivamente de la **cohesión y la fricción química**, que se ven gravemente afectadas en hormigones degradados.

En estos casos, el ACI recomienda evaluar in situ la resistencia mediante ensayos no destructivos (esclerómetro, ultrasonidos) o testigos cilíndricos, y si se detectan valores bajos de f'_c , proponer refuerzos o sustituciones localizadas del acero.

- **6. Propiedades del acero**

El ACI 318 exige que las armaduras cumplan con requisitos específicos de resistencia y ductilidad, normalmente definidos en las normas ASTM A615 (barras corrugadas de acero al carbono) y ASTM A706 (barras soldables de alta ductilidad). Entre los valores mínimos, destacan:

- **Límite elástico (f_y):** ≥ 420 MPa (60 ksi)
- **Resistencia a tracción (f_u):** $\geq 1.25 \cdot f_y$
- **Relación de alargamiento mínima:** variable según el tipo de barra y diámetro

Las armaduras lisas, particularmente las colocadas antes de los años 60, pueden no cumplir estos valores, lo cual representa un **riesgo importante en evaluaciones de carga y refuerzo**. Su caracterización requiere ensayos de tracción directa, obteniendo muestras en obra o en zonas representativas.

- **Ensayos característicos**

Para validar o justificar el uso de armaduras lisas en estructuras existentes bajo normativa ACI, se recomiendan los siguientes ensayos:

- **Pull-out test (ASTM A944 o similares):** para determinar la resistencia a la adherencia y verificar si la barra puede desarrollar los esfuerzos requeridos.
- **Ensayos de tracción (ASTM A370):** para caracterizar el acero y confirmar que cumple (o no) con los criterios actuales.
- **Ensayos de carga en elementos reales (beam tests):** permiten evaluar el desempeño global del sistema y comprobar si se alcanzan los estados límite sin fisuración excesiva ni fallos prematuros.
- **Ensayos de tracción por hendimiento:** complementarios en zonas donde la tracción perpendicular predomina sobre el cortante.

El ACI no establece valores umbral específicos para estos ensayos en barras lisas, pero permite su utilización en el marco de **evaluaciones estructurales**, siempre que se complementen con un análisis riguroso de seguridad.

3. Ensayos de adherencia y anclaje

3.1. Ensayo PULL-OUT TEST

3.1.1. Introducción al ensayo

Las estructuras de hormigón armado construidas durante las décadas de 1960 y 1970 presentan una tipología común en cuanto al uso de armaduras de acero: barras lisas sin corrugas. Este tipo de acero, ampliamente utilizado antes de la normalización de las barras corrugadas, plantea hoy serios desafíos para la evaluación estructural y la rehabilitación de infraestructuras existentes, especialmente en el contexto de las exigencias impuestas por los códigos estructurales modernos, como el Eurocódigo 2.

La adherencia entre el hormigón y la armadura constituye un mecanismo fundamental para garantizar la compatibilidad de deformaciones entre ambos materiales y para posibilitar la transmisión de esfuerzos. En el caso de las armaduras corrugadas, esta adherencia se basa en tres componentes: adherencia química, fricción superficial y anclaje mecánico derivado del relieve de las corrugas. Sin embargo, en las barras lisas, el tercer mecanismo está prácticamente ausente, lo que reduce significativamente la capacidad de anclaje y condiciona el comportamiento ante sollicitaciones de tracción.

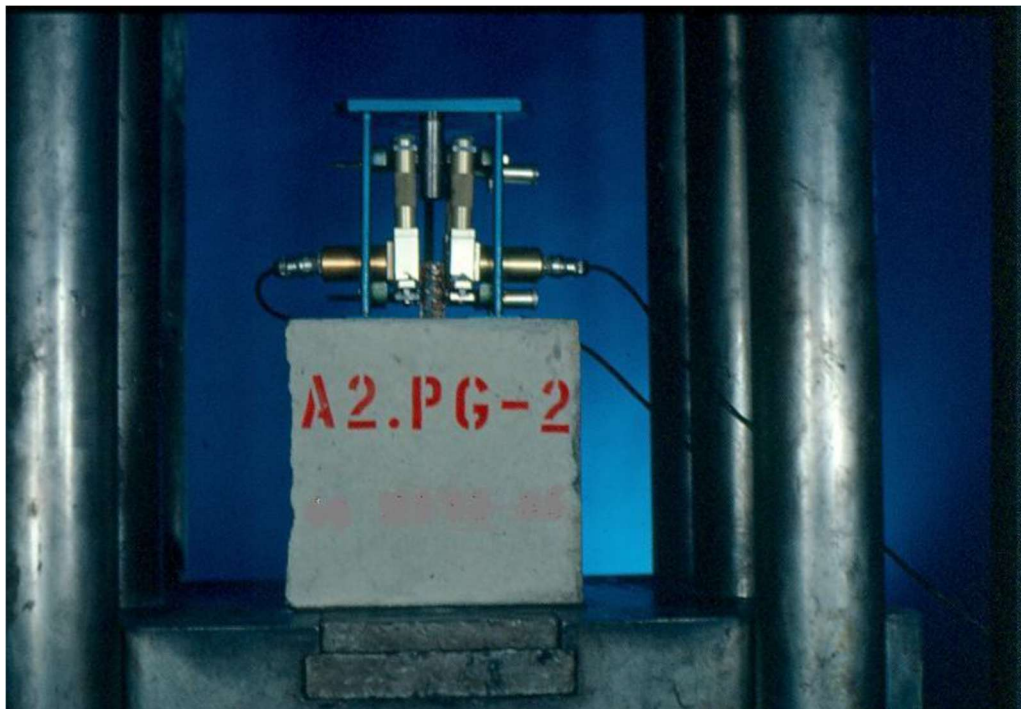


Ilustración 28 - Ensayo PULL-OUT (INTEMAC)

El ensayo de extracción directa o **Pull-out Test** permite estudiar de forma aislada y controlada el fenómeno de adherencia entre una barra de acero lisa y el hormigón que la rodea. Este procedimiento experimental ha sido ampliamente empleado tanto en estudios de caracterización de materiales como en investigaciones orientadas al desarrollo de modelos de adherencia y de formulaciones para la longitud de anclaje. Su simplicidad y reproductibilidad lo convierten en una herramienta útil para generar datos comparables, aunque su interpretación requiere considerar las diferencias existentes entre la situación de ensayo y las condiciones reales de trabajo en elementos estructurales.

Este ensayo cobra especial relevancia en el contexto actual de conservación y reevaluación del patrimonio construido, donde numerosas estructuras aún en servicio emplean armaduras lisas cuya capacidad de anclaje efectiva es desconocida o no se ajusta a los parámetros establecidos en las normativas actuales. La verificación experimental de la adherencia efectiva en estos casos resulta esencial para evitar diagnósticos conservadores en exceso o, por el contrario, sobrestimaciones peligrosas de la capacidad resistente.

En este capítulo se presenta una descripción detallada del ensayo Pull-out aplicado a armaduras lisas, abordando su fundamento teórico, procedimiento experimental, variables críticas, tipos de fallo característicos y su relación con las formulaciones actuales del Eurocódigo. Este análisis constituye la base para una posterior validación o modificación de los modelos normativos de longitud de anclaje aplicables a estructuras históricas.

3.1.2. Fundamento teórico

La adherencia entre la armadura de acero y el hormigón es esencial para garantizar la compatibilidad de deformaciones y la transmisión efectiva de esfuerzos en el hormigón armado. Esta adherencia se manifiesta como una tensión tangencial en la interfaz barra-hormigón que resiste el deslizamiento relativo y permite que la armadura colabore estructuralmente. Desde un punto de vista mecánico, la adherencia se puede descomponer en tres componentes principales:

- **Adherencia química:** Es la primera en activarse durante el proceso de fraguado del hormigón y se refiere a las fuerzas de unión físico-químicas entre la pasta de cemento y la superficie del acero. Su magnitud es limitada y suele perderse en cuanto se produce el más mínimo deslizamiento.

- **Fricción superficial:** Actúa después de que se rompe la adherencia química. Se debe a las irregularidades microscópicas de la superficie de la barra y del hormigón. Es proporcional a la presión normal que ejerce el hormigón sobre la barra, y depende del coeficiente de fricción y del estado tensional interno.
- **Anclaje mecánico:** Es el componente predominante en barras corrugadas. Surge de la geometría de las corrugas, que ofrecen resistencia mecánica al deslizamiento a través de mecanismos de bloqueo. Las barras lisas carecen de este componente, lo que limita severamente su capacidad de adherencia.

En un ensayo de tracción o en una situación de servicio, el esfuerzo de adherencia no se distribuye de forma uniforme a lo largo de la longitud embebida de la barra. Se concentra en las zonas próximas al extremo cargado, siguiendo una curva no lineal que depende del comportamiento del hormigón y de la rigidez relativa de los materiales. En las primeras etapas de carga, esta distribución es casi elástica, pero con el aumento de la carga se inicia el deslizamiento y se generan fisuras en el hormigón, lo que modifica la distribución de esfuerzos adherentes.

La relación típica entre la tensión de adherencia (τ) y el deslizamiento (s) es no lineal y presenta una fase ascendente seguida de una meseta o descenso, dependiendo del tipo de barra y de las propiedades del hormigón. En barras lisas, esta relación muestra una menor resistencia máxima y un deslizamiento más continuo.

Para el análisis mecánico del comportamiento de adherencia se emplean modelos constitutivos τ - s , que representan la relación entre la tensión de adherencia y el deslizamiento relativo. Diversas propuestas han sido formuladas por entidades como el Comité Euro-Internacional del Hormigón (CEB) y la Federación Internacional del Pretensado (FIP). Estos modelos suelen adoptar expresiones analíticas calibradas experimentalmente, y pueden incluir efectos de confinamiento, fisuración del hormigón, tipo de barra y nivel de carga.

Un modelo simplificado para barras lisas podría expresarse como:

$$\tau(s) = \tau_{\max} \cdot \left(\frac{s}{s_1} \right) \quad \text{para } s \leq s_1$$

$$\tau(s) = \tau_{\max} \cdot \exp \left(-\alpha \cdot \frac{s - s_1}{s_2} \right) \quad \text{para } s > s_1$$

donde:

τ_{\max} : tensión máxima de adherencia

s_1 : deslizamiento en el que se alcanza τ_{\max} ,

s_2 : parámetro de suavizado,

α : coeficiente de degradación.

Este tipo de modelo permite simular numéricamente el comportamiento del anclaje y evaluar la evolución de las tensiones en el ensayo Pull-out.

En el Pull-out Test, el modo de fallo habitual para barras lisas es el **deslizamiento progresivo**, acompañado de **fisuración radial** en el hormigón. Esta fisuración se produce como respuesta al incremento de las tensiones circunferenciales provocadas por la transferencia de carga tangencial. En muchos casos, se forma un cono de rotura con una inclinación característica ($\approx 30-45^\circ$), lo que permite identificar visualmente el modo de fallo.

El Eurocódigo 2 (AENOR, 2006) establece valores de adherencia de cálculo (f_{bd}) para diferentes tipos de barra. Para barras lisas sin deformaciones mecánicas, se penaliza significativamente el valor de adherencia, en parte debido a la ausencia del anclaje mecánico. La longitud de anclaje básica se calcula según:

$$l_{b,req} = \frac{\Phi \cdot \sigma_s}{4 \cdot f_{bd}}$$

donde:

Φ : diámetro de la barra,

σ_s : tensión de cálculo en la armadura,

f_{bd} : tensión de adherencia de cálculo.

No obstante, estos valores están basados principalmente en estudios con barras corrugadas, por lo que su validez en casos de barras lisas es discutible. El Pull-out Test permite verificar si la formulación del Eurocódigo resulta conservadora o insuficiente para este tipo de armadura, especialmente en hormigones antiguos de baja resistencia o con pérdidas de adherencia por carbonatación o corrosión incipiente.

3.1.3. Procedimiento experimental

El ensayo de extracción directa o **Pull-out Test** se diseña con el objetivo de analizar de forma controlada la adherencia entre una barra de acero y el hormigón en que se encuentra embebida. La metodología sigue un enfoque simplificado, pero altamente sensible a las condiciones de ensayo, por lo que su diseño y ejecución requieren atención a múltiples variables constructivas y de medición.

- Geometría de la probeta

Existen varias configuraciones válidas para la ejecución del ensayo, siendo las más comunes:

- **Probeta prismática:** Generalmente de sección cuadrada o rectangular, con dimensiones típicas de 150×150×300 mm o 200×200×300 mm, dependiendo del recubrimiento y la longitud de anclaje deseada.
- **Probeta cilíndrica:** De diámetro 150 mm y altura 300 mm, similar a las utilizadas en ensayos de compresión, con la barra centrada en el eje longitudinal.

La **longitud de anclaje** se define como la porción de la barra que se encuentra embebida en el hormigón. Para estudiar la influencia de este parámetro, se suelen emplear longitudes variables, por ejemplo: $5\cdot\Phi$, $10\cdot\Phi$ y $15\cdot\Phi$, siendo Φ el diámetro de la barra.

La barra debe posicionarse de forma **concéntrica** en la probeta, garantizando simetría del confinamiento radial y evitando excentricidades que puedan generar fisuras prematuras o desviaciones del eje de carga.

- Preparación del ensayo

Los pasos de preparación incluyen:

1. **Colocación de la armadura:** La barra lisa debe introducirse en el molde con la longitud de anclaje deseada. El extremo libre se protege con una funda plástica o se deja fuera del molde para garantizar el libre movimiento axial. Es fundamental evitar cualquier adherencia no deseada en la parte expuesta.
2. **Fijación del molde:** Se centra la barra mediante soportes o separadores para mantenerla vertical y sin contacto con las paredes del molde.
3. **Vertido del hormigón:** El hormigón se coloca en capas y se vibra mecánicamente para eliminar burbujas de aire. Se deben registrar los datos de mezcla, como la relación agua/cemento, tipo de árido y consistencia (slump).

4. **Curado:** Tras el desmoldeo (usualmente a las 24 h), las probetas se curan en cámara húmeda o bajo agua, manteniéndose durante al menos 28 días antes del ensayo.

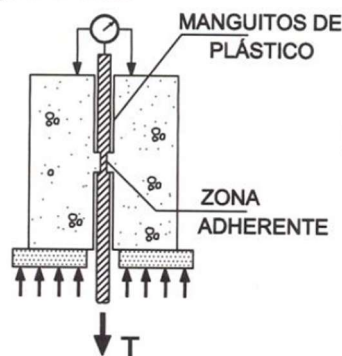
- Instrumentación

Para una correcta ejecución del ensayo, se requiere instrumentación precisa que permita registrar el esfuerzo de extracción y el desplazamiento relativo:

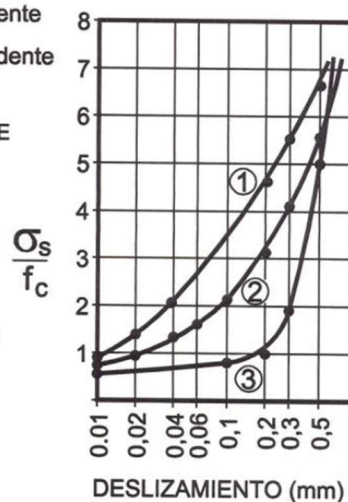
- **Máquina de ensayo universal:** Debe contar con capacidad suficiente (al menos 100–200 kN) y con control de desplazamiento o carga. El cabezal móvil aplica la fuerza axial de extracción.
- **Célula de carga:** Para medir el esfuerzo transmitido a la barra. Su capacidad debe estar adaptada al rango esperado de adherencia.
- **Transductores de desplazamiento (LVDTs):** Se colocan entre el hormigón y el extremo libre de la barra para medir con precisión el deslizamiento (s). También se puede usar un extensómetro montado sobre el acero.
- **Fijación de la probeta:** El bloque de hormigón debe apoyarse de forma firme y libre de deslizamiento, permitiendo únicamente el movimiento axial de la barra.
- **Sistema de adquisición de datos:** Se utiliza para registrar de forma continua la evolución de carga y desplazamiento durante todo el ensayo.
- Procedimiento de carga

RESULTADOS DE ENSAYOS DE PULL-OUT SEGÚN REHM
POSICIONES DE HORMIGONADO:

- ① Vertical, con tracción ascendente
- ② Vertical, con tracción descendente
- ③ Horizontal



a)



b)

Ilustración 29 - Ensayo PULL-OUT en laboratorio (Ruiz, 2008)

El ensayo puede realizarse con **control de desplazamiento** o de **fuerza**, dependiendo del equipo disponible. El protocolo más recomendable consiste en aplicar la carga a una velocidad constante de desplazamiento (por ejemplo, 0,5 mm/min) hasta que se produce el fallo por pérdida de adherencia.

Durante el ensayo se registra la curva **fuerza-deslizamiento**, que suele presentar una fase inicial elástica, seguida de un pico de adherencia máxima y un descenso progresivo debido al deslizamiento. En barras lisas, el comportamiento es más continuo y sin caídas bruscas de carga, a diferencia de lo que ocurre con barras corrugadas.

3.1.4. Variables de control y medición

- Variables relacionadas con la armadura

Tipo de barra: En este estudio, se emplean exclusivamente **barras lisas**, cuya superficie carece de relieves mecánicos. Estas presentan menor capacidad de adherencia que las barras corrugadas y su comportamiento está gobernado por adherencia química y fricción.

Diámetro de la barra (Φ): Influye directamente en la superficie de adherencia disponible y en el desarrollo de tensiones tangenciales. Diámetros típicos en los ensayos son $\Phi = 10, 12, 16$ mm.

Longitud embebida (l): La longitud de anclaje define la zona donde se produce la transferencia de carga. En general, se ensayan varias longitudes normalizadas, como $5\cdot\Phi$, $10\cdot\Phi$ y $15\cdot\Phi$, lo que permite estudiar el desarrollo de adherencia en función del recorrido disponible.

Estado superficial: La presencia de óxidos, grasas, lechadas de cemento o suciedad puede alterar la fricción superficial y la adherencia química. Es esencial estandarizar la preparación de la superficie de las barras (cepillado, limpieza con disolvente, etc.).

Tipo de acero: Aunque el tipo de acero no afecta directamente a la adherencia (en ausencia de deformaciones), la ductilidad y módulo de elasticidad sí pueden influir en la redistribución de tensiones y en el modo de fallo.

- Variables relacionadas con el hormigón

Resistencia característica (f'_c): A mayor resistencia, mayor capacidad de confinamiento y resistencia a la fisuración radial, lo que tiende a incrementar la adherencia. Se pueden considerar distintas dosificaciones representativas de hormigones históricos (p. ej. 15–30 MPa).

Edad del hormigón: La adherencia evoluciona con el tiempo debido al proceso de hidratación del cemento. La edad estándar de ensayo son 28 días, aunque para estructuras históricas podrían analizarse edades mayores o incluso procesos de degradación simulados.

Relación agua/cemento (a/c): Afecta la porosidad del hormigón y, por tanto, su adherencia. Es relevante registrar esta relación para correlacionarla con los resultados de carga máxima.

Tamaño máximo del árido: Influye en la zona de transición interfacial y en la homogeneidad del contacto con la barra.

Condiciones de curado: El tipo (sumergido, cámara húmeda, ambiental) y la duración del curado influyen en la microestructura de la matriz cementante, con efectos directos sobre la adherencia.

- Variables geométricas y constructivas

Configuración de la probeta: La forma (cilíndrica o prismática), el recubrimiento (mínimo de $2\cdot\Phi$ en todas las direcciones), y el centrado de la barra son esenciales para garantizar una distribución simétrica de tensiones y evitar fallos prematuros.

Confinamiento: Probetas sin confinamiento tienden a fisurar radialmente antes de alcanzar el máximo de adherencia. En algunos estudios se emplean sistemas de confinamiento externo (anillos metálicos o refuerzos transversales) para evaluar su efecto.

- Variables de ensayo y medición

Velocidad de carga o desplazamiento: Una velocidad excesiva puede generar efectos dinámicos no deseados; lo ideal es mantener una velocidad de desplazamiento lenta y constante (por ejemplo, 0.5 mm/min).

Modo de control del ensayo: El control puede realizarse por carga o por desplazamiento. El control por desplazamiento suele ofrecer mayor estabilidad y permite capturar mejor la curva completa de carga–deslizamiento.

Precisión de los sensores: La resolución de las células de carga y de los LVDT debe ser adecuada al rango esperado. Se recomienda una precisión de $\pm 0,1$ kN en carga y $\pm 0,01$ mm en desplazamiento.

Medición del deslizamiento (s): Debe medirse entre el extremo libre de la barra y la cara del hormigón, con una referencia fija. Este dato es esencial para construir la curva τ – s , que describe el comportamiento de adherencia.

- Variables ambientales

Temperatura y humedad: Afectan tanto al curado como al estado de humedad del hormigón durante el ensayo. El Eurocódigo recomienda realizar ensayos a temperaturas estables de 20 ± 2 °C.

Estado de saturación del hormigón: Un hormigón seco presenta mayor fricción, pero menor adherencia química. Las condiciones deben ser homogéneas y reproducibles.

Estas variables deben recogerse de forma sistemática en una **ficha técnica de cada ensayo**, lo que permite posteriormente correlacionar los resultados experimentales con las condiciones de partida, y realizar análisis estadísticos o comparaciones normativas.

3.1.5. Análisis e interpretación de los resultados

El tratamiento de los datos obtenidos en un ensayo Pull-out no se limita únicamente a registrar la carga máxima alcanzada. Una interpretación rigurosa debe considerar la forma de la curva carga-deslizamiento, la identificación del tipo de fallo y la comparación con modelos teóricos o normativos.

- Representación carga – deslizamiento

Durante el ensayo se registran dos magnitudes principales:

- **Carga de extracción (F):** Aplicada axialmente a la barra por la máquina de ensayo.
- **Deslizamiento (s):** Movimiento relativo entre la barra y el hormigón, medido en el extremo libre.

La representación gráfica estándar consiste en la curva **F–s**, que permite visualizar el comportamiento de adherencia. Esta curva típicamente muestra:

1. **Zona inicial lineal:** Corresponde al comportamiento elástico, donde no hay deslizamiento significativo. La pendiente inicial puede interpretarse como una rigidez aparente de adherencia.
2. **Pico máximo (F_{\max}):** Representa el máximo esfuerzo de adherencia movilizado. Se define como la carga máxima soportada por la interfaz antes de la pérdida de adherencia.
3. **Descenso progresivo:** Tras el pico, el deslizamiento crece sin que la carga aumente, o incluso disminuye. En barras lisas, esta fase es más pronunciada y representa el proceso de fricción post-rotura.

4. **Estabilización:** Puede alcanzarse una carga residual que se mantiene constante, correspondiente a fricción pura.

- Obtención de la tensión de adherencia

La **tensión de adherencia media** ($\tau_{\text{máx}}$) se calcula a partir de la carga máxima mediante la fórmula:

$$\tau_{\text{máx}} = \frac{F_{\text{máx}}}{\pi \cdot \Phi \cdot l}$$

donde:

$F_{\text{máx}}$: Carga máxima registrada (N)

Φ : Diámetro de la barra (mm)

l : Longitud de anclaje embebida (mm)

Esta tensión es una **media** sobre toda la longitud embebida, lo que implica que no representa directamente el comportamiento local de adherencia. Para estudiar la distribución de tensiones a lo largo del anclaje, serían necesarios métodos complementarios (instrumentación interna, elementos finitos, etc.).

- Identificación del tipo de fallo

El modo de fallo observado en el Pull-out Test es un indicador fundamental del comportamiento de adherencia. En barras lisas, los modos típicos son:

- **Fallo por deslizamiento (pull-out puro):** La barra se desliza sin dañar significativamente el hormigón, mostrando una curva suave con pérdida progresiva de carga. Indica una adherencia dominada por fricción y sin fisuración relevante.
- **Fallo por fisuración radial:** Aparecen grietas perpendiculares a la barra debido a tensiones radiales generadas por la transferencia de carga. Se manifiesta como una caída brusca tras el pico de carga.
- **Fallo combinado:** Deslizamiento con microfisuración, sin pérdida completa de confinamiento. Es frecuente en probetas sin confinamiento externo.

Documentar el tipo de fallo con fotografías postensayo es recomendable para una caracterización visual complementaria.

- Influencia de variables

El análisis se completa correlacionando los valores de τ_{\max} con las distintas variables de control (tipo de hormigón, longitud embebida, diámetro, etc.). Esto permite identificar tendencias como:

- **Incremento de adherencia con la resistencia del hormigón.**
- **Disminución de adherencia con el aumento de la longitud embebida**, debido a la distribución no uniforme de tensiones (efecto de longitud).
- **Variaciones con el diámetro de la barra**, especialmente en términos de rigidez de contacto.

Estos análisis pueden realizarse mediante representación gráfica (τ_{\max} vs. f'_c , vs. Φ , vs. l) y regresión estadística si se dispone de un número suficiente de ensayos.

- Comparación con formulaciones teóricas

Los resultados pueden compararse con las expresiones propuestas por normas como el Eurocódigo 2 o modelos clásicos como el de FIB Model Code. Por ejemplo, el Eurocódigo establece una tensión de adherencia de diseño para barras lisas a través de:

$$\tau_{bd} = \alpha_{bd} \cdot f_{ctd}$$

donde:

α_{bd} : Coeficiente reductor (para barras lisas suele ser ≤ 1)

f_{ct} : Resistencia a tracción de cálculo del hormigón

Esta comparación permite evaluar si la normativa resulta conservadora o no respecto a los resultados experimentales, y justificar la necesidad de ajustes o nuevas formulaciones.

3.2. Ensayo BEAM TEST

3.2.1. Introducción

La adherencia entre el acero y el hormigón es un mecanismo fundamental en las estructuras de hormigón armado. Esta interacción asegura que ambos materiales actúen de forma conjunta ante cargas aplicadas, permitiendo que la armadura absorba tracciones y el hormigón compresiones. Tradicionalmente, esta adherencia ha sido garantizada mediante el uso de barras corrugadas, que proporcionan un mecanismo de anclaje mecánico eficaz. Sin embargo, en numerosas estructuras construidas antes de la generalización normativa de este tipo de armaduras, especialmente entre las décadas de 1950 y 1970, se utilizaron barras lisas. Este tipo de acero carece de resaltes superficiales, por lo que la transferencia de carga se basa únicamente en la adherencia química y la fricción superficial.

En este contexto, resulta fundamental evaluar de forma precisa la capacidad de anclaje de estas armaduras lisas, especialmente en el marco de proyectos de rehabilitación o revisión estructural de edificaciones históricas. El conocimiento de su comportamiento es esencial para determinar si las longitudes de anclaje existentes son suficientes, o si es necesario implementar técnicas de refuerzo localizadas.

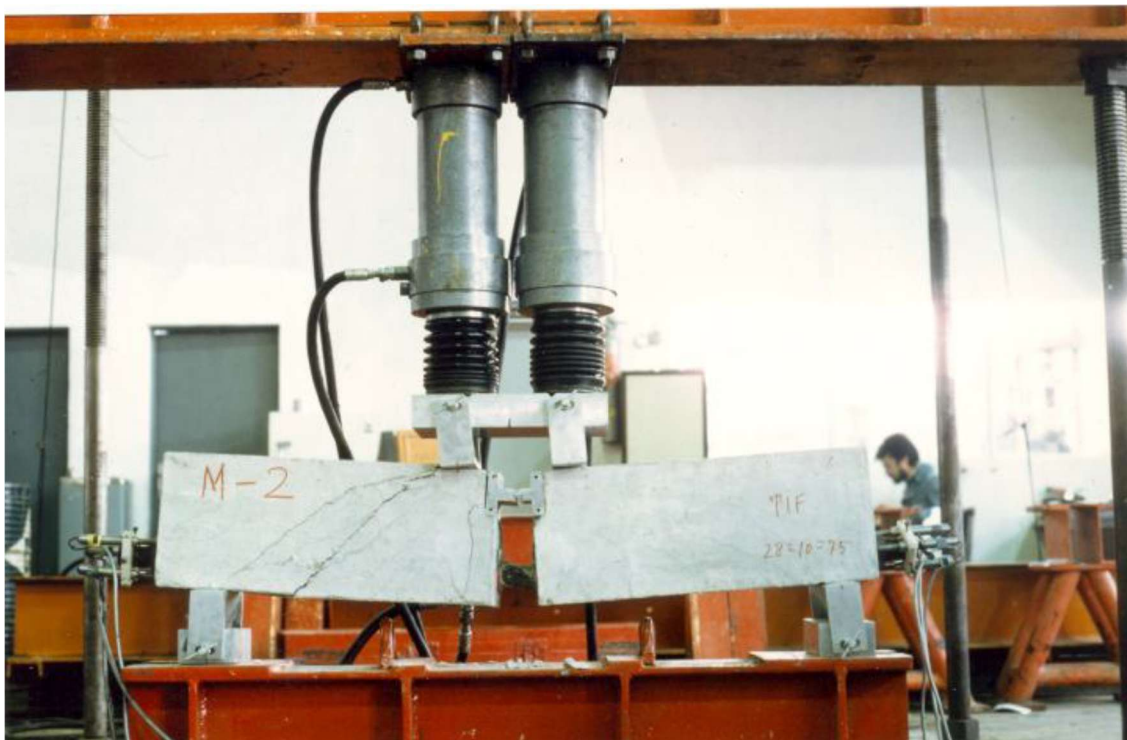


Ilustración 30 - Ensayo Beam-Test (INTEMAC)

Aunque existen varios métodos para estudiar la adherencia entre acero y hormigón, el **ensayo Beam Test** se distingue por su capacidad para representar situaciones estructurales más realistas. A diferencia del Pull-out Test, que evalúa la adherencia en condiciones uniaxiales de extracción directa, el Beam Test permite analizar el comportamiento del anclaje dentro de un sistema sometido a flexión, incluyendo el efecto de cargas distribuidas, fisuración, confinamiento por estribos y condiciones de apoyo.

Este ensayo consiste, en esencia, en aplicar carga sobre una viga de hormigón armado, dentro de la cual se introduce una armadura parcialmente anclada. Al monitorizar el comportamiento de dicha barra, se puede determinar si la longitud embebida es suficiente para permitir el desarrollo completo de las tensiones de tracción, o si, por el contrario, se produce un fallo prematuro por pérdida de adherencia.

El presente capítulo se centra en el desarrollo técnico y experimental del Beam Test, aplicándolo específicamente a armaduras lisas, con el objetivo de analizar su comportamiento adherente en condiciones comparables a las que se dan en elementos reales de las estructuras históricas. Se describen en detalle su fundamento teórico, procedimiento experimental, variables críticas, modos de fallo y su comparación con modelos normativos, con el fin de aportar datos relevantes para la formulación de criterios de evaluación estructural más ajustados a la realidad del parque construido.

El ensayo Beam Test se plantea como una herramienta experimental con capacidad para reproducir, en condiciones de laboratorio, el comportamiento de las armaduras embebidas en hormigón bajo flexión. En el contexto de este trabajo, centrado en el análisis del anclaje de barras lisas en estructuras de hormigón antiguas, los objetivos concretos del ensayo son los siguientes:

- **Analizar el comportamiento de la adherencia entre barras de acero liso y el hormigón** cuando estas se encuentran sometidas a esfuerzos de flexión en una viga, considerando las condiciones de carga reales que se dan en elementos estructurales típicos.
- **Determinar la longitud mínima de anclaje necesaria para el desarrollo completo de la tracción** en la barra lisa sin que se produzca deslizamiento o fallo prematuro por pérdida de adherencia, lo cual es clave para evaluar si las dimensiones existentes en estructuras antiguas son seguras.

- **Identificar los modos de fallo característicos asociados al anclaje insuficiente** en barras lisas, como el deslizamiento progresivo, la fisuración longitudinal del hormigón o la extracción parcial de la barra, en comparación con el fallo por fluencia o rotura del acero.
- **Estudiar la influencia de parámetros clave**, como la longitud embebida, la resistencia del hormigón, el diámetro de la armadura y la presencia o no de estribos de confinamiento, sobre la capacidad de anclaje efectiva.
- **Comparar los resultados experimentales obtenidos con las formulaciones actuales del Eurocódigo 2**, evaluando si estas resultan conservadoras, adecuadas o inadecuadas para el caso particular de armaduras lisas en estructuras históricas.
- **Proponer una base experimental para una posible modificación de la formulación normativa o para la generación de expresiones empíricas alternativas** más ajustadas al comportamiento real observado.

Estos objetivos permitirán establecer una metodología de evaluación técnica sólida y fundamentada, que sirva de apoyo tanto en el diagnóstico estructural como en la toma de decisiones de intervención sobre edificaciones antiguas.

3.2.2. Fundamentos teóricos

El comportamiento adherente entre el acero y el hormigón en una estructura de hormigón armado depende de la capacidad de la interfaz para transferir esfuerzos de tracción desde el acero hacia la matriz cementante de forma progresiva, sin deslizamientos significativos. En una situación ideal, esta transferencia de cargas se produce gracias a un equilibrio entre adherencia química, fricción superficial y, en el caso de armaduras corrugadas, anclaje mecánico derivado del relieve superficial.

Sin embargo, cuando se utilizan **barras lisas**, el anclaje mecánico es prácticamente inexistente, lo que obliga a que los mecanismos de adherencia dependan exclusivamente del contacto efectivo entre ambas superficies y de las tensiones radiales inducidas por la tracción longitudinal. En este escenario, el comportamiento del anclaje se vuelve especialmente sensible a variables como la calidad del hormigón, el recubrimiento, la presencia de fisuras, y, sobre todo, la **longitud embebida efectiva**.

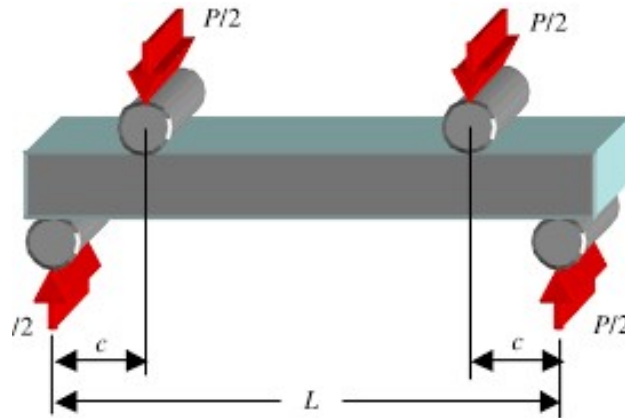


Ilustración 31 - Esquema de ensayo de flexión en 4 puntos (Resistencia a flexión y porosidad de la tiza, 2004)

- Transferencia de cargas en vigas

Cuando una viga se encuentra sometida a **flexión**, se generan esfuerzos de tracción y compresión en las fibras extremas. La tracción es absorbida por las armaduras inferiores, que deben estar adecuadamente ancladas dentro del hormigón para que la tensión se transmita de forma efectiva.

El fenómeno de **anclaje** se produce en la zona próxima al extremo libre de la barra. La transferencia de carga desde la barra al hormigón se da mediante tensiones tangenciales (tensión de adherencia) distribuidas a lo largo de la longitud embebida. Si esta longitud no es suficiente, se puede producir un **deslizamiento progresivo**, que reduce la efectividad del armado y puede provocar fallos localizados.

- Distribución de la adherencia en el Beam Test

A diferencia del Pull-out Test, en el Beam Test la distribución de tensiones de adherencia no es simétrica ni constante. En una viga sometida a flexión, la tracción se desarrolla gradualmente desde el punto de aplicación de la carga hacia los apoyos. Por tanto, las tensiones de adherencia también se distribuyen de forma no uniforme, concentrándose en las proximidades de la zona de momento máximo.

Esta distribución se ve afectada, entre otros, por:

- La longitud embebida real de la barra.
- El confinamiento generado por los estribos o el recubrimiento.
- La evolución de las fisuras longitudinales, que reducen progresivamente la adherencia efectiva.
- El nivel de deformación alcanzado en la barra.
- Mecanismos de fallo en barras lisas

En armaduras lisas, los mecanismos de fallo son distintos a los que se observan con armaduras corrugadas. Los más habituales en el Beam Test son:

Fallo por deslizamiento sin fisuración relevante: la barra se desliza dentro del hormigón sin provocar daños visibles en la matriz. Es típico de anclajes cortos o de baja adherencia.

Fallo por fisuración longitudinal: a medida que se transfiere la carga, se generan tensiones radiales que pueden provocar fisuras paralelas a la barra, especialmente cuando no existe confinamiento transversal suficiente.

Fallo por extracción parcial con cono de rotura: si el confinamiento es moderado, se forma una superficie de fallo inclinada que expulsa el hormigón de recubrimiento.

Fallo por tracción del acero: si la adherencia es suficiente, el acero fluye o rompe antes de que se pierda el anclaje. Es el modo de fallo deseado desde el punto de vista estructural.

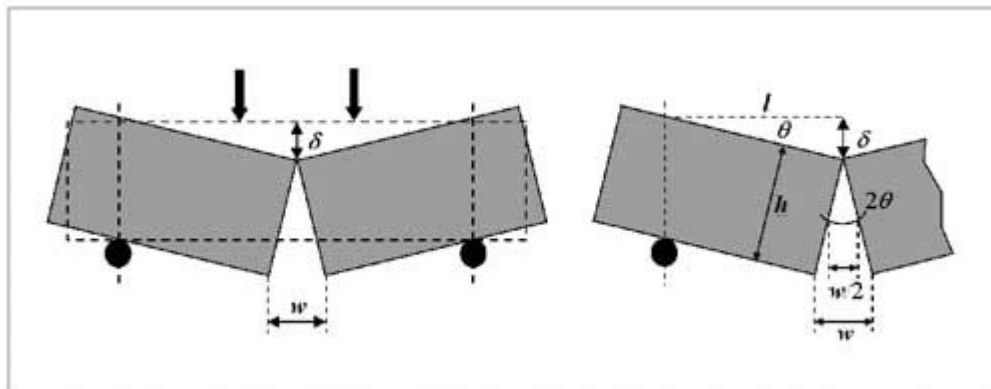


Ilustración 32 - Parámetros de medición en el ensayo Beam Test (Tenacidad a la fractura de cementos de uso petrolero)

- Comparación con otras metodologías

En relación con otros ensayos, como el Pull-out Test, el Beam Test presenta las siguientes ventajas:

- Representa mejor las **condiciones reales de carga** en una estructura (flexión, estribos, distribución de tensiones).
- Permite observar la interacción entre **adherencia, fisuración y deformación de la viga**.
- Es adecuado para validar formulaciones de anclaje en condiciones realistas, especialmente en presencia de **armaduras lisas**.

Sin embargo, también presenta limitaciones como una mayor complejidad de instrumentación y una menor repetitividad debido a las variaciones en la fisuración.

3.2.3. Procedimiento experimental

El diseño experimental del Beam Test debe ajustarse tanto a los principios mecánicos del ensayo como a las condiciones materiales y constructivas propias de las estructuras que se desean analizar. En este caso, se pretende reproducir el comportamiento de **armaduras lisas** ancladas en elementos de hormigón armado que han sido ejecutados según prácticas habituales en las décadas de 1960 y 1970. Por ello, tanto la geometría de las vigas como las características de los materiales empleados buscan representar fielmente ese contexto.

- Geometría de la probeta

Las vigas ensayadas presentan dimensiones estandarizadas que permiten generar una zona central con momento constante y evitar efectos de borde:

- **Longitud total de la viga:** 1200 mm
- **Luz entre apoyos:** 1000 mm
- **Sección transversal:** 150 mm de ancho × 200 mm de canto
- **Longitud de anclaje de la armadura:** variable, en función del objetivo del ensayo (0.5·l_{bd}, 1.0·l_{bd}, etc.)

La elección de estas dimensiones asegura un equilibrio entre realismo estructural y manejabilidad en laboratorio, además de compatibilidad con los sistemas de carga y medición disponibles.

- Armaduras utilizadas

Se emplean **barras lisas de acero**, con diámetros típicos de 10 a 16 mm. Estas se disponen en la zona inferior de la viga, como armadura longitudinal traccionada, y se disponen con anclajes parciales a fin de provocar el fallo por pérdida de adherencia si la longitud no es suficiente.

Además, se instalan:

- **Estribos de confinamiento:** colocados con separación regular (ej. cada 100 mm), o ausentes según el caso de estudio.
- **Barra opuesta (compresora):** en la parte superior, para mantener el equilibrio estático.
- **Gancho u otro refuerzo:** se puede prescindir de ellos para estudiar el comportamiento de la adherencia pura.
- Disposición de los apoyos y sistema de carga

El sistema de ensayo consiste en una **viga simplemente apoyada** con carga aplicada en dos puntos, simétrica respecto al centro, generando una **zona de momento constante** en la parte central (entre cargas). Esta configuración permite:

- Maximizar la zona sometida a tracción uniforme.
- Evitar concentraciones excesivas de esfuerzo cortante.
- Facilitar la instrumentación y observación de la zona crítica.
- **Apoyos:** Rígidos, tipo cilindro metálico sobre superficie lisa.
- **Carga:** Aplicada mediante gato hidráulico y celda de carga, repartida mediante una viga metálica auxiliar.

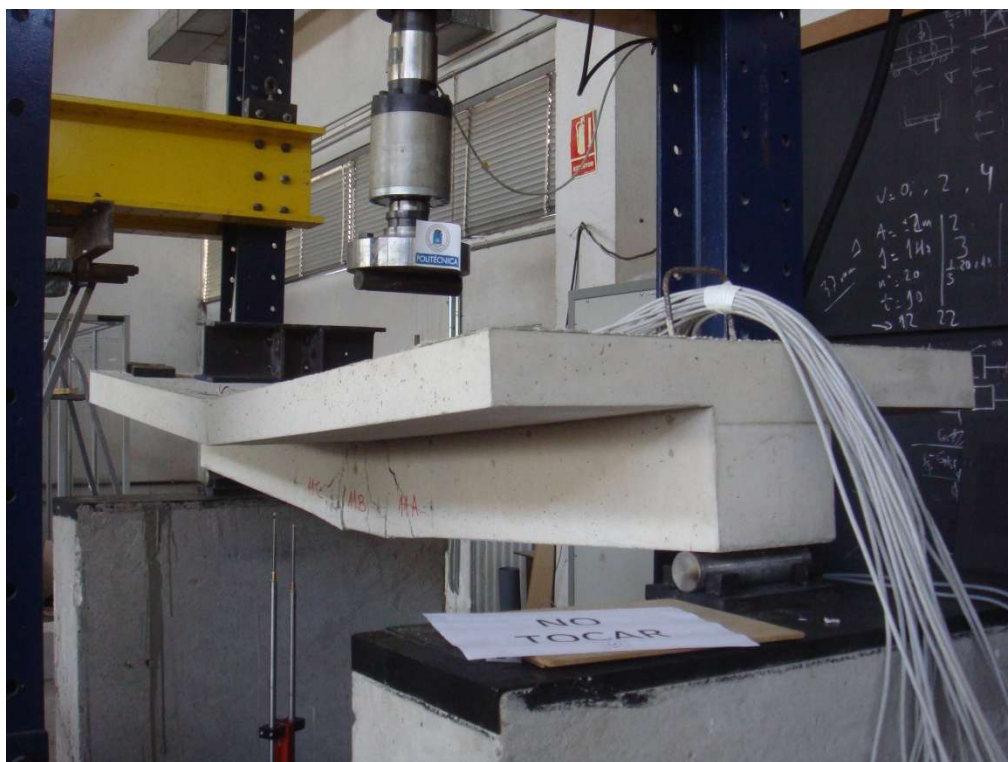


Ilustración 33 - Ensayo de flexión en vigas tipo T (UPM, 2015)

- Instrumentación del ensayo

Se emplean diversos sistemas para medir tanto los desplazamientos como la evolución del estado tensional:

- **LVDTs (Linear Variable Differential Transformers):** instalados en el extremo de la barra para registrar el **deslizamiento relativo** entre el acero y el hormigón.
- **Extensómetros:** colocados sobre la armadura para medir deformación axial.

- **Galgas extensométricas o strain gauges:** adheridas a la superficie del acero en puntos estratégicos.
- **Cámaras o escáneres ópticos:** para registrar la **formación y propagación de fisuras**.
- **Célula de carga:** ubicada entre el sistema de carga y la viga, para registrar la fuerza aplicada con precisión.
- Condiciones de curado y puesta en obra

Las vigas se fabrican en moldes de acero o madera, y se vibran mecánicamente para asegurar la compactación del hormigón. Posteriormente:

- Se curan en cámara húmeda o bajo agua durante 28 días, a 20 ± 2 °C.
- Se retiran del curado 24–48 horas antes del ensayo para aclimatación.

Este procedimiento garantiza que las propiedades del hormigón alcanzan el desarrollo esperado al momento del ensayo, lo cual es crucial para una interpretación rigurosa de los resultados.

El procedimiento de ejecución del ensayo Beam Test debe desarrollarse siguiendo una secuencia rigurosa que asegure la fiabilidad de los resultados, la correcta activación del mecanismo de adherencia y la detección precisa de los fenómenos de deslizamiento o fallo de anclaje.

1. Preparación previa al ensayo

Antes de llevar a cabo la prueba, es necesario:

- **Verificar la alineación de los apoyos**, asegurando que la viga se encuentra centrada respecto al sistema de carga.
- **Confirmar la colocación de sensores** (LVDTs, galgas, extensómetros), fijándolos firmemente para evitar lecturas erróneas por movimientos ajenos al fenómeno que se estudia.
- **Comprobar la integridad de la viga**, revisando que no haya microfisuras previas visibles ni pérdidas de sección en las armaduras.

Además, se mide la **temperatura ambiental**, ya que puede influir ligeramente en las propiedades del hormigón o en los dispositivos electrónicos de medición.

2. Aplicación de carga

La carga se aplica de forma **cuasiestática y controlada**, siguiendo uno de estos dos modos:

- **Control de desplazamiento** (más recomendable): la velocidad de descenso del gato hidráulico es constante (ej. 0.5 mm/min), permitiendo una mejor resolución de la curva carga–desplazamiento.
- **Control de fuerza**: carga creciente en incrementos constantes (ej. 1–2 kN cada 30 segundos), con pausas para registrar datos y observar fisuras.

Durante la aplicación de carga, se deben realizar las siguientes acciones:

- Registrar continuamente la **carga aplicada** mediante la celda de carga.
- Medir la **flechade la viga** en el centro y bajo los puntos de carga.
- Registrar el **deslizamiento relativo barra-hormigón** en el extremo del anclaje monitorizado.
- Fotografiar y/o registrar con video la aparición de fisuras longitudinales o circunferenciales.

3. Identificación del fallo

El ensayo puede detenerse en dos situaciones:

- **Fallo por adherencia**: Se observa un deslizamiento progresivo y creciente de la barra respecto al hormigón, acompañado de fisuras longitudinales en la zona de anclaje, antes de que el acero fluya.
- **Fallo por tracción del acero**: La barra alcanza su fluencia ($\text{esfuerzo} > f_{y\text{}}$) y eventualmente rompe, sin evidencias de pérdida de anclaje. Este caso indica que la longitud de anclaje ha sido suficiente.

Para detectar el modo de fallo, se considera:

- El valor máximo de carga alcanzada.
- El momento en que comienza el deslizamiento medido por LVDTs.
- La aparición de fisuras que conectan con el extremo del anclaje.
- Si la deformación medida en el acero supera la deformación de fluencia típica (~2–3 %).

4. Registro de datos

Durante el ensayo, los siguientes datos deben recogerse en tiempo real o a intervalos regulares:

- **Fuerza aplicada (F)**
- **Desplazamiento vertical de la viga (δ)**
- **Deslizamiento relativo de la barra (s)**
- **Deformación del acero (ϵ_s)**
- **Evolución de fisuras (fotografías y croquis)**

Estos valores se utilizan para construir las **curvas carga-desplazamiento**, **carga-deslizamiento** y eventualmente la **curva adherencia-deslizamiento $\tau-s$** .

5. Postensayo

Una vez finalizado el ensayo, se procede a:

- **Extraer la barra de acero** para observar las marcas de contacto o abrasión.
- **Cortar la viga longitudinalmente** (opcional) para identificar el patrón de fisuras internas.
- **Fotografiar el cono de extracción**, si se ha producido.
- **Consolidar los datos** en una ficha técnica del ensayo, registrando todas las variables de entrada y resultados obtenidos.

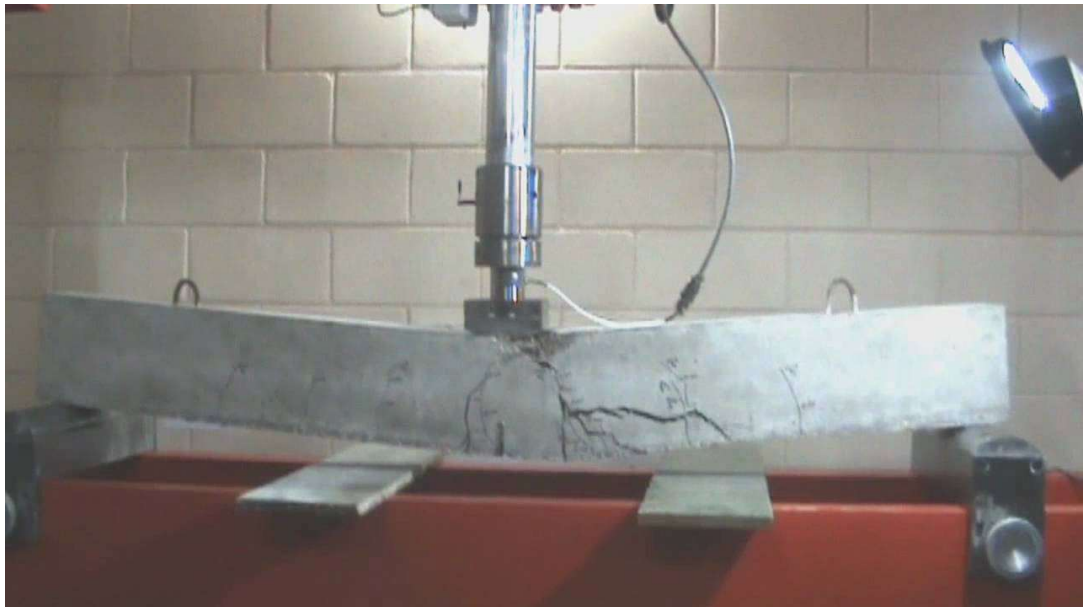


Ilustración 34 - Ensayo Beam Test en viga de hormigón armado (Arteta, 2007)

3.2.4. Variables de control y medición

El comportamiento del anclaje de una barra lisa embebida en una viga de hormigón depende de numerosos factores. Para que los resultados obtenidos sean comparables y útiles a efectos de evaluación estructural, es imprescindible controlar y registrar todas las **variables que afectan directamente al desarrollo de la adherencia y al modo de fallo**.

Estas variables se agrupan según su naturaleza:

- Variables geométricas

Longitud de anclaje efectiva (l): Es la variable más decisiva. Define la zona de contacto entre el acero y el hormigón donde se transfiere el esfuerzo de tracción. Valores comunes: $5 \cdot \Phi$, $10 \cdot \Phi$, $15 \cdot \Phi$.

A mayor longitud, mayor superficie de adherencia disponible, pero con rendimientos decrecientes por distribución no lineal de tensiones.

Diámetro de la barra (Φ): Influye en la superficie de contacto y en el esfuerzo axial que puede desarrollar. En barras lisas, el aumento de Φ reduce la adherencia específica (τ) porque la fuerza se distribuye sobre más área sin mejora proporcional del mecanismo adherente.

Recubrimiento de hormigón: Afecta al confinamiento pasivo de la barra. Recubrimientos muy bajos favorecen la fisuración radial y reducen la resistencia al deslizamiento.

El Eurocódigo fija mínimos normativos, pero en estructuras antiguas estos suelen ser inferiores.

- Variables mecánicas

Resistencia a tracción del hormigón: La adherencia depende directamente de la calidad del hormigón en la interfaz.

En hormigones antiguos (H-150 a H-250), esta resistencia es inferior a la esperada en diseño moderno, lo que puede reducir la capacidad del anclaje.

Estado de fisuración previa: Fisuras existentes en la zona de anclaje alteran radicalmente la distribución de tensiones adherentes y favorecen el fallo por deslizamiento. En ensayos comparativos puede considerarse el ensayo sobre vigas preagrietadas.

Nivel de confinamiento transversal: La presencia o no de estribos condiciona la resistencia al desprendimiento radial.

Ensayos con y sin confinamiento permiten valorar el efecto del armado transversal en el comportamiento adherente.

- Variables de ensayo

Velocidad de carga: Influye en la respuesta del sistema. Cargas aplicadas lentamente permiten observar mejor el deslizamiento progresivo. Ensayos dinámicos tienden a mostrar un comportamiento más frágil.

Tipo de control (fuerza o desplazamiento): Controlar por desplazamiento suele ofrecer mejores resultados para observar la rama post-pico del comportamiento adherente.

Ubicación de la barra dentro de la sección: Las barras más cercanas al fondo de la viga están más expuestas a tracción y microfisuración, lo que puede afectar el inicio del deslizamiento.

- Variables ambientales y constructivas

Edad del hormigón al ensayo: Aunque se recomienda ensayar a los 28 días, el hormigón antiguo puede estar afectado por carbonatación o microfisuras internas. En algunos casos, se simulan estas condiciones en laboratorio.

Condiciones de curado: Un curado deficiente implica una matriz más porosa y débil, lo que reduce la capacidad de adherencia.

Calidad del contacto acero-hormigón: Impurezas, óxidos o restos de desencofrante en la barra pueden alterar la fricción superficial y afectar la adherencia efectiva.

3.2.5. Análisis e interpretación de los resultados

Una vez realizado el ensayo Beam Test, el análisis de los resultados tiene como finalidad comprender el comportamiento del anclaje bajo flexión, identificar el tipo de fallo producido y establecer relaciones cuantitativas entre las variables estudiadas y la adherencia efectiva entre el acero liso y el hormigón.

Este análisis debe realizarse desde una doble perspectiva: cuantitativa (curvas y magnitudes obtenidas) y cualitativa (modo de fallo y evolución del daño).

- Curvas carga-desplazamiento y carga-deslizamiento

Los datos recogidos durante el ensayo permiten construir diferentes curvas, siendo las más relevantes:

- **Curva carga vs. flecha central de la viga:** indica la rigidez global del sistema y permite identificar el inicio de fisuración (pérdida de linealidad), el pico de carga y la rama post-pico si existe.
- **Curva carga vs. deslizamiento del anclaje:** permite observar directamente la eficiencia del anclaje. Un incremento rápido del deslizamiento tras alcanzar la carga máxima indica pérdida de adherencia.
- **Curva deformación del acero vs. carga:** ayuda a determinar si el acero alcanzó su límite elástico (fluencia) antes del fallo.

A partir de estas curvas se pueden obtener los siguientes valores característicos:

- **Carga máxima (F_{max}):** corresponde al punto más alto de la curva.
- **Deslizamiento en F_{max} (s_{max}):** si es elevado, puede indicar fallo por adherencia.
- **Flecha máxima:** permite evaluar la ductilidad global del sistema.

- **Deformación de fluencia del acero:** si no se alcanza, se interpreta como fallo prematuro de anclaje.

- Modos de fallo observados

En función de la longitud de anclaje, el confinamiento y la calidad del hormigón, se pueden observar diferentes modos de fallo:

- **Fallo por deslizamiento progresivo:** La barra se desplaza respecto al hormigón sin alcanzar su capacidad resistente. Se asocia con longitudes de anclaje insuficientes o baja resistencia del hormigón.
- **Fallo por fisuración longitudinal:** Se desarrollan fisuras paralelas a la barra en el recubrimiento, típicas en hormigones poco confinados.
- **Fallo por extracción parcial (cono de rotura):** En casos con cierto confinamiento, el hormigón se separa parcialmente en forma de cuña o cono.
- **Fallo por tracción del acero (fluencia o rotura):** Se considera el modo deseado. Indica que el anclaje ha sido suficiente para desarrollar toda la capacidad del acero.

La documentación visual del ensayo (fotografías antes y después, croquis de fisuras, registros del deslizamiento) es clave para clasificar estos fallos con claridad.

- Evaluación de la tensión de adherencia efectiva

A partir de la carga máxima alcanzada y de la geometría del anclaje, puede calcularse la **tensión media de adherencia efectiva** (τ_{eff}):

$$\tau_{\text{eff}} = \frac{F_{\text{max}}}{\pi \cdot \Phi \cdot l}$$

Este valor permite comparar los resultados del Beam Test con los obtenidos en el Pull-out Test o con las tensiones de cálculo del Eurocódigo. En caso de que el ensayo no produzca fallo adherente, se puede considerar que la adherencia disponible es igual o superior al valor calculado, lo que refuerza la validez del anclaje.

- Interpretación estructural

Los resultados obtenidos en el Beam Test deben interpretarse en el contexto de su aplicación real. Algunas consideraciones:

- Si el ensayo muestra que una longitud de anclaje $l \geq 10 \cdot \Phi$ permite desarrollar la tracción sin fallo, puede considerarse ese valor como mínimo de referencia para barras lisas en estructuras antiguas.
 - Los casos en que se produce deslizamiento con longitudes mayores indican **necesidad de refuerzo o sustitución** del anclaje.
 - La aparición de fisuras longitudinales antes del fallo sugiere que el recubrimiento o el confinamiento es insuficiente, incluso si el anclaje resiste la carga total.
 - Las curvas con ramas post-pico pronunciadas evidencian **comportamientos dúctiles**, mientras que caídas bruscas tras F_{max} revelan sistemas frágiles.
- Aplicabilidad de los resultados

Los resultados del Beam Test son especialmente útiles para:

- **Validar o ajustar** los valores de adherencia asumidos por el Eurocódigo en el caso de armaduras lisas.
- **Diseñar soluciones de refuerzo** cuando los anclajes originales no cumplen con los requisitos de seguridad.
- **Establecer bases experimentales** para propuestas normativas alternativas que reflejen el comportamiento real de estructuras construidas en el pasado.

3.3. Ensayo de Resistencia a Tracción por Hendimiento

3.3.1. Introducción

El comportamiento mecánico del hormigón ante solicitaciones de tracción es un aspecto determinante en el diseño, análisis y diagnóstico de estructuras de hormigón armado. Aunque el hormigón destaca por su alta capacidad a compresión, su resistencia a tracción es sensiblemente inferior y mucho más variable, lo que condiciona su utilización directa en zonas sometidas a este tipo de esfuerzos. En consecuencia, el estudio de la tracción del hormigón es esencial en todos aquellos fenómenos estructurales donde se desarrollan fisuras, (AENOR, 2010) se activan mecanismos de adherencia, o se requiere una transferencia eficaz de esfuerzos entre materiales, como ocurre con las armaduras embebidas.

En estructuras históricas ejecutadas con **barras lisas**, la resistencia del hormigón a tracción juega un papel aún más relevante. Al no existir anclajes mecánicos eficaces, como los proporcionados por armaduras corrugadas, la transferencia de carga entre el acero y el hormigón depende casi exclusivamente de la calidad de la interfaz y de la capacidad del hormigón para resistir tracciones inducidas por esfuerzos tangenciales. En estos casos, una caracterización precisa de la resistencia a tracción se convierte en un factor clave para evaluar la seguridad estructural del sistema.

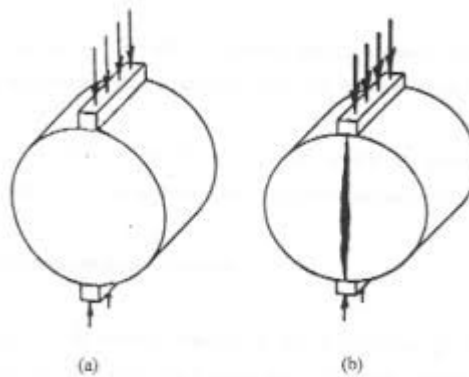


Ilustración 35 - Ensayo a tracción por hendimiento (UPC)

Sin embargo, la medición directa de la resistencia a tracción del hormigón plantea numerosos inconvenientes: requiere equipos y fijaciones especiales, genera valores muy dispersos y no siempre se corresponde con los mecanismos que realmente actúan en estructuras. Por ello, se recurre frecuentemente a **métodos indirectos**, entre los cuales destaca el **ensayo de tracción por hendimiento**, también denominado *ensayo brasileño*.

Este procedimiento experimental está estandarizado en diversas normativas internacionales y nacionales, como la **UNE-EN 12390-6** (AENOR, 2006) la **ASTM C496/C496M-17** (ASTM International, 2017) o la **NTC 4024** (Comisión Nacional de Normalización de Obras de Construcción (mexico), 2004), entre otras. En todas ellas se establece un método de ensayo basado en la aplicación controlada de una carga de compresión a lo largo del diámetro de una probeta cilíndrica de hormigón, produciendo una rotura por tracción indirecta en el plano vertical.

La principal ventaja de este método es su sencillez, alta reproducibilidad y buena correlación con el comportamiento del hormigón en regiones donde se desarrollan **tracciones distribuidas o confinadas**, como ocurre en la zona de adherencia de una barra embebida. A diferencia de los ensayos de tracción directa, que presentan mayor dispersión y dificultad de ejecución, el hendimiento proporciona resultados útiles tanto para el control de calidad del hormigón como para el análisis estructural.

En el marco del presente trabajo, el ensayo de tracción por hendimiento se emplea como herramienta de caracterización del hormigón, con el objetivo de establecer una base experimental que permita evaluar, con mayor precisión, la interacción entre el hormigón y las armaduras lisas presentes en estructuras históricas. Los resultados obtenidos se utilizarán tanto para comparar materiales como para alimentar modelos analíticos de adherencia desarrollados a partir de otros ensayos, como el Pull-out Test o el Beam Test.

3.3.2. Fundamento teórico

El ensayo de tracción por hendimiento es un método indirecto para determinar la resistencia del hormigón a tracción. Aunque la carga aplicada durante el ensayo es compresiva, el estado tensional generado dentro de la probeta da lugar a la aparición de **tensiones de tracción en dirección perpendicular a la carga**, lo cual provoca la rotura del material a través del plano diametral. Este fenómeno se conoce como **tracción por hendimiento o división diametral**, y permite estimar de manera fiable la capacidad del hormigón para resistir esfuerzos de tracción distribuidos.

- Comportamiento mecánico durante el ensayo

Cuando una probeta cilíndrica de hormigón es comprimida a lo largo de un diámetro mediante cargas concentradas distribuidas linealmente (por ejemplo, a través de bandas de neopreno o platinas metálicas), se genera un campo de tensiones complejas. En la vecindad del plano diametral vertical, y alejadas de las zonas de aplicación de carga, las tensiones tangenciales dominantes son

tensiones de tracción horizontales. Estas tensiones se distribuyen de forma prácticamente uniforme a lo largo de la sección transversal, generando un estado plano de tracción indirecta.

El fallo se produce típicamente de forma frágil, mediante la formación de una **fisura vertical neta** que recorre el eje del cilindro. Esta fisura evidencia la incapacidad del hormigón para resistir las tensiones generadas por el estado de esfuerzo transversal, y su aparición permite determinar la carga máxima soportada por el material.

- Hipótesis de cálculo

El modelo de análisis más extendido asume que:

- El contacto entre el sistema de carga y la probeta se encuentra idealmente distribuido a lo largo de una franja estrecha.
- El material es homogéneo, isótropo y presenta comportamiento elástico lineal hasta el fallo.
- La fisura se inicia en el centro de la probeta y se propaga perpendicularmente a la dirección de la carga.

Bajo estas hipótesis, se deduce la **fórmula empírica** que permite estimar la resistencia a tracción por hendimiento del hormigón:

$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi \cdot L \cdot D}$$

donde:

$f_{ct,sp}$ = resistencia a tracción indirecta por hendimiento (MPa)

F = carga máxima aplicada en el momento de la rotura (N)

L = longitud de la probeta cilíndrica (mm)

D = diámetro de la probeta (mm)

Este valor representa una **tensión media de tracción** en el plano diametral, que, si bien no corresponde a la tracción uniaxial directa, sí ofrece una aproximación válida y repetible del comportamiento tensional del hormigón en situaciones de tracción distribuida.

- Comparación con otros métodos de tracción

A diferencia del **ensayo de tracción directa**, que requiere dispositivos específicos para aplicar la carga de forma axial sin generar momentos parásitos, el método de hendimiento:

- Es más sencillo de implementar.
- Presenta menor dispersión en los resultados.
- No requiere encofrados especiales ni sistemas de agarre.
- Ofrece una mejor representación del comportamiento del hormigón en condiciones estructurales reales.

Asimismo, en comparación con el **ensayo de flexión (tracción indirecta en viga partida)**, el hendimiento presenta mayor facilidad de ejecución y un campo de tensiones más homogéneo en la zona crítica.

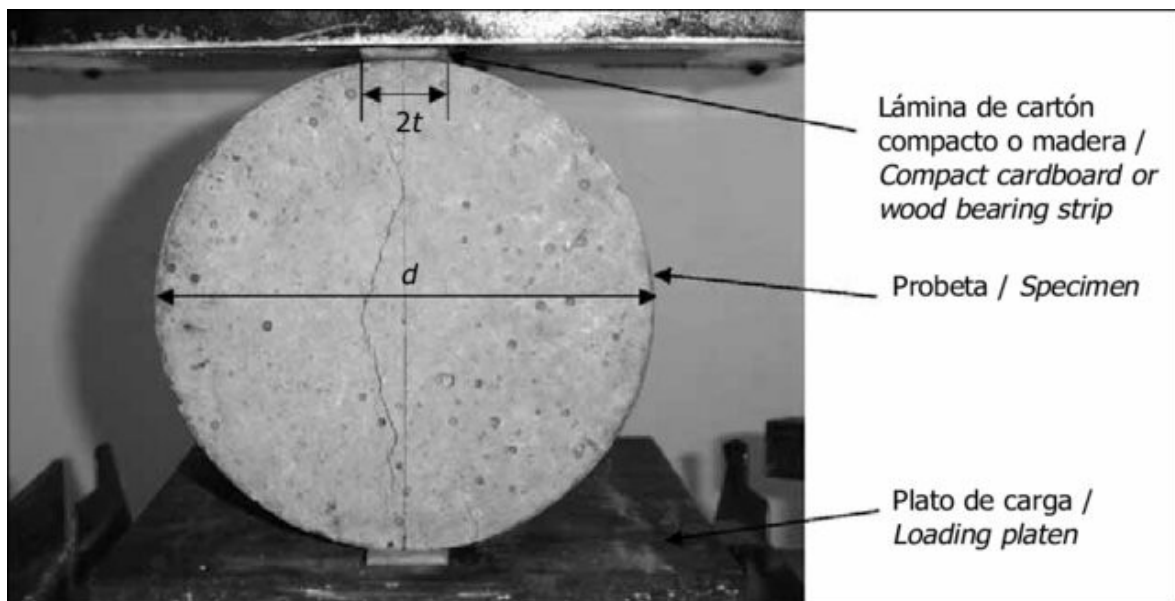


Ilustración 36 - Ensayo a tracción indirecta (Efecto del tamaño de la probeta y condiciones de carga en el ensayo de tracción indirecta, 2009)

Por estos motivos, la mayoría de las normativas y manuales técnicos recomiendan el **ensayo por hendimiento como método de referencia** para la estimación de la resistencia a tracción del hormigón, y lo utilizan para calcular otras propiedades derivadas, como la adherencia a armaduras, la fisuración en elementos flexionados o el dimensionado de anclajes.

3.3.3. Procedimiento experimental

El ensayo de tracción por hendimiento debe realizarse siguiendo una secuencia estructurada que garantice la fiabilidad de los resultados obtenidos y la correcta identificación de los fenómenos mecánicos que conducen a la rotura del hormigón. A continuación, se describen las distintas fases que componen el procedimiento experimental, desde la fabricación de las probetas hasta la ejecución del ensayo.

1. Fabricación y preparación de probetas

Las probetas utilizadas en este ensayo deben reproducir las condiciones del hormigón que se desea caracterizar. Para ello, se recomienda:

- Utilizar la **misma dosificación y procedencia** del hormigón empleado en la estructura original o en el modelo experimental.
- Emplear moldes cilíndricos con dimensiones normalizadas: **150 mm de diámetro por 300 mm de altura**.
- Verter el hormigón en dos capas y **vibrarlo** adecuadamente en cada una para garantizar una correcta compactación y eliminar oquedades.

Tras el vertido:

- Las probetas se mantienen en el molde durante 24 ± 2 horas.
- Posteriormente, se desmoldan y se colocan en condiciones de curado controlado: **inmersión en agua o cámara húmeda a 20 ± 2 °C y ≥ 95 % de humedad relativa**, durante al menos 28 días.
- Antes del ensayo, se **retiran del curado** y se dejan en condiciones ambientales normales durante 24 horas para su aclimatación.

2. Verificación geométrica y pesaje

Antes del ensayo, se procede a:

- **Medir el diámetro y la altura de cada probeta** con un calibre o cinta métrica metálica con precisión mínima de 1 mm.
- **Pesar la probeta** con balanza de precisión para evaluar su densidad y comprobar si existen desviaciones significativas entre probetas.
- Registrar los valores para introducirlos en los cálculos posteriores del esfuerzo a tracción.

3. Colocación en la prensa y alineación

El ensayo se realiza sobre una prensa hidráulica dotada de:

- Platos planos de acero endurecido o platinas de carga.
- Lectura digital de la carga aplicada.
- Elementos de alineación para asegurar la distribución uniforme del esfuerzo.

Para evitar concentraciones de tensiones locales, es habitual interponer **bandas de neopreno o láminas de cartón prensado** de unos 3–5 mm de espesor entre la probeta y los platos de carga. Estas bandas actúan como interfaces de reparto.

- La probeta se **dispone horizontalmente**, con el eje longitudinal paralelo a los platos.
- Se **centra con precisión** respecto a los ejes de la prensa para evitar excentricidades que alteren el campo de tensiones.

4. Aplicación de carga

Una vez colocada la probeta, se inicia el ensayo siguiendo las directrices de las normas UNE-EN 12390-6 o ASTM C496. Se recomienda:

- Aplicar la carga de forma continua y **sin interrupciones**.
- Mantener una **velocidad de carga constante**, controlada entre 0.04 MPa/s y 0.06 MPa/s.
- Observar visualmente la probeta a lo largo del ensayo para identificar el momento de rotura.

El **fallo suele producirse de forma repentina y frágil**, mediante una fisura longitudinal en el plano diametral vertical. Esta fisura puede iniciarse en el centro o en los extremos, dependiendo de las condiciones de curado y homogeneidad del material.

5. Registro de resultados

Una vez finalizado el ensayo, se deben registrar con precisión los siguientes datos:

- **Carga máxima aplicada (F)**, en N o kN.
- **Dimensiones reales de la probeta** (diámetro y altura).
- **Tipo de rotura observado** (fisura limpia, rotura parcial, doble fisura, etc.).
- **Fotografías** de la fisura postensayo y del patrón de rotura.
- **Observaciones cualitativas**: presencia de nidos de grava, variaciones de color, zonas porosas, etc.

El valor de resistencia a tracción indirecta se calcula posteriormente utilizando la expresión teórica descrita en el apartado anterior.

3.3.4. Variables de control y medición

En cualquier procedimiento experimental, el control riguroso de las variables que intervienen en el ensayo es fundamental para asegurar la fiabilidad de los resultados, reducir la dispersión y permitir comparaciones válidas entre distintos lotes o condiciones de ensayo. En el caso del ensayo de

tracción por hendimiento, varias variables deben ser cuidadosamente controladas o registradas, tanto desde el punto de vista geométrico y mecánico como en relación con el proceso de ejecución.

A continuación, se describen las principales variables que deben considerarse en la preparación, desarrollo y análisis de este tipo de ensayo.

- Variables geométricas

Diámetro y altura de la probeta

La fórmula utilizada para calcular la resistencia a tracción por hendimiento asume una distribución homogénea de tensiones a lo largo del plano diametral. Cualquier desviación significativa en las dimensiones de la probeta puede generar errores de cálculo o una distribución no uniforme del esfuerzo.

- Se recomienda medir el **diámetro (D)** y la **altura (L)** en al menos dos puntos ortogonales, y utilizar el promedio para el cálculo.
- Las desviaciones superiores al 2 % respecto a las dimensiones nominales deben anotarse y, si es necesario, corregirse con cilindros mecanizados.

Relación L/D

Aunque el ensayo está diseñado para probetas con una relación $L/D = 2$ (150 mm × 300 mm), también pueden ensayarse cilindros de 100 × 200 mm o de dimensiones equivalentes. No obstante, al modificar esta relación se puede alterar el estado de tensiones internas y debe tenerse en cuenta en la interpretación comparativa.

- Variables relacionadas con el hormigón

Resistencia a compresión

Aunque no interviene directamente en el cálculo del hendimiento, la resistencia a compresión suele correlacionarse con la resistencia a tracción. Un hormigón de mayor resistencia suele presentar una mayor capacidad a tracción, aunque con menor ductilidad.

Edad del hormigón

La resistencia a tracción evoluciona con el tiempo, especialmente durante los primeros 90 días. Es fundamental realizar el ensayo a una edad controlada (habitualmente 28 días) para que los resultados sean comparables. Si se desea evaluar estructuras envejecidas, deben ensayarse probetas más antiguas o extraídas in situ.

Curado y condiciones ambientales

El curado influye directamente en la microestructura del hormigón. Un curado deficiente (baja humedad, temperatura elevada, tiempo insuficiente) puede generar tensiones internas, microfisuras y menor cohesión de la pasta de cemento, reduciendo la resistencia a tracción.

- Variables del sistema de carga

Velocidad de aplicación de la carga

Una carga demasiado rápida puede inducir un comportamiento más frágil o una distribución desigual de las tensiones, afectando negativamente a la fiabilidad del ensayo. Las normativas recomiendan velocidades entre 0.04 y 0.06 MPa/s.

Distribución del contacto

El contacto entre las platinas de carga y la probeta debe ser lineal y centrado a lo largo del diámetro. Se utilizan bandas de neopreno, cartón o madera dura para repartir la presión. Cargas mal distribuidas pueden inducir fisuras prematuras fuera del eje deseado.

Alineación de la probeta

La excentricidad en la colocación o inclinación de la probeta puede generar momentos adicionales o tensiones de flexión, alterando el patrón de fisura y los resultados del ensayo. Se deben utilizar elementos de centrado o marcas guía para garantizar la correcta alineación.

Figura 16.- Evolución de la superficie de falla. Probeta de hormigón empleando parámetros constitutivos de contacto (micro-estructurales) equivalentes a los macro-estructurales empleados en [35].

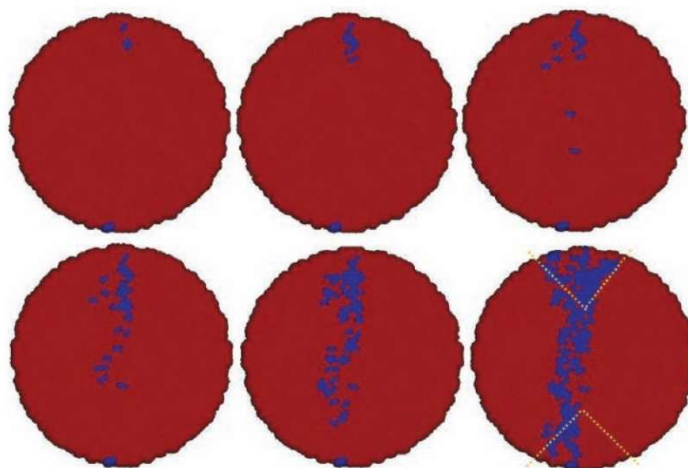


Ilustración 37 - Simulación de fallo del Ensayo Brasileño (Modelación y simulación del ensayo de tracción indirecta o ensayo Brasileño, empleando el Método de los Elementos Distintos (MED))

- Variables instrumentales y de medición

Lectura de la carga

El sistema de medición debe estar calibrado y tener una resolución adecuada para registrar con precisión la carga en el momento de la rotura. Los errores en la lectura directa pueden trasladarse linealmente al resultado final.

Registro de fisuras

Aunque el valor numérico del ensayo se basa en la carga, el patrón de fisuración proporciona información cualitativa muy útil. Se recomienda anotar:

- Número y tipo de fisuras (única, doble, ramificada).
- Posición de inicio de la fisura (centro, extremos).
- Simetría de la rotura.
- Condiciones externas

Temperatura y humedad del ambiente de ensayo

Estas condiciones pueden afectar tanto al comportamiento del hormigón como a la precisión de los equipos de medición. Aunque el efecto es menor que en otras propiedades (como fluencia o retracción), es conveniente mantener registros ambientales durante el ensayo.

Operador

Como en muchos ensayos manuales, la intervención humana puede introducir sesgos. Es recomendable que el ensayo lo realice personal técnico formado y que se utilice un procedimiento estandarizado escrito.

Con todas estas variables controladas y correctamente registradas, se garantiza que los resultados obtenidos reflejan el comportamiento real del hormigón frente a tensiones de tracción indirectas y que pueden emplearse con confianza para posteriores comparaciones, análisis estadísticos o modelización estructural.

3.3.5. Análisis e interpretación de los resultados

Una vez ejecutado el ensayo de tracción por hendimiento y calculada la resistencia a partir de la carga máxima soportada, es fundamental interpretar el resultado no solo como un valor numérico aislado, sino dentro del contexto mecánico y estructural al que va destinado. En este caso, se persigue comprender hasta qué punto el hormigón existente —o simulado— tiene capacidad

suficiente para sostener las tensiones de tracción indirecta que se desarrollan en la zona de anclaje de las armaduras lisas.

- Cálculo de la resistencia a tracción

El valor experimental de resistencia a tracción indirecta se obtiene, como se ha visto, mediante la siguiente fórmula:

$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi \cdot L \cdot D}$$

donde:

- F: carga máxima aplicada (en N),
- L: longitud de la probeta (en mm),
- D: diámetro de la probeta (en mm).

Este cálculo proporciona un valor medio de tensión en el plano diametral, que se interpreta como una estimación de la **resistencia a tracción del hormigón**, generalmente algo superior a la obtenida por tracción directa, pero inferior a la registrada en ensayos de flexión.

El resultado debe anotarse con una precisión mínima de 0.01 MPa, acompañado de la fecha del ensayo, la edad del hormigón, y un registro visual del patrón de rotura.



Ilustración 38 - Estado visual de la probeta posterior al ensayo de tracción indirecta (Efecto de la Incorporación de Pequeñas Dosis de Emulsión Asfáltica en el Comportamiento de Estabilizaciones de Suelo con Cemento Portland, 2020)

- Evaluación de la fiabilidad del resultado

Existen diversos indicadores cualitativos y cuantitativos que permiten valorar si el resultado obtenido en el ensayo es representativo y fiable:

- **Fisura limpia y simétrica** en el plano vertical: indica buena alineación y distribución de tensiones.
- **Carga creciente sin oscilaciones**: refleja una correcta aplicación de la fuerza.
- **Coincidencia del plano de rotura con el eje diametral**: condición necesaria para la validez del método.

Si la rotura es irregular, ocurre fuera del eje o presenta desviaciones evidentes (como fisuras oblicuas, rotura por aplastamiento o doble fisura paralela), el resultado puede considerarse no válido o, al menos, dudoso, debiendo repetirse el ensayo si es posible.

- Utilidad estructural del resultado

El valor de $f_{ct,spf}$ obtenido tiene múltiples aplicaciones estructurales:

Caracterización básica del hormigón: permite establecer si el material empleado cumple con los requisitos de resistencia especificados o esperados para una determinada clase (H-200, H-250, etc.).

Determinación del valor de adherencia de cálculo f_{bdf_bd} , según el Eurocódigo 2, mediante la expresión:

$$f_{bd} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \frac{f_{ct,sp}}{\gamma_c}$$

donde:

- η_1 : factor de tipo de barra (0.7 para acero liso),
- η_2 : factor de posición (1.0 en la mayoría de los casos),
- γ_c : coeficiente parcial de seguridad (habitualmente 1.5).

Esto permite calcular con precisión la tensión máxima de adherencia admisible entre acero y hormigón, base para estimar longitudes de anclaje, desarrollar expresiones de adherencia o validar modelos de ensayo como el Pull-out Test.

Comparación entre materiales o condiciones de curado: facilita establecer el impacto de distintas formulaciones, edades del hormigón o condiciones ambientales sobre su capacidad a tracción.

Diagnóstico de estructuras existentes: en rehabilitación o evaluación de estructuras históricas, permite conocer de forma no destructiva (mediante extracción de testigos) si el hormigón aún conserva niveles adecuados de resistencia.

- Relación con los mecanismos de adherencia

En el caso particular de las armaduras lisas, el resultado de este ensayo tiene una **implicación directa en la evaluación del anclaje**. Dado que estas barras no cuentan con relieves que contribuyan al anclaje mecánico, la capacidad del hormigón para resistir tracciones inducidas por la interfaz acero-hormigón es el factor limitante.

Una baja resistencia a tracción se traduce en **menor adherencia efectiva**, mayor riesgo de deslizamiento y, por tanto, necesidad de longitudes de anclaje superiores o refuerzos.

Una resistencia a tracción adecuada puede justificar, en determinadas condiciones, la **suficiencia de anclajes existentes**, especialmente si no se observan daños visibles o fisuras longitudinales en las zonas de anclaje.

Por ello, el ensayo de tracción por hendimiento no solo proporciona un valor de referencia, sino que también contribuye a establecer **criterios técnicos para la toma de decisiones** en proyectos de evaluación, refuerzo o intervención estructural.

4. ANALISIS DE LOS FUTUROS REQUISITOS NORMATIVOS. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

Las **tablas resumen elaboradas** sintetizan de forma ordenada los principales parámetros que cada normativa ha aplicado a las armaduras lisas: longitudes mínimas de anclaje y solape, radios de doblado, condiciones de gancho, recubrimientos exigidos, características mecánicas del acero y del hormigón, así como los ensayos característicos prescritos o implícitamente asumidos en cada periodo. Este esquema comparativo permite trazar una visión continua de la evolución técnica y normativa, facilitando la identificación de los hitos fundamentales en el abandono progresivo de las barras lisas como solución habitual en el diseño estructural.

Con el fin de ilustrar cuantitativamente esta evolución, se han elaborado dos tablas comparativas de **longitudes de anclaje** en función del diámetro de las barras lisas. En ambos casos se ha considerado un hormigón tipo **HA-25** y un acero con límite elástico de **275 MPa**, parámetros que representan condiciones de uso frecuentes en la práctica constructiva española. En la primera se comparan las longitudes de anclaje que establecían las normas que se han ido publicando en España hasta la fecha, y en la segunda se añaden las que se deducen de la aplicación del futuro Eurocódigo 2 (Autor institucional, 2026):

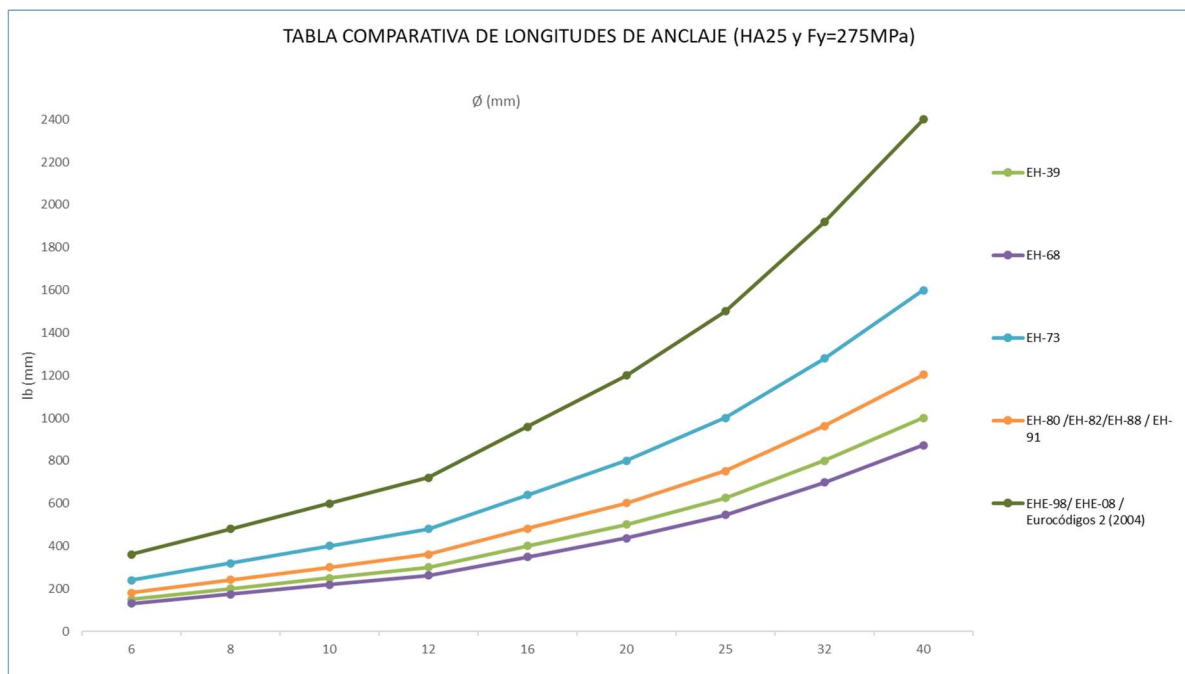


Tabla 1 - Tabla comparativa de longitudes de anclaje actual (elaboración propia)

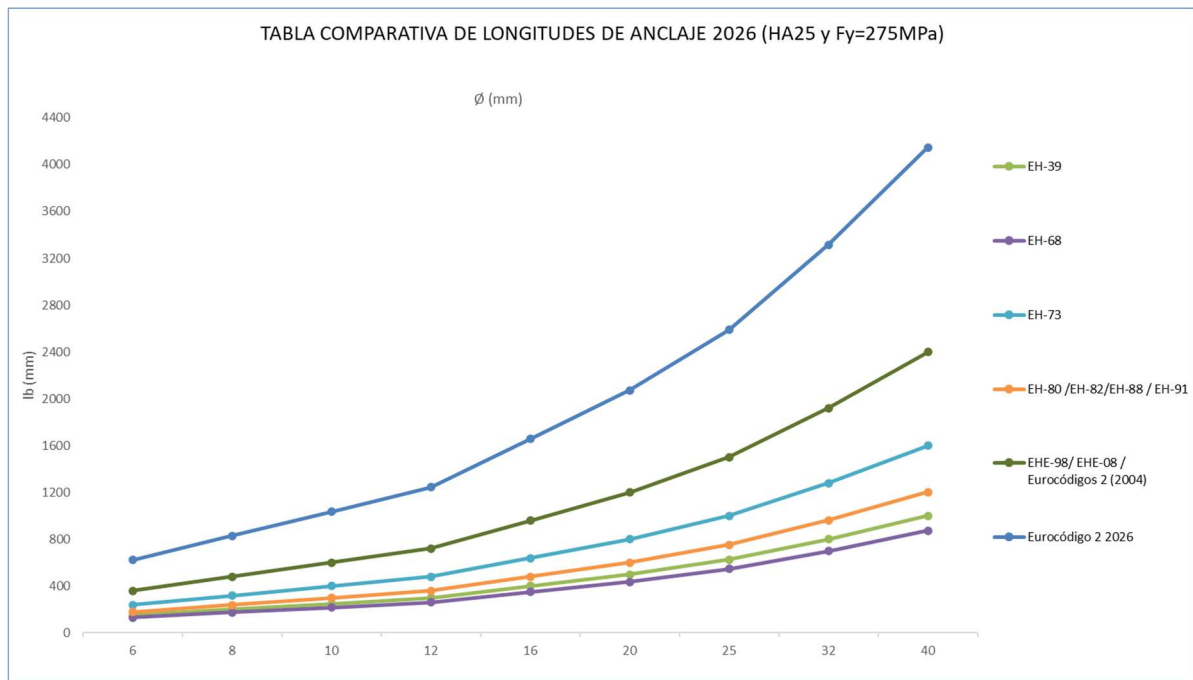


Tabla 2 - Comparativa de longitudes de anclaje con la nueva actualización del Eurocódigo 2 (2026) (elaboración propia)

El análisis comparativo de la normativa técnica española, desde la **Instrucción EH-39** (1939) hasta la plena adopción del **Eurocódigo 2** (Comité Europeo de Normalización (CEN), 2004), permite identificar con claridad la evolución en el tratamiento de las **barras de acero liso** empleadas como armaduras en estructuras de hormigón armado. La revisión histórica revela un tránsito progresivo desde criterios esencialmente empíricos y geométricos hasta un marco normativo basado en formulaciones racionales, verificación por estados límite y un enfoque prácticamente excluyente hacia el empleo del acero corrugado.

Primeras normativas: EH-39 y EH-68

En las primeras instrucciones, el **acero liso** constituía la tipología predominante de armadura. Las disposiciones normativas se limitaban a establecer **longitudes mínimas fijas** para anclajes y solapes, expresadas habitualmente como múltiplos del diámetro de la barra.

Asimismo, se prescribía la obligatoriedad de disponer **ganchos en los extremos** de las barras, de radios normalizados, como garantía adicional de anclaje. Estas medidas reflejan un enfoque pragmático y empírico, característico de la ingeniería de la época, en la que predominaban criterios de simplicidad constructiva y la experiencia acumulada en obra. Este esquema normativo fue suficiente para el contexto estructural de la España de mediados del siglo XX, en el que las edificaciones eran en su mayoría de pequeña o media escala y con hormigones de resistencias moderadas.

Transición hacia un enfoque racional: EH-73 y EH-82

La **EH-73** (1973) supuso un primer intento de modernización, manteniendo la regulación del acero liso pero comenzando a valorar de forma más consistente conceptos relacionados con la **resistencia del hormigón y la adherencia**. La transición se consolida con la **EH-80** (1980), que marca un cambio de paradigma: el diseño estructural comienza a apoyarse en **criterios de cálculo más técnicos y verificables**, alineándose progresivamente con la tendencia internacional hacia los **estados límite**.

Aunque las barras lisas siguen contemplándose en esta fase, su papel empieza a verse reducido frente a las ventajas ofrecidas por las armaduras corrugadas, cuya mayor capacidad de anclaje y fiabilidad mecánica permiten optimizar el dimensionamiento. Se pasa así de un modelo basado en **requisitos geométricos uniformes** a otro que admite la **modulación de las longitudes de anclaje y solape en función de las propiedades mecánicas del material**.

Descripción de las barras de acero liso en la Normativa: EHE-98 y EHE-08

Con la **EHE-98** (1998) se alcanza la plena integración del marco de diseño por **estados límite últimos y de servicio**, lo que consolida un sistema de cálculo fundamentado en la seguridad estructural y en la comprobación probabilística de las hipótesis de proyecto. En esta normativa se aprecia un cambio decisivo: el **acero liso deja de considerarse un material de uso generalizado**.

Las prescripciones se centran exclusivamente en las **barras corrugadas**, eliminando progresivamente toda referencia al acero liso en apartados relativos a **anclajes, solapes y empalmes**. Este criterio se mantiene en la **EHE-08** (Ministerio de Fomento, 2008), reforzando la exigencia de ductilidad, resistencia y capacidad de adherencia del acero, parámetros que el material liso no puede garantizar de manera suficiente para cumplir con los requisitos normativos de seguridad. De este modo, el acero liso queda relegado únicamente a la justificación de estructuras existentes, sin cabida en el diseño de nuevas construcciones.

Exclusión normativa en el Eurocódigo 2

El **Eurocódigo 2** (Comité Europeo de Normalización (CEN), 2004), marco normativo europeo en vigor y de aplicación en España como parte del Código Estructural, continúa esta línea de exclusión. Aunque **no prohíbe expresamente** el uso de barras lisas, tampoco proporciona parámetros de cálculo ni fórmulas específicas que permitan dimensionarlas directamente. Esta ausencia equivale a su **exclusión práctica** del diseño estructural convencional.

La normativa únicamente admite su empleo si se justifica experimentalmente mediante **ensayos específicos** que permitan evaluar la capacidad de adherencia y anclaje en condiciones reales de

servicio. Entre los ensayos más relevantes para este propósito se encuentran el **Pull-Out Test**, el **Beam Test** y el **ensayo de tracción por hendimiento**, todos ellos orientados a proporcionar resultados cuantitativos que permitan establecer coeficientes de seguridad acordes con el comportamiento estructural real.

Síntesis de la evolución normativa

En conjunto, la evolución normativa española y europea muestra un tránsito claro:

1. **Etapla inicial (EH-39, EH-68):** soluciones empíricas, criterios geométricos simples y aceptación generalizada del acero liso.
2. **Etapla de transición (EH-73, EH-80):** incorporación de fundamentos de adherencia y cálculo racional, con el acero liso, aún presente, pero en retroceso.
3. **Etapla de consolidación (EHE-98, EHE-08):** adopción plena de estados límite, exclusión explícita de las barras lisas y centralidad de las corrugadas.
4. **Etapla actual (Eurocódigo 2):** marco de aplicación internacional que no contempla las barras lisas en diseño ordinario, permitiendo únicamente su empleo bajo **justificación experimental**.

Este proceso refleja no solo la **evolución de la normativa**, sino también la transformación del propio sector de la construcción, en el que el **acero corrugado** se ha consolidado desde finales de los años 60-principios de los 70 del pasado siglo XX como la solución técnica estándar. El acero liso queda hoy circunscrito a la **evaluación de estructuras existentes**, donde el análisis experimental resulta esencial para garantizar la seguridad y prolongar la vida útil de construcciones históricas.

Salta a la vista que la futura versión del Eurocódigo EC2 (Autor institucional, 2026) exige longitudes de anclaje muy importantes, del orden del doble o más que las exigidas históricamente por la normativa. Por todo esto, en la evaluación de estructuras existentes, supone un condicionante muy importante que puede invalidar, desde el punto de vista de la seguridad, estructuras que con los criterios históricamente adoptados serían perfectamente válidas, incluso por las acciones y coeficientes parciales de seguridad exigibles en la actualidad.

Además, no existen antecedentes de siniestros ni patologías por fallos de anclaje de armaduras en estructuras que cumpliesen con estos requisitos históricos.

Una revisión de la nueva formulación que recogerá el futura Eurocódigo EC-2 (Autor institucional, 2026) parece dar mas peso a la adherencia del hormigón-acero, y menos al efecto del gancho en la capacidad del anclaje.

En el presente trabajo se plantea analizar cuál es la colaboración exclusivamente del gancho, mediante una campaña experimental.

El planteamiento de esta campaña, la metodología empleada y los resultados obtenidos se exponen en los siguientes apartados.



5. PLANTEAMIENTO DE ENSAYOS

Con el fin de caracterizar el comportamiento real de las armaduras lisas con gancho en estructuras históricas de hormigón armado, se plantea una campaña experimental orientada a determinar la resistencia efectiva de anclaje proporcionada exclusivamente por el gancho en ausencia de adherencia significativa. Este planteamiento responde a la necesidad de obtener un valor de referencia cuantitativo, que permita validar el uso de estas soluciones constructivas en edificaciones existentes y, a su vez, establecer un criterio comparativo frente a los requisitos de seguridad contemplados en normativas actuales.

El objetivo principal de la campaña es verificar qué capacidad de anclaje puede garantizar el gancho. Para ello, se han ejecutado un total de cuatro ensayos experimentales en el **Laboratorio del Instituto técnico de Materiales y Construcciones (INTEMAC)** sobre armaduras de diámetros comprendidos entre 14 mm y 15 mm, extraídas de una obra de demolición real.



Ilustración 39 - Demolición y extracción de armaduras en Gran Vía 3 (INTEMAC)

Las barras proceden de la demolición del **edificio situado en Gran Vía nº 3 (Madrid), construido en 1918**, lo que aporta un interés añadido a la investigación, al tratarse de un caso representativo del patrimonio edificado con armaduras lisas en España. La intervención fue realizada por la empresa INTEMAC, que colaboró en la campaña proporcionando tanto la documentación gráfica del proceso

de desmontaje como las propias barras de acero recuperadas (Cortesía de la empresa contratista dMol), previamente limpiadas y acondicionadas para su ensayo.



Ilustración 40 - Demolición y extracción de armaduras en Gran Vía 3 (INTEMAC)

Materiales y condiciones iniciales

Las armaduras recuperadas corresponden a acero liso, con un límite elástico característico en torno a 240 MPa, conforme a las propiedades típicas de los aceros laminados en caliente empleados en España en las primeras décadas del siglo XX. La elección de este valor responde tanto a los resultados de ensayos de caracterización metalográfica realizados en muestras de la misma procedencia, como a referencias documentales sobre las especificaciones históricas del material.

En cuanto al hormigón, se plantea la fabricación de probetas normalizadas con el objetivo de determinar la resistencia real del hormigón de referencia empleado en los ensayos. A efectos de comparación se ha adoptado una resistencia del hormigón de HA-25.

Cabe destacar que, en esta campaña experimental, no se han considerado de manera explícita las condiciones de recubrimiento del acero, dado que el objetivo principal es aislar la contribución del gancho como único mecanismo resistente frente al deslizamiento de la barra. Este aspecto constituye una limitación del planteamiento, aunque plantearon abordarlo en futuras fases de

investigación si los resultados de los ensayos son favorables, dado que el recubrimiento ejerce un papel relevante en el comportamiento global de adherencia y durabilidad.

Metodología experimental

El ensayo seleccionado para la campaña es el Pull-Out Test, considerado como el más adecuado para reproducir, de manera controlada y directa, las condiciones de adherencia y anclaje de una armadura en probeta de hormigón. Este ensayo permite cuantificar la fuerza máxima necesaria para extraer la barra y, por tanto, evaluar la contribución específica del gancho al anclaje, bajo la hipótesis de adherencia nula en el resto de la superficie de contacto acero-hormigón.

El procedimiento se ha ejecutado siguiendo los siguientes pasos:

1. Preparación de probetas de hormigón con inclusión de las barras lisas previamente seleccionadas, disponiendo el extremo con gancho embebido en el material.
2. Cura y endurecimiento del hormigón durante el tiempo reglamentario, con el fin de garantizar una resistencia homogénea y representativa. Ensayo de probetas moldeadas elaboradas con el mismo hormigón que el de las probetas en condiciones normalizadas para asegurar que el ensayo se realiza una vez alcanzados los 25 MPa previstos.
3. Montaje en el dispositivo de ensayo, fijando la probeta en el banco de carga y acoplando la barra a los elementos de tracción controlada.
4. Aplicación progresiva de carga axial hasta la extracción de la barra o la rotura localizada del hormigón en la zona de anclaje.
5. Registro de la carga máxima alcanzada y cálculo de la tensión correspondiente, con el objetivo de contrastar los valores experimentales frente al umbral de referencia de 25 MPa.

Esta metodología asegura una caracterización precisa del comportamiento de las armaduras lisas con gancho en condiciones comparables, ofreciendo una base sólida para el análisis posterior.

Alcance y perspectivas

La campaña descrita constituye una primera fase de investigación experimental destinada a validar el anclaje por gancho en barras lisas extraídas de estructuras históricas. El número limitado de ensayos (cuatro) responde a la necesidad de valorar si la contribución del gancho es importante más amplio en cuanto a la influencia de los diferentes diámetros de armadura, resistencias del hormigón, recubrimientos, etc. Se busca así analizar una tendencia preliminar sobre la capacidad resistente del mecanismo de anclaje. En fases posteriores, se contemplaría, si los resultados

desmintiesen las conclusiones que se deducen de la formulación del futuro Eurocódigo EC-2 (Autor institucional, 2026), ampliar en futuras líneas de investigación el número de probetas, incorporar diferentes tipologías de recubrimiento y contrastar los resultados con otras metodologías de ensayo, como el Beam Test o el ensayo de tracción por hendimiento, con el fin de disponer de un marco comparativo más completo.

En definitiva, esta campaña experimental se plantea como un ejercicio de validación práctica, en el que se confrontan directamente las hipótesis teóricas sobre el papel del gancho con resultados medidos en laboratorio. Su relevancia radica tanto en el conocimiento técnico aportado como en la contribución al análisis y conservación del patrimonio estructural histórico, donde las armaduras lisas siguen siendo un elemento común y necesario de evaluar.

6. REALIZACIÓN DE ENSAYOS

La campaña experimental se desarrolló en base a cuatro ensayos de extracción (PULL-OUT) sobre barras lisas recuperadas de una obra histórica, con el objetivo de caracterizar la resistencia que aporta exclusivamente el gancho como mecanismo de anclaje. Para ello, se prepararon cuatro probetas cúbicas de $200 \times 200 \times 200$ mm de hormigón, en las que se embebieron sendas barras lisas de diámetros 14 mm (dos unidades) y 15 mm (otras dos unidades), todas ellas con un gancho conformado a 180° con un radio de 30mm. El planteamiento fue reproducir unas condiciones de ensayo controladas en laboratorio que permitieran llevar cada probeta hasta rotura, registrando la evolución carga–desplazamiento y documentando el modo de fallo en cada caso.



Ilustración 41 - Probetas cilíndricas y cúbicas para el ensayo (INTEMAC)

En primer lugar, se procedió a la recepción y preparación de las barras. Todas ellas provenían de la demolición del edificio situado en la calle Gran Vía de Madrid, erigido en 1918, de donde fueron recuperadas durante el proceso de desmontaje ejecutado por la empresa dMol bajo la Dirección Facultativa de INTEMAC. Una vez en laboratorio, las barras fueron etiquetadas y fotografiadas individualmente, asignándoles una nomenclatura que permitiera identificar sin ambigüedad tanto su diámetro nominal como el orden de ensayo (M-1, M-2, M-3 y M-4). Se llevó a cabo una limpieza

superficial mediante cepillado manual, con el único objetivo de eliminar restos de óxido suelto o mortero adherido, manteniendo en la medida de lo posible el estado real de conservación del acero, ya que se consideraba fundamental preservar sus condiciones originales de cara a la interpretación de los resultados. Se midió el diámetro real de cada barra con pie de rey de precisión y se verificó el correcto conformado del gancho, empleando una plantilla metálica que aseguraba un desarrollo de 60 ± 2 mm y un ángulo de doblado de 180° . Durante este proceso se documentaron también mermas o reducciones puntuales de sección, en especial en las barras de 15 mm, que posteriormente resultaron determinantes en el tipo de fallo observado.

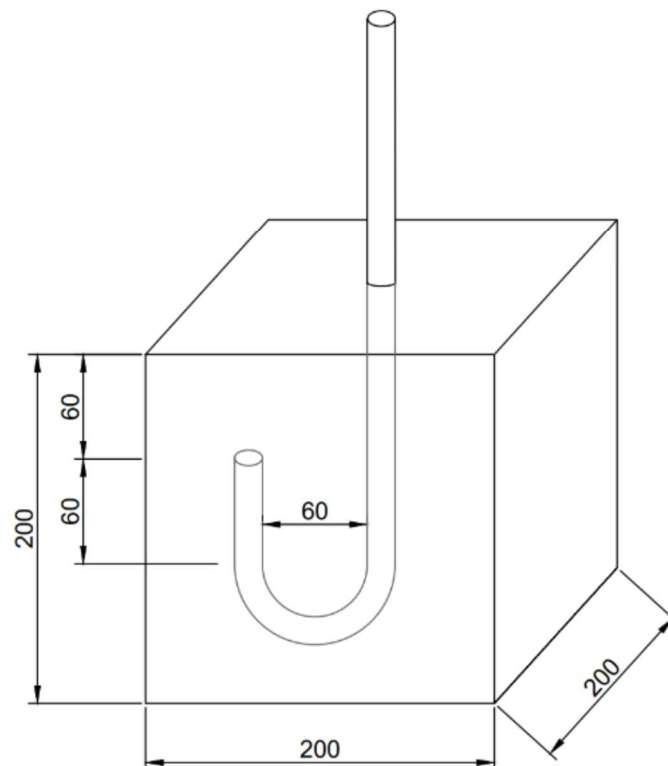


Ilustración 42 - Esquema dimensional del modelo. Cotas expresadas en mm (INTEMAC)

Paralelamente a la preparación de las barras, se procedió a la fabricación del hormigón destinado a las probetas de ensayo. La dosificación se planteó de forma que la resistencia característica se aproximase a un hormigón HA-25, representativo y compatible con los requisitos normativos actuales, aunque históricamente los valores utilizados en la época de construcción del edificio

habrían sido sensiblemente inferiores (en torno a HA-15 o HA-20). Se empleó cemento CEM I 42,5 R, árido calizo con fracción 0/12 y una relación agua/cemento ajustada para obtener una consistencia media, medida mediante el ensayo de cono de Abrams, con un asiento comprendido entre 6 y 8 cm. La mezcla se preparó en amasadora de eje vertical, asegurando una homogeneización adecuada y controlando que la temperatura final del hormigón se mantuviera entre 20 y 23 °C, condiciones consideradas óptimas para el proceso de fraguado.



Ilustración 43 - Amasadora Vertical tipo ARCEN (INTEMAC)

El moldeo de las probetas se llevó a cabo en moldes cúbicos metálicos de 200 × 200 × 200 mm, previamente engrasados para facilitar su posterior desencofrado. En cada uno de ellos se dispuso la barra correspondiente de forma vertical, situando el gancho embebido en el fondo del molde y procurando que el plano de este quedara paralelo a una de las caras de la probeta, con el fin de facilitar tanto la observación visual del comportamiento durante el ensayo como la interpretación del fallo una vez extraída la barra. Se cuidó la correcta colocación de la barra en el centro, de manera que la excentricidad respecto al eje del cubo fuera inferior a 2 mm, empleando separadores rígidos que garantizaban la posición durante el vertido. El llenado se efectuó en dos capas, con

compactación mediante vibrador de aguja en cada una de ellas, cuidando de no entrar en contacto directo con el acero. Tras la compactación y nivelado superficial, se identificó cada probeta con un código indeleble (P-1, P-2, P-3 y P-4) que coincidía con la barra correspondiente. De forma paralela, se fabricaron probetas testigo cilíndricas para la determinación de la resistencia real a compresión a los 28 días, lo cual permitió contextualizar los resultados obtenidos en los ensayos de pull-out.

El curado de todas las probetas se realizó en cámara húmeda a 20 ± 2 °C y con una humedad relativa superior al 95 %, desde las 24 horas posteriores al moldeo hasta la fecha del ensayo, fijada en 28 días. De este modo se aseguraba que el hormigón alcanzara un estado de madurez suficiente y representativo de condiciones de obra.



Ilustración 44 - Prensa hidráulica de laboratorio (INTMAC)

Para la ejecución de los ensayos se utilizó una prensa hidráulica de capacidad nominal superior a 600 kN, equipada con célula de carga calibrada y sistema de adquisición de datos informatizado. El montaje de cada probeta se realizó situándola centrada en la mesa de carga, cuidando que el eje de la barra coincidiera con el eje de aplicación de la fuerza, evitando excentricidades superiores a 1 mm o desalineaciones mayores de 1°. El extremo libre de la barra fue fijado en unas mordazas autocentrantes, con un apriete mínimo de cinco diámetros, y se colocó un transductor de desplazamiento lineal (LVDT) anclado en un marco rígido independiente de la prensa, para registrar

el deslizamiento relativo de la barra respecto al hormigón con una precisión de 0,01 mm. Previamente al inicio de cada ensayo se aplicó una precarga de aproximadamente 2 kN, con objeto de eliminar holguras mecánicas, y se puso a cero el sistema de adquisición de datos.

La aplicación de carga se llevó a cabo en régimen cuasi-estático, con un incremento progresivo de aproximadamente 0,2 kN/s, registrándose de manera continua tanto la fuerza transmitida por la prensa como el desplazamiento relativo de la barra. Durante el desarrollo del ensayo se realizó una observación visual sistemática de la probeta, con especial atención a la aparición de fisuración en la zona de salida de la barra, ruidos característicos de microfisuración o desprendimientos en la matriz de hormigón. El criterio de finalización fue alcanzar la rotura bien por tracción del acero, por desconchado del hormigón en la zona de anclaje o, en su defecto, detener el ensayo al superar la capacidad de seguridad del equipo o al detectarse condiciones anómalas.

Una vez alcanzada la rotura, se procedió a documentar fotográficamente la probeta, registrando el modo de fallo, la presencia de fisuras, estricción en el acero o la rotura del gancho. En el caso particular de las barras de 15 mm, debido a la existencia de mermas puntuales en la sección de acero, el ensayo fue detenido una vez superados los 60 kN, ya que se produjo rotura de la barra antes de que aparecieran daños relevantes en el hormigón. Este hecho resulta especialmente significativo porque pone de manifiesto que, en estos casos, la capacidad resistente del sistema estuvo condicionada por el acero y no por el material de anclaje.

Muestra nº	Diámetro (mm)	Carga de rotura (kN)
1	14	56,81
2	14	57,84
3	15	$\geq 60^{(1)}$
4	15	$\geq 60^{(1)}$

⁽¹⁾ Debido a que las barras de acero presentaban mermas puntuales de sección, se produjo la rotura de dichas barras antes que la del bloque de hormigón.

Tabla 3 - Resumen de los resultados (INTEMAC)

Tal como se observa en la tabla, en las muestras 1 y 2 (barras de diámetro 14 mm) se alcanzaron valores máximos de 56,81 kN y 57,84 kN respectivamente, muy superiores a la carga de referencia estimada inicialmente en torno a 25 kN. En el caso de las barras 3 y 4 se decidió parar el ensayo

debido a que las barras de acero comenzaron a presentar mermas puntuales en la sección las cuales produjeron la rotura de dichas barras antes de producirse la rotura del bloque de hormigón.

En la muestra 1 la rotura se produjo por la apertura del ángulo de 90° del gancho, lo que derivó en una fisuración localizada en la zona de contacto con el hormigón y, finalmente, en el arrancamiento parcial de la matriz. La Ilustración 46 recoge este fenómeno, donde puede apreciarse la deformación del acero en el extremo de anclaje y el desprendimiento del hormigón adyacente. Este tipo de rotura confirma que, en barras lisas, el gancho adquiere un papel fundamental como único mecanismo de retención frente al deslizamiento.

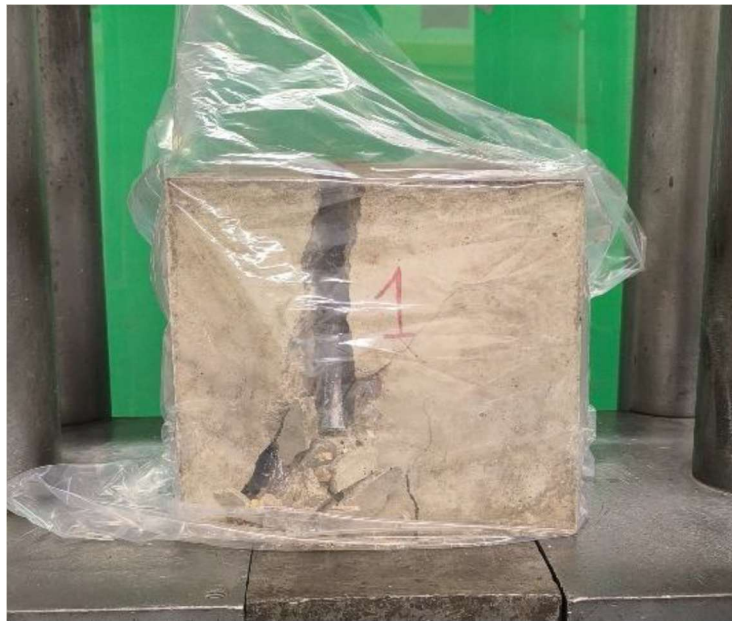


Ilustración 45 - Aspecto general del bloque de hormigón 1 tras ensayo (INTEMAC)



Ilustración 46 - Aspecto interior del bloque de hormigón 1 tras ensayo (INTEMAC)

En el caso de la muestra 2, el comportamiento fue similar en cuanto a nivel de carga, aunque con una diferencia significativa: el ensayo finalizó con el gancho en condiciones prácticamente intactas, sin apertura excesiva ni pérdida de su geometría original. Aquí, la rotura se concentró en el hormigón circundante al gancho, que cedió antes de que el acero alcanzase su límite elástico. La Ilustración 47 muestra este modo de fallo, caracterizado por un cono de rotura en el hormigón y un gancho que conserva su ángulo inicial.



Ilustración 47 - Aspecto general del bloque de hormigón 2 tras ensayo (INTEMAC)

Este resultado resulta particularmente interesante, ya que pone de manifiesto la variabilidad en el comportamiento de barras aparentemente equivalentes, lo cual refuerza la necesidad de contar con un número representativo de ensayos para extraer conclusiones de carácter general.



Ilustración 48 - Aspecto interior del bloque de hormigón 2 tras ensayo (INTEMAC)

En las muestras 3 y 4 (barras de diámetro 15 mm), el comportamiento observado fue todavía más llamativo. En ambos casos se alcanzaron cargas superiores a 60 kN, hasta el punto de que se decidió dar por finalizado el ensayo sin llegar a provocar la rotura completa de la probeta. El motivo de esta decisión fue evitar la rotura frágil del acero, ya que las barras presentaban mermas puntuales de sección y existía un riesgo real de que el fallo se produjera por tracción del acero en lugar de por pérdida de adherencia o fallo del hormigón. Como puede verse en las Ilustraciones 50 y 52, tanto el hormigón como el gancho se mantuvieron en perfecto estado estructural, sin signos significativos de fisuración ni desconchados. Estos resultados confirman que, al menos para los diámetros analizados, el gancho ofrece una capacidad de anclaje que supera holgadamente la resistencia prevista del hormigón, hasta el punto de que el límite último lo impone el propio acero.

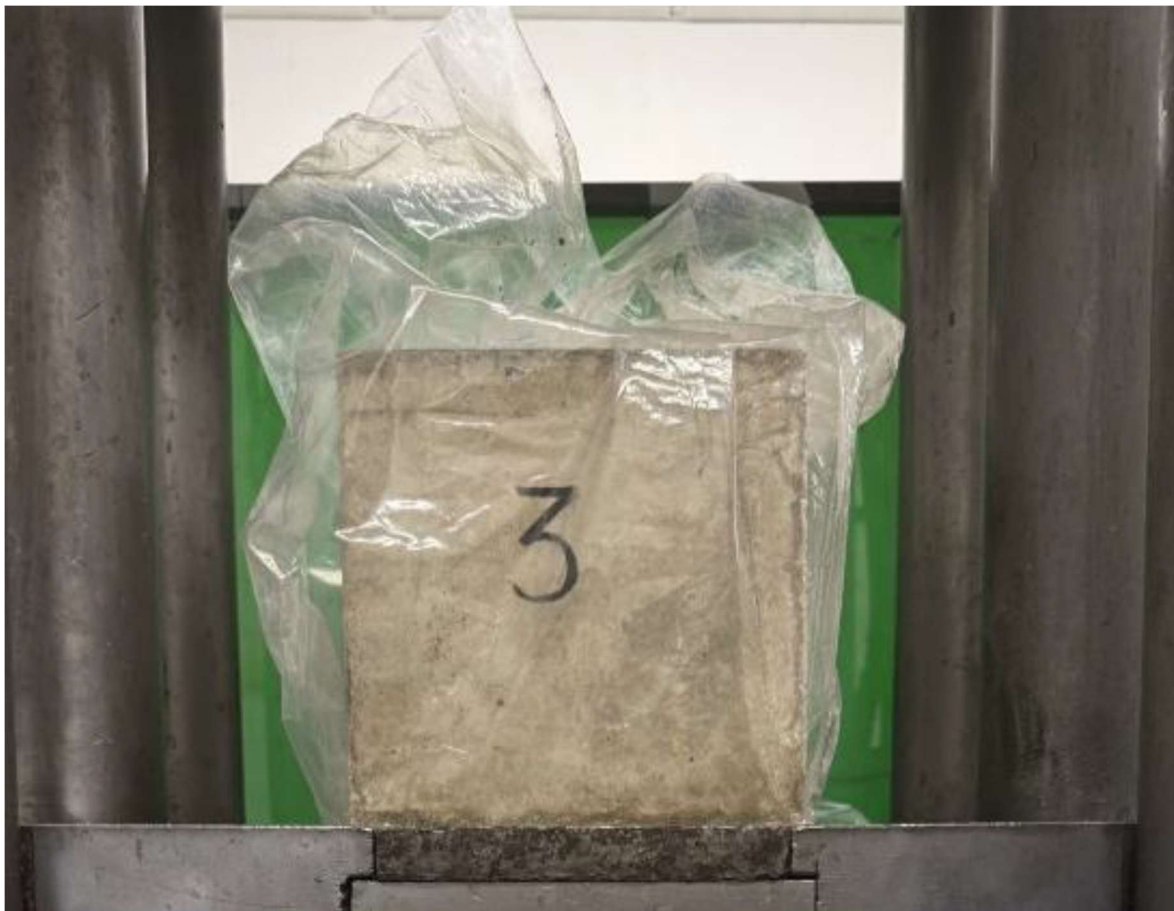


Ilustración 49- Aspecto general del bloque de hormigón 3 tras ensayo (INTEMAC)



Ilustración 50 - Aspecto interior del bloque de hormigón 3 tras ensayo (INTEMAC)

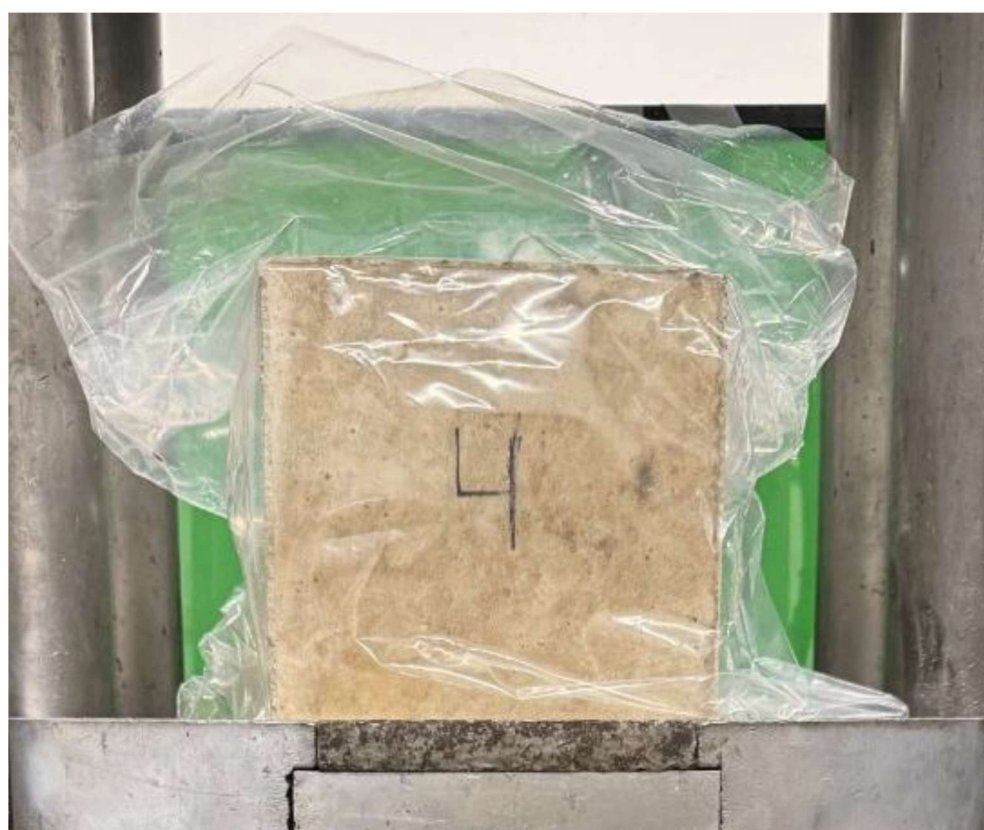


Ilustración 51 - Aspecto general del bloque de hormigón 4 tras ensayo (INTEMAC)



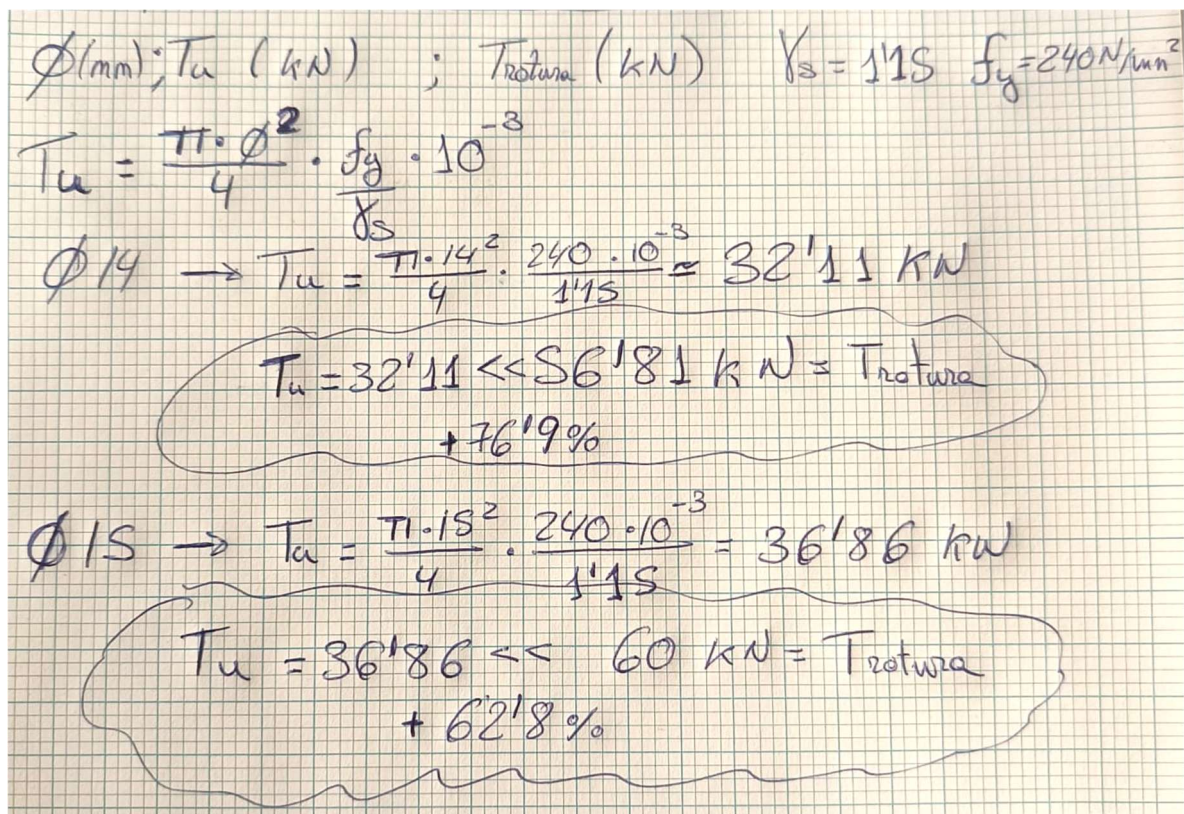
Ilustración 52 - Aspecto interior del bloque de hormigón 4 tras ensayo (INTEMAC)

En conjunto, el análisis de las imágenes y de la tabla de resultados permite establecer una primera conclusión relevante: la resistencia medida en los ensayos fue sistemáticamente muy superior a la prevista teóricamente para el límite elástico asignable a estos aceros, lo que implica que los modelos de cálculo normativos pueden estar ofreciendo valores de diseño excesivamente conservadores cuando se trata de barras lisas con gancho ya que éste, en el Estado Límite Último, garantizaría por sí solo, sin longitud recta adicional, la capacidad de la barra. Además, el contraste entre los diferentes modos de fallo observados (apertura del gancho, rotura localizada del hormigón y finalización por seguridad antes de rotura) aporta una visión amplia sobre los posibles mecanismos de comportamiento de este tipo de anclajes.

7. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

7.1. PROPUESTA DE FORMULACIÓN

A partir de los resultados experimentales obtenidos y del análisis comparativo entre la **tensión de rotura alcanzada en los ensayos** y la **tensión útil de las barras**, se plantean una serie de consideraciones que permiten formular propuestas preliminares para la interpretación normativa del comportamiento de las armaduras lisas con anclaje mediante gancho.



$\phi(\text{mm}); T_u (\text{kN}) ; T_{\text{rotura}} (\text{kN}) \quad \gamma_s = 1.15 \quad f_y = 240 \text{ N/mm}^2$
 $T_u = \frac{\pi \cdot \phi^2}{4} \cdot \frac{f_y}{\gamma_s} \cdot 10^{-3}$
 $\phi 14 \rightarrow T_u = \frac{\pi \cdot 14^2}{4} \cdot \frac{240 \cdot 10^{-3}}{1.15} = 32'11 \text{ kN}$
 $T_u = 32'11 < 56'81 \text{ kN} = T_{\text{rotura}}$
 $+76'9\%$
 $\phi 15 \rightarrow T_u = \frac{\pi \cdot 15^2}{4} \cdot \frac{240 \cdot 10^{-3}}{1.15} = 36'86 \text{ kN}$
 $T_u = 36'86 < 60 \text{ kN} = T_{\text{rotura}}$
 $+62'8\%$

Ilustración 53 - Interpretación de los resultados (contribución propia)

En la **Ilustración 53** se presenta la síntesis de la interpretación gráfica de los resultados, donde puede observarse que los valores de tensión de rotura superan con holgura los de la tensión útil de las barras ensayadas. Por ejemplo, en las barras de diámetro 14 mm se alcanzaron valores superiores al 75 % de la resistencia útil, y en el caso de las de diámetro 15 mm, valores superiores al 60 %. A partir de estos resultados, se formulan tres puntos clave:

1. Anclaje pleno mediante el gancho en estado límite último (ELU).

Los ensayos permiten concluir que, en el ELU, el gancho es capaz de desarrollar la totalidad de la capacidad resistente asignable a la barra sin necesidad de recurrir a la adherencia

asociada a la prolongación recta. Esto implica que, a efectos de cálculo, en ELU, no sería preciso contemplar longitudes adicionales de anclaje o de solape. En vista de los resultados obtenidos de los ensayos, llegamos a la conclusión que los incrementos de las longitudes de anclaje que supondrá la aplicación del nuevo Eurocódigo EC-2 (Autor institucional, 2026) no están justificados.

Además, la experiencia histórica refuerza esta visión: no existen siniestros ni patologías significativas en España atribuibles específicamente al empleo de armaduras lisas con anclaje por gancho, a pesar de la amplia extensión de esta tipología en miles de estructuras ejecutadas a lo largo del siglo XX. Esta evidencia empírica otorga un respaldo adicional a la propuesta de formulación aquí presentada.

2. Fisuración no condicionante en estado límite último.

La adopción de esta hipótesis podría conllevar un incremento de la fisuración en el ELU; sin embargo, este aspecto no resulta limitante para el dimensionamiento, puesto que la fisuración se evalúa en el **estado límite de servicio (ELS)**. En consecuencia, el posible aumento de fisuración no tendría repercusiones en los cálculos de seguridad estructural asociados al ELU, quedando circunscrito únicamente al comportamiento en servicio.

3. Validez del planteamiento en estructuras en servicio.

El análisis debe enmarcarse en el contexto de estructuras que ya se encuentran en servicio, muchas de ellas desde hace varias décadas. En estos casos, la evaluación del estado estructural puede realizarse mediante **inspecciones si no hay cambios de uso, pruebas de carga en servicio o análisis de cambio de uso**, que permiten conocer de forma directa la respuesta real de la estructura.

7.2. SOSTENIBILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación no solo aporta hallazgos técnicos relevantes, sino que encaja en un enfoque de **sostenibilidad estructural, económica y ambiental** que cada vez cobra mayor importancia en ingeniería. A continuación, se describen los principales argumentos que demuestran cómo este trabajo tiene un impacto positivo desde la vertiente de la sostenibilidad, así como los problemas actuales normativos que impiden aprovechar plenamente este potencial.

Rehabilitación frente a demolición: ahorro económico y ambiental

La rehabilitación de estructuras existentes, especialmente aquellas ejecutadas con armaduras lisas, no solo evita los costes directos derivados de la demolición, la gestión de escombros y la fabricación de nuevos materiales, sino que también permite optimizar el proceso de intervención. Cada tonelada de hormigón demolido implica gastos de transporte, vertido y tratamiento, además de un considerable impacto ambiental en términos de emisiones de CO₂. Frente a ello, la reutilización de la estructura existente supone una notable reducción en la generación de residuos y en la huella ecológica del proyecto.

Adicionalmente, los resultados de la investigación muestran que, al aplicar criterios específicos para este tipo de armaduras, las necesidades de refuerzo se minimizan. Esto implica que no solo se ahorra al evitar la demolición, sino también durante la propia fase de rehabilitación, reduciéndose el consumo de acero y hormigón suplementario. De este modo, se alcanzan soluciones más sostenibles y eficientes, con un menor gasto económico y una reducción de los impactos derivados de la producción de materiales, como el cemento, responsable de entre un 5 % y un 8 % de las emisiones globales de CO₂.

En conjunto, la rehabilitación con un planteamiento adaptado a las particularidades de las barras lisas permite una doble optimización: preservar el valor estructural ya existente y minimizar el uso de recursos adicionales, reforzando así la viabilidad tanto técnica como ambiental de este enfoque frente a la aplicación directa de formulaciones estándar, como las previstas en el futuro Eurocódigo EC2.

Problemática normativa como barrera para la sostenibilidad

Las normativas actuales —y muy especialmente los Eurocódigos en revisión— no contemplan parámetros que faciliten cálculos fiables para estructuras existentes con barras lisas. Eso obliga a diseñar refuerzos, incrementar secciones, espesores de vigas o recubrimientos mayores, lo que incrementa costes materiales, tiempo de obra y emisiones.

Esta tendencia hacia criterios excesivamente conservadores, aunque garantiza seguridad, **no tiene en muchos casos evidencia experimental que justifique ciertos coeficientes de seguridad tan elevados**, especialmente en estructuras que han demostrado buen comportamiento por décadas.

Impacto ambiental del hormigón

La rehabilitación de estructuras existentes, especialmente aquellas ejecutadas con armaduras lisas, ofrece una alternativa más eficiente y sostenible que la demolición. Evita los costes asociados a la gestión de escombros, transporte y vertido, así como la necesidad de producir grandes volúmenes

de nuevos materiales. Cada tonelada de hormigón demolido supone emisiones adicionales de CO₂ y la pérdida de carbono ya “embebido” en la estructura. En cambio, conservar y prolongar la vida útil de los materiales existentes reduce la huella ecológica y maximiza el aprovechamiento de los recursos.

El hormigón estructural promedio genera entre 200 y 500 kg de CO₂ por m³, dependiendo de su composición, transporte y proceso de producción. Una parte significativa de estas emisiones proviene de la fabricación del cemento, tanto por la quema de combustibles fósiles para alcanzar temperaturas de horno del orden de 1.400-1.500 °C, como por la descarbonatación química del carbonato cálcico. Reducir la demanda de nuevo hormigón implica, por tanto, un ahorro directo en emisiones globales.

Más allá de la dicotomía entre rehabilitación y demolición, los resultados de la investigación muestran que la aplicación de formulaciones específicas para armaduras lisas permite minimizar las necesidades de refuerzo. Esto es especialmente relevante en construcciones históricas, donde, de aplicarse las longitudes de anclaje previstas en el futuro Eurocódigo II, sería necesario reforzar un porcentaje muy elevado de elementos estructurales. Evitar estos refuerzos innecesarios no solo reduce el coste económico y la complejidad de la intervención, sino también el consumo de acero y hormigón suplementario, materiales cuya producción implica un elevado impacto ambiental.

De este modo, la rehabilitación apoyada en criterios técnicos ajustados a las condiciones reales de adherencia ofrece una doble ventaja: preserva el valor estructural existente y reduce al mínimo tanto los residuos como la necesidad de recursos adicionales, contribuyendo a una estrategia de conservación más económica, sostenible y compatible con el patrimonio construido.

Sostenibilidad económica y social

La rehabilitación suele implicar menores costes globales para propietarios y comunidades. Menos materiales, menos residuos, menos permisos y trámites, menor tiempo de ejecución, reducción de molestias a usuarios y al entorno.

Además, la preservación de elementos estructurales existentes contribuye a mantener el patrimonio edificio, el valor cultural, la identidad urbana, con beneficios sociales difíciles de cuantificar, pero muy reales.

Propuesta de integración sostenible para futuras normativas

A partir de los resultados experimentales de este trabajo, se propone que nuevas normativas:

Reconozcan y validen formalmente el uso de barras lisas con ganchos como mecanismo de anclaje eficiente, siempre que se cumplan ciertas condiciones verificables (ensayo pull-out, recubrimientos mínimos, diámetro, etc.).

Ajusten los coeficientes de seguridad con base experimental, de modo que no penalicen innecesariamente las intervenciones de rehabilitación.

Incluyan criterios de evaluación del ciclo de vida estructural, no solamente cálculo de resistencia, para valorar el coste ambiental de las intervenciones (material, CO₂, emisiones, residuos).

Faciliten la rehabilitación aplicable para obra existente, con procedimientos documentados, reconocimiento de soluciones históricas, para evitar que muchas estructuras funcionales se queden “obsoletas” normativamente sin necesidad.



Ilustración 54 - Menos es más (elaboración propia)

En resumen, este proyecto demuestra que **con un enfoque experimental adecuado** se puede avalar la rehabilitación de estructuras con armaduras lisas como una alternativa viable, tanto técnica como sostenible, frente a la construcción nueva o al refuerzo innecesario sin quedar tan fuertemente penalizadas las condiciones de anclaje como quedarán con las futuras exigencias de la nueva versión del Eurocódigo. Normativas excesivamente conservadoras no sólo elevan costes, sino que pueden provocar impactos ambientales que podrían evitarse, comprometiendo la sostenibilidad que hoy demanda toda intervención en edificación.

8. CONCLUSIONES

El análisis de la normativa española, desde la EH-39 hasta la EHE-08, muestra una transición progresiva: de criterios empíricos con longitudes de anclaje moderadas y barras lisas como material habitual, hacia normas modernas que consolidan el uso exclusivo de armaduras corrugadas. En este recorrido, las longitudes de anclaje exigidas se fueron incrementando gradualmente, aunque siempre dentro de márgenes constructivamente viables.

La actualización del Eurocódigo 2 prevista para 2026 plantea un cambio significativo: las longitudes de anclaje aumentan notablemente respecto a las históricas, llegando en muchos casos a duplicarlas. Estos valores resultan difíciles de aplicar en estructuras existentes y carecen de respaldo en la experiencia práctica, pues no se han registrado patologías graves ni siniestros atribuibles al uso de las longitudes de anclaje de las barras lisas empleadas durante décadas.

En este sentido, la brecha entre las exigencias normativas actuales y el comportamiento demostrado históricamente refuerza la necesidad de investigaciones experimentales específicas que permitan ajustar los criterios de diseño y rehabilitación a las condiciones reales de las estructuras con armaduras lisas.

8.1. Conclusiones experimentales

La campaña experimental mediante ensayos de tipo *pull-out* constituye el núcleo fundamental de este trabajo y ha permitido evaluar de manera directa el comportamiento de barras lisas con gancho frente a esfuerzos de adherencia en hormigón. Los resultados obtenidos aportan información de gran valor técnico y contrastan claramente con la visión conservadora reflejada en las normativas actuales.

Se realizaron cuatro ensayos con barras lisas de 14 y 15 mm de diámetro, todas con un gancho de 180° en el extremo. Las probetas, de 200 × 200 × 200 mm, fueron fabricadas en condiciones controladas en laboratorio, reproduciendo la configuración típica de anclaje de estructuras históricas en las que el gancho constituía el único recurso de transferencia de esfuerzos.

Los resultados superaron ampliamente las expectativas. Mientras que la carga teórica de referencia al ELU se situaba en torno a 32-36 kN, asociada a la resistencia característica del hormigón, los valores alcanzados oscilaron entre 56,81 kN y más de 60 kN, duplicando o incluso triplicando la previsión. Este margen confirma que, aun considerando nula la adherencia en el fuste de la barra, el gancho por sí solo es capaz de garantizar la transmisión de esfuerzos necesaria en ELU.

De estos resultados se desprenden varias conclusiones clave:

- **En Estado Límite Último**, para la capacidad asignable a las barras con su límite elástico, el gancho garantiza el anclaje.
- **Capacidad resistente muy superior**: Los valores de capacidad de anclaje sólo del gancho, sin contar con adherencia alguna de prolongación recta, en los ensayos realizados, son muy superiores a las capacidades asignables a las barras de acuerdo con el límite elástico de referencia los tipos de acero utilizados.

En definitiva, la investigación demuestra que la disposición de ganchos en barras lisas garantiza un comportamiento estructural plenamente satisfactorio como anclaje de la armadura en ELU, incluso en condiciones en las que las normas actuales descartarían su empleo. Esto supone un aporte relevante para la rehabilitación de estructuras históricas, donde este tipo de armaduras sigue presente.

Por otro lado, hay que mencionar que la fisuración es un Estado Límite de Servicio que no un ELU por lo que para chequear una estructura se realizará una inspección, sin cálculos, si no hay ningún cambio de cargas, viendo si hay fisuras con abertura excesiva., o bien con una prueba de carga con cargas no mayoradas si se contempla un incremento de cargas bien por el uso de la estructura como por un incremento de las cargas por cualquier otro factor.

En resumen, los resultados evidencian que las formulaciones del nuevo Eurocódigo EC2 son excesivamente conservadoras. Su aplicación estricta conduce a sobrecostos en refuerzos que, a la luz de la evidencia experimental, carecen de justificación técnica. El sobredimensionamiento obedece a coeficientes de seguridad muy elevados que, en este caso, se demuestra que no responden a una necesidad real, comprometiendo la eficiencia económica y la coherencia técnica de las intervenciones.

9. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Aunque los resultados obtenidos en la presente investigación han sido muy satisfactorios y han demostrado la validez de los ganchos en barras lisas como mecanismo eficaz de anclaje, es necesario dar continuidad al trabajo mediante nuevas campañas experimentales que permitan ampliar el rango de parámetros analizados y consolidar la base técnica alcanzada.

Una primera línea de investigación debería centrarse en el efecto que tiene la resistencia del (Autor institucional, 2026)hormigón en la capacidad de anclaje. En este estudio se ha trabajado con un hormigón de resistencia media, pero sería de gran interés realizar ensayos con hormigones de menor resistencia (del orden de 12 MPa y 18MPa). Ello permitiría determinar si los ganchos mantienen su eficacia en condiciones menos. Junto a este factor, sería igualmente conveniente ampliar el análisis a distintos diámetros de armadura.

Una segunda línea de investigación debería abordar la respuesta de barras lisas de diámetros más grandes, como los de 32 mm o 40 mm. Estos diámetros, menos frecuentes pero presentes en determinadas obras singulares de mediados del siglo XX, plantean interrogantes específicos en cuanto a la capacidad de anclaje y podrían comportarse de manera diferente respecto a las barras de diámetros más reducidos que han sido objeto de la campaña experimental actual.

Es necesario contemplar la influencia del recubrimiento lateral del gancho. Es preciso realizar nuevos ensayos en diferentes situaciones en cuanto a dicho recubrimiento, que puede afectar a los resultados y eventualmente exigir alguna consideración a barras con recubrimientos laterales reducidos.

Finalmente, resultaría especialmente relevante analizar la influencia de la disposición relativa de varias barras lisas en paralelo. La proximidad entre armaduras puede modificar la transmisión de esfuerzos y la fisuración del hormigón en la zona de anclaje, de manera que disponer dos o más barras juntas podría alterar los resultados respecto a los obtenidos con una única barra aislada. Este aspecto es crucial de cara a la aplicación práctica en elementos de obra real, donde las armaduras rara vez trabajan de forma individual.

En conjunto, estas líneas de investigación permitirán avanzar en la comprensión del comportamiento del anclaje de las armaduras de acero liso en estructuras existentes y ofrecerán una base experimental más amplia para su evaluación y posible refuerzo dentro del marco normativo actual.

ANEXO I. INFORME ORIGINAL DE LABORATORIO DE LOS ENSAYOS REALIZADOS

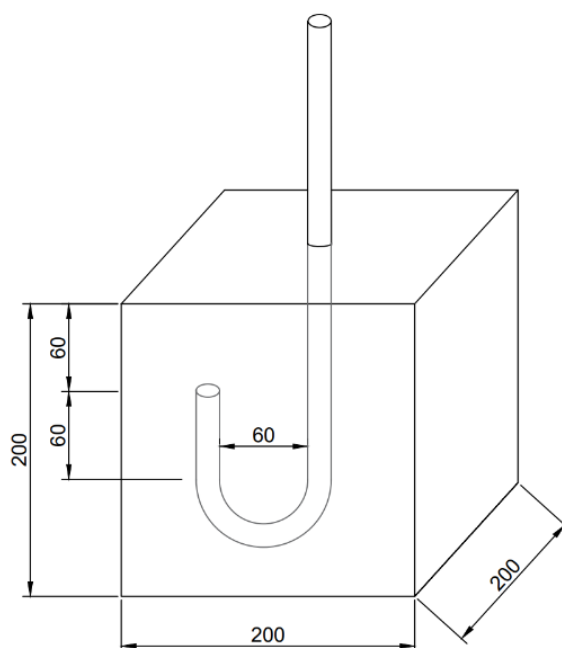
Resultados de los ensayos de “pull-out”

Tabla 1. Resumen de resultados

Muestra nº	Diámetro (mm)	Carga de rotura (kN)
1	14	56,81
2	14	57,84
3	15	≥ 60 ⁽¹⁾
4	15	≥ 60 ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Debido a que las barras de acero presentaban mermas puntuales de sección, se produjo la rotura de dichas barras antes que la del bloque de hormigón.

Croquis del bloque de hormigón con la barra de acero embebida



Fotografía 1. Esquema dimensional del modelo. Las cotas están expresadas en milímetros.

Fotografías de las muestras tras ensayo



Fotografía 2. Aspecto general del bloque de hormigón 1 tras ensayo



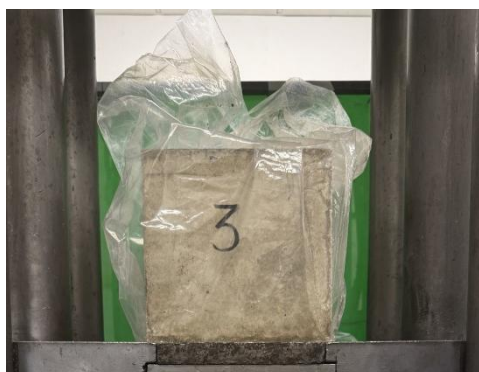
Fotografía 3. Aspecto interior del bloque de hormigón 1 tras ensayo



Fotografía 4. Aspecto general del bloque de hormigón 2 tras ensayo



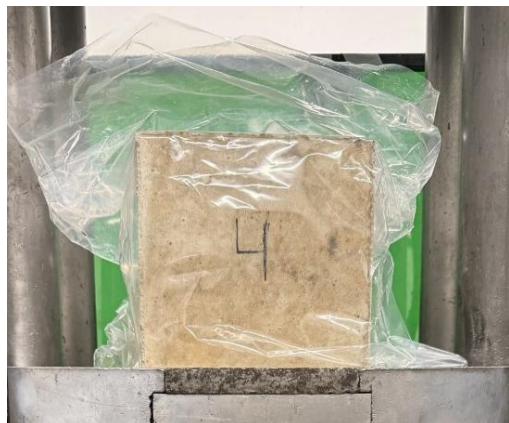
Fotografía 5. Aspecto interior del bloque de hormigón 2 tras ensayo



Fotografía 6. Aspecto general del bloque de hormigón 3 tras ensayo



Fotografía 7. Aspecto interior del bloque de hormigón 3 tras ensayo



Fotografía 8. Aspecto general del bloque de hormigón 4 tras ensayo



Fotografía 9. Aspecto interior del bloque de hormigón 4 tras ensayo

BIBLIOGRAFÍA

- AENOR. 2006.** UNE-EN 10080:2006. *Acero para el armado del hormigón. Acero soldable para armaduras de hormigón armado. Generalidades.* Madrid : AENOR, 12 de Abril de 2006.
- . **2010.** UNE-EN 12390-6:2010. *Ensayos para hormigón endurecido. Parte 6: Resistencia a tracción indirecta en probetas cilíndricas.* Madrid : Asociación Española de Normalización (AENOR), 2010.
- American Concrete Institute. 2019.** ACI 318-19. *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary.* Farmington Hills : ISBN 978-1-64195-073-2, 2019.
- Arteta, Carlos. 2007.** Ensayo flexión viga concreto reforzado. [En línea] 10 de Enero de 2007. www.youtube.com/@thecat0000.
- Asociación Española de Normalización. 2009.** UNE-EN 12390-6:2009. *Ensayo de resistencia a tracción indirecta.* Madrid : s.n., 2009.
- ASTM International. 2017.** ASTM C496/C496M-17. *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens.* s.l. : West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.
- Autor institucional. 2026.** Eurocódigo 2 (versión prevista 2026). *En la futura parte del Eurocódigo 2 para estructuras de hormigón, propuesta para 2026.* 2026.
- British Standards Institution. 1985.** BS 8110:1985. *Structural use of concrete.* Londres : s.n., 1985.
- Comisión Nacional de Normalización de Obras de Construcción (méxico). 2004.** NTC 4024. *Determinación de la resistencia a la tracción indirecta del concreto hidráulico mediante el método de carga diametral (ensayo brasileño).* México D.F. : ONNCCE, 2004.
- Comité Euro-International du Béton. 1985.** CEB-FIP Model Code. Paris : s.n., 1985.
- Comité Europeo de Normalización (CEN). 2004 .** EN 1992-1-1:2004. *Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón.* Bruselas : s.n., 2004 .
- Deutsches Institut für Normung. 1972.** DIN 1045:1972. *Beton- und Stahlbetonbau.* Berlín : s.n., 1972.
- E & FN Spon. 1982.** RILEM/CEB. *Recommendations for the testing and use of constructions materials.* Londres : s.n., 1982.

Efecto de la Incorporación de Pequeñas Dosis de Emulsión Asfáltica en el Comportamiento de Estabilizaciones de Suelo con Cemento Portland. **Hillar, Pablo. 2020.** 2020.

Efecto del tamaño de la probeta y condiciones de carga en el ensayo de tracción indirecta. **Carmona, Sergio. 2009.** 2009.

Eligehausen, R. 1983. Bond in Concrete. London : s.n., 1983.

2008. Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08). Madrid : Ministerio de Fomento, 2008.

1998. Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-98). Madrid : Ministerio de Fomento, 1998.

1961. Instrucción para el Proyecto y Ejecución de Obras de Hormigón Armado (EH-61). Madrid : Ministerio de Obras Públicas, 1961.

1968. Instrucción para el Proyecto y Ejecución de Obras de Hormigón Armado (EH-68). Madrid : Ministerio de Obras Públicas, 1968.

1973. Instrucción para el Proyecto y Ejecución de Obras de Hormigón Armado (EH-73). Madrid : Ministerio de Obras Públicas, 1973.

1980. Instrucción para el Proyecto y Ejecución de Obras de Hormigón Armado (EH-80). Madrid : Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, 1980.

1982. Instrucción para el Proyecto y Ejecución de Obras de Hormigón Armado (EH-82). Madrid : Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, 1982.

1988. Instrucción para el Proyecto y Ejecución de Obras de Hormigón Armado (EH-88). Madrid : Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, 1988.

1939. Instrucción para el Proyecto y Ejecución de Obras de Hormigón en Masa o Armado (EH-39). Madrid : Ministerio de Obras Públicas, 1939.

LEONHARDT, F. 1973. *Construcción de hormigón armado.* Barcelona : Gustavo Gili, 1973.

2025. Magna Aceros. *Magna Aceros.* [En línea] Magna Aceros, 2025. <https://magnaaceros.com/barra-redonda/>.

Ministerio de Fomento. 2008. Instrucción de Hormigón Estructural. *EHE-08.* España : BOE, 2008.

Ministerio de Obras Públicas y Transportes. 1991. Instrucción para el Proyecto y Ejecución de Obras de Hormigón Armado (EH-91). Madrid : MOPT, 1991.

Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. 2021. Código Estructural. Madrid : BOE, 2021.

Modelación y simulación del ensayo de tracción indirecta o ensayo Brasileño, empleando el Método de los Elementos Distintos (MED). **Morfa, Carlos A. Recarey.**

Mönnig, H.O. 1973. *Juntas y solapes en estructuras de hormigón.* Berlín : Springer, 1973.

PRONTUBEAM. *PRONTUBEAM.* [En línea] prontubeam.com.

Resistencia a flexión y porosidad de la tiza. **Martín-Meizoso, Antonio. 2004.** Navarra : Universidad de Navarra, 2004.

Ruiz, José Calavera. 2008. *Proyecto y Cálculo de Estructuras de Hormigón.* Madrid : INTEMAC, 2008.

Tenacidad a la fractura de cementos de uso petrolero. **Pablo Cirimello, Walter Morris y Juan E. Pérez Ipiña.**

Tepfers, R. 1979. *Bond and anchorage of reinforced concrete under cyclic loads.* París : RILEM, 1979.

UPC. Ensayo de tracción indirecta. Cartagena : s.n. Vol. Capítulo 3.

UPM. 2015. Ensayos de flexión en vigas. Madrid : s.n., 2015.