



UCAM

UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE MURCIA

TESIS DOCTORAL

ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO

*Programa de Doctorado Tecnologías de la Computación e
Ingeniería Ambiental*

**Conexión de micropilotes con estructuras existentes de
hormigón**

Autor:

D. Vicente Salvador Martínez Lirón

Directores:

Dr. D. Francisco Pellicer Martínez

Dr. D. Alejandro Mateo Hernández Díaz

Murcia, septiembre de 2023



UCAM

UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE MURCIA

TESIS DOCTORAL

ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO

*Programa de Doctorado Tecnologías de la Computación e
Ingeniería Ambiental*

Conexión de micropilotes con estructuras existentes de
hormigón

Autor:

D. Vicente Salvador Martínez Lirón

Directores:

Dr. D. Francisco Pellicer Martínez

Dr. D. Alejandro Mateo Hernández Díaz

Murcia, septiembre de 2023

AUTORIZACIÓN DEL DIRECTOR DE LA TESIS PARA SU PRESENTACIÓN

El Dr. D. Francisco Pellicer Martínez y el Dr. D. Alejandro Mateo Hernández Díaz como Directores de la Tesis Doctoral titulada “Conexión de micropilotes con estructuras existentes de hormigón” realizada por D. Vicente Salvador Martínez Lirón en el Programa de Doctorado Tecnologías de la Computación e Ingeniería Ambiental, **autoriza su presentación a trámite** dado que reúne las condiciones necesarias para su defensa.

Lo que firmo, para dar cumplimiento al Real Decreto 99/2011 de 28 de enero, en Murcia a 18 de septiembre de 2023.



RESUMEN

Los micropilotes son pilotes de pequeño diámetro que se construyen mediante la introducción de una armadura cilíndrica en una perforación del terreno y la posterior inyección de lechada de cemento que termina rellenando y recubriendo dicha armadura. Su uso para el recalce de cimentaciones de hormigón es, actualmente, la técnica más utilizada y extendida, y se materializa conectando varios micropilotes a una cimentación superficial. La manera habitual de realizar la unión de los micropilotes con la cimentación superficial es mediante la conexión directa, en la que los micropilotes se ejecutan perforando el suelo por rotación sobre la propia cimentación. De esta forma, la conexión directa micropilote-cimentación se genera por el contacto entre materiales hormigonados en distintas fases. En concreto, por el contacto entre el hormigón de la cimentación y la lechada del micropilote en la superficie cilíndrica de perforación.

El diseño de los recalces requiere la verificación de varias comprobaciones geotécnicas y estructurales que aseguren la correcta transmisión de cargas estructura-terreno. Entre ellas, la comprobación de la conexión directa es la más limitante, ya que los últimos cambios normativos han reducido a la mitad la resistencia en la interfaz lechada-hormigón, denominada como tensión de adherencia. Anteriormente, esta tensión de adherencia se calculaba con la formulación de resistencia a cortante del hormigón, mientras que ahora se equipara a la tensión rasante en juntas de hormigones. Este cambio, parece adecuado cualitativamente al ser la resistencia por el contacto de dos materiales hormigonados en dos fases, tal y como ocurre realmente, pero no estaría avalado cuantitativamente por los resultados experimentales ya publicados. Dichos resultados muestran que la tensión de adherencia real es muy superior a los valores teóricos que arrojarían las fórmulas de tensión rasante en juntas de hormigonado.

La consecuencia directa de este cambio normativo es que, en muchos casos, para un mismo nivel de cargas, ahora es necesario construir más micropilotes con el único fin de repartir las cargas entre un mayor número de perforaciones, y reducir así la carga que recibe cada conexión. Por lo que, por un lado, este cambio normativo ha incrementado el empleo de materiales de construcción con elevado

coste económico e impacto ambiental. Y, por otro lado, el incremento de excavación resultante supone un mayor volumen de materiales de desecho a llevar a vertedero.

Dada esta situación, el objetivo principal de la presente tesis doctoral es el diseño de un nuevo sistema de conexión directa que aumente la resistencia respecto a la conexión directa convencional. El nuevo sistema consiste en construir un sobre-ancho con la lechada del micropilote cuya función es generar un tope en la conexión que evite el deslizamiento relativo del micropilote por la perforación de la cimentación. Dada la forma que adquiere el nuevo sistema de conexión, se ha denominado conexión directa con sombrero. Así, este diseño cambia la resistencia por contacto actual a un modelo de resistencia por punzonamiento, en el que se emplearía la resistencia por cortante anterior, que incrementaría la resistencia de la conexión directa. De este modo, la comprobación asociada a la conexión dejaría de ser limitante, volviendo a los diseños previos de recalces con menor coste económico y menor generación de volumen de residuos, lo que reduciría a su vez el impacto de este tipo de estructuras sobre el medio ambiente.

Para cumplir este objetivo se estudia la conexión directa desde tres perspectivas diferentes. La primera es el estudio de la repercusión económica del cambio normativo. La segunda es la caracterización de la conexión directa convencional y del nuevo sistema de conexión mediante experimentación en laboratorio. La tercera es la simulación numérica mediante el método de elementos finitos de la conexión directa convencional y con sombrero.

La perspectiva económica se aborda calculando los presupuestos de 29 obras ya ejecutadas con la normativa vigente, cuyos resultados se comparan con los presupuestos que se obtienen al emplear las fórmulas aplicadas en las últimas décadas. Este análisis determinístico se ha completado con otro probabilístico mediante una simulación Monte Carlo.

La experimentación en laboratorio se ha desarrollado a partir de un Diseño de Experimentos en el que el factor principal es el tipo de conexión directa: convencional o con sombrero. Asimismo, también se han incluido otros factores que se prevé controlan la resistencia de la conexión, como son el diámetro de perforación, o la resistencia del hormigón de la cimentación. El Diseño de Experimentos se compone de 40 probetas a escala real ensayadas a compresión,

cuyo diseño final se ha definido gracias al ensayo previo de 8 probetas a escala reducida.

Por último, la simulación numérica proporciona una valiosa información sobre el estado tensional que se genera en el micropilote, en la conexión y en la cimentación. De esta forma, es posible verificar los modos de fallo producidos en las diferentes probetas ensayadas, permitiendo establecer estrategias para evitar cada uno de estos modos de fallo.

Respecto a los resultados, el estudio económico indica que los cambios normativos han supuesto un incremento económico medio del 40% en los presupuestos de los proyectos de recalce que, en algunos casos, puede llegar al 60%. Asimismo, este estudio muestra que, a partir de tensiones de adherencia de 0,6 MPa no se producen ahorros significativos, y que no sería económicamente eficiente superar el valor umbral de 1,0 MPa.

Los resultados experimentales de la conexión directa muestran unos valores de tensión de adherencia dentro del rango 1,0-2,0 MPa, muy superiores a los valores teóricos que se desprenden de las formulaciones de las normativas que se vienen aplicando actualmente. Además, indican que el nuevo sistema de conexión es estadísticamente un 39% más resistente, por lo que su uso estaría justificado, incrementando sustancialmente el nivel de seguridad de la conexión. Además, su implementación representaría un sustancial ahorro económico y la reducción de impactos ambientales derivados de un menor uso de materiales de construcción y la reducción de residuos.

Por último, la simulación numérica de las probetas ensayadas a compresión con elementos finitos identifica claramente las zonas más tensionadas de las conexiones, al coincidir con aquellas en las que se producen los diferentes modos de fallo. Si bien no ha sido posible calibrar el modelo numérico con los resultados experimentales, éste sí que ha servido para advertir las tracciones que se generan en el bloque de hormigón de la probeta por efecto Poisson del micropilote en la conexión, que supondrían un riesgo de rotura monolítica y frágil de la cimentación. Por lo tanto, aunque los modelos utilizados no son capaces de predecir con exactitud los valores numéricos de los ensayos realizados, sí que son de gran ayuda para predecir cualitativamente el comportamiento tensional de ambos tipos de conexión.

ABSTRACT

Micropiles are little diameter piles which are built drilling the soil, introducing a cylindrical reinforcement, and injecting cement grout that ends filling and covering that reinforcement. Its use for the underpinning of the concrete foundations is today a wide-spread method. This technique is materialised by connecting several micropiles to a superficial foundation, and the bond with the foundation is usually made by direct connection, where the micropiles are executed drilling the soil by rotation over the foundation itself. This way, the direct connection is the bond by the contact between different materials in the drilling, specifically, by the contact in the grout-concrete interface.

The underpinning design requires accomplishing some geotechnical and structural verifications that ensures the correct load transmission from the structure to the soil. Between them, the direct connection verification is the limiting due to the bond strength at the grout-concrete interface have been reduced by half in the latest regulatory changes. Previously, this bond strength was calculated with the shear concrete strength formulation whereas now it is equated to the horizontal shear stress in concrete cast at different times. This change seems qualitatively suitable being the strength by the contact of two materials cast in two phases, but it would not be quantitatively guaranteed by the experimental results already published. These results show that the bond strength is much higher than the theoretical values for this horizontal shear stress.

The direct consequence of this regulatory change is that, in many cases, for the same loads, it is now necessary to build more micropiles with the sole purpose of distributing the loads among a greater number of drillings. Therefore, on the one hand, it has increased the use of construction materials with high

economic cost and environmental impact. And, on the other hand, the excavation increase emerges in a greater volume of waste materials to be taken to landfill.

Given this situation, the main goal of this doctoral dissertation is the design of a new direct connection system which increases the resistance compared to conventional direct connection. The new system is an extra-width in the micropile just before the connection. This extra-width is made with the own grout of the micropile. Its function is to generate a cap that prevents the relative sliding of the micropile across the drilling. Thus, the main resistance model is no longer by the contact of two cementitious materials. The resistance model is now by punching. So, the shear stress strength of the grout can be used, increasing the strength of the direct connection. The new connection model is called as direct connection with hat. If this new system was succeed, the direct connection verification would not be longer limiting, returning to the previous underpinnings designs with lower economic cost and lower generation of waste volume, which would reduce in turn the impact of this kind of structures on the environment.

To meet this objective, the direct connection is studied from three perspectives. The first one is the economic impact of the regulatory changes. The second one is the characterization of both the conventional direct connection and the new direct connection system through the lab experimentation. The third one is the numerical simulation, using the finite element method, of both direct connection systems: conventional and with hat.

The economic perspective is addressed by comparing the cost of 29 works already executed and calculated with the current regulations and those applied in recent decades. This deterministic analysis has been completed with another probabilistic analysis using a Monte Carlo simulation.

Lab experimentation has been developed from a Design of Experiments in which the main factor is the direct connection system: conventional or with hat. Likewise, other factors that are expected to control the strength of the connection have also been included, such as the drilling diameter or the strength of the foundation concrete. The Design of Experiments is made up of 40 life-size specimens tested in compression, whose final design has been defined thanks to the previous test of 8 reduced-scale specimens.

Finally, the numerical simulation provides valuable information about the stresses generated in the own micropile, in the connection, and in the foundation. This way, it is possible to verify the failure/fracture modes produced in the different tested specimens, allowing strategies to avoid these failure modes.

Regarding the results, the regulatory changes have meant an average economic increase of 40% in the cost of the underpinning projects, which in some cases can reach up to 60%. Likewise, it shows that, from bond strength of 0.6 MPa, no significant savings are produced, and that it would not be economically efficient to exceed the threshold value of 1.0 MPa.

The experimental results of the direct connection show bond strength values within the range 1.0-2.0 MPa, much higher than the theoretical values derived from the regulations formulations that are currently being applied. Furthermore, they indicate that the new direct connection system is statistically 39% more resistant, so its use would be justified, substantially increasing the security level of the connection. Furthermore, its implementation would represent a substantial economic savings, and the reduction of the environmental impacts derived from a less use of construction materials, and from less waste generation.

Finally, the numerical simulation of the specimens tested under compression with finite elements clearly identifies the most stressed areas of both connections, coinciding with those in which the different failure modes occur. Although it has not been possible to calibrate the numerical model with the experimental results, it has served to warn of the tensile stresses that are generated in the concrete block due to the Poisson effect of the micropile in the connection, and they causes the monolithic fracture of the concrete block. Therefore, although the numerical simulations are not capable of accurately predicting the numerical values of the tests carried out, they are of great help to qualitatively predict the strength behaviour of both connection systems.

PALABRAS CLAVE

Cimientos; Análisis y Diseño de Experimentos; Rehabilitación de edificios; Tensión de adherencia; Lechada de cemento; Cimentaciones especiales; Recalce; Simulación Monte-Carlo; ANOVA.

KEYWORDS

Foundations; Analysis and Design of Experiments; Building Rehabilitation; Bond Stress; Cement grout; Special Foundations; Underpinning; Monte-Carlo Simulation; ANOVA.

AGRADECIMIENTOS

A todos los que han hecho posible que hoy esté redactando estas palabras.

CITA

"Si saber no es un derecho, seguro será un izquierdo". Silvio
Rodríguez (1946).

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	7
I - INTRODUCCIÓN	49
II - OBJETIVOS DEL ESTUDIO	63
2.1. JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA DEL ESTUDIO	64
2.2. RESISTENCIA DE LA CONEXIÓN DIRECTA CONVENCIONAL. .	64
2.3. NUEVO SISTEMA DE CONEXIÓN DIRECTA	65
2.4. SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LAS CONEXIONES ENSAYADAS .	66
III - ESTADO DEL ARTE	69
IV - METODOLOGÍA	81
4.1. ESTUDIO ECONÓMICO	83
4.1.1. Diseño de los proyectos de recalce.	83
4.1.2. Formulaciones para estimar la tensión de adherencia.....	89
4.1.3. Simulación Monte Carlo.....	95
4.1.4. Casos de estudio.....	97
4.2. DISEÑO EXPERIMENTAL	99
4.2.1. Diseño de experimentos.....	101
4.2.1.1. Definición	101
4.2.1.2. Análisis de la Varianza (ANOVA).....	101
4.2.2. Programa experimental a escala reducida.....	103
4.2.3. Programa experimental a escala real.....	109
4.2.4. Materiales y proceso de elaboración.	113
4.2.5. Justificación del diseño de las probetas.	115

4.2.5.1.	Resistencia en la interfaz lechada-hormigón en conexión directa.....	116
4.2.5.2.	Resistencia en la interfaz lechada-acero.....	117
4.2.5.3.	Resistencia por punzonamiento en la nueva conexión.....	118
4.2.5.4.	Resistencia del propio micropilote a compresión.....	118
4.2.6.	Realización de los ensayos.....	119
4.3.	SIMULACIÓN NUMÉRICA.....	120
4.3.1.	Descripción general del Problema Elástico.....	121
4.3.1.1.	Definición.....	121
4.3.1.2.	Objetivo, resultados y criterios de rotura.....	123
4.3.1.3.	El Método de Elementos Finitos.....	124
4.3.2.	Plan de simulación numérica de las probetas.....	125
4.3.2.1.	Descripción del procedimiento seguido con Ansys.....	125
4.3.2.2.	Probetas diseñadas con armadura tubular y sin armadura tubular..	127
V -	RESULTADOS.....	131
5.1.	JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA.....	131
5.1.1.	Análisis determinístico.....	131
5.1.2.	Resultados de la Simulación Monte Carlo.....	135
5.1.3.	Discusión del estudio económico.....	138
5.2.	RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	142
5.2.1.	Descripción de los tipos de fallo en los ensayos.....	142
5.2.2.	Resultados numéricos obtenidos en los ensayos.....	148
5.2.3.	Análisis estadístico del Diseño Experimental.....	153
5.2.3.1.	ANOVA 1. Resultados de la conexión convencional.....	153
5.2.3.2.	ANOVAS 2 Y 3. Análisis del factor sombrero.....	156
5.2.3.3.	ANOVAS 4 Y 5. Análisis del diámetro del sombrero.....	160
5.2.3.4.	ANOVAS 6. Análisis del armado del sombrero.....	163
5.2.4.	Discusión y conclusiones del programa experimental.....	164

5.3.	SIMULACIÓN NUMÉRICA.....	167
5.3.1.	Desplazamientos en las probetas sin considerar armadura tubular.....	168
5.3.2.	Desplazamientos en las probetas considerando armadura tubular.....	172
5.3.3.	Tipos de rotura de las probetas.....	176
5.3.3.1.	Rotura de la zona de la cabeza del micropilote.	176
5.3.3.2.	Fallo por deslizamiento del micropilote en conexión convencional..	178
5.3.3.3.	Rotura del dado de hormigón que simula la zapata.....	180
5.3.3.4.	Rotura del sombrero.	181
5.3.4.	Comparativa de los modelos de rotura según el tipo de conexión.....	182
VI -	CONCLUSIONES	187
VII -	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	195
VIII -	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	199
IX -	ANEXOS	211

SIGLAS Y ABREVIATURAS

A_c : Sección neta de lechada o mortero, descontando armaduras.

ANOVA: Análisis de la Varianza.

A_s : Sección total de las barras corrugadas de acero.

A_{sr} : Superficie lateral de contacto de las barras corrugadas.

A_{ss} : Armadura del sombrero.

A_{st} : Sección de cálculo de la armadura tubular de acero.

A_{stt} : Superficie lateral de contacto de la armadura tubular de acero.

c : Coeficiente de adhesión de la superficie en la comprobación de rasante.

\bar{C} : Coste medio de construcción de los micropilotes.

CC: Coste de construcción de los proyectos de recalce.

C_R : Coeficiente adimensional de micropilotes para el efecto de pandeo.

d_e : Diámetro exterior nominal de la armadura tubular.

D_h : Diámetro de perforación de la cimentación existente.

d_i : Diámetro interior nominal de la armadura tubular.

D_m : Diámetro del micropilote.

D_s : Diámetro del sombrero.

DoE: Diseño de Experimentos.

δ_u : Deformaciones últimas.

e_0 : Espesor capa de rellenos.

ε_1 : Deformación principal unitaria máxima.

ε_3 : Deformación principal unitaria mínima.

f_{cd} : Resistencia de cálculo a compresión del hormigón.

f_{ctd} : Resistencia de cálculo a tracción del hormigón.

f_{ck} : Resistencia característica a compresión del hormigón.

F_e : Factor de perforación de micropilotes.

f_{gd} : Resistencia de cálculo a compresión de la lechada de cemento.

f_{gk} : Resistencia característica a compresión de la lechada de cemento.

f_{gm} : Resistencia media a compresión de la lechada de cemento.

f_{sd} : Resistencia de cálculo del acero de las barras corrugadas.

f_{sk} : Límite elástico del acero de barras corrugadas.

$F_{u,c}$: Factor de unión de micropilotes.

f_y : Límite elástico del acero de armadura tubular.

f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero de la armadura tubular.

h : Canto de la cimentación existente.

L : Longitud del micropilote.

\bar{L} : Longitud media de los micropilotes de uno o varios proyectos.

L_{sr} : Longitud barras corrugadas.

L_{st} : Longitud armadura tubular.

LSD: Least Significant Difference.

μ : Coeficiente de rozamiento de la superficie en la comprobación de rasante.

M_d : Momento flector de diseño.

MEF: Método de Elementos Finitos.

n : Número de micropilotes.

N: Unidades de elementos de cimentación a recalzar.

$N_{c,Rd}$: Resistencia estructural del micropilote.

N_d : Axil de diseño.

P_u : Carga última de rotura de las probetas.

\bar{Q} : Carga media que reciben los elementos a recalzar.

Q_m : Axil del micropilote más cargado.

R: Factor de pandeo de micropilotes.

r: Recubrimiento de la lechada de cemento a micropilotes.

$R_{adh,d}$: Resistencia en la interfaz lechada-acero.

$R_{adh,t}$: Resistencia de cálculo de adherencia lechada-armadura tubular.

$R_{adh,a}$: Resistencia de cálculo de adherencia lechada-armadura corrugada.

R_{ck} : Resistencia de la conexión directa micropilote-cimentación existente.

r_e : Reducción de espesor de la armadura por efecto de la corrosión.

R_{gp} : Resistencia de fallo esperada por punzonamiento en zona sombrero.

R_h : Resistencia al hundimiento del micropilote.

ρ : Cuantía de armado transversal en la comprobación de rasante.

V_d : Cortante de diseño.

β : Coeficiente de rugosidad de la superficie de unión.

β_c : Coeficiente incremento tensión adherencia lechada-armadura tubular.

γ_a : Coeficiente de seguridad para el acero de la armadura tubular.

γ_c : Coeficiente de seguridad del mortero, hormigón o lechada.

γ_s : Coeficiente de seguridad para el acero de las armaduras corrugadas.

τ_{adh} : Tensión de adherencia.

- τ_f : Resistencia por fuste del terreno.
- τ_{gp} : Resistencia a cortante de la lechada de cemento
- τ_m : Tensión de adherencia media.
- $\tau_{m,HA}$: Tensión de adherencia media en hormigón armado.
- $\tau_{m,d,HA}$: Tensión de adherencia de cálculo media en hormigón armado.
- $\tau_{m,HM}$: Tensión de adherencia media en hormigón en masa.
- $\tau_{m,d,HM}$: Tensión de adherencia de cálculo media en hormigón en masa.
- τ_{sg-r} : Tensión de la unión en la interfaz lechada-armadura corrugada.
- τ_{sg-t} : Tensión de la unión en la interfaz lechada-armadura tubular.
- σ_{eq} : Tensión equivalente de comparación en criterio rotura/plastificación.
- $\sigma_{eq,vM}$: Tensión equivalente de von Mises.
- σ_{HM} : Desviación típica hormigón en masa.
- $\sigma_{d,HM}$: Desviación típica de cálculo hormigón en masa.
- σ_L : Tensión límite de un material para ensayo uniaxial.
- σ_n : Tensión de compresión (radial en la perforación).
- σ_p : Resistencia por punta del terreno.
- σ_1 : Tensión principal máxima.

ÍNDICE DE FIGURAS, DE TABLAS Y DE ANEXOS**ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 1. Fases de la ejecución de micropilotes cuando la conexión es mediante un nuevo encepado que se conecta con la estructura existente. Fuente: Elaboración propia.....	53
Figura 2. Fases de la ejecución de micropilotes cuando se emplea la conexión directa a la estructura existente. Fuente: Elaboración propia.	54
Figura 3. Superficie de contacto micropilote-cimentación existente en conexiones directas convencionales. Fuente: Elaboración propia.	55
Figura 4. Superficies de contacto micropilote-cimentación existente en conexiones directas con sombrero. Fuente: Elaboración propia.	65
Figura 5. Esquema metodológico seguido en la tesis doctoral y su relación con los objetivos perseguidos. Fuente: Elaboración propia.....	82
Figura 6. Esquema de las fases en el diseño del recalce de un elemento mediante conexión directa del micropilote con la cimentación existente de hormigón. Fuente: Elaboración propia.....	86
Figura 7. Variación de la tensión de adherencia para las formulaciones aplicadas según la resistencia característica a compresión simple (f_{ck}) del hormigón. Fuente: Elaboración propia.....	94
Figura 8. Esquema del diseño de las probetas a escala reducida. Fuente: Elaboración propia.....	105
Figura 9. Preparación de las probetas a escala reducida. Fuente: Elaboración propia.....	106
Figura 10. Placa de acero de apoyo perforada para la realización de los ensayos. Fuente: Elaboración propia.....	107

- Figura 11. Diseño de las probetas ensayadas: a) conexión convencional, b) conexión con sombrero, c) conexión con sombrero armado. Fuente: Elaboración propia..... 111
- Figura 12. Proceso de fabricación de las probetas: a) Encofrado bloques de hormigón. b) Desencofrado y perforación de los huecos. c) Colocación de encofrado con diferentes tubos de PVC para definir la nueva conexión. d) Armaduras tubulares con las barras corrugadas soldadas. e) Especímenes obtenidos. f) Barras corrugadas para reforzar la nueva conexión propuesta. Fuente: Elaboración propia..... 114
- Figura 13. Imágenes del desarrollo de los ensayos. a) Pórtico de carga de 100 toneladas. b) Detalle de placa metálica para permitir el desplazamiento relativo del micropilote a través del cubo que de hormigón. Fuente: Elaboración propia. 119
- Figura 14. Esquema del ensayo a compresión hasta rotura en pórtico de carga: a) disposición de extensómetros en probeta de conexión convencional. b) Disposición de extensómetros en probeta con conexión con sombrero, con y sin armado. Fuente: Elaboración propia. 120
- Figura 15. Modelos de muestras en ANSYS del sistema de conexión convencional y el nuevo sistema con sombrero considerando los volúmenes de dado, micropilote y sombrero. Fuente: Elaboración propia..... 127
- Figura 16. Modelos de muestras en Ansys del sistema de conexión convencional y el nuevo sistema con sombrero considerando los volúmenes de dado, micropilote y sombrero estando todos ellos atravesados por la armadura tubular del micropilote. Fuente: Elaboración propia..... 128
- Figura 17. Disminución del número de perforaciones (n), de la medición total de los micropilotes (L), y del ahorro económico para cada proyecto de recalce (CC), teniendo en cuenta el espesor de la cimentación (h), el espesor de la capa de rellenos no resistente (e_0), y la tensión media de rozamiento por fuste (τ_f) y la carga promedio. Fuente: Elaboración propia. 133
- Figura 18. a) Disminución del número de perforaciones por zapata según la carga que reciben. b) Descenso en la medición global de micropilotes por zapata (aislada, corrida o losa) según la carga que reciben. c) Ahorros económicos por zapata según la carga que reciben. Fuente: Elaboración propia..... 134

- Figura 19. Histograma del coste agregado (CC) de los proyectos de recalce que resulta de la Simulación Monte Carlo. Fuente: Elaboración propia. 136
- Figura 20. Representación conjunta de la variación del coste de los proyectos agregados (CC) junto con la distribución normal de tensión de adherencia en el fondo. Fuente: Elaboración propia. 137
- Figura 21. Ahorros medios relacionados con: la tensión de adherencia en MPa, el espesor de la capa de rellenos (e_0) en metros que son los números insertados en las curvas, el rozamiento por fuste en MPa, y el espesor de la cimentación (h) en metros. Fuente: Elaboración propia..... 140
- Figura 22. Esquema de las diferentes zonas de las probetas a la hora de analizar los resultados de los ensayos. Fuente: Elaboración propia. 143
- Figura 23. Fotografías de roturas en los ensayos de la conexión convencional: a) rotura de la cabeza del micropilote; b) deslizamiento del micropilote; c) fisuras en la zapata; d) rotura monolítica de la zapata. Fuente: Elaboración propia. 144
- Figura 24. Fotografías de roturas en los ensayos de la conexión con sombrero sin armadura: a) rotura de la cabeza del micropilote; b) deslizamiento del micropilote; c) fisuras en la zapata; d) rotura monolítica de la zapata. Fuente: Elaboración propia..... 145
- Figura 25. Fotografías de roturas en los ensayos de la conexión con sombrero con armadura (SA1-SA16): a) rotura de la cabeza del micropilote; b) deslizamiento del micropilote dentro del sombrero y de la perforación; c) deslizamiento del micropilote; d) rotura del sombrero; e) rotura monolítica de la zapata; f) rotura monolítica del sombrero y la zapata. Fuente: Elaboración propia. 146
- Figura 26. Fotografías de roturas en la lechada en la zona de la conexión en algunas probetas con sombrero (SA1-SA16): a) zona interna del micropilote sin romper; b) zona interna del micropilote fracturada; c) fisuras que se generan en la zona del sombrero justo antes de la zona interna del micropilote; d) fotografía en la que se visualiza el plano de rotura de cortante; e) fotografía en la que se muestran las fisuras/fracturas en forma de celosía en la zona interna del micropilote en la perforación; f) inclinación fracturas en la zona interna del micropilote. Fuente: Elaboración propia..... 147
- Figura 27. Gráficas carga-deformación obtenidas en los ensayos de las probetas C1-C8: a) curva de ascenso hasta la carga pico de rotura que provoca el primer

- deslizamiento brusco; b) gráficas de las curvas carga-deformación incluyendo la fase de recarga de algunas probetas. Fuente: Elaboración propia. 150
- Figura 28. Gráficas carga-deformación obtenidas en los ensayos de las probetas S1-S16: a) curva de ascenso hasta la curva de rotura que provoca el primer deslizamiento brusco; b) gráficas de las curvas carga-deformación incluyendo la fase de recarga de algunas probetas. Fuente: Elaboración propia. 151
- Figura 29. Gráficas carga-deformación obtenidas en los ensayos de las probetas SA1-SA16: a) curva de ascenso hasta la curva de rotura que provoca el primer deslizamiento brusco; b) Gráficas de las curvas carga-deformación incluyendo la fase de recarga de algunas probetas. Fuente: Elaboración propia. 152
- Figura 30. Interacción entre diámetro de perforación (D_h) y resistencia del hormigón (f_{ck}) de la cimentación: a) tomando como referencia la carga de rotura (P_u), y b) tomando como referencia la tensión de adherencia (τ_{adh}). Fuente: Elaboración propia. 155
- Figura 31. Gráfica de cajas para visualizar la influencia aislada sobre la tensión de adherencia (τ_{adh}) de los parámetros: a) resistencia característica del hormigón (f_{ck}); b) diámetro de perforación (D_h). Fuente: Elaboración propia. 156
- Figura 32. Gráfica de cajas para visualizar la influencia aislada del sombrero (Hat) sobre la carga de rotura (P_u): a) probetas con conexión convencional (C1-C8) y con sombrero (S1-S16); b) probetas con conexión convencional (C1-C8) y con sombrero armado (SA1-SA16). Fuente: Elaboración propia. 158
- Figura 33. Interacción entre la resistencia del hormigón del dado (f_{ck}) y la construcción del sombrero (Hat): a) comparando conexión convencional y conexión con sombrero sin armado (C1-C8 y S1-S16); b) comparando conexión convencional y conexión con sombrero armada (C1-C8 y SA1-SA16). Fuente: Elaboración propia. 158
- Figura 34. Interacción entre el diámetro de perforación (D_h) y la construcción del sombrero (Hat): a) comparando conexión convencional y conexión con sombrero sin armado (C1-C8 y S1-S16); b) comparando conexión convencional y conexión con sombrero armada (C1-C8 y SA1-SA16). Fuente: Elaboración propia. 159
- Figura 35. Gráfica de cajas para visualizar la influencia aislada del diámetro de perforación (D_h) sobre la carga de rotura (P_u): a) probetas con conexión con

sombrero sin armar (S1-S16); b) probetas con conexión con sombrero armadas (SA1-SA16). Fuente: Elaboración propia..... 161

Figura 36. Gráfica de cajas para visualizar la influencia aislada del diámetro del sombrero (D_s) sobre la carga de rotura (P_u): a) probetas con conexión con sombrero (S1-S16); b) probetas con conexión con sombrero armadas (SA1-SA16). Fuente: Elaboración propia..... 162

Figura 37. Gráfica de cajas para visualizar la influencia del ratio entre diámetro de sombrero (D_s) y diámetro de micropilote ($D_m = 150$ mm) sobre la carga de rotura (P_u): a) probetas con conexión con sombrero (S1-S16); b) probetas con conexión con sombrero armadas (SA1-SA16). Fuente: Elaboración propia. 163

Figura 38. Gráfica de cajas para visualizar la influencia del ratio entre diámetro de sombrero (D_s) y diámetro de perforación (D_h) sobre la carga de rotura (P_u): a) probetas con sombrero sin armado (S1-S16); b) probetas con sombrero armado (SA1-SA16). Fuente: Elaboración propia..... 163

Figura 39. Gráfica de cajas para visualizar la influencia del armado del sombrero (A_{ss}). Se comparan las distribuciones entre probetas con sombrero sin armado (S1-S16) y las probetas con sombrero y armado (SA1-SA16). Fuente: Elaboración propia..... 164

Figura 40. Deformaciones de las probetas de conexión convencional modelizadas en Ansys. Fuente: Elaboración propia..... 169

Figura 41. Deformaciones de las probetas del nuevo sistema de conexión con sombrero modelizadas en Ansys con hormigón de resistencia a compresión simple de 17,5 MPa. Fuente: Elaboración propia..... 170

Figura 42. Deformaciones de las probetas del nuevo sistema de conexión con sombrero modelizadas en Ansys con hormigón de resistencia a compresión simple de 30 MPa. Fuente: Elaboración propia..... 171

Figura 43. Desplazamientos en el eje horizontal de diferentes modelos con Ansys: a) conexión convencional, b) conexión con sombrero. Fuente: Elaboración propia. 172

Figura 44. Deformaciones de las probetas de conexión convencional modelizadas en Ansys introduciendo en el modelo la armadura tubular que atraviesa todos los cuerpos. Fuente: Elaboración propia..... 173

Figura 45. Deformaciones de las probetas del nuevo sistema de conexión con sombrero modelizadas en Ansys con hormigón de resistencia a compresión simple de 17,5 MPa introduciendo en el modelo la armadura tubular que atraviesa todos los cuerpos. Fuente: Elaboración propia.	174
Figura 46. Deformaciones de las probetas del nuevo sistema de conexión con sombrero modelizadas en Ansys con hormigón de resistencia a compresión simple de 30 MPa introduciendo en el modelo la armadura tubular que atraviesa todos los cuerpos. Fuente: Elaboración propia.	175
Figura 47. Probetas llevadas a rotura en pórtico que han desarrollado una rotura en la zona de la cabeza del micropilote. Fuente: Elaboración propia.	176
Figura 48. Tensión equivalente de von-Mises de diferentes modelos con Ansys. Fuente: Elaboración propia.	177
Figura 49. Secciones de Tensión equivalente de von-Mises de diferentes modelos con Ansys. Fuente: Elaboración propia.	177
Figura 50. Sección con deformaciones principales máximas (ε_1) modeladas con Ansys para dos probetas: a) conexión convencional; b) conexión con sombrero. Fuente: Elaboración propia.	178
Figura 51. Secciones con deformaciones principales mínimas (ε_3) modeladas con Ansys para dos probetas: a) conexión convencional; b) conexión con sombrero. Fuente: Elaboración propia.	178
Figura 52. Probetas llevadas a rotura en pórtico que han desarrollado el descenso del micropilote en la zona de unión con la zapata. Fuente: Elaboración propia.	179
Figura 53. Resultados tensiones de un modelo de conexión convencional simulado con Ansys: a) tensión equivalente de von Mises ($\sigma_{eq,vM}$); b) tensión máxima principal (σ_1). Fuente: Elaboración propia.	179
Figura 54. Probetas llevadas a rotura en pórtico en las que han aparecido fisuras/fracturas en la zona de la zapata. Fuente: Elaboración propia.	180
Figura 55. Tensiones principales máximas (σ_1) en dos modelos de probeta con Ansys: a) conexión convencional; b) conexión con sombrero. Fuente: Elaboración propia.	181
Figura 56. Rotura de la zona del sombrero mostrando las tensiones equivalentes de von Mises con Ansys. Fuente: Elaboración propia.	182

Figura 57. Deslizamiento de la zona de perforación de la zapata respecto de la propia zapata: a) imagen de los ensayos en pórtico de carga. b) Representación esquemática del modelo resistente sobre una sección del campo de desplazamientos. Fuente: Elaboración propia.	183
Figura 58. Rotura de la zona del sombrero: a) imagen de los ensayos en pórtico de carga. b) Tensiones equivalentes de von-Mises en la simulación con Ansys. Fuente: Elaboración propia.	183
Figura 59. Fotografías de la probeta C1 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.	224
Figura 60. Gráfica de tensión deformación de probeta C1. Fuente: Elaboración propia.	224
Figura 61. Fotografías de la probeta C2 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.	225
Figura 62. Gráfica de tensión deformación de muestra C2. Fuente: Elaboración propia.	225
Figura 63. Fotografías de la probeta C3 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.	226
Figura 64. Gráfica de tensión deformación de probeta C3. Fuente: Elaboración propia.	226
Figura 65. Fotografías de la probeta C4 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.	227
Figura 66. Gráfica de tensión deformación de probeta C4. Fuente: Elaboración propia.	227
Figura 67. Fotografías de la probeta C5 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.	228
Figura 68. Gráfica de tensión deformación de probeta C5. Fuente: Elaboración propia.	228
Figura 69. Fotografías de la probeta C6 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.	229
Figura 70. Gráfica de tensión deformación de probeta C6. Fuente: Elaboración propia.	229

Figura 71. Fotografías de la probeta C7 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.....	231
Figura 72. Gráfica de tensión deformación de probeta C7. Fuente: Elaboración propia.....	230
Figura 73. Fotografías de la probeta C8 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.....	231
Figura 74. Gráfica de tensión deformación de probeta C8. Fuente: Elaboración propia.....	231
Figura 75. Fotografía de la probeta Cilíndrica 1 antes de la rotura. Fuente: Elaboración propia.....	232
Figura 76. Fotografías de la probeta Cilíndrica 2 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.....	233
Figura 77. Fotografía de la probeta Cilíndrica 7 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.....	234
Figura 78. Fotografías de la probeta Cilíndrica 8 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.....	235
Figura 79. Fotorgrafías de la probeta S1 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.....	237
Figura 80. Gráfica de tensión deformación de probeta S1. Fuente: Elaboración propia.....	237
Figura 81. Fotografías de la probeta S2 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.....	238
Figura 82. Gráfica de tensión deformación de probeta S2. Fuente: Elaboración propia.....	238
Figura 83. Fotografías de la probeta S3 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.....	239
Figura 84. Gráfica de tensión deformación de probeta S3. Fuente: Elaboración propia.....	239
Figura 85. Fotografías de la probeta S4 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.....	240
Figura 86. Gráfica de tensión deformación de probeta S4. Fuente: Elaboración propia.....	240

Figura 87. Fotografías de la probeta S5 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.....	241
Figura 88. Gráfica de tensión deformación de probeta S5. Fuente: Elaboración propia.....	241
Figura 89. Fotografías de la probeta S6 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.....	242
Figura 90. Gráfica de tensión deformación de probeta S6. Fuente: Elaboración propia.....	242
Figura 91. Fotografías de la probeta S7 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.....	243
Figura 92. Gráfica de tensión deformación de probeta S7. Fuente: Elaboración propia.....	243
Figura 93. Fotografías de la probeta S8 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.....	244
Figura 94. Gráfica de tensión deformación de probeta S8. Fuente: Elaboración propia.....	244
Figura 95. Fotografías de la probeta S9 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.....	245
Figura 96. Gráfica de tensión deformación de probeta S9. Fuente: Elaboración propia.....	245
Figura 97. Fotografías de la probeta S10 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.....	246
Figura 98. Gráfica de tensión deformación de probeta S10. Fuente: Elaboración propia.....	246
Figura 99. Fotografías de la probeta S11 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.....	247
Figura 100. Gráfica de tensión deformación de probeta S11. Fuente: Elaboración propia.....	247
Figura 101. Fotografías de la probeta S12 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.....	248
Figura 102. Gráfica de tensión deformación de probeta S12. Fuente: Elaboración propia.....	248

Figura 103. Fotografías de la probeta S13 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.....	249
Figura 104. Gráfica de tensión deformación de probeta S13. Fuente: Elaboración propia.....	249
Figura 105. Fotografías de la probeta S14 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.....	250
Figura 106. Gráfica de tensión deformación de probeta S14. Fuente: Elaboración propia.....	250
Figura 107. Fotografías de la probeta S15 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.....	251
Figura 108. Gráfica de tensión deformación de probeta S15.Fuente: Elaboración propia.....	251
Figura 109. Fotografías de la probeta S16 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.....	252
Figura 110. Gráfica de tensión deformación de probeta S16. Fuente: Elaboración propia.....	252
Figura 111. Fotografías de la probeta SA1 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.....	253
Figura 112. Gráfica de tensión deformación de probeta SA1. Fuente: Elaboración propia.....	253
Figura 113. Fotografías de la probeta SA2 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.....	254
Figura 114. Gráfica de tensión deformación de probeta SA2.Fuente: Elaboración propia.....	254
Figura 115. Fotografías de la probeta SA3 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.....	255
Figura 116. Gráfica de tensión deformación de probeta SA3. Fuente: Elaboración propia.....	255
Figura 117. Fotografías de la probeta SA4 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.....	256
Figura 118. Gráfica de tensión deformación de probeta SA4. Fuente: Elaboración propia.....	256

Figura 119. Fotografías de la probeta SA5 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.....	257
Figura 120. Gráfica de tensión deformación de probeta SA5.Fuente: Elaboración propia.....	257
Figura 121. Gráfica de tensión deformación de probeta SA6. Fuente: Elaboración propia.....	258
Figura 122. Fotografías de la probeta SA7 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.....	259
Figura 123. Gráfica de tensión deformación de probeta SA7. Fuente: Elaboración propia.....	259
Figura 124. Fotografías de la probeta S8 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.....	260
Figura 125. Gráfica de tensión deformación de probeta SA8. Fuente: Elaboración propia.....	260
Figura 126. Fotografías de la probeta SA9 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.....	261
Figura 127. Gráfica de tensión deformación de probeta SA9. Fuente: Elaboración propia.....	261
Figura 128. Gráfica de tensión deformación de probeta SA10. Fuente: Elaboración propia.....	262
Figura 129. Fotografías de la probeta SA11 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.....	263
Figura 130. Gráfica de tensión deformación de probeta AS11. Fuente: Elaboración propia.....	263
Figura 131. Fotografías de la probeta SA12 antes de la rotura. Fuente: Elaboración propia.....	264
Figura 132. Gráfica de tensión deformación de probeta AS12. Fuente: Elaboración propia.....	264
Figura 133. Fotografías de la probeta SA13 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.....	265
Figura 134. Gráfica de tensión deformación de probeta AS13. Fuente: Elaboración propia.....	265

Figura 135. Fotografías de la probeta SA14 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.....	266
Figura 136. Gráfica de tensión deformación de probeta AS14. Fuente: Elaboración propia.....	266
Figura 137. Fotografías de la probeta SA15 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.....	267
Figura 138. Gráfica de tensión deformación de probeta AS15. Fuente: Elaboración propia.....	267
Figura 139. Fotografías de la probeta SA16 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.....	268
Figura 140. Gráfica de tensión deformación de probeta AS16. Fuente: Elaboración propia.....	268
Figura 141. Fotografías de la probeta Cilíndrica 3 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.....	269
Figura 142. Fotografías de la probeta Cilíndrica 4 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.....	270
Figura 143. Fotografías de la probeta Cilíndrica 5 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.....	271
Figura 144. Fotografías de la probeta Cilíndrica 6 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.....	272

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de las formulaciones aplicadas para estimar la tensión de adherencia en el estudio económico. Fuente: Elaboración propia.	93
Tabla 2. Resumen de los principales datos de las 29 cimentaciones estudiadas. Fuente: Elaboración propia.	98
Tabla 3. Coste de cada unidad utilizada en los presupuestos con precios de 2020. Fuente: Elaboración propia.	99
Tabla 4. Resultados de la fase de experimentación a escala reducida. Fuente: Elaboración propia.	108
Tabla 5. Resultados del contraste de hipótesis de diferencia de medias. Fuente: Elaboración propia.	109
Tabla 6. Diseño del programa experimental realizado. Fuente: Elaboración propia.	112
Tabla 7. Resistencias esperadas según los diferentes modos de rotura o fallo: interfaz lechada-hormigón (R_{ck}), interfaz lechada-acero (R_{adh}, d), punzonamiento en sombrero (R_{gp}), compresión del micropilote ($N_{c,Rd}$). Fuente: Elaboración propia.	116
Tabla 8. Coste de los proyectos de recalce dependiente de la formulación de tensión de adherencia empleada. Fuente: Elaboración propia.	132
Tabla 9. Resultados medios obtenidos para cada tipo de probeta ensayada: C1-C8, S1-S16 y SA1-SA16. Fuente: Elaboración propia.	149
Tabla 10. Esquema del diseño experimental realizado. Fuente: Elaboración propia.	153
Tabla 11. Resultados del ANOVA 1 para los especímenes C1-C8 tomando la carga pico de rotura (P_u) como parámetro de referencia. Fuente: Elaboración propia.	154
Tabla 12. Resultados del ANOVA 1 para los especímenes C1-C8 tomando la tensión de adherencia (τ_{adh}) como parámetro de referencia. Fuente: Elaboración propia.	154

Tabla 13. Resultados del ANOVAS 2 y 3 para los factores: f_{ck} , D_h y Hat . Fuente: Elaboración propia.....	157
Tabla 14. Resultados del ANOVAS 2 y 3 para los factores: D_h y Hat . Fuente: Elaboración propia.....	160
Tabla 15. Resultados de los ANOVAS 4 y 5 para las probetas S1-S16 y SA1-SA16, respectivamente, en las que se analizan los factores D_h y D_s . Fuente: Elaboración propia.....	161
Tabla 16. Resultados del ANOVAS 6 para las probetas S1-S16 y SA1-SA16, respectivamente, en las que se analizan los factores A_{ss} , D_s y D_h . Fuente: Elaboración propia.....	164
Tabla 17. Características detalladas de las cimentaciones de los 29 edificios estudiados, edificios 1 a 6. Fuente: Elaboración propia.....	212
Tabla 18. Características detalladas de las cimentaciones de los 29 edificios estudiados, edificios 7 a 12. Fuente: Elaboración propia.....	215
Tabla 19. Características detalladas de las cimentaciones de los 29 edificios estudiados, edificios 13 a 18. Fuente: Elaboración propia.....	217
Tabla 20. Características detalladas de las cimentaciones de los 29 edificios estudiados, edificios 19 a 24. Fuente: Elaboración propia.....	220
Tabla 21. Características detalladas de las cimentaciones de los 29 edificios estudiados, edificios 25 a 29. Fuente: Elaboración propia.....	222
Tabla 22. Principales características de la probeta C1. Fuente: Elaboración propia.	224
Tabla 23. Principales características de la probeta C2. Fuente: Elaboración propia.	225
Tabla 24. Principales características de la probeta C3. Fuente: Elaboración propia.	226
Tabla 25. Principales características de la probeta C4. Fuente: Elaboración propia.	227
Tabla 26. Principales características de la probeta C5. Fuente: Elaboración propia.	228
Tabla 27. Principales características de la probeta C6. Fuente: Elaboración propia.	229

Tabla 28. Principales características de la probeta C7. Fuente: Elaboración propia.	230
Tabla 29. Principales características de la probeta C8. Fuente: Elaboración propia.	231
Tabla 30. Principales características de la probeta Cilíndrica 1. Fuente: Elaboración propia.....	232
Tabla 31. Principales características de la probeta Cilíndrica 2. Fuente: Elaboración propia.....	233
Tabla 32. Principales características de la probeta Cilíndrica 7. Fuente: Elaboración propia.....	234
Tabla 33. Principales características de la probeta Cilíndrica 8. Fuente: Elaboración propia.....	235
Tabla 34. Principales características de la probeta S1. Fuente: Elaboración propia.	237
Tabla 35. Principales características de la probeta S2. Fuente: Elaboración propia.	238
Tabla 36. Principales características de la probeta S3. Fuente: Elaboración propia.	239
Tabla 37. Principales características de la probeta S4. Fuente: Elaboración propia.	240
Tabla 38. Principales características de la probeta S5. Fuente: Elaboración propia.	241
Tabla 39. Principales características de la probeta S6. Fuente: Elaboración propia.	242
Tabla 40. Principales características de la probeta S7. Fuente: Elaboración propia.	243
Tabla 41. Principales características de la probeta S8. Fuente: Elaboración propia.	244
Tabla 42. Principales características de la probeta S9. Fuente: Elaboración propia.	245
Tabla 43. Principales características de la probeta S10. Fuente: Elaboración propia.	246

Tabla 44. Fotografías características de la probeta S11. Fuente: Elaboración propia.....	247
Tabla 45. Principales características de la probeta S12. Fuente: Elaboración propia.....	248
Tabla 46. Principales características de la probeta S13. Fuente: Elaboración propia.....	249
Tabla 47. Principales características de la probeta S14.Fuente: Elaboración propia.....	250
Tabla 48. Principales características de la probeta S15. Fuente: Elaboración propia.....	251
Tabla 49. Principales características de la probeta 16.Fuente: Elaboración propia.....	252
Tabla 50. Principales características de la probeta SA1.Fuente: Elaboración propia.....	253
Tabla 51. Principales características de la probeta SA2. Fuente: Elaboración propia.....	254
Tabla 52. Principales características de la probeta SA3. Fuente: Elaboración propia.....	255
Tabla 53. Principales características de la probeta SA4. Fuente: Elaboración propia.....	256
Tabla 54. Principales características de la probeta SA5. Fuente: Elaboración propia.....	257
Tabla 55. Principales características de la probeta SA6.Fuente: Elaboración propia.....	258
Tabla 56. Principales características de la probeta SA7.Fuente: Elaboración propia.....	259
Tabla 57. Principales características de la probeta SA8.Fuente: Elaboración propia.....	260
Tabla 58. Principales características de la probeta SA9.Fuente: Elaboración propia.....	261
Tabla 59. Principales características de la probeta SA10.Fuente: Elaboración propia.....	262

Tabla 60. Principales características de la probeta AS11.Fuente: Elaboración propia.....	263
Tabla 61. Principales características de la probeta AS12. Fuente: Elaboración propia.....	264
Tabla 62. Principales características de la probeta AS13.Fuente: Elaboración propia.....	265
Tabla 63. Principales características de la probeta AS14. Fuente: Elaboración propia.....	266
Tabla 64. Principales características de la probeta AS15.Fuente: Elaboración propia.....	267
Tabla 65. Principales características de la probeta AS16. Fuente: Elaboración propia.....	268
Tabla 66. Principales características de la probeta Cilíndrica 3. Fuente: Elaboración propia.....	269
Tabla 67. Principales características de la probeta Cilíndrica 4. Fuente: Elaboración propia.....	270
Tabla 68. Principales características de la probeta Cilíndrica 5.Fuente: Elaboración propia.....	271
Tabla 69. Principales características de la probeta Cilíndrica 6. Fuente: Elaboración propia.....	272

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1. Casos analizados en el estudio económico. 211

ANEXO 2. Resultados de los ensayos para conocer la resistencia de la conexión directa tradicional. 223

ANEXO 3. Resultados de los ensayos para conocer la resistencia de la conexión del nuevo sistema con sombrero..... 236

I – INTRODUCCIÓN

I- INTRODUCCIÓN

La mayoría de las construcciones en edificación y obra civil se sustentan sobre cimentaciones superficiales de hormigón armado. Las tipologías más habituales son la zapata aislada, la viga de cimentación y la losa de cimentación, al ser sencillas de ejecutar y más económicas respecto a las cimentaciones profundas. Sin embargo, son susceptibles de sufrir asientos cuando el suelo pierde, por diversos motivos, parte de su capacidad portante. Generalmente, este hecho puede suceder cuando se ha construido la cimentación sobre suelos arcillosos o rellenos, y la presencia de agua modifica la composición química o la estructura del suelo. Los asientos son especialmente dañinos cuando son diferenciales, y se detectan cuando aparecen fisuras en las estructuras de hormigón armado o grietas en las tabiquerías.

La técnica más empleada para frenar asientos en cimentaciones superficiales son los micropilotes, que son estructuras esbeltas y cilíndricas, con diámetro inferior a 300 mm, capaces de transmitir cargas a los estratos de suelo más profundos. Su construcción genera una gran superficie de contacto suelo-micropilote, por lo que resisten fundamentalmente por rozamiento y son capaces de detener totalmente la evolución de los asientos. A la actuación de rehabilitación de cimentaciones de hormigón con micropilotes se le denomina comúnmente como recalce.

El precursor de esta tipología estructural fue Fernando Lizzi, que en 1952 empezó a desarrollar una técnica que consistía en pilotes de pequeño diámetro ligeramente reforzados con acero que denominó “pali radice” o “palos raíz”. Dado el éxito de estas primeras aplicaciones, su uso empezó a generalizarse a partir de la década de 1980 [1], evolucionando su tecnología considerablemente hasta la técnica que hoy conocemos habitualmente por micropilotes.

Las prestaciones que ofrece esta tipología de cimentación especial han hecho que se incremente la variedad de aplicaciones prácticas. Desde una perspectiva de transmisión de cargas proporcionan un considerable incremento de superficie de contacto entre estructura y suelo que, en principio, no está limitado, salvo por problemas de pandeo o de ejecución. Por lo que su construcción permite transmitir grandes cargas por rozamiento suelo-estructura a terrenos con baja

capacidad portante. Si bien existe transmisión de cargas por punta, solamente se considera en los cálculos cuando los micropilotes se apoyan directamente sobre un estrato rocoso. Además, otra prestación importante es la capacidad de anclar la cimentación en estratos profundos de los suelos, evitando las posibles afecciones negativas derivadas de las capas más superficiales.

Estas prestaciones hacen que el uso de micropilotes sea la técnica habitual a la hora de rehabilitar o acondicionar cimentaciones existentes. Su uso más generalizado es en recalces cuando aparecen patologías en edificaciones, como se ha comentado anteriormente, pero también se vienen empleando para apuntalar cimentaciones antes de realizar una excavación cercana que vaya a afectar a su bulbo de presiones, evitando posibles asentamientos derivados. En línea con estas aplicaciones, es la técnica recurrida en acondicionamiento o refuerzo de cimentaciones en edificaciones que experimentan un cambio de uso y van a tener que soportar un incremento de sobrecarga. Generalmente, la superestructura se modifica incluyendo los refuerzos necesarios, y la cimentación se mejora con micropilotes. Este tipo de intervenciones que, a nivel estructural pueden ser globales o locales, son cada vez más comunes en obra civil, como es el caso de las ampliaciones de puentes o los recalces de depósitos o muros de contención.

El uso de los micropilotes también se ha extendido como cimentación en nuevas construcciones. Son una buena opción cuando se pretende construir sobre terrenos cuyos estratos superficiales no son competentes, evitando que las cargas sean soportadas por éstos. Como es el caso de cimentar sobre rellenos o suelos superficiales no consolidados, arcillas expansivas, entre otros, evitando tener que recurrir a técnicas de mejora de terreno que generalmente son más costosas. Además, dada la capacidad de atravesar diferentes estratos de suelo y su resistencia a esfuerzos de cortante y flexión ha propiciado su uso para estabilizar taludes, incluso se emplean para realizar pantallas en excavaciones verticales para evitar entibaciones. A pesar de la aparición de nuevas aplicaciones prácticas, el uso más extendido sigue siendo en recalces para subsanar patologías en cimentaciones superficiales.

Dentro del campo de los recalces, el procedimiento de construcción de los micropilotes se realiza fundamentalmente en cuatro fases: i) perforación previa del terreno, ii) colocación de armadura tubular, iii) inyección de lechada de

cemento que rellena y rodea la armadura tubular, iv) conexión de la cabeza de los micropilotes a la cimentación existente [2].

La excavación del hueco en el que se va a insertar el micropilote se puede realizar con diferentes equipos de perforación, que trabajan por rotación y rotopercusión. La perforación por rotación está más extendida, al ser una técnica que no genera vibraciones y evita agravar los problemas de asentos. La elección del equipo a emplear viene condicionada por la potencia necesaria y los útiles de perforación. Pero, muchas veces, uno de los principales condicionantes en la rehabilitación de edificios es la falta de espacio, debiendo recurrir a equipos de pequeñas dimensiones.

Una vez realizada la perforación, se inserta la armadura tubular de acero. El procedimiento a seguir es colocar tramos de armadura de forma sucesiva de modo que queden unidos mediante roscas macho hembra, o mediante manguito exterior. Este último sistema permite perder menos sección de la tubería en la unión.

A continuación, se rellena el hueco interior de la armadura y el hueco entre la armadura y el terreno con lechada de cemento o mortero de cemento. Lo más habitual es usar lechada de cemento, cuyas propiedades pueden modificarse mediante aditivos [3]. Además, la lechada se puede inyectar en el terreno a diferentes presiones y diferentes fases [4]. La inyección de la lechada se suele realizar a presión, y esa inyección puede ser de diferentes formas. Para realizar la inyección se obtura la parte superior del micropilote, que se denomina cabeza, mediante una pieza que se rosca al micropilote y que se une a la bomba de inyección mediante latiguillos. Se denomina inyección única cuando la inyección se realiza una sola vez. En este caso la lechada circula desde la cabeza del micropilote a la parte inferior del mismo por el interior de la armadura tubular ascendiendo hasta salir por la parte superior. Se denomina inyección repetitiva cuando la inyección se realiza en varias veces. Para realizar este tipo de inyección se necesitan tubos manguito a diferentes profundidades o válvulas antirretorno que se colocan en la armadura tubular, espaciadas entre 50 cm y 100 cm. En este caso la armadura tubular se debe cegar en la parte inferior de la misma, saliendo la lechada por las válvulas antirretorno o por los manguitos. La inyección se puede repetir las veces que se requiera, siempre que se limpie la lechada del interior de la armadura o los manguitos, para evitar que fragüe. La última técnica

es la inyección repetitiva-selectiva. Este tipo de inyección se realiza en varias fases, también mediante tubos manguito o válvulas antirretorno a diferentes profundidades, y permite inyectar a la profundidad que se quiera. Si se realiza mediante tubos manguito, dichos tubos tendrán diferentes profundidades y seleccionando unos u otros se inyecta a determinada profundidad. Si se realiza mediante válvulas se debe utilizar un doble obturador que se desliza por el interior de la tubería aislando la válvula por la que se requiere inyectar.

El tipo de inyección que se realice condiciona la tensión de rozamiento suelo-estructura. La inyección única es la que proporciona una menor tensión de rozamiento por fuste. La repetitiva ofrece una mayor tensión de rozamiento, siendo la repetitiva-selectiva la que proporciona a los micropilotes la mayor tensión de rozamiento suelo-estructura.

Por último queda la conexión de los micropilotes a la cimentación superficial que se puede materializar de diferentes maneras. Pero, de forma genérica, se pueden clasificar en dos grupos [5]: conexión mediante un nuevo encepado y conexión directa. Es importante esta diferenciación, ya que condiciona el procedimiento constructivo del recalce.

El primer grupo englobaría aquellos casos de conexión en los que es necesario realizar un nuevo encepado que recoja los nuevos micropilotes. Es habitual cuando hay que realizar muchos micropilotes y no hay suficiente espacio para hacerlos sobre la propia cimentación existente. Generalmente este método es exclusivo de las zapatas, ya que en las vigas o losas de cimentación no hay problemas de espacio. El procedimiento de ejecución de este tipo de conexión se puede resumir en cuatro fases (Figura 1):

1. Ejecución de los micropilotes.
2. Excavación alrededor de la cimentación existente
3. Realización de taladros en la cimentación existente, y colocación de conectores.
4. Ejecución del nuevo encepado.

La conexión entre la cabeza de los micropilotes y el nuevo encepado es monolítica ya que se hormigonan de forma conjunta. Y la conexión del nuevo encepado a la cimentación existente se materializa mediante conectores. Es decir, se hacen unas perforaciones horizontales en la cimentación existente con el fin de

colocar unas barras de acero que solidaricen dicha cimentación con el nuevo encepado. En este caso se hace una excavación alrededor de la cimentación existente, rebajando la cota del terreno. Ese proceso debilita la capacidad de transmisión de cargas de dicha zapata al terreno en un edificio que teóricamente ya está con dificultades, ya que la transmisión de esfuerzos de las zapatas se realiza a través de las superficies de la misma, incluyendo la cara vertical. La cara inferior de la zapata seguirá transmitiendo las cargas, pero la cara vertical de la zapata dejará de estar en contacto con el terreno, y por lo tanto dejará de transmitir cargas por esa superficie.

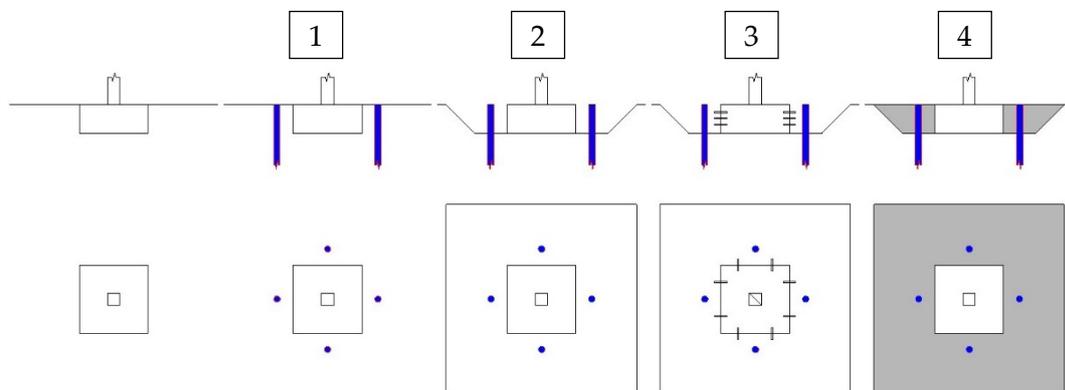


Figura 1. Fases de la ejecución de micropilotes cuando la conexión es mediante un nuevo encepado que se conecta con la estructura existente. Fuente: Elaboración propia.

El segundo grupo contendría aquellas conexiones que unen directamente la cabeza del micropilote con la cimentación existente. En estos casos la perforación se realiza sobre la cimentación existente y la unión es por contacto lechada-hormigón en la propia superficie cilíndrica que deja la perforación. Las fases de ejecución serían las siguientes (Figura 2):

1. Perforación de la estructura existente, normalmente en un diámetro superior al de la perforación del micropilote. Se persigue aumentar la superficie de contacto con el fin de incrementar la resistencia por rozamiento en la conexión (Figura 3).
2. Perforación o excavación del micropilote.

3. Introducción de la armadura del micropilote. Se suele reforzar con barras corrugadas en la zona de la armadura tubular que atraviesa la estructura existente.
4. Inyección de la lechada de cemento en la zona del micropilote y la zona de la perforación de la estructura existente.

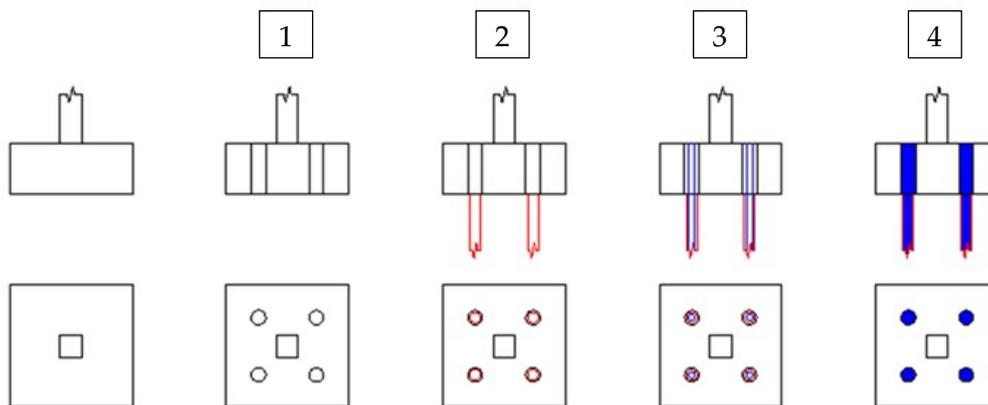


Figura 2. Fases de la ejecución de micropilotes cuando se emplea la conexión directa a la estructura existente. Fuente: Elaboración propia.

La ejecución de recalces mediante conexión directa es un método más sencillo, más rápido, más económico y genera menos residuos. Además, para el caso de recalce de zapatas, se evita la excavación circundante y no se disminuye el coeficiente de seguridad de la transmisión de carga en el transcurso de la ejecución. Estos motivos hacen que la conexión directa sea la opción más utilizada [6].

Sin embargo, la transmisión de carga en la conexión directa es únicamente por contacto (rozamiento) en la interfaz lechada-hormigón creada en la perforación y ésta no es muy elevada, a diferencia de la conexión monolítica del caso anterior. Por tanto, para los casos en los que la carga global que soporta una zapata sea elevada es necesario ejecutar muchas perforaciones para reducir la carga en las conexiones, lo que implica, a su vez, debilitar la propia estructura de la zapata.

En estos casos, si no se quiere o puede recurrir a la conexión con encepado, hay que incrementar la carga a transmitir por rozamiento en la conexión directa. Esto es posible mediante dos actuaciones. La primera es aumentar la rugosidad

de la perforación, lo que implica un tratamiento posterior de la superficie de contacto. El objetivo de esta actuación es aumentar el coeficiente de rozamiento en la interfaz lechada-hormigón. La segunda es perforar la cimentación horizontalmente e incluir unos tensores o armaduras pretensadas que compriman la cimentación horizontalmente. El objetivo ahora es generar una tensión normal (fuerza normal) en la zona de contacto que aumenta la resistencia por rozamiento. Estas dos actuaciones suponen sobrecostes e incrementos en el tiempo de ejecución, por lo que su uso no siempre estaría justificado.

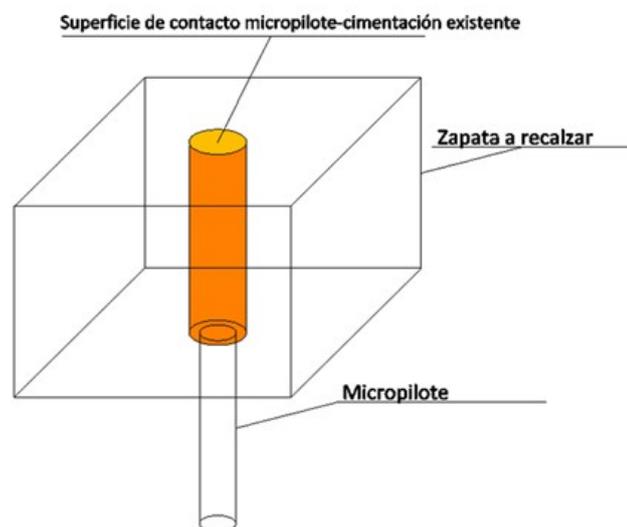


Figura 3. Superficie de contacto micropilote-cimentación existente en conexiones directas convencionales. Fuente: Elaboración propia.

El diseño de los proyectos de recalces con micropilotes viene regulado por normativa, tanto española [7] como europea [8], por lo que tiene que estar debidamente justificado con una memoria técnica adecuada. Pero, antes de ahondar en las comprobaciones de diseño, se hace una breve reflexión sobre la transmisión de cargas desde la perspectiva de la mecánica racional y de la mecánica de los medios continuos. Al fin y al cabo, es un problema de transmisión de fuerzas de volumen y de superficie que condicionan las tensiones que sufren los materiales que componen los micropilotes y la propia cimentación existente. El objetivo de esta explicación es resaltar la diferencia entre

comprobaciones resistentes de la normativa y el fenómeno físico real que se genera en los recalces.

Describiendo una transición de cargas desde el terreno hacia la cimentación, en primer lugar se produce el rozamiento en la interfaz suelo-lechada, que es un esfuerzo rasante sobre el recubrimiento de lechada de cemento alrededor de la armadura tubular del micropilote. Este esfuerzo rasante se transmite hacia el interior del micropilote generándose otra tensión rasante en la interfaz lechada-acero de la armadura tubular. El conjunto de tensiones rasantes se acumula desde el fondo de la cimentación hacia la superficie, generándose en el micropilote un esfuerzo axil que finalmente alcanza la zona de la conexión. Por último, la conexión es la que debe soportar este esfuerzo axil que transmite cada micropilote. En concreto, se debe garantizar que las superficies de contacto en la zona de conexión son capaces de resistir estas cargas axiales por contacto o por rozamiento entre materiales, independientemente del tipo de conexión (encepado o directa).

Las normativas o manuales para el diseño de micropilotes indican las comprobaciones que se deben realizar, y consideran el fenómeno de transmisión de cargas que se acaba de comentar. Siguiendo el mismo orden de antes, en primer lugar están las comprobaciones geotécnicas que garantizan que no haya ni hundimiento ni arranque de micropilotes (interfaz suelo-lechada). La resistencia viene regulada por el tipo de suelo, definido por parámetros geotécnicos, y por el tipo de inyección de la lechada. En segundo lugar, la transmisión de tensiones de la lechada a la armadura tubular (lechada-acero) debe estar garantizada. El valor de esta tensión rasante depende de la rugosidad de la armadura tubular del micropilote y del nivel de confinamiento. En tercer lugar, se debe asegurar la conexión. Si la conexión es por encepado, se debe comprobar la resistencia a cortante de los conectores, mientras que si es directa se debe asegurar la resistencia en la interfaz lechada-hormigón en la perforación circular. Por último, queda la propia resistencia del micropilote.

Las normativas o guías más utilizadas a nivel internacional son las americanas [2, 9-12], después las francesas [13-15], europeas [8, 16] y la española [7]. En ellas, las comprobaciones geotécnicas vienen muy desarrolladas y detalladas, pero generalmente delegan las comprobaciones estructurales en la normativa de hormigón armado correspondiente de cada país [17-20]. En este

sentido, hay comprobaciones estructurales que se resuelven con modelos de resistencia conocidos y desarrollados en dichas normativas de hormigón, como es el caso de la propia resistencia del micropilote. Para este caso se recurre al clásico modelo resistente lineal en el que hay igualdad de deformación en la lechada y acero, siendo su cálculo relativamente sencillo.

Respecto a la resistencia en la interfaz lechada-acero, hay valores tabulados según la rugosidad de la armadura tubular, que generalmente son valores relativamente bajos. Para incrementar esta rugosidad es habitual soldar barras corrugadas y el valor resistente se estima con los valores conocidos de tensión rasante acero-hormigón. En la conexión con encepado, la resistencia se puede estimar como la resistencia a cortante de las barras utilizadas como conectores. Sin embargo no hay unificación de criterios a la hora de verificar la conexión directa. De un lado, la normativa americana de micropilotes [2] simplemente indica que la conexión debe cumplir con la normativa ACI-318 [17] y que, en caso de duda, se deberán hacer ensayos previos para contrastar la resistencia de la conexión. De otro lado, la normativa española [7] y la europea [8, 16], indican que la conexión directa se debe calcular con la comprobación a rasante en juntas de hormigonado. Por lo que, en la práctica, para estos últimos casos, la carga máxima que resiste la conexión directa se obtiene multiplicando la tensión rasante en la junta lechada-hormigón por la superficie cilíndrica de contacto de la perforación. El problema se reduce pues a establecer el valor de la tensión tangencial o de rasante, ya que la superficie de contacto suele estar bien definida sobre todo si la perforación es por rotación. A esta tensión tangencial se denomina en la normativa española como tensión de adherencia [7, 21].

A simple vista, el procedimiento de cálculo a seguir en el diseño de proyectos de recalce se ve bien definido. Todas las comprobaciones tienen una metodología para su verificación, incluso la conexión directa no parece ser una comprobación limitante ya que la normativa americana la deja a criterio y/o experiencia del ingeniero que haga el diseño. Sin embargo, esto no es así, y la comprobación de conexión directa es la que ha generado más controversia en los últimos años por la evolución de los métodos empleados a la hora de establecer el valor de tensión de adherencia que se comentan a continuación.

Tomando como referencia España, inicialmente se equiparaba la tensión de adherencia a la resistencia a cortante del hormigón [22-24], con una formulación

similar a la recogida en la normativa americana ACI-318 [17]. El uso de la resistencia a cortante de hormigón proporciona unos valores de tensión de adherencia en el rango 0,40-0,60 MPa. Posteriormente, con la aparición de nuevas versiones de la normativa americana ACI 318-02 [25], el autor Rodríguez-Ortiz [26] propuso una formulación que suponía una leve modificación de la resistencia a cortante, que arrojaba valores de tensión de adherencia ligeramente superiores a 0,60 MPa. Mientras que Oteo [21] propuso una fórmula basada en su propia experiencia que proporciona valores entre 0,50-1,20 MPa.

El cambio al uso de la tensión rasante en juntas de hormigonado comienza con la aprobación de la Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera [7], que se encuentra vigente en la actualidad. Esta guía indica que la conexión directa debe cumplir con la EHE-98 [27] y, en concreto, que la tensión de adherencia se debe calcular con el artículo sobre rasante en juntas de hormigonado sin armadura transversal. Esto supuso un cambio sustancial, ya que el cumplimiento estricto de este artículo redujo a la mitad el valor de la tensión de adherencia. De hecho, el rango de variación pasó a 0,20-0,30 MPa, cuando antes con la resistencia por cortante era 0,40-0,60 MPa. La aprobación posterior de la normativa de hormigón armado EHE-08 [19] no supuso ningún cambio significativo, ya que las fórmulas para la comprobación a rasante en juntas de hormigonado seguían siendo las mismas que en la EHE-98 [27].

La normativa europea, tanto la previa de 2006 [16] como la vigente [8], también indica el uso de la comprobación de rasante entre juntas de hormigonado con el Eurocódigo 2 [18]. Por lo que la propuesta metodológica está en línea a lo establecido en España en 2006 [7, 19]. El modelo resistente que propone es una combinación entre cohesión y rozamiento, y el rango de valores que arroja esta formulación es el mismo que el de la normativa española (0,20-0,30 MPa) [7, 19].

Actualmente en España la normativa vigente en materia de estructuras de hormigón armado es el Código Estructural [18], que entró en vigor el año 2021, derogando la EHE-08 [19]. El Código Estructural no supone ningún cambio. De hecho, introduce exactamente el mismo articulado del Eurocódigo 2 sobre cálculo de esfuerzo rasante en juntas de hormigón armado [18]. De este modo, actualmente las normativas española y europea son equivalentes a la hora de comprobar la conexión directa de micropilotes.

Por último, en un intento de hacer que la conexión directa cumpla con la normativa de hormigón armado americana [17], se ha buscado una metodología o formulación que pueda asemejarse al fenómeno físico que se produce en la tensión de adherencia de las perforaciones. No se ha encontrado ninguna, pero se podría interpretar que el valor de la tensión de adherencia se correspondería con la resistencia nominal entre juntas de hormigones ejecutados en momentos diferentes (rasante en forjados unidireccionales), y cuyo valor es constante e igual a 0,552 MPa.

Los cambios normativos de los últimos años han afectado exclusivamente a la tensión de adherencia, y han supuesto una reducción significativa de la resistencia de la conexión directa en los proyectos de recalce en Europa. Sin embargo, en América podría mantenerse, en teoría, el valor de 0,552 MPa (dentro del rango anteriormente utilizado de 0,40-0,60 MPa). Esta reducción en Europa no está debidamente justificada. De hecho, no hay publicaciones experimentales con ensayos de laboratorio que rebatan dichos valores, ni tampoco estudios sobre patologías derivadas por fallos en conexiones directas.

La reducción de la resistencia de la conexión directa a la hora de diseñar los recalces ha tenido consecuencias en las soluciones finales adoptadas. El cambio normativo en Europa ha hecho que esta comprobación resistente pase a ser el eslabón débil de la transmisión de cargas, siendo ahora el factor más limitante. Es decir, ahora, en la mayoría de los casos, es necesario construir un mayor número de micropilotes que con la práctica previa a la Guía de Carreteras [7]. Otra opción para salvar esta restricción sería la construcción de una conexión mediante encepado. Pero ambas soluciones implican finalmente un incremento del coste de los recalces sin justificación previa.

El fenómeno resistente que realmente se produce en la conexión directa ha sido estudiado con experimentación. Los primeros trabajos se han centrado en la resistencia en la interfaz lechada-acero del micropilote [28-30] y se obtuvieron resultados muy dispares. Esto se debe a las grandes diferencias de diseño en las probetas ensayadas, ya que no hay ninguna normativa al respecto. Otros trabajos posteriores se han centrado en la interfaz lechada-hormigón [4, 6], en los que se obtuvieron una gran variabilidad de resultados por las diferencias en el diseño de las probetas. Una importante conclusión común en estos trabajos es que los principales mecanismos resistentes son la adhesión química (cohesión) y el

rozamiento [6]. Este resultado está en línea a la formulación de la comprobación a rasante en juntas de hormigonado en vigas o forjados [8, 20], que considera la resistencia a rasante como la suma de cohesión (adhesión química) y rozamiento. Por lo que en referencia al modo resistente de la conexión directa, los textos normativos están bien fundamentados. Sin embargo, los resultados que proporcionan dichas formulaciones son muy inferiores a los obtenidos en la experimentación (2-25 MPa), independientemente de las probetas ensayadas y de la interfaz estudiada.

A pesar de las discrepancias descritas, no se ha seguido investigando el fenómeno resistente que se produce en la conexión directa. Además, no hay referencias relacionadas con el sobrecoste que ha supuesto este cambio normativo, ni tampoco hay evidencias que el cambio sea por motivos de seguridad. Si bien la investigación mediante experimentación es costosa y lenta, sobre todo si los ensayos son con probetas a escala real, tampoco se han encontrado trabajos que aborden esta problemática mediante simulación numérica. De hecho, actualmente no hay un modelo físico, debidamente desarrollado y fundamentado en el campo de la mecánica de medios continuos, para determinar la tensión de adherencia [31]. Aun así, actualmente, la conexión directa continúa siendo la práctica más generalizada en los recalces de estructuras y, en Europa, la comprobación se sigue realizando con la resistencia a rasante en juntas de hormigonado.

Esta situación es la que ha motivado la realización de esta tesis doctoral que pretende, en primer lugar, arrojar un poco de luz sobre esta temática desde varios puntos de vista. Desde un punto de vista económico conocer las repercusiones derivadas de este cambio normativo. Desde un punto de vista experimental, comprobar con ensayos de laboratorio si los resultados obtenidos están en consonancia con las formulaciones de diseño. Y, desde un punto de vista numérico, plantear un modelo de simulación computacional que contraste los mecanismos resistentes de la conexión. Además, en segundo lugar, y como parte más novedosa de esta tesis doctoral, se propone un nuevo sistema de conexión directa que sea más resistente que el convencional y cuya ejecución sea rápida y sencilla. Así, de esta forma, se va a poder dotar al mundo de la ingeniería de las cimentaciones especiales con micropilotes, de otra opción a la hora de realizar la conexión directa.

II –OBJETIVOS DEL ESTUDIO

II - OBJETIVOS DEL ESTUDIO

Las comprobaciones de cálculo que se realizan en el diseño de recalces con micropilotes van orientadas a que exista una continuidad en la transmisión de cargas desde el suelo a la estructura o viceversa. Para la mayoría de estas comprobaciones es posible modificar la capacidad resistente de los elementos estructurales o zonas de contacto de modo que se consiga un diseño óptimo.

La resistencia al hundimiento o arranque de los micropilotes se puede incrementar con una mayor longitud y diámetro de los mismos. También es posible cambiar el sistema de inyección, de modo que se emplee uno que aumente el rozamiento suelo-estructura. Para mejorar la resistencia a rotura horizontal se puede aumentar el diámetro del micropilote y emplear una armadura tubular de mayores dimensiones. La resistencia a compresión-tracción del propio micropilote se incrementa con una sección de mayores dimensiones y/o incrementando la calidad de los materiales. Si el problema resistente fuera en la interfaz lechada-acero, hay que incrementar la rugosidad en la cara del acero, por ejemplo, soldando barras corrugadas de acero a la armadura tubular o cambiando el tipo de armadura tubular.

Sin embargo, para el caso concreto de la comprobación de la conexión directa, es especialmente complicado aumentar la resistencia de la misma. Ésta se calcula multiplicando la tensión de adherencia por la superficie de contacto, y los valores de ambos términos de la multiplicación dependen de las características de la cimentación existente que no se puede modificar. De un lado, la tensión de adherencia depende de la resistencia característica del hormigón de la cimentación. Por otro lado, la superficie cilíndrica de contacto está condicionada por el canto de la cimentación. Por lo tanto, si se quiere mejorar la conexión, la única opción es recurrir a sistemas complejos y caros. Esencialmente son tratamientos superficiales que aumenten la rugosidad en la perforación, o mediante el uso de barras pretensadas que compriman la cimentación [6].

Como ya se ha adelantado, los cambios normativos en las últimas dos décadas han supuesto que la resistencia de la conexión directa se reduzca a la mitad, pasando a ser la comprobación limitante en el diseño de los recalces. Este

cambio ha generado gran incertidumbre en los profesionales del sector, que no terminan de asumir el cambio por la falta de justificación científica. Esto ha motivado la búsqueda de otras metodologías de cálculo u otras técnicas para materializar la conexión directa con un sobre coste asumible. Respecto a las nuevas metodologías o formulaciones matemáticas, no hay nada específico de la conexión directa y, respecto a las técnicas de conexión directa, no se ha encontrado ninguna técnica o tecnología que dé respuesta a esta problemática a un coste asumible. Esta situación es la principal motivación de esta tesis doctoral, en la que se estudian, en profundidad, todos los aspectos de la conexión directa, y se propone y testa un nuevo sistema de conexión directa. Para todo ello, se han planteado varios objetivos que se describen a continuación.

2.1. JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA DEL ESTUDIO.

El primer objetivo (O1) es analizar las repercusiones económicas que ha supuesto el cambio de método a la hora de calcular la tensión de adherencia, y que ha reducido significativamente la resistencia de la conexión directa. Este análisis pretende, además de establecer los incrementos de costes en los proyectos de recalces según las características de las cimentaciones, justificar en qué casos la comprobación de la conexión directa es limitante y si es posible establecer un valor a partir del cual esta comprobación deja de serlo.

2.2. RESISTENCIA DE LA CONEXIÓN DIRECTA CONVENCIONAL.

El segundo objetivo (O2) es conocer el valor real de la tensión de adherencia mediante experimentación en laboratorio. Para ello, se han diseñado unas probetas a escala real que simulan la conexión directa entre micropilotes y cimentación existente. Las probetas se cargan hasta la rotura mediante un ensayo de empuje del micropilote sobre la cimentación, lo que permite conocer la capacidad resistente de la unión y establecer un valor medio de tensión de adherencia a lo largo de la perforación. Los ensayos se enmarcan dentro de un Diseño de Experimentos (DoE) con el que se pretende analizar también la influencia de dos factores: (i) el diámetro de la perforación, y (ii) la resistencia a compresión del hormigón de la cimentación.

2.3. NUEVO SISTEMA DE CONEXIÓN DIRECTA.

El tercer y principal objetivo de esta tesis (O3) es diseñar y testar la validez de un nuevo sistema de conexión directa. Este nuevo sistema cambia los mecanismos resistentes habituales de contacto por otro de punzonamiento con el fin de aumentar la resistencia de la conexión directa convencional. La nueva conexión se diseña con un sobre-ancho justo antes de la zona de conexión convencional, lo que evita el deslizamiento del micropilote en la perforación (Ver Figura 4). Por la forma que adquiere la nueva conexión, se ha denominado por conexión directa con “sombbrero”. Ahora, en teoría, la conexión resiste en primer lugar por el contacto del sobre-ancho (o sombrero) de la cabeza del micropilote sobre el fondo de la cimentación, zona sombreada en color azul. Antes de deslizar el micropilote por la perforación, zona sombreada en naranja, se espera la rotura por punzonamiento del sombrero de la cabeza. Las probetas, al igual que antes, se cargan hasta la rotura mediante un ensayo de empuje del micropilote sobre la cimentación.

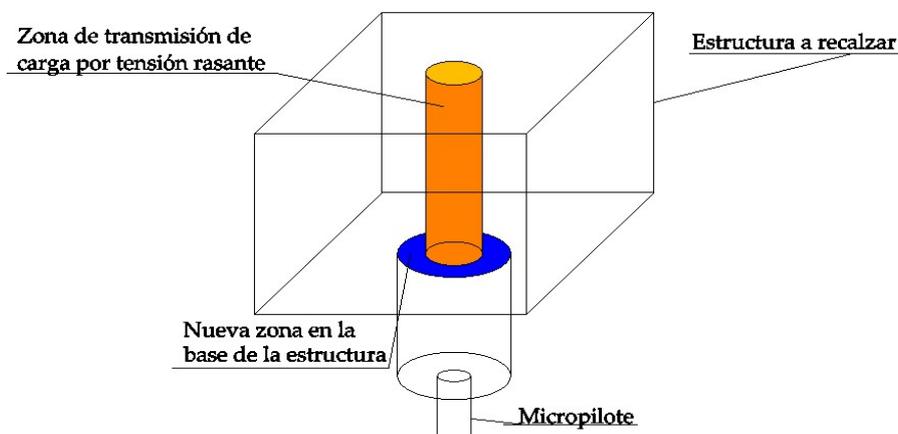


Figura 4. Superficies de contacto micropilote-cimentación existente en conexiones directas con sombrero. Fuente: Elaboración propia.

Para analizar la resistencia de la nueva conexión se ha desarrollado un plan experimental con probetas a escala real en el que se han testado varios diseños. Estas probetas forman parte de un DoE, junto con los ensayos anteriores sin sombrero, en el que se analiza la influencia de varios factores a niveles diferentes:

(i) diámetro de la perforación, (ii) resistencia a compresión del hormigón, (iii) existencia o no del sombrero, (iv) diámetro del sombrero, (v) armado de la zona del sombrero. La finalidad de este plan experimental es validar el nuevo sistema de conexión e intentar obtener un diseño óptimo del mismo.

2.4. SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LAS CONEXIONES ENSAYADAS.

El cuarto objetivo (O4) es realizar una simulación numérica de los ensayos realizados en el laboratorio con el fin de contrastar los resultados. La simulación numérica se realiza con un software de elementos finitos comercial, con el fin de describir el estado tensional teórico que se genera en las superficies de contacto y dentro de los diferentes materiales. Esta descripción cualitativa, y cuantitativa, será de ayuda a la hora de identificar las zonas de iniciación de rotura, justificar el nivel de carga soportado por cada probeta, incluso ser un punto de partida a la hora de proponer futuras metodologías de cálculo específicas para las dos tipologías de conexión directa ensayadas.

III – ESTADO DEL ARTE

III - ESTADO DEL ARTE

Los micropilotes son elementos estructurales que se clasifican como cimentación especial profunda. Conectan las zapatas o losas más superficiales, donde descansan los muros y pilares de las estructuras, con los estratos más profundos del suelo. El estado tensional que se genera, tanto en el suelo como en las diferentes partes de las estructuras conectadas, es complejo, por lo que es necesario prever tanto el comportamiento estructural de los diferentes elementos como la respuesta de la cimentación en su conjunto respecto al tipo de suelo en el que se han implantado. Además, su empleo puede tener diferentes objetivos, como es la rehabilitación de una cimentación existente, la creación de una nueva cimentación, o mejorar la estabilidad de un suelo. Sin olvidar que su ejecución, ya sea por la técnica a utilizar o los materiales a emplear, dependen del tipo de suelo en el que se vayan a insertar. Estos motivos hacen que sean muchos los aspectos a tener en cuenta a la hora de diseñar y ejecutar micropilotes.

Al revisar las principales investigaciones relacionadas con los micropilotes, aparecen una gran variedad de temas, áreas o campos de estudio, debido al elevado número de aspectos o características a considerar en su diseño y ejecución. En primer lugar se hace referencia a aquellos estudios en los que se hacen recopilaciones históricas y se presentan casos de estudio singulares. La técnica de los micropilotes tiene un elevado carácter práctico y está íntimamente relacionados con la ingeniería del terreno, por lo que gran parte del conocimiento aplicado se ha transmitido mediante descripciones de experiencias vividas en la ejecución de casos reales.

En este campo destaca la revisión general realizada por Bruce [3]. En ella se analizan 20 casos prácticos con el fin de obtener una clasificación de los tipos de micropilotes, de los diferentes métodos de ejecución, de las principales aplicaciones, de su diseño tanto de forma individual como en grupo, de sus costes asociados y de los principales problemas constructivos. Recientemente, Xie [32] publicó una recopilación histórica de la relación de los micropilotes con suelos expansivos y salinos, para que sirviera de base a la investigación teórica y a sus aplicaciones en ingeniería.

Como casos de estudio, destaca el trabajo de Babu [33], donde analizó el caso real de un recalce de una estructura mediante micropilotes de 100 mm y 4 m de longitud, en el que se estudiaba la mejora en la capacidad portante de las zapatas recalzadas. Actualmente, otro caso de estudio singular es el presentado por Elsawwaf [34]. En este trabajo se presenta el recalce de un edificio de varias plantas en Egipto. La ejecución de los micropilotes detuvo el proceso de basculación que estaba sufriendo. Ese hecho se pudo confirmar gracias a las mediciones in situ que se estuvieron realizando. Por último, destacar el trabajo presentado por Pere [35], donde analizó el motivo de fallo de una pantalla de micropilotes que se derrumbó en la fase de excavación interior, investigando los posibles motivos de este suceso.

Los trabajos de investigación más habituales son los que analizan un aspecto concreto de los micropilotes. Dentro de estos últimos, los que estudian la relación entre micropilote y suelo que lo rodea (suelo-micropilote) son los que más abundan. Generalmente buscan conocer la carga axial que puede transmitir el micropilote al suelo con un asiento despreciable. El enfoque general en estos estudios es la experimentación realizando pruebas de carga en estructuras reales (in situ) o ensayos de laboratorio (probetas). Además, en los últimos años, desde la expansión de los métodos numéricos, algunos de estos estudios de interacción suelo-micropilote se han complementado con modelizaciones mediante elementos finitos. Para completar la interacción suelo-micropilote, y gracias a los avances informáticos, se ha empezado a estudiar el efecto de los sismos en las cimentaciones con micropilotes.

En el campo de estudio suelo-micropilote mediante experimentación in situ se enmarcaría el estudio realizado por Castro [36], que analizó la carga admisible de los micropilotes en terrenos tropicales compuestos por arcillas arenosas y limos arenosos. Para ello realizó unas pruebas de carga a micropilotes ejecutados y compararon la resistencia real con la que se obtiene aplicando las formulaciones de carga admisible de la Administración Federal de Carreteras FHWA [2]. Siguiendo en la misma línea de investigación, Hany [37] estudió la carga admisible de los micropilotes ejecutados en arcillas blandas, mediante la realización de pruebas de carga en una cimentación cuadrada, con y sin micropilotes, comprobando la capacidad de transmisión de carga al terreno a lo largo del tiempo, nada más ejecutar la cimentación, a los 6 meses y a los 5 años.

Por su parte, y relacionado con los anteriores estudios, Bellato [38] realizó un análisis del comportamiento de los micropilotes en suelos gruesos heterogéneos con matriz fina, mediante una serie de pruebas de carga en micropilotes ejecutados en suelos de Italia con estas características, comparando los resultados obtenidos con las cargas teóricas mediante la utilización de métodos de cálculo comunes. En este campo destacaría la investigación realizada por Abd [39], ya que además de analizar el comportamiento de micropilotes auto-perforantes en suelos cohesivos mediante la ejecución de pruebas de carga, utilizó los resultados para calibrar un modelo numérico con el que predecir la carga admisible.

En el grupo que han utilizado la experimentación en laboratorio para conocer la interacción suelo-micropilote se encuentra el estudio realizado por Malik [40]. En este trabajo analizó la capacidad portante de las cimentaciones superficiales cuando se ejecutan micropilotes a su alrededor. Para ello, realizó un experimento en laboratorio que determinó que el diámetro de los micropilotes y su separación son parámetros influyentes en la mejora de la capacidad portante. Relacionada con la investigación anterior, Young-Eun [41] analizó también el aumento de la capacidad de carga de una cimentación después de realizar una contención lateral con micropilotes, para lo que se realizaron pruebas en laboratorio a escala 1/20, comprobando el aumento de la capacidad de carga que se consigue y la reducción de asentos, en función del aumento de la rigidez de los micropilotes utilizados.

Entre los estudios que utilizan un enfoque numérico para la interacción suelo-micropilote se encuentra el trabajo de Petrenko [42], que investigó el estado de deformación del suelo y los micropilotes cuando se realiza una mejora del terreno. El trabajo se centra en la heterogeneidad entre los materiales resultantes después de la mejora. La herramienta empleada es la modelización numérica mediante elementos finitos de 20 modelos suelo-micropilote. Otra investigación es la realizada por Ahmed [43], que estudió la capacidad de transmisión de carga de micropilotes ejecutados con inyección repetitiva. Para ello empleó la modelización numérica mediante el programa de elementos finitos ABAQUS, obteniendo la influencia teórica que sobre la transmisión de carga tienen los parámetros: longitud, diámetro, lechada y el tipo de suelo. Siguiendo la misma línea Pourya [44] analizó la interacción de la cimentación con el terreno al realizar el recalce con micropilotes de una estructura existente, realizando una simulación

numérica mediante PLAXIS con elementos finitos. Obtuvo la capacidad de carga de la cimentación en función de 4 parámetros de los micropilotes: separación, diámetro, inclinación y longitud.

Respecto a la influencia del sismo, el trabajo realizado por Souli [45] estudió el comportamiento de micropilotes inclinados frente a acciones sísmicas, simulando el sistema suelo-micropilotes-estructura con un modelo tridimensional. Marwan [46] también estudió el comportamiento de los micropilotes frente a sismos mediante una simulación con elementos finitos. El objetivo del estudio era conocer el tipo de conexión micropilote-cimentación que proporciona una mejor respuesta dinámica. Concluyó que una conexión articulada reduce la fuerza axial de los micropilotes. Por otro lado, Keivan [47] analizó la influencia de diferentes factores en la rehabilitación de cimentaciones frente a sismos en suelos arenosos. Observó que las actuaciones reducirían las vibraciones en la estructura, tanto horizontales como verticales. Por su parte, Stay [48] analizó la mejora que se produce en suelos licuefactables al ejecutar micropilotes con inyección de lechada de cemento y como dicha mejora permite que el terreno se comporte adecuadamente durante los terremotos.

También hay estudios relacionados con los materiales empleados, fundamentalmente sobre las lechadas de cemento y los aditivos que se pueden incluir. Uno de estos trabajos es el realizado por Aboutabikh [49], quien estudió el comportamiento estructural de micropilotes ejecutados con lechadas que contenían materiales reciclados. En este caso en concreto el material reciclado empleado fue el residuo de arenas bituminosas tratadas. Otro estudio en esta misma línea es el realizado por Flor [50], en el que se realizó una comparativa de la durabilidad de la lechada de cemento. En este caso concreto, se comparó una lechada de cemento con cenizas volantes con otra realizada exclusivamente con cemento Portland.

Respecto al comportamiento estructural, las principales investigaciones abordan esencialmente aspectos complejos que difícilmente se pueden comparar a estructuras no enterradas. Por ejemplo, no hay investigaciones sobre el método de cálculo de la propia resistencia de los micropilotes. Se viene considerando que tienen un comportamiento similar a los pilares y se asumen las hipótesis de resistencia de materiales (Saint-Venant y Navier-Bernoulli). Es decir, el método de cálculo general que se aplica considera que los materiales en contacto se

deforman solidariamente. Otro ejemplo es la conexión en estructuras de obra nueva. No se han encontrado estudios científicos relevantes. Hay recomendaciones en textos normativos para definir cómo queda embebida la conexión en la cimentación de modo que se garantice teóricamente la resistencia de la misma [2].

Sin embargo, dentro de las investigaciones relacionadas con el comportamiento estructural destacan las que abordan el estudio de los esfuerzos laterales que soportan los micropilotes cuando se emplean para estabilizar suelos, o el estudio de la estabilidad por pandeo, al tratarse de un elemento estructural muy esbelto. Los métodos o enfoques habitualmente empleados en estos campos han sido la modelización numérica y los ensayos de laboratorio. Otro importante foco de investigación es el estudio de la resistencia en la conexión micropilote-cimentación existente, conexión habitual en proyectos de rehabilitación o reacondicionamiento de cimentaciones. Esta conexión es la que presenta un estado tensional más complejo, ya que la transmisión de esfuerzos se realiza exclusivamente por contacto entre diferentes materiales. La metodología aplicada en la literatura científica ha sido siempre la experimentación en laboratorio, analizando de forma cualitativa la influencia de ciertos parámetros. Por último, merece la pena comentar que la normativa americana admite cualquier tipo de conexión (directa o con encepado) si ha sido previamente testada con éxito, por lo que se pueden encontrar en internet algunas presentaciones en congresos sobre experiencias de test realizados in situ para casos muy concretos que difícilmente pueden generalizarse (International Society for Micropiles).

Comenzando por las investigaciones sobre esfuerzos laterales, y su uso para evitar estabilizar suelos, se incluye el trabajo de Wei [51]. Este trabajo estudia la resistencia de los micropilotes a esfuerzos laterales de momento flector y cortante. Realiza un estudio comparativo combinando simulación numérica de los micropilotes mediante el programa ABAQUS y ensayos de laboratorio a micropilotes con y sin armadura. En este mismo campo está el estudio de Shi [52], que analizó el comportamiento de las pantallas de micropilotes para contenciones de deslizamientos de terreno. El enfoque que empleó está basado en el modelo de Winkler [53], por lo que asignaron coeficientes de rigidez a los resortes que son los micropilotes trabajando a flexión. Liu [54] estudió una contención mediante una doble pantalla de micropilotes de un deslizamiento en Xituo por medio de

una modelización numérica mediante el programa comercial de elementos finitos especializado en suelos FLAC3D [55]. En este estudio quedaron registrados diferentes parámetros de la pantalla como desplazamientos, momentos flectores y cortantes. Wang [56] estudió el deslizamiento de Tizicao. En este trabajo se analizaron las mejoras que se producen mediante la ejecución de pantallas de micropilotes solos y con anclajes de cable. Para ello, la simulación numérica también fue con el programa de elementos finitos comercial FLAC3D. Por su parte, Xiao [57] estudió el uso de micropilotes para el control de deslizamientos de ladera en el sur de Shaanxi, estableciendo un modelo numérico con FLAC3D. Mientras que Wan-li [58] analizó la capacidad horizontal de los micropilotes en refuerzos de taludes, mediante el análisis numérico con elementos finitos.

Respecto a la estabilidad de los micropilotes existen algunas investigaciones, aunque no son tan numerosas como las dedicadas al estudio de la interacción suelo-micropilotes. La estabilidad por pandeo puede ser crítica, dada la gran esbeltez que tienen los micropilotes. Si bien es un elemento constreñido por el terreno, no siempre se puede asegurar su estabilidad. Cadden [59] fue el primero que analizó este fenómeno. En los primeros años del uso de micropilotes, estos tenían una carga admisible pequeña ya que los diámetros de perforación utilizados también eran pequeños. Con la aparición de micropilotes de gran diámetro, hasta diámetros de 300 mm, las cargas admisibles pueden alcanzar las 300 Tn. Este hecho fue el impulsor de este estudio, poniendo de manifiesto las posibles limitaciones de longitud de los micropilotes. Bastantes años después, Gatto [60] analizó la influencia de la esbeltez en el comportamiento de los micropilotes y cómo afectaba a la carga admisible en función del diámetro de perforación en el terreno. Este estudio se basó en el calibrado de modelos numéricos que reproducían el comportamiento de los micropilotes. Para realizar el calibrado se dispusieron de los resultados de pruebas de laboratorio sobre micropilotes en terrenos blandos. Concluyeron que en terrenos duros no influye el pandeo en la carga admisible y que, por el contrario, en terrenos blandos sí que lo hace dependiendo del diámetro de los micropilotes. Se estableció que no había problemas de estabilidad para esbelteces geométricas inferiores a 150.

Por último, hay que destacar especialmente las investigaciones relacionadas con la conexión directa en cimentaciones existentes, al ser ésta la temática de la tesis doctoral. En primer lugar, comentar que el fallo estructural en este tipo de

conexión se produce en las superficies de contacto entre materiales: lechada-acero y lechada-material de la cimentación. Generalmente las cimentaciones son de hormigón armado o en masa, pero también existen de mampostería. Es importante diferenciar los planos de contacto, ya que las investigaciones se suelen centrar en alguno de ellos. Por ejemplo, una de las primeras investigaciones realizadas por Gómez [28] se centraba en la resistencia acero-lechada, incluyendo también ensayos para evaluar la resistencia acero-hormigón. Para ello se estudiaron 4 tipos de modelos de micropilotes con distintas rugosidades en el acero que fueron ensayados a compresión. En todos los casos se utilizó un dado de hormigón que representaba la zapata existente. Los micropilotes que se ensayaron fueron: i) micropilotes con armadura lisa empotrada directamente en el dado de hormigón consiguiendo una unión monolítica; ii) micropilotes con armadura tubular lisa insertados en un hueco perforado por percusión que atraviesa totalmente el dado de hormigón y posteriormente se rellena con lechada de cemento; iii) micropilotes con armadura texturizada con cordones de soldadura en forma de anillo; iv) y micropilotes con barra roscada. El procedimiento de preparación de las probetas tipo ii), iii) y iv) es el mismo, solamente cambia el tipo de armadura insertada en el micropilote. Respecto a la perforación por percusión, hay que destacar que deja una superficie de contacto muy rugosa, por lo que se fuerza o intenta garantizar que el fallo se produzca en la interfaz de contacto acero-lechada. Una de las principales conclusiones de esta investigación es que describe los mecanismos resistentes en esta interfaz: adhesión química y rozamiento. Otra es que la capacidad de la conexión depende de la resistencia a compresión de la lechada y del hormigón de la zapata, así como de la disminución del diámetro del agujero. Además, la resistencia entre acero-hormigón resulta menor que en el caso acero-lechada. La tensión de adherencia que se alcanzó en los 4 tipos de uniones estudiadas varió entre 2,34 y 3,93 MPa. Los mecanismos de fallo o rotura fueron frágiles, al sufrir un fuerte desplazamiento relativo de la armadura dentro de la lechada o del hormigón, según el caso. Las curvas carga-desplazamiento obtenidas solamente tienen rama de ascenso, aunque después de la rotura la unión siguió manteniendo una cierta resistencia residual. Además, el tipo de roturas producidas confirma que los valores obtenidos están vinculados a la resistencia en la interfaz lechada-acero.

En línea con el trabajo de Gómez [28], Veludo [6] estudió la resistencia en la interfaz acero-lechada bajo varios supuestos de confinamiento lateral. Para ello, se llevaron hasta la rotura 30 muestras. Los diferentes grados de confinamiento los proporcionaron los materiales utilizados como “moldes” para realizar las probetas. 10 muestras se prepararon utilizando tubos de presión de PVC PN10, y como armadura del micropilote se usó tubería de acero ST52 con 3 diámetros diferentes. Otras 10 muestras se prepararon como las anteriores, pero en lugar de tubos de PVC se usaron tubos de acero. Las últimas 10 muestras se prepararon con cubos de hormigón de dimensiones 450x450x500 mm y una resistencia a compresión simple de 32,5 MPa armados en la cara inferior con una parrilla de 5 barras corrugadas BS400 de diámetro 8 mm en cada lado. Para la armadura del micropilote también se usó tubería de acero ST52 con 3 diámetros diferentes. Las principales conclusiones fueron: i) a mayor grado de confinamiento mayor tensión de adherencia, ii) la tensión de adherencia no varía con la longitud de empotramiento y iii) la tensión de adherencia aumenta con el descenso del diámetro del agujero. Los ensayos proporcionaron una respuesta dúctil, con unas gráficas tensión-deformación sin saltos bruscos en los desplazamientos que contrastan con las obtenidas por Gómez [28]. Esto pudo deberse a que las probetas no estaban totalmente perforadas, y a que los ensayos se hicieron por desplazamiento. La tensión de adherencia obtenida varió entre 6,23 y 8,33 MPa. Al igual que en el estudio de Gómez [28], estos resultados están vinculados a la resistencia en la interfaz acero-lechada, por lo que no son extrapolables a la tensión de unión entre lechada y hormigón.

Veludo [29] completó su investigación anterior analizando la resistencia de la conexión directa en la interfaz lechada-hormigón. Se elaboraron 18 muestras compuestas por micropilotes con armadura tubular en los que se incrementaba la rugosidad mediante anillos concéntricos realizados con soldadura. Además, las perforaciones realizadas en dados de hormigón armado por rotación fueron tratadas para aumentar la rugosidad. En estas probetas se emplearon diferentes grados de confinamiento mediante el uso de 4 barras pretensadas tipo Dywidag. Las armaduras tubulares empleadas tenían 60 mm de diámetro exterior y 6 mm de espesor con una calidad de acero N80. La lechada de los micropilotes tenía una resistencia a compresión simple de 53,4 MPa. El hormigón de las zapatas tenía una resistencia a compresión simple de 32,4 MPa y unas dimensiones de

450x450x550 mm. Se emplearon tres diámetros de perforación diferentes (92, 102 y 122 mm), que no llegaban a atravesar totalmente el dado, con 2 acabados diferentes de las paredes de la perforación (cepillado con alambre y ranurado), y 3 longitudes de perforación del dado de hormigón (200, 275 y 350 mm). Cada una de las muestras se llevó a rotura por compresión en una prensa de 500 Tn, aplicando carga por desplazamiento con una velocidad de 0,025 mm/s, obteniendo unas gráficas tensión-deformación continuas sin saltos bruscos. Por lo que al igual que en el estudio anterior, se produjeron roturas dúctiles. Las principales conclusiones fueron que la resistencia de la unión aumenta linealmente con el nivel de confinamiento, pero con una diferencia, que la longitud de empotramiento sí influye en la tensión de adherencia. Aunque también admiten que en realidad puede variar, ya que no se compararon con niveles de confinamiento iguales. Los valores de tensión de adherencia obtenidos son muy elevados, entre 4,71 y 10,79 MPa, ya que se aplican mejoras en la rugosidad de la perforación y se aplica pretensado a la zapata.

Por último, Pachla [4] estudió el comportamiento de la tensión de adherencia entre micropilotes y cimentación existente en muestras de hormigón en masa, hormigón armado y ladrillo, realizando pruebas a compresión y a tracción. Elaboró 70 probetas de hormigón armado con unas dimensiones de 500x500x500 mm con un hormigón c20/25. De las 70 muestras, 40 contaban con un refuerzo en las esquinas mediante un perfil de acero de 25x25x3 mm, mientras que las 30 restantes no tenían dicho refuerzo. Las 70 probetas se perforaron por rotación dejando un hueco liso de 225 mm de diámetro que atravesaba las probetas totalmente. Posteriormente los micropilotes se crearon con una armadura de 4 barras de diámetro 16 mm y el hueco fue rellenado con lechada de cemento con una relación agua/cemento en peso de 0,5. También se construyeron 37 probetas de ladrillo de dimensiones 520x520x520 mm y 28 de hormigón en masa c12/15 con unas dimensiones 500x500x500 mm. Estas 37+28 probetas se perforaron mediante rotación con un diámetro de 150 mm. Los micropilotes se crearon uniendo 4 barras de diámetro 14 mm en forma de jaula y la misma lechada que antes. La superficie de las perforaciones fue lisa, ya que se hicieron mediante rotación, por lo que se esperaba el fallo en la zona de contacto lechada-hormigón o lechada-ladrillo. A diferencia de Veludo [29], los ensayos se realizaron controlando la carga en lugar del desplazamiento, pero no hay mucha

información detallada al respecto. Los resultados confirmaron que el fallo tiende a producirse en la superficie de contacto de forma frágil, ya que las curvas de carga-deformación que obtuvieron sólo tenían rama de ascenso. La tensión de adherencia media obtenida varió entre 0,85 y 2,38 MPa, según el material empleado. Y una de las principales conclusiones fue que la resistencia de la unión se incrementa con la mejora de la calidad del material de la cimentación, al proporcionar éste un mayor grado de confinamiento. Comprobó que los ensayos a tracción proporcionan una mayor tensión de adherencia que los de compresión en las probetas de hormigón, al contrario que sucede en las de ladrillo. Pero, lo más importante es que, dado el elevado número de ensayos realizados, pudo estimar las distribuciones de probabilidad para las tensiones de adherencia entre lechada y los materiales empleados.

En resumen, existen pocas investigaciones científicas relacionadas con la conexión directa de micropilotes con estructuras de hormigón. Y son minoritarias las que estudian la interfaz lechada-hormigón de la perforación. Por el contrario, hay una gran variedad de investigaciones sobre la interacción suelo-estructura, seguramente fruto de la gran incertidumbre asociada al mundo de la geotecnia. Incluso hay numerosas investigaciones que aplican la simulación numérica mediante el uso de programas comerciales. Sin embargo, no se han encontrado trabajos que analicen la conexión directa mediante la simulación numérica, aunque sea simplemente desde una perspectiva cualitativa.

IV - METODOLOGÍA

IV -METODOLOGÍA

Esta tesis estudia la conexión directa de los micropilotes en recalces de hormigón. Su principal motivación es el cambio normativo en la comprobación resistente en esta unión que ha reducido su capacidad a la mitad sin la adecuada justificación científica. En este sentido, la revisión bibliográfica ha mostrado que existen muy pocas investigaciones sobre esta temática, indicando a su vez que no hay una formulación específica para el fenómeno resistente que se genera en este tipo de conexión.

Para dar respuesta a esta problemática se aborda el estudio desde tres perspectivas interconectadas. En primer lugar, se desarrolla un exhaustivo estudio económico sobre la influencia que la conexión directa tiene sobre los presupuestos de los proyectos de recalces. En segundo lugar se estudia la resistencia de la conexión directa mediante un extenso programa experimental en laboratorio. Aquí se incluye tanto el estudio de la conexión directa convencional como el del nuevo sistema de conexión propuesto. En tercer lugar la simulación numérica se emplea para describir los modos de fallo/rotura obtenidos en los ensayos de las conexiones directas, y para explicar los mecanismos resistentes movilizados según el tipo de conexión.

Así, con estas tres perspectivas, el problema de la conexión directa queda definido de forma integral. El estudio económico sirve para revelar la importancia relativa de la resistencia de la conexión directa en el presupuesto de los proyectos de recalces, y para indicar el rango de valores económicamente óptimos de dicha resistencia en términos de tensión de adherencia. La experimentación proporciona los valores reales de la resistencia de las conexiones, y muestra los mecanismos resistentes y los modos de fallo que se pueden producir. Por último, la simulación numérica es un nexo entre el estado tensional que se produce en las diferentes conexiones y los modos de fallo.

La Figura 5 resume el esquema metodológico seguido en la presente tesis doctoral.

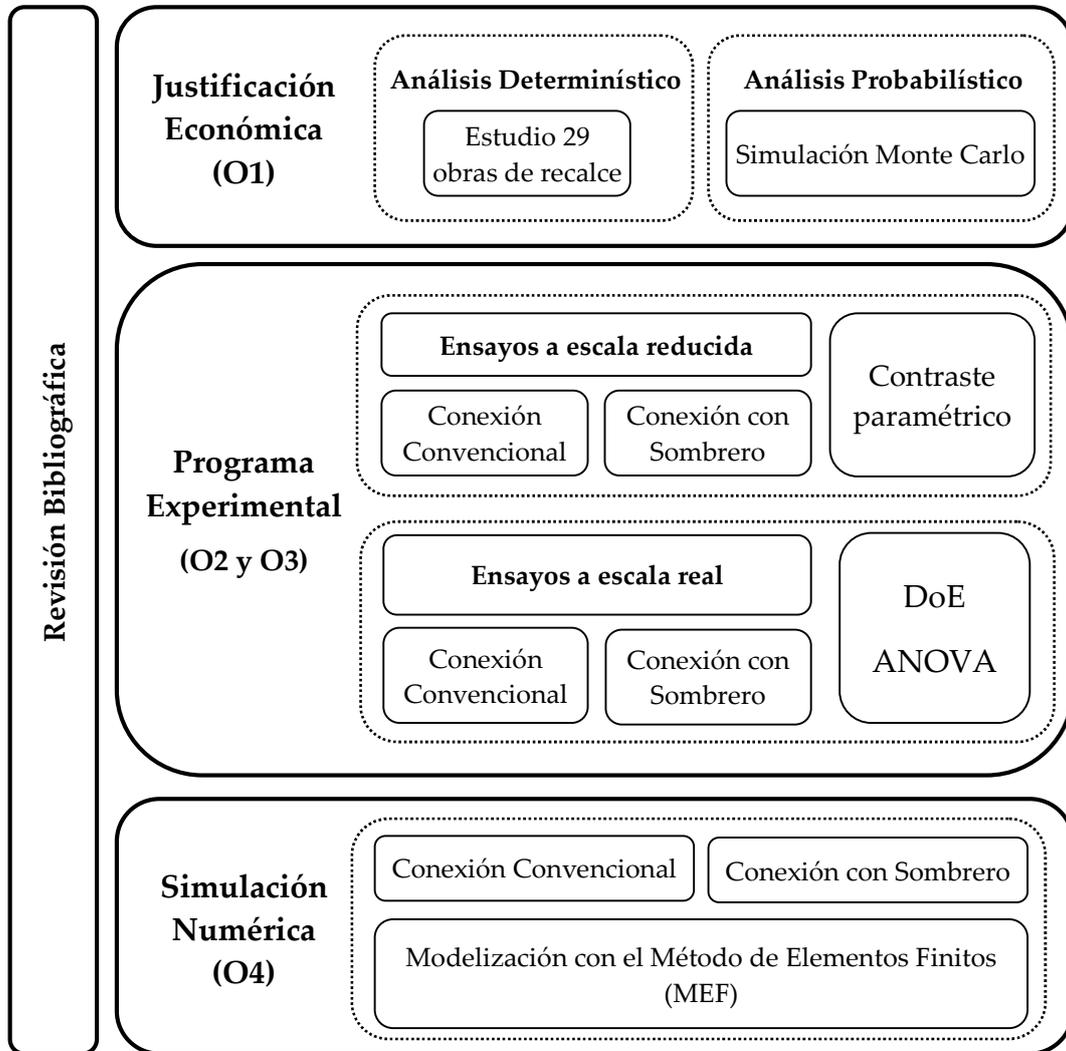


Figura 5. Esquema metodológico seguido en la tesis doctoral y su relación con los objetivos perseguidos.
Fuente: Elaboración propia.

4.1. ESTUDIO ECONÓMICO.

El estudio económico analiza la influencia de la conexión directa en el presupuesto de los proyectos de recalce y pretende dar respuesta al primer objetivo de esta tesis (O1). Este estudio se resume en cuatro partes. La primera es la metodología de cálculo seguida a la hora de definir los recalces, que sirve para mostrar las diferentes comprobaciones a cumplir en el diseño de este tipo de proyectos. En esta parte se ha visto adecuado incluir las principales formulaciones que se han usado, con el fin de mostrar las hipótesis asumidas en los modelos de cálculo. La segunda es una revisión bibliográfica de las diferentes formulaciones utilizadas para estimar la tensión de adherencia con la que se calcula la resistencia de la conexión directa. En la tercera se describe la Simulación Monte Carlo, método seleccionado para el análisis de sensibilidad. En cuarto lugar se describen las principales características de los proyectos analizados incluyendo un resumen de los datos usados.

4.1.1. Diseño de los proyectos de recalce.

El uso de micropilotes está extendido a nivel mundial y en las últimas décadas se han venido desarrollando, y actualizando, diferentes normativas para establecer los criterios mínimos a cumplir tanto en el proceso de diseño como de ejecución [2, 3, 7-9, 11-16]. La revisión de estas normativas ha puesto de manifiesto que las principales comprobaciones a realizar en el diseño de recalces, junto con los métodos de cálculo, son básicamente los mismos en todas ellas. Por este motivo, se ha optado por seguir las indicaciones de la Guía de Carreteras [7]. A partir de esta normativa española se ha desarrollado un algoritmo de diseño de recalces sujeto a ciertas restricciones. Pero, antes de describir su funcionamiento, se comentan brevemente los aspectos principales a tener en cuenta a la hora de definir el recalce de una estructura. Muchos de estos aspectos terminarán siendo restricciones en dicho algoritmo.

El diseño del recalce comienza con los esfuerzos de diseño que actúan sobre la cimentación que se va a recalzar. Los esfuerzos provienen de la envolvente resultante de las combinaciones de cargas mayoradas según su naturaleza [19]. Es

decir, en los cálculos se utilizan los esfuerzos concomitantes máximos de diseño: momento flector (M_d), cortante (V_d), y axil (N_d). Pero, por simplicidad, y dado que en los casos de estudio los esfuerzos de cortante y de momento flector son despreciables frente al axil, sólo se ha tenido en cuenta los axiles (N_d).

A partir de estos esfuerzos, del número y de la distribución geométrica de los micropilotes propuestos, se obtienen los esfuerzos axiles que actuarán sobre ellos. Este cálculo se realiza aplicando equilibrio de fuerzas en un sólido rígido. Todos los micropilotes de un mismo elemento de cimentación tendrán las mismas dimensiones, tomando como axil de referencia el del micropilote más cargado (Q_m). Por lo que la longitud (L), diámetro de perforación del micropilote (D_m) y armado serán los mismos. Además, se procura una distribución de micropilotes lo más simétrica posible, con el fin de que la posible resultante de las fuerzas pase cerca del centro de gravedad de la cimentación.

La zona de trabajo en los recalces suele tener limitaciones de gálibo, por tratarse de edificios que ya estaban construidos, siendo habitual el uso de equipos de perforación pequeños. Por este motivo, los diámetros máximos habituales de los micropilotes (D_m) se encuentran en el rango 150-180 mm.

Es imprescindible conocer algunas características relacionadas con la cimentación existente. En concreto las dimensiones de la cimentación, su canto (h) y la resistencia a compresión simple del hormigón que lo compone (f_{ck}). Respecto a los micropilotes, hay que conocer la resistencia de la lechada (f_{gk}) y fijar un diámetro de perforación de la cimentación existente (D_h) y el armado tubular (A_{st}). Por último, el número mínimo de micropilotes (n) que se coloca por elemento estructural es 2, de manera que se cumpla con lo que marca normativa para elementos de cimentación especial menores de 450 mm [61]. El algoritmo de diseño de recalces empleado se muestra esquemáticamente en el diagrama de flujo de la Figura 6. La filosofía de cálculo parte de dos premisas: la resistencia de la conexión directa es limitante y el número mínimo (n) de micropilotes es 2. Además, en relación con lo anteriormente expuesto, se han fijado otros parámetros con el fin de simplificar los cálculos: el diámetro de perforación en la cimentación es de 200 mm, el diámetro de los micropilotes es 150 mm, y la resistencia a compresión simple de la lechada de cemento (f_{gk}) es, al menos, igual a 25 MPa. Por lo que el material más débil en la zona de contacto suponemos que es el hormigón. Este valor es el mínimo que se obtiene para una lechada de

cemento con relación en peso agua/cemento 0,5. Por lo que la resistencia de la lechada será siempre superior a la del hormigón de la cimentación. Esta hipótesis es relevante, ya que las formulaciones para calcular la tensión de adherencia que se muestran posteriormente toman como referencia de resistencia el menor valor entre los materiales en contacto (hormigón y lechada).

El algoritmo comienza con el cálculo de la resistencia de la conexión directa (R_{ck}), multiplicando la tensión de adherencia (τ_{adh}) por la superficie cilíndrica de la perforación. La resistencia de la conexión se compara con el máximo esfuerzo axial que recibe un micropilote del elemento de cimentación (Q_m). El primer valor de Q_m se calcula dividiendo la carga total que recibe el elemento de cimentación por 2 (n). Si $R_{ck} > Q_m$, entonces, el número de micropilotes es 2. En caso contrario, el número de micropilotes (n) irá aumentando para disminuir la carga que le llega al micropilote más cargado. Luego n será el número de micropilotes mínimo necesario que cumple la restricción de la conexión directa.

Una vez determinado (n) se realizará la comprobación geotécnica, donde se debe asegurar que el micropilote es capaz de transmitir al terreno las cargas que le llegan de la estructura. La transmisión al terreno se realiza por rozamiento lateral del micropilote, generalmente conocido como resistencia por fuste (τ_f). Si bien siempre se produce la transmisión de carga por la punta del micropilote, se suele despreciar para quedar del lado de la seguridad [7], y en esta investigación también se ha adoptado este criterio.

Para obtener la resistencia al hundimiento del micropilote (R_h) se multiplica la superficie lateral del micropilote, que depende de su diámetro (ϕ_m) y su longitud (L), por la resistencia por fuste (τ_f) de la capa de terreno que atraviesa. El valor de rozamiento por fuste depende del tipo de terreno y de la tecnología aplicada en la inyección de la lechada de cemento. Su valor se aproxima mediante ensayos in situ tipo SPT, granulometría, siendo al final el informe geotécnico el que proporciona dichos valores de rozamiento por fuste. El cálculo geotécnico se inicia con una longitud de micropilote igual a 0 y se van aplicando incrementos de longitud (ΔL) de 0,5 m. De esta manera se irán haciendo iteraciones hasta conseguir la longitud de micropilote (L) que haga que $R_h > Q_m$.

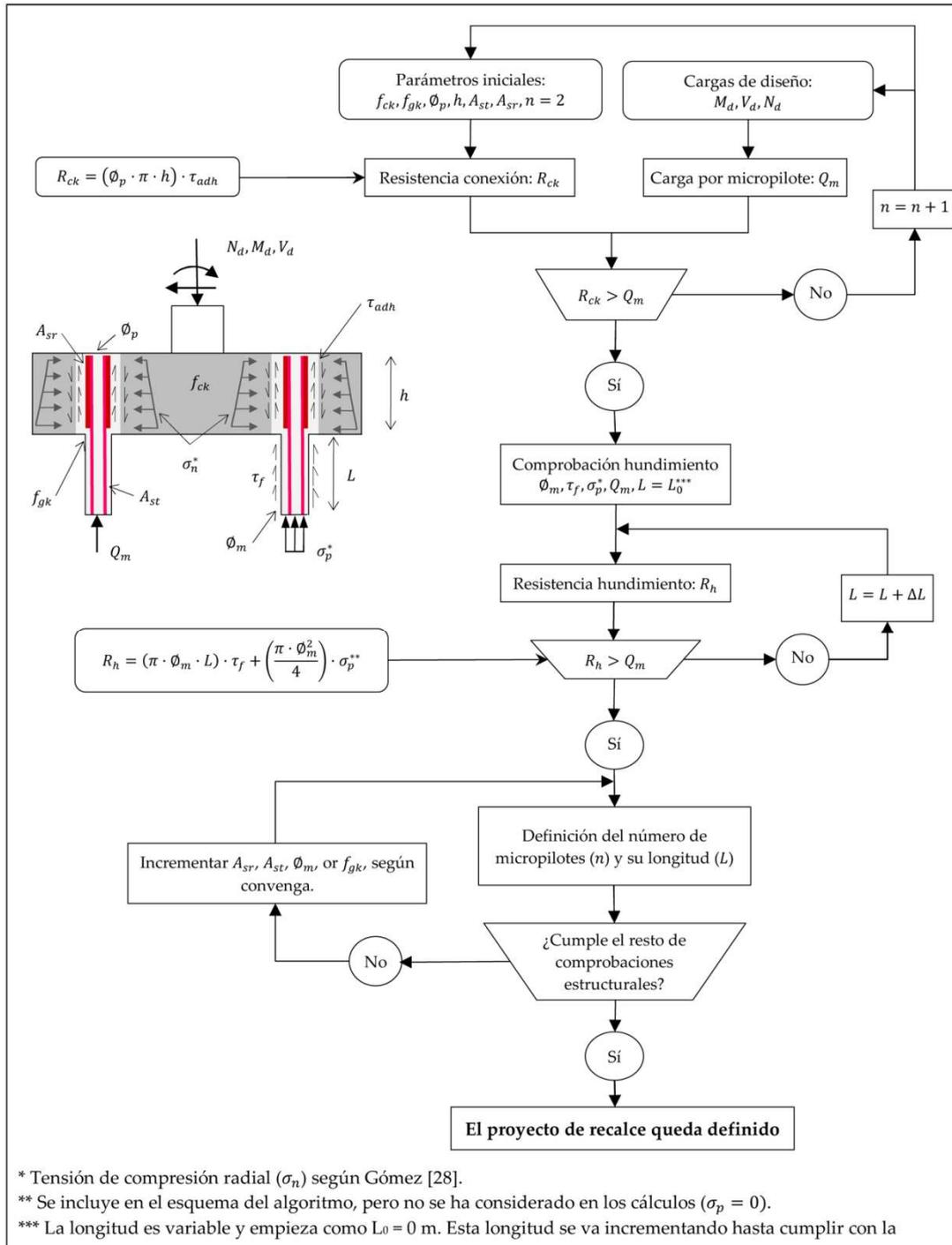


Figura 6. Esquema de las fases en el diseño del recalce de un elemento mediante conexión directa del micropilote con la cimentación existente de hormigón. Fuente: Elaboración propia.

Una vez que se ha definido el número de micropilotes (n), el diámetro de perforación del micropilote (D_m) y la longitud del micropilote (L), faltaría realizar las comprobaciones estructurales. Si alguna de estas comprobaciones no se cumple, se incrementaría el diámetro de los micropilotes o se mejorarían las calidades de los materiales (mayor armado o mejor lechada), por lo que no sería necesario volver a realizar dichas comprobaciones.

La primera comprobación estructural sería la que evalúa la propia resistencia del micropilote como elemento estructural ($N_{c,Rd}$). Se debe comprobar que $N_{c,Rd} > Q_m$. Esta comprobación depende de la resistencia de la lechada (f_{gk}), del área neta de lechada del micropilote (A_c), de la sección de la armadura tubular (A_{st}) y de la resistencia de cálculo de la misma (f_{yd}). El algoritmo va seleccionando una armadura con mayor sección hasta que se verifique la comprobación. En caso contrario aumenta la calidad de la lechada. La ecuación de cálculo (Ecuación 1) depende de otros dos factores. Uno relacionado con el pandeo (R) y otro que recoge el efecto del terreno y del tipo de perforación (F_e).

Ecuación 1. Resistencia a compresión simple de los micropilotes

$$N_{c,Rd} = (0,85 \times A_c \times f_{gd} + A_{st} \times f_{yd}) \times \frac{R}{1,2 \times F_e}$$

Esta comprobación resistente considera el efecto de la pérdida de sección de acero por corrosión (Ecuación 2). Por lo que en el cálculo del área de la sección de acero (A_{st}) se considera, además del diámetro exterior (d_e) e interior (d_i), una pérdida de recubrimiento por corrosión (r_e) y el tipo de unión de la armadura tubular ($F_{u,c}$). El valor de los parámetros r_e y $F_{u,c}$ vienen tabulados en la normativa [7]. Se ha tomado $r_e = 1,20$ mm, que corresponde a un suelo inalterado para una vida útil de 100 años, y $F_{u,c} = 1,0$, que corresponde a un tipo de unión estándar. Para la reducción de resistencia por el efecto del tipo de terreno y perforación (F_e), se ha seleccionado la técnica habitual de perforación con revestimiento recuperable [7], cuyo valor es $F_e = 1,05$.

Ecuación 2. Determinación del área de acero de la armadura tubular considerada en los cálculos.

$$A_{st} = \frac{\pi}{4} \times [(d_e - 2 \times r_e)^2 - d_i^2] \times F_{u,c}$$

Respecto a la reducción por la inestabilidad por efecto del pandeo, el valor del factor empírico R se calcula con la Ecuación 3, que depende a su vez de otro coeficiente adimensional (C_R) tabulado en la Guía de Carreteras [7]. Se toma $C_R = 15$, que corresponde a un suelo de baja calidad, resultando $R = 0,665$.

Ecuación 3. Determinación del parámetro empírico que considera el efecto del pandeo en los micropilotes.

$$R = 1,07 - 0,027 \times C_R$$

La siguiente comprobación estructural es la resistencia en la interfaz lechada-acero en la zona de la conexión directa. Se debe cumplir que la resistencia por contacto en esta interfaz ($R_{adh,d}$) es superior al esfuerzo axial que recibe el micropilote más cargado (Q_m). Esta resistencia es la suma del rozamiento de la lechada con la armadura tubular ($R_{adh,t}$) y con las barras corrugadas ($R_{adh,a}$) soldadas a ésta (Ecuación 4).

Ecuación 4. Cálculo de la resistencia en la interfaz lechada-acero.

$$R_{adh,d} = R_{adh,t} + R_{adh,a}$$

El rozamiento con la armadura tubular se determina multiplicando la superficie perimetral en contacto con la lechada por la tensión de adherencia entre ambos materiales. A la superficie cilíndrica de contacto calculada con el diámetro exterior de la armadura tubular se le descuenta la zona con barras corrugadas soldadas. Del mismo modo, el área de contacto entre las barras corrugadas con la lechada también queda minorada por la zona de la soldadura. La tensión de adherencia entre lechada-armadura tubular y lechada-armadura corrugada es diferente. Para la primera se utiliza el valor del Eurocódigo 4 [62], en el que se indica que para perfiles de acero embebidos en hormigón se puede considerar una tensión rasante de cálculo de 0,30 MPa. Este valor será de aplicación en recubrimientos mínimos de 40 mm. Para recubrimientos superiores, se puede

considerar un valor superior de tensión rasante, multiplicándolo por un coeficiente β_c (Ecuación 5).

Ecuación 5. Coeficiente β_c que modifica la tensión de adherencia acero-lechada según el recubrimiento.

$$\beta_c = 1 + 0,02 \times r \times \left(1 - \frac{40}{r}\right) \leq 2,5$$

Esta ecuación se aplica cuando el diámetro de perforación está en torno a los 200 mm. Para este caso en concreto, el recubrimiento para una armadura tubular de 73 mm de diámetro exterior supone un recubrimiento de 63,5 mm que aumenta la tensión de adherencia lechada-armadura tubular hasta un valor de 0,441 MPa.

Por otro lado, la tensión de adherencia en barras corrugadas se ha estimado con la formulación del Eurocódigo 2 [18]. Si bien esta formulación es específica para hormigones, es la que se emplea para la adherencia de barras corrugadas en morteros y lechadas. En este caso, viendo los resultados de los ensayos realizados que se muestran más adelante (4.2.4), se ha empleado una resistencia característica a compresión de 50 MPa, obteniéndose un valor de 4,29 MPa. Este valor es acorde a los resultados obtenidos experimentalmente para tensión de unión de barras corrugadas en lechada de cemento [63].

4.1.2. Formulaciones para estimar la tensión de adherencia.

Esta sección recoge las diferentes formulaciones o valores de tensión de adherencia que se han aplicado en el recalce con micropilotes a lo largo de las últimas décadas. Se ha procurado seguir un orden cronológico, aunque algunas normativas de hormigón armado han mantenido las formulaciones en varias actualizaciones seguidas.

La primera es la resistencia a cortante que aparece en la EH-80 [23] (Ecuación 6). Esta formulación ya estaba en la normativa americana ACI-318 de 1970 y en la normativa española de 1973 [22]. En este caso, la tensión de adherencia se calcula en función de la resistencia característica a compresión simple del hormigón (f_{ck}) en kg/cm², y de un coeficiente de seguridad (γ_c). El valor habitual de dicho coeficiente es de 1,5, y es el que se ha usado en esta

formulación. También se ha usado el mismo valor para el resto de formulaciones posteriores en el que aparece.

Ecuación 6. Tensión de adherencia como resistencia a cortante de la EH-80 [23].

$$\tau_{adh} = 0,50 \sqrt{\frac{f_{ck}}{\gamma_c}} = 0,50 \sqrt{f_{cd}}$$

La siguiente formulación (Ecuación 7) es la que propone Rodríguez-Ortiz [24], que también se basa en la resistencia a compresión del hormigón (f_{ck}) en kg/cm² y del coeficiente de seguridad (γ_c). Está relacionada con las normas americanas [17, 25] y ha sido recomendada por otros autores [64] por lo que ha sido muy utilizada en España. Rodríguez-Ortiz [24] recomendó un rango de valores para la τ_{adh} entre 0,40-0,60 MPa.

Ecuación 7. Tensión de adherencia según Rodríguez-Ortiz [24].

$$\tau_{adh} = 0,5625 \sqrt{f_{cd}}$$

La tercera formulación fue propuesta por Oteo [21]. Depende de la resistencia de cálculo a compresión simple de hormigón (f_{cd}) (Ecuación 8), cuyo valor se obtiene dividiendo f_{ck} entre el coeficiente de seguridad (γ_c). Las unidades utilizadas tienen que ser MPa. En este caso el rango de valores que recomienda el autor para la tensión de adherencia está entre 0,30-0,60 MPa.

Ecuación 8. Tensión de adherencia según Oteo [21].

$$\tau_{adh} = \frac{f_{cd}}{20}$$

La cuarta formulación es la resistencia a rasante en juntas de hormigón del Eurocódigo 2 de hormigón armado estructural (Ecuación 9) [18]. La aplicación de este modelo resistente viene recomendada en la normativa europea sobre micropilotes [8, 16].

Ecuación 9. Formulación de comprobación a rasante del Eurocódigo 2 [18].

$$\tau_{adh} = c \cdot f_{ctd} + \mu \cdot \sigma_n + \rho \cdot f_{yd} (\mu \sin \alpha + \cos \alpha) \leq 0,3 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \cdot f_{cd}$$

La Ecuación 9 se simplifica cuando se aplica al caso concreto de la unión de micropilotes con estructuras existentes de hormigón. No hay armadura transversal en la unión ($\rho = 0$) y el valor de σ_n es desconocido, por lo que se desprecia ($\sigma_n = 0$) con el fin de quedar del lado de la seguridad. El coeficiente c depende de la rugosidad de la superficie de contacto entre los materiales (lechada-hormigón) y sus valores vienen tabulados en el Eurocódigo 2. Este parámetro varía entre 0,025 para superficies de contacto muy lisas, hasta valores de 0,5 para los casos de superficies de contacto dentadas. Por tanto, queda la Ecuación 10, en la que f_{cd} es la resistencia de cálculo a compresión simple de hormigón, y f_{ctd} es la resistencia de cálculo a tracción del hormigón. Ambas resistencias se obtienen dividiendo las resistencias características por el coeficiente de seguridad γ_c y las unidades son MPa.

Ecuación 10. Tensión de adherencia según la resistencia a rasante del Eurocódigo 2 [18].

$$\tau_{ad} = c \cdot f_{ctd} \leq 0,3 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \cdot f_{cd}$$

La quinta formulación que se ha utilizado es la segunda propuesta de Rodríguez-Ortiz [26]. Ésta es muy parecida a la que él mismo propuso en 1984 [24], pero aumenta un poco el coeficiente de ponderación de 0,5625 a 0,60 (Ecuación 11). Las unidades de f_{ck} son kg/cm².

Ecuación 11. Tensión de adherencia según Rodríguez-Ortiz [26].

$$\tau_{adh} = 0,60 \sqrt{\frac{f_{ck}}{\gamma_c}} = 0,60 \sqrt{f_{cd}}$$

La sexta formulación utilizada para el cálculo de la tensión de adherencia es la resistencia a rasante en juntas de hormigonado de la EHE-08 [19]. Esta normativa contempla dos opciones para la comprobación a rasante: con armado transversal y sin armado transversal. La conexión de los micropilotes no tiene armado transversal, por lo que para esta opción se utiliza la Ecuación 12.

Ecuación 12. Tensión de adherencia según la resistencia a rasante en juntas de hormigonado según EHE-08 [19].

$$\tau_{adh} = \beta \cdot \left(1,3 - 0,30 \cdot \frac{f_{ck}}{25} \right) \cdot f_{ctd} \leq 0,70 \cdot \beta \cdot f_{ctd}$$

En esta formulación existe un coeficiente β que depende de la rugosidad de la superficie de unión que toma valores entre 0,2 y 0,8. Dicho coeficiente engloba los mecanismos resistentes de adhesión química y rozamiento. Además, no es posible considerar compresión normal (σ_n) a la superficie de unión, por lo que éste efecto lo debe englobar también dicho coeficiente β . Los otros dos parámetros resistentes, f_{ck} y f_{ctd} son, respectivamente, la resistencia característica del hormigón a compresión simple y la resistencia de cálculo a tracción del hormigón expresadas en (MPa).

Como se ha comentado previamente, con la entrada en vigor del nuevo Código Estructural en España en el año 2021 [20], la formulación para la comprobación a rasante en juntas de hormigonado es exactamente la misma que la del Eurocódigo 2 ya comentado previamente (Ecuación 10). Por lo tanto, los resultados que se obtengan con el Eurocódigo son los mismos que los que se obtendrían con el Código Estructural actualmente vigente en España.

La séptima formulación (o valor) utilizada en el estudio es la que propone la última normativa americana de hormigón estructural [17]. Con esta normativa se puede considerar que la tensión de adherencia entre las juntas de hormigonado de elementos prefabricados es independiente de la resistencia de los hormigones puestos en contacto y de la rugosidad de los mismos (Ecuación 13). Se puede considerar que la superficie es lisa al estar la formulación pensada para hormigones prefabricados. Más concretamente, para la rasante que se genera en los forjados unidireccionales entre viguetas y losa de compresión. Debe ser un valor medio para un forjado con unas características convencionales.

Ecuación 13. Tensión de adherencia según la resistencia a rasante en juntas de hormigonado [17].

$$\tau_{ad} = 0,552 \text{ MPa}$$

A modo resumen, se recogen estas 7 formulaciones en la Tabla 1. De esta forma se observa claramente que sólo hay dos que dependen de otros parámetros

diferentes a la resistencia de los materiales, que son la EHE-08 [19] y el Eurocódigo 2 [18]. Éstas tienen coeficientes relacionados con la rugosidad (β y c) que influyen significativamente sobre el resultado final. El valor que se les da a estos coeficientes depende de la experiencia del calculista que realiza el diseño del recalce que, si bien siempre dentro de las indicaciones de las normativas, no deja de tener un componente arbitrario.

Estado	Normativa	Formulación	
Vigente	Eurocódigo 2	$\tau_{adh} = c \cdot f_{ctd} \leq 0,3 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \cdot f_{cd}$	(Ecuación 10)
	ACI-318-19	$\tau_{adh} = 0,552 \text{ MPa}$	(Ecuación 13)
Derogada	EH-80	$\tau_{adh} = 0,50\sqrt{f_{cd}}$	(Ecuación 6)
	Rodríguez-Ortiz (1984)	$\tau_{adh} = 0,5625\sqrt{f_{cd}}$	(Ecuación 7)
	Oteo	$\tau_{adh} = \frac{f_{cd}}{20}$	(Ecuación 8)
	Rodríguez-Ortiz (2007)	$\tau_{adh} = 0,6\sqrt{f_{cd}}$	(Ecuación 11)
	EHE-08	$\tau_{adh} = \beta \cdot \left(1,3 - 0,30 \cdot \frac{f_{ck}}{25}\right) \cdot f_{ctd} \leq 0,70 \cdot \beta \cdot f_{ctd}$	(Ecuación 12)

Tabla 1. Resumen de las formulaciones aplicadas para estimar la tensión de adherencia en el estudio económico. Fuente: Elaboración propia.

Para poder desarrollar el estudio es necesario fijar unos valores a estos coeficientes. Empezando por la norma EHE-08, el coeficiente β tendría un valor de 0,2 en el caso de superficies no intencionadamente rugosas, 0,4 en el caso de superficies intencionadamente rugosas, y 0,8 en el caso de superficies rugosas de secciones compuestas en las que existe una imbricación que impide el cabalgamiento. Como se adelantó previamente, cuando se ejecuta el recalce en obra, la perforación de la cimentación se debe realizar de modo que no se transmitan vibraciones a la estructura existente que suele tener problemas estructurales. Por este motivo la perforación se realiza mediante la rotación de una corona añadiendo agua. Este procedimiento deja una perforación lisa, por lo que se utiliza un valor de $\beta = 0,2$.

Para la formulación del Eurocódigo 2 [18], equivalente al Código Estructural [20], el valor del parámetro c viene tabulado de forma similar, siendo 0,025 para superficies muy lisas, 0,2 para lisas, y crece hasta un valor de 0,5 para superficies dentadas. Por lo tanto, por equivalencia con el parámetro anterior, se toma el mismo valor $c = 0,2$.

Una vez descritas las formulaciones y fijados los parámetros, la Figura 7 muestra cómo varían los valores de las diferentes ecuaciones de tensión de adherencia según la resistencia a compresión simple del hormigón (asumimos que la lechada tiene una resistencia mayor). De acuerdo con esta gráfica, los valores más bajos corresponden a los modelos de rasante, después estarían los de cortante, donde se incluiría el de la normativa americana. Todos estos modelos arrojan valores inferiores a 1,0 MPa, excepto Oteo [21] que proporciona los valores más altos cuando la resistencia a compresión del hormigón es igual o superior a 25 MPa, alcanzando valores de hasta 1,0-1,2 MPa. Como es difícil encontrar resistencias de hormigón en cimentaciones superiores a 25 MPa, probablemente esta formulación no está pensada para hormigones de resistencia característica iguales o superiores a 30 MPa. Por lo tanto, según las formulaciones vistas, el rango de variación de la tensión de adherencia estaría entre 0,20-1,20 MPa.

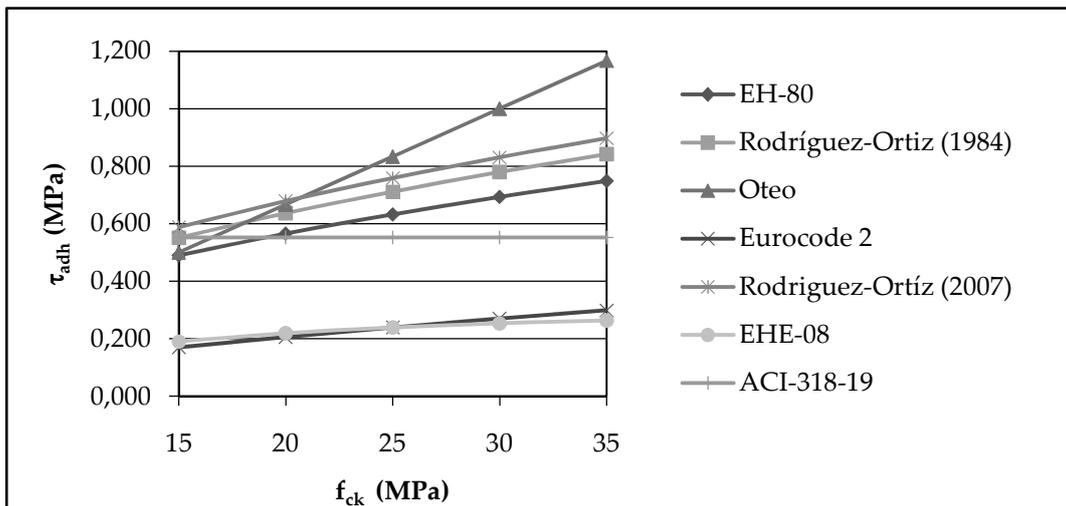


Figura 7. Variación de la tensión de adherencia para las formulaciones aplicadas según la resistencia característica a compresión simple (f_{ck}) del hormigón. Fuente: Elaboración propia.

4.1.3. Simulación Monte Carlo.

Es un método estadístico que evalúa la incertidumbre del resultado de un suceso incierto y es aplicable a diferentes áreas científicas [65, 66]. Su uso está recomendado para problemas que dependan de variables con cierta variabilidad, y cuando el análisis de sensibilidad lineal no da una descripción ajustada de la variación de los resultados.

En el campo de las estructuras su aplicación está muy extendida. Se ha empleado para evaluar la incertidumbre de ciertas acciones [67, 68], o con el fin de conocer la respuesta estructural al cambiar el valor de ciertos parámetros de los materiales [69, 70], entre otros. En esta tesis se usa la simulación Monte Carlo para evaluar la incertidumbre que la tensión de adherencia le transmite al presupuesto final.

En términos generales, la simulación Monte Carlo se resume en dos fases. La primera consiste en generar una terna de valores aleatorios, para las distintas variables que se quieren estudiar. Para ello, se establece una función de distribución de probabilidad para cada variable y la correlación entre las mismas. Estas funciones de distribución se definen con parámetros estadísticos como la media, mediana y desviación típica, mientras que la dependencia entre ellas viene reflejada en la matriz de correlación. El número de ternas a generar debe ser elevado, normalmente más de 10.000 [71]. En la segunda fase se simula el modelo global a estudiar para cada una de las ternas de variables generadas. Obteniendo para cada simulación unos resultados diferentes que se sintetizan en parámetros de referencia que resumen el comportamiento del modelo. La agrupación de estos resultados permite conocer, de forma aproximada, la distribución de probabilidad de estos parámetros que se han considerado más relevantes.

En esta tesis el punto de partida es el estudio de Pachla [4], que realizó un extenso programa de ensayos a probetas cúbicas a escala real con diferentes materiales y resistencias. Estos materiales son hormigón en masa, hormigón armado y mampostería. En concreto, los materiales son: c12/15, c20/25, c20/25 armado y ladrillo macizo (clase 10 con mortero MM50). Los ensayos los realizó tanto a compresión como a tracción. Una característica importante de las probetas

ensayadas es que la perforación de la conexión fue por rotación atravesando totalmente la probeta. Por lo que la superficie de contacto es lisa y el ensayo permite el deslizamiento relativo del micropilote. Las dimensiones de las probetas cúbicas fueron 500x500x500 mm y el diámetro de perforación fue de 150 mm, valor habitual en recalces, lo que permite extrapolar los resultados a estructuras reales. Por último, como se adelantó en el capítulo de Estado del Arte, dado el elevado número de probetas ensayadas, fue capaz de obtener las distribuciones de probabilidad de tensión de adherencia para todos los materiales ensayados. Estas distribuciones eran variables normales definidas por los parámetros media y desviación típica.

Los 29 casos de estudio de obras de recalce estudiados en esta tesis, que se describen en la sección siguiente, tenían una cimentación de hormigón (armado/masa). En la mayoría de casos no se ha dispuesto de planos de armado de proyecto, por lo que hay que suponer tanto la tipificación del hormigón como del armado realmente dispuesto. La única fuente de información fiable son los testigos de las perforaciones realizadas a la hora de realizar el recalce que indican que los hormigones son (en su mayoría) de baja calidad, muchas cimentaciones sin armado, y las que tienen armado sólo han dispuesto un armado mínimo en la base. Por lo tanto, se ha creído conveniente emplear de forma genérica la distribución de probabilidad del hormigón en masa tipificado por c20/25. Así, además, estos resultados serán más conservadores para los casos de estudio en los que las cimentaciones fueran de hormigón armado y con mayor resistencia a compresión.

En resumen, se emplea como referente la distribución de probabilidad del hormigón en masa tipo c20/25 del estudio realizado por Pachla [4], cuya tensión de adherencia media (τ_m), y desviación típica (σ) son: $\tau_{m,HM} = 1,15$ MPa y $\sigma_{HM} = 0,19$ MPa. A estos valores no se les ha aplicado un coeficiente de seguridad, por lo que se reducen aplicándoles el mismo coeficiente de seguridad que en las formulaciones definidas previamente ($\gamma_c = 1,5$). Así, se obtienen los valores de cálculo: $\tau_{m,d,HM} = \tau_{m,HM}/1,5 = 0,767$ MPa y $\sigma_{d,HM} = \sigma_{HM}/1,5 = 0,129$ MPa.

Simplemente a modo comparativo, se indica el valor de los parámetros de la distribución de probabilidad para el hormigón armado tipo c20/25: $\tau_{m,HA} = 2,38$ MPa y $\sigma_{HA} = 0,32$ MPa. Y los valores de cálculo serían $\tau_{m,d,HA} = \tau_{m,HA}/1,5 =$

1,587 MPa y $\sigma_{d,HA} = \sigma_{HA}/1,5 = 0,213$ MPa. Lo que indica que la tensión de adherencia en hormigón armado sería prácticamente el doble.

Por tanto, para la fase 1 de la Simulación Monte Carlo se decide emplear la distribución de probabilidad obtenida por Pachla [4] para hormigón en masa tipo c20/25. Además, como sólo hay una variable, no hay que definir matriz de correlación. A partir de esta distribución se generan 50.000 valores aleatorios de tensión de adherencia.

A continuación, en la fase 2, para cada valor de tensión de adherencia aleatorio se calcula el recalce para las 29 obras según el algoritmo descrito en la sección 4.1.1, cuyo diagrama de flujo viene en la Figura 6. Una vez definidos los recalces, se evalúan los presupuestos de cada uno de ellos con los costes que se muestran en la sección siguiente.

Por último indicar que el procedimiento de cálculo de la Simulación Monte Carlo se ha implementado en un algoritmo en R.Studio.

4.1.4. Casos de estudio.

Los 29 casos de estudio analizados son obras reales de recalces ya ejecutadas por la empresa Solum-Drilling Cimentaciones Especiales. Estas obras fueron calculadas siguiendo la normativa actual de micropilotes, Guía de Carreteras [7] y con la normativa de hormigón estructural vigente en el momento del diseño y ejecución de los mismos que era la EHE-08 [19]. En la Tabla 2 se resumen sus principales características: tipo de cimentación, canto de la misma (h), espesor de la capa de rellenos no tenida en cuenta en la comprobación a hundimiento (e_0), resistencia unitaria por fuste de cada estrato de terreno (τ_f), y carga media que reciben los elementos a recalzar (\bar{Q}). Información más detallada de las obras se muestra en las Tablas del Anexo 1 (Tabla 17, Tabla 18, Tabla 19, Tabla 20 y Tabla 21).

El diámetro de perforación de los micropilotes fue de 150 mm. Se recurrió a este diámetro porque, como se ha explicado previamente, en el recalce de edificios hay limitaciones de gálibo y se recurrió a equipos de perforación de pequeñas dimensiones. Sin embargo, el diámetro de perforación de la cimentación se amplió a 200 mm para aumentar la superficie de contacto en la conexión directa. Así, al aumentar la superficie de contacto en la perforación se

compensan los bajos valores de tensión de adherencia que permite la normativa. Es la forma más sencilla de incrementar la resistencia final de la conexión directa aplicando estrictamente las normativas implicadas.

Número	Tipo de Cimentación	h (m)	e ₀ (m)	N (Ud)	\bar{Q} (kN)	τ_f (MPa)
1	Zapata aislada	1,00	2,20	9	763,30	0,090
2	Zapata aislada	0,60	4,40	12	599,78	0,070
3	Zapata aislada	0,80	0,90	7	1627,47	0,175
4	Zapata aislada	0,50	5,00	4	176,38	0,108
5	Zapata aislada	1,00	6,00	28	909,53	0,093
6	Zapata aislada	0,80	5,00	47	625,05	0,055
7	Zapata aislada	0,50	5,00	4	204,39	0,212
8	Zapata aislada	0,70	1,60	58	318,17	0,073
9	Zapata aislada	1,30	3,00	23	1557,81	0,099
10	Zapata aislada	0,80	6,00	12	735,01	0,130
11	Zapata aislada	0,50	5,00	23	678,76	0,086
12	Zapata aislada	0,70	4,00	18	1163,99	0,094
13	Zapata aislada	0,50	4,00	7	556,65	0,080
14	Zapata aislada	0,70	12,00	8	1323,50	0,078
15	Zapata aislada	0,50	4,50	12	197,47	0,076
16	Zapata aislada	0,90	9,50	8	723,05	0,093
17	Zapata aislada	0,90	2,50	23	686,36	0,120
18	Zapata aislada	0,45	3,00	5	388,48	0,151
19	Zapata aislada	0,90	8,00	9	292,77	0,047
20	Zapata aislada	0,60	5,00	3	266,83	0,081
21	Zapata aislada	0,90	6,50	7	973,36	0,086
22	Zapata aislada	0,80	5,00	16	427,92	0,051
23	Zapata aislada	1,30	2,00	52	1510,06	0,150
24	Zapata aislada	1,60	10,50	6	320,65	0,071
25	Viga de cimentación	0,60	5,00	2	926,10	0,061
26	Losa de cimentación	0,30	5,00	1	635,69	0,174
27	Losa de cimentación	0,25	3,50	2	1595,25	0,162
28	Losa de cimentación	0,30	3,50	1	5950,30	0,178
29	Losa de cimentación	0,45	1,50	1	6847,02	0,086

h: espesor de la cimentación; e₀: espesor de la capa superior de rellenos; \bar{Q} : carga promedio que reciben los elementos de la cimentación.

Tabla 2. Resumen de los principales datos de las 29 cimentaciones estudiadas. Fuente: Elaboración propia.

Por último, la valoración económica se ha organizado en unidades de obra. Muchas son medidas en unidades lineales (m), excepto el transporte de los equipos que se consideran como un único coste, conocido normalmente como partida alzada (P.A.). Los precios de mercado de estas unidades dependen de los materiales usados, especialmente la cantidad de acero usado en su construcción. Los precios son los del mercado español para el año 2020 (Tabla 3), que son similares a los estimados por Sabatini [2] para Estados Unidos.

Unidad	Descripción	Barra circular	Coste (€)
m	Ejecución de micropilote de 150 mm de diámetro, con armadura tubular según fila correspondiente.	73,0 × 6 (mm)	66,0
		88,9 × 7 (mm)	70,0
		88,9 × 9 (mm)	75,5
		101,6 × 9 (mm)	79,0
m	Refuerzo en la unión para mejorar la resistencia en la interfaz lechada-armadura del micropilote.	Ø16 (mm)	10,0
		Ø20 (mm)	11,0
		Ø25 (mm)	12,5
m	Perforación de cimentación existente con 200 mm de diámetro	-	150,0
P.A.	Transporte de equipo de micropilotes	-	3.500,0

Tabla 3. Coste de cada unidad utilizada en los presupuestos con precios de 2020. Fuente: Elaboración propia.

4.2. DISEÑO EXPERIMENTAL.

El objetivo principal de la presente tesis doctoral es proponer un nuevo sistema de conexión directa testado experimentalmente mediante ensayos de laboratorio. Para ello se ha aplicado la técnica más recomendada para analizar los resultados en este tipo de estudios, el Diseño de Experimentos (DoE). Este estudio se ha realizado con probetas a escala real que simulan la conexión convencional y el nuevo sistema de conexión directa. Pero antes de definir las dimensiones y características de las probetas se ha realizado una prueba piloto con probetas a escala reducida, mucho más pequeñas y manejables, con el fin de depurar los trabajos del DoE.

Esta prueba piloto sirve: i) para comprobar que el nuevo sistema de conexión resiste más que el convencional, por lo menos en las probetas a escala; ii)

comprobar qué diseño es el más adecuado; y iii) detectar posibles fallos de diseño que se evitarán en las probetas a escala real.

Por tanto, cronológicamente, el primer paso es el diseño y ensayo de probetas a escala reducida que simulan la conexión directa convencional y el nuevo sistema. Estas probetas, si bien tienen dimensiones reducidas, son capaces de mostrar el comportamiento de ambas conexiones con un coste económico y de tiempo mucho menor.

Tras el análisis de los resultados obtenidos de las probetas a escala reducida, se define el DoE de las probetas a escala real, cuyo objetivo principal es verificar si el nuevo prototipo mejora la resistencia de la conexión directa convencional de los micropilotes. Así mismo, se incluyen más factores controlados que, en la práctica, se pueden encontrar fácilmente a la hora de realizar un recalce de un edificio.

Por último, los resultados de los ensayos de laboratorio se analizan en dos sentidos. Primero, desde una perspectiva estructural, en la que se describen los modos de fallo experimentados por las probetas, se estudian las curvas de carga-deformación, se analizan los resultados numéricos obtenidos comparándolos con los teóricos esperables, entre otras. Segundo, desde una perspectiva estadística que confirme las conclusiones estructurales. Para ello se recurre a la herramienta estadística ANOVA, que es la que generalmente se emplea en los DoE. Sirve para confirmar estadísticamente si el nuevo prototipo mejora la conexión directa de los micropilotes. Así mismo, también identificará los factores más relevantes indicando cuáles son los valores óptimos entre los empleados en la experimentación.

Por todo lo anterior, se incluye a continuación una breve descripción de la técnica DoE aplicada y se explica el fundamento teórico de la herramienta estadística de Análisis de la Varianza (ANOVA), sin entrar en detalles que se pueden encontrar en cualquier libro de estadística aplicada [72]. Así mismo, dentro de este apartado se hace una simple referencia a los diferentes análisis estadísticos que generalmente complementan el uso del ANOVA en los DoE que se han utilizado en la presente tesis doctoral.

4.2.1. Diseño de experimentos.

4.2.1.1. *Definición*

Existen muchas definiciones respecto a la técnica denominada por Diseño de Experimentos (DoE) pero se podría resumir como el procedimiento de investigación reglado con una fuerte base estadística cuyo objetivo es mejorar alguna característica en el procedimiento de fabricación de un producto [73]. Hoy en día es la técnica más aplicada en el proceso de investigación de nuevos productos, ya que ayuda de forma objetiva (cuantitativamente) a la toma de decisiones. Para su adecuada aplicación es necesario asumir ciertas hipótesis, como normalidad de las variables implicadas y de los errores, aleatoriedad de las pruebas, entre otras [72].

Otra definición que también se adapta al experimento realizado en esta tesis doctoral es la de Lye [74], que entiende el DoE como una metodología para aplicar sistemáticamente la estadística a un programa experimental. De forma más específica, sería el diseño de un plan de trabajo compuesto de unas probetas en las que se introducen cambios deliberados en las variables (factores) con el fin de cuantificar el efecto de dichos cambios sobre una variable de respuesta.

Esta técnica se enmarca en la teoría de la caja negra. Es decir, cuando los principales procesos que rigen el experimento tienen una elevada incertidumbre (o se desconocen directamente). En esos casos, el modelo de caja negra se compone de las variables de entrada que se controlan (factores) y de salida (respuestas), así como las variables que influyen en la respuesta y no se controlan (conocidas como ruido).

Por último, el DoE se ha aplicado en diferentes campos [75], entre los que se encuentran la investigación en el campo de las estructuras, ya sea para analizar comportamiento estructural [76], nuevos diseños de productos relacionados con las estructuras [77], o el comportamiento de nuevos materiales [78, 79]. Por lo que es la técnica más adecuada para el estudio del nuevo sistema de conexión directa.

4.2.1.2. *Análisis de la Varianza (ANOVA)*

El Análisis de la Varianza (Analysis of Variance: ANOVA) es una técnica estadística que sirve para realizar contrastes de igualdad de medias de varias

poblaciones. Se puede emplear para comparar dos poblaciones, aunque sería lo mismo que aplicar un contraste de medias de dos poblaciones [80]. Por lo que su mayor potencial es cuando se requiere comparar más de dos poblaciones [81]. En concreto, dadas n poblaciones, la hipótesis nula es que la media poblacional de todas las poblaciones es la misma ($H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_n = \mu_0$), y la hipótesis alternativa es que, al menos, la media poblacional de una variable es diferente (por ejemplo; $H_a: \mu_1 \neq \mu_2 = \dots = \mu_n = \mu_0$).

Por tanto, el ANOVA es una herramienta para ver si la media de dos o más poblaciones es igual o si, por el contrario, al menos una es diferente. Por ejemplo, para un mismo caso en el que se estudian 4 poblaciones, aceptar la hipótesis alternativa nula implica afirmar que las 4 medias de las poblaciones son iguales, según un cierto grado de significación (generalmente se toma un valor del 5%). Por otro lado, rechazar la hipótesis nula implica poder obtener varios resultados: 1 población tiene una media diferente respecto las otras 3, o el caso extremo en el que las 4 medias son diferentes. La decisión de aceptar o rechazar la hipótesis nula depende siempre del nivel de significación tomado inicialmente.

En el DoE hay muchas poblaciones teóricas, tantas como factores y niveles asociados. Por ejemplo, para un caso sencillo en el que se estudian 3 factores a 2 niveles, implica que hay 6 elementos con tratamientos diferentes (término empleado en agricultura, una de las áreas donde más se emplea el DoE), por lo que habrían 6 poblaciones teóricamente diferentes. Por tanto, el ANOVA es la técnica estadística que mejor se adapta. Además, cuando en el DoE se estudia más de un factor, como el caso del ejemplo anterior, es posible estudiar las interacciones entre los factores si el número de grados de libertad lo permite. Para ello hay que definir un modelo de relación entre la variable respuesta y los factores a estudiar, que suele ser un modelo de regresión lineal. Para analizar si la interacción entre factores es relevante, se incluye esta nueva variable en la regresión y en el estudio posterior con el ANOVA.

Generalmente, los factores se analizan a dos niveles (+/-) por lo que, a falta de mayor información, es correcto asumir una relación lineal que justifica el uso de un modelo de regresión lineal. Una vez definido el DoE, la técnica de ANOVA compara la variabilidad que introduce cada factor en los resultados finales (variabilidad externa), con la propia variabilidad de cada tratamiento (variabilidad interna). En otras palabras y desde otro enfoque, es una técnica que

se basa en cuantificar cuán solapadas están las distribuciones teóricas de cada tratamiento (o diseño en este caso). Si las distribuciones de dos tratamientos se solapan, no se puede decir que las dos poblaciones son diferentes, ya que estadísticamente hay muchos puntos en común. Por el contrario, si las distribuciones de los tratamientos no se solapan, o el solapamiento es mínimo, entonces se puede decir que las poblaciones de dichos tratamientos son diferentes. Por lo tanto, la aplicación sucesiva de la técnica ANOVA sirve para buscar cuáles son los tratamientos o factores que son similares de los que son diferentes. La comparativa de variabilidades se realiza mediante ratios de varianzas, lo que implica el uso del test F [80, 81].

Por lo tanto, en la práctica, el ANOVA no sirve para indicar cuál es la media poblacional óptima para el fin perseguido, simplemente indica si son iguales o si son diferentes. Para poder decidir o seleccionar la mejor opción de un conjunto de medias, se hace necesario recurrir a otras herramientas estadísticas. Existen muchas, aunque las más empleadas son las gráficas de cajas o intervalos LSD [82].

Por último, las gráficas de interacción son muy útiles para conocer cómo se relacionan entre sí los factores respecto a la variable respuesta. Por ejemplo, dado un experimento con dos factores (A y B) a dos niveles (+/-), no hay interacción entre estos factores cuando el efecto A sobre la variable respuesta es independiente de los niveles de B. Esta interacción se puede representar por rectas para este caso, en el que la respuesta serían dos rectas paralelas.

El análisis estadístico realizado en este trabajo se ha realizado con Excel, para los casos más sencillos, y con R.Studio para los casos más complejos de ANOVA, gráficas de cajas y gráficas de interacción.

4.2.2. Programa experimental a escala reducida.

Antes de definir las probetas a escala real, se construyeron unas probetas a escala reducida representativas de la conexión directa convencional y de la nueva propuesta. El objetivo de este pequeño plan experimental fue doble. De un lado, testar la respuesta de la nueva propuesta de conexión, con el fin de asegurar la principal línea de investigación de la tesis doctoral. Por otro lado, detectar posibles fallos en el diseño y ejecución de las probetas y así pulir el diseño final de las probetas a escala real. Todo el proceso de ejecución de estas probetas, desde el

diseño hasta la rotura de las mismas se llevó a cabo en el Laboratorio de Construcción de la Universidad Católica de Murcia.

En su construcción se recurrió a materiales accesibles y representativos de los que se pueden encontrar en una obra de recalce. Por este motivo se aprovecharon varias probetas cilíndricas de hormigón, de las que habitualmente se emplean en los controles de calidad, que sirven para conocer su resistencia a compresión simple. Las dimensiones de estas probetas cilíndricas son de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura y el tipo de hormigón tenía una resistencia característica de 25 MPa. Se partieron por su directriz justo por la mitad quedando dos partes iguales de 150 mm de diámetro y 150 mm de altura. Estas medias probetas representarían la cimentación a recalzar.

Viendo las dimensiones de estas probetas, se diseñaron las conexiones a escala con los medios disponibles en el mercado. Se eligió una corona de perforación de 76 mm de diámetro con la que se perforó mediante rotación, dejando un hueco justo en el centro. Posteriormente, se diseñaron tres tipos de moldes con PVC para conformar las conexiones: convencional, con sombrero estrecho y con sombrero ancho (Figura 8). La convencional era directamente con una tubería de PVC de 68 mm de diámetro interior (Figura 8a). Mientras que las conexiones con sombrero se hicieron uniendo dos tramos de tuberías de PVC con diámetro diferente. El encofrado del sombrero estrecho se materializó uniendo un tramo de 68 mm de diámetro con otro de 82 mm (Figura 8b). Mientras que para el sombrero ancho los tramos eran de 68 mm y 100 mm, respectivamente (Figura 8c). La motivación de emplear dos diámetros de sombrero diferentes fue: la posibilidad de que la resistencia de la nueva conexión con sombrero dependiera del diámetro de éste. La altura de todos los sombreros fue de 95 mm de alto.

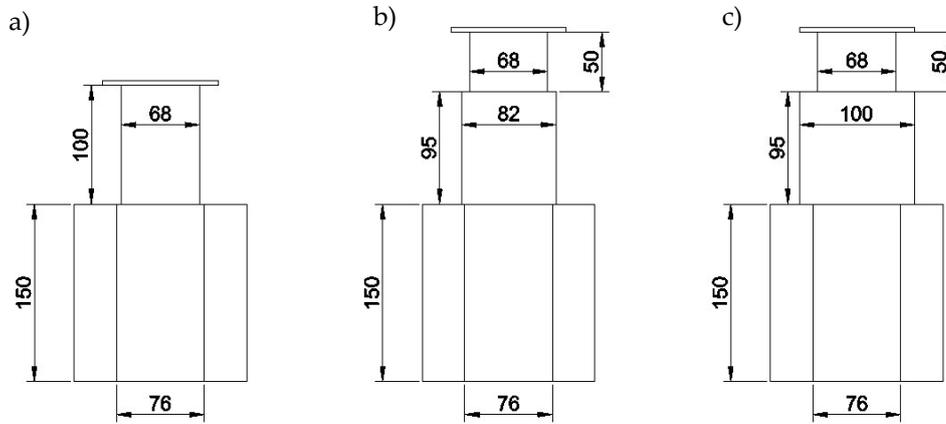


Figura 8. Esquema del diseño de las probetas a escala reducida. Fuente: Elaboración propia.

Es importante remarcar la importancia de comenzar con ensayos a escala por el ahorro de materiales. Las probetas diseñadas tienen una escala respecto a una cimentación real entre 1:2 o 1:3, respecto a una única dimensión. Sin embargo, esta escala en tres dimensiones representa una relación en masa de hasta 1:27, lo que representa un ahorro significativo de material y una alta capacidad de maniobrabilidad dentro del laboratorio.



Figura 9. Preparación de las probetas a escala reducida. Fuente: Elaboración propia.

La preparación de las probetas consistió, por tanto, en los siguientes pasos. Primero la perforación de las probetas. A continuación, antes de la incorporación de la lechada, se insertaron unas barras corrugadas de acero de 25 mm de diámetro tipo B500S en las perforaciones, a las que se soldaron unas placas

cuadradas de acero (50x50x3 mm) que ayudaran a transmitir y repartir la carga en la realización del ensayo. Después se colocó la lechada de cemento con una relación agua/cemento de 0,5 en peso. El cemento empleado fue del tipo CEM II/A-LL 42,5R. La lechada se vertió hasta el borde con el fin de garantizar el contacto entre la placa de acero de reparto y la lechada. A los 28 días se realizó el desencofrado de las tuberías de PVC con ayuda de una radial. La retracción y exudación que sufrió la lechada hizo que se perdiera el contacto entre ambos materiales (lechada y la placa del acero), por lo que se colocó en el hueco una masilla tipo epoxi con el fin de garantizar el contacto entre los materiales. A los pocos días se procedió a la realización de los ensayos (ver Figura 9).



Figura 10. Placa de acero de apoyo perforada para la realización de los ensayos. Fuente: Elaboración propia.

Las probetas se llevaron a la rotura por compresión en una prensa de ensayos de compresión simple. Para permitir el desplazamiento relativo de la cabeza del micropilote, se colocaron las probetas sobre una plancha de acero con un hueco en el centro creada a tal efecto (Figura 10). La velocidad de carga fue de 10kN/s. Todas las probetas rompieron por deslizamiento relativo, y se registró la carga de rotura máxima (P_{U1}) a partir de la cual se iniciaba. A partir de estos

resultados, se calculó la tensión de adherencia (τ_{adh}) correspondiente mediante la división de la carga máxima por la superficie cilíndrica de contacto (Tabla 4).

Los resultados indican, a simple vista, que la nueva conexión proporciona una resistencia, de media, superior a la conexión convencional. El valor medio de la carga máxima de la nueva propuesta (88,9 kN) es más del doble que el de la conexión convencional (41,6 kN). Además, la conexión con sombrero ancho de 100 mm (112,7 kN) resiste más que la de sombrero estrecho (65,1 kN). Si se calcula el valor de la tensión de adherencia media que inicia el deslizamiento, como la división de la carga entre la superficie de contacto, se obtienen valores de 1,18 MPa para la conexión convencional y de 2,50 MPa para la nueva propuesta. Es necesario destacar que el mecanismo resistente que se produce en la nueva conexión es diferente, y no procede hablar de tensión de adherencia. No obstante, se ha calculado para poder hacer la comparativa.

Tipo de probeta		P_u (kN)	τ_{adh} (MPa)	Código
Sin sombrero (convencional)		37,1	1,1	Cilíndrica 1
		28,3	0,8	Cilíndrica 2
		39,0	1,4	Cilíndrica 7
		61,8	1,5	Cilíndrica 8
Con sombrero	Sombreo de 82 mm	55,9	1,6	Cilíndrica 3
		74,2	2,1	Cilíndrica 4
	Sombreo de 100 mm	144,0	4,0	Cilíndrica 5
		81,4	2,3	Cilíndrica 6

Tabla 4. Resultados de la fase de experimentación a escala reducida. Fuente: Elaboración propia.

Esta última reflexión viene refutada por la forma de rotura de las diferentes conexiones. En la convencional, la rotura ha sido por deslizamiento relativo mientras que en la nueva propuesta ha habido primero rotura del sombrero seguida del deslizamiento de la cabeza del micropilote.

Con el fin de apoyar la hipótesis de que la resistencia de la conexión propuesta es mayor, se realiza un contraste estadístico. En concreto, se ha elegido el test de diferencia de medias asumiendo que ambas variables tienen la misma varianza. La hipótesis nula es igualdad de medias, mientras que la hipótesis

alternativa es que el nuevo sistema de conexión tiene una resistencia mayor. Los cálculos son similares a los de un ANOVA de un único factor, pero cambia la hipótesis alterativa. El resultado, que se muestra en la Tabla 5, muestra que la diferencia de medias es significativa. Siendo más concreto, la resistencia de la nueva conexión es superior con un nivel de significación del 0,05 [80].

	Convencional	Propuesta
Media	41,6 (kN)	88,9 (kN)
Varianza	156,29	1465,78
Observaciones	4	4
Varianza agrupada	811,04	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	6	
Estadístico t	2,3973	
P(T<=t) una cola	0,0267	

Tabla 5. Resultados del contraste de hipótesis de diferencia de medias. Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, al realizar este mismo contraste entre las probetas con distinto diámetro de sombrero, el resultado indica que el sombrero más ancho resiste más, pero no estaría justificado estadísticamente dado el escaso número de muestras ensayadas. No obstante, este resultado indica que el diámetro del sombrero puede ser un factor relevante a estudiar en el programa experimental a escala real.

4.2.3. Programa experimental a escala real.

El programa experimental está adaptado a los objetivos experimentales de la tesis (O2 y O3): i) estudiar la resistencia de la conexión convencional, ii) estudiar factores relevantes en otros estudios (nivel de confinamiento, diámetro de perforación), iii) estudiar la nueva propuesta de conexión, y iv) estudiar nuevos factores relacionados con la nueva propuesta de conexión (diámetro del sombrero, armado del sombrero).

El diseño de las probetas a escala real se llevó a cabo teniendo en consideración dos importantes fuentes de información. La primera es el análisis de los trabajos previos de Veludo [6] y Pachla [4]. Mientras que la segunda es la

valiosa información proporcionada por los ensayos a escala reducida realizados. Respecto a los trabajos previos, sirvieron para definir dimensiones, materiales, procedimiento constructivo y protocolo de ejecución de los ensayos. Ante la disyuntiva de hacer una perforación parcial como Veludo [6] o completa del dado de hormigón como Pachla [4]. Se optó por la segunda opción de perforar completamente el dado, tal y como se hace en la realidad. Así, se da la opción que se produzca el deslizamiento del micropilote a través del bloque. Los trabajos previos realizados por otros autores simplemente introducen la lechada en el hueco de la perforación, y la aplicación de la carga es directamente sobre la armadura de acero del micropilote (ver [4] y [6]). Aquí se propone que el micropilote sea completo, acero y lechada, y que la transmisión de carga sea a través de ambos materiales. Así, se pretende reproducir el modelo teórico de la comprobación resistente del propio micropilote, vista anteriormente, en el que acero y lechada trabajan a axil de forma solidaria. Es, por tanto, una novedad que se introduce en el programa de experimentación.

Respecto a los resultados de los ensayos a escala reducida, éstos indican y confirman que la conexión con sombrero es más resistente que la convencional. Además, parecen indicar que el diámetro del sombrero influye en la resistencia, por lo que sería interesante incluir dicho parámetro como factor a estudiar. También indican la importancia de la retracción de la lechada al fraguar, que hace que se desprenda de la placa de reparto. Por lo que para garantizar el contacto se decide hacer una perforación en dicha placa por la que se rellena lechada durante el fraguado.

Otro condicionante a la hora de definir el programa experimental fue la zona de trabajo. Dada la envergadura de los planes experimentales previos, el Laboratorio ITC S.L., con el que la Universidad UCAM tiene un convenio, se ofreció para la realización de los ensayos, proporcionando el espacio para el almacenamiento de las probetas y la tecnología para la ejecución y desarrollo de los ensayos. Esta empresa dispone de una zona de aparcamiento de unos 100 m² donde se pudieron ejecutar las probetas y una prensa de ensayos homologada capaz de transmitir una carga de 100 Tn. Vistas las posibilidades, el plan de ensayos a escala se ajustó a la máxima disponibilidad de este Laboratorio.

Dados los objetivos del estudio, y las instalaciones disponibles se diseñaron 20 probetas diferentes, con replicación, ensayadas a compresión (dando un total

de 40 probetas). Todas se construyeron sobre cubos de hormigón en masa de 500 mm de arista que se perforaron a los 28 días mediante una corona de diamante montada en un equipo de taladro sobre columna. La perforación fue perpendicular y en el centro de la cara, atravesando totalmente los cubos, quedando una superficie de contacto lisa. La longitud de empotramiento del micropilote en la cimentación es un valor fijo de 500 mm para todas las probetas (Figura 11). No se dispuso armado en la zapata con el fin de obtener valores de tensión de adherencia conservadores en las conexiones convencionales, permitiendo, dado el caso, la rotura monolítica del cubo. Del mismo modo, en las probetas con la conexión con sombrero, se obtendrán resistencias conservadoras para cuando se disponga en zapatas sin armado.

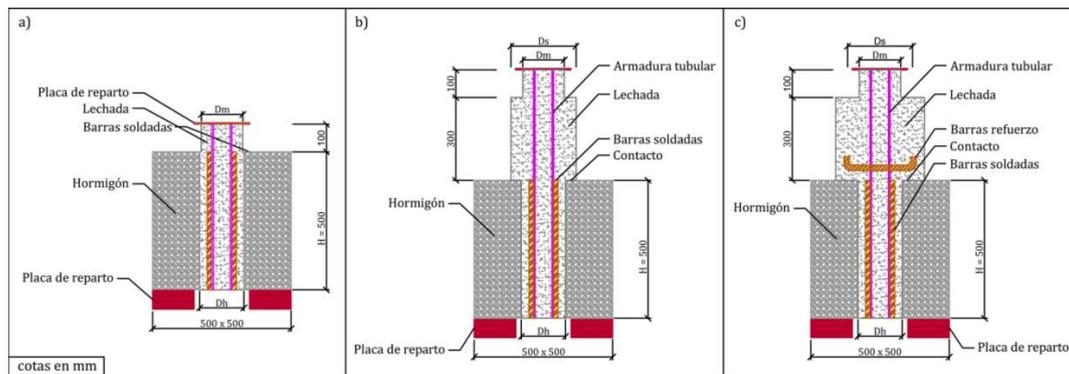


Figura 11. Diseño de las probetas ensayadas: a) conexión convencional, b) conexión con sombrero, c) conexión con sombrero armado. Fuente: Elaboración propia.

Se construyeron 8 probetas con conexión directa convencional sin sombrero y se estudiaron dos factores: diámetro de perforación (D_h) de 160 y 200 mm (Figura 11a) y nivel de confinamiento al emplear dos hormigones diferentes en la construcción de los bloques (c17,5/22 y c30/37). Para el nuevo sistema de conexión se construyeron 32 probetas, en las que se estudiaron 4 factores. El primero, al igual que las probetas convencionales es el nivel de confinamiento, también a dos niveles (c17,5/22 y c30/37). El segundo es el diámetro de perforación (D_h) a dos niveles 160, 200 mm. El tercero es el diámetro del sombrero (D_s), viendo que podría ser significativo en los ensayos a escala, a cuatro niveles 235, 285, 321 y 362 mm (Figura 11b). En realidad se combinan según el diámetro de perforación a dos niveles. Para el diámetro de 160 mm se proponen los diámetros de sombrero 235 y 321 mm, mientras que para el diámetro de perforación de 200 mm se disponen

los diámetros de sombrero de 285 y 362 mm. Esta combinación se hace pensando en que los ratios entre diámetros sean similares. Y el cuarto el armado de la zona del sombrero, a dos niveles (con armado y sin armado). Por tanto, la mitad de las probetas con sombrero (16) se realizaron sin armadura, mientras que el resto (16) se construyeron con refuerzo de 4 barras corrugadas de 20 mm de diámetro nominal ubicadas en la zona de conexión (Figura 11c). La disposición de este refuerzo, similar a zapatas y encepados, debe absorber la tracción que se genera en la zona de conexión.

Probeta		Características				
Código Corto	Código Largo	f_{ck} (MPa)	D_h (mm)	Sombrero	D_s (mm)	Armado
C1-2	17,5/160/-/AN (A y B)	17,5	160	NO	-	-
C3-4	17,5/200/-/AN (A y B)	17,5	200	NO	-	-
C5-6	30/160/-/AN (A y B)	30	160	NO	-	-
C7-8	30/200/-/AN (A y B)	30	200	NO	-	-
S1-2	17,5/160/235/AN (A y B)	17,5	160	SI	235	NO
S3-4	17,5/160/321/AN (A y B)	17,5	160	SI	321	NO
S5-6	17,5/200/285/AN (A y B)	17,5	200	SI	285	NO
S7-8	17,5/200/362/AN (A y B)	17,5	200	SI	362	NO
S9-10	30/160/235/AN (A y B)	30	160	SI	235	NO
S11-12	30/160/321/AN (A y B)	30	160	SI	321	NO
S13-14	30/200/285/AN (A y B)	30	200	SI	285	NO
S15-16	30/200/362/AN (A y B)	30	200	SI	362	NO
SA1-2	17,5/160/235/AS (A y B)	17,5	160	SI	235	SI
SA3-4	17,5/160/321/AS (A y B)	17,5	160	SI	321	SI
SA5-6	17,5/200/285/AS (A y B)	17,5	200	SI	285	SI
SA7-8	17,5/200/362/AS (A y B)	17,5	200	SI	362	SI
SA9-10	30/160/235/AS (A y B)	30	160	SI	235	SI
SA11-12	30/160/321/AS (A y B)	30	160	SI	321	SI
SA13-14	30/200/285/AS (A y B)	30	200	SI	285	SI
SA15-16	30/200/362/AS (A y B)	30	200	SI	362	SI

Tabla 6. Diseño del programa experimental realizado. Fuente: Elaboración propia.

Todos las probetas tienen micropilotes con un diámetro exterior (D_m) de 150 mm con la misma armadura tubular en su interior a la que se han soldado 4 barras corrugadas en la zona de conexión ($L_{sr} = 500$ m) tipo B500S. La longitud

de la armadura tubular (L_{st}) de las probetas sin sombrero es de 600 mm, mientras que en las probetas con sombrero es de 900 mm. La altura del sombrero en todos los casos fue de 300 mm. Posteriormente, en la sección siguiente donde se describen las características de los materiales empleados, se justifica la resistencia teórica de cada uno de estas probetas que, aunque no se ha comentado previamente, se ha tenido en cuenta para garantizar que teóricamente se produzca el fallo por deslizamiento del micropilote en las probetas con conexión convencional (parte superior de la Tabla 6). No obstante, se han calculado todas las cargas de rotura teóricas de cada tipo de fallo para prever los modos de fallo en los ensayos. Por último, la configuración de las diferentes muestras se puede ver resumida en la Tabla 6.

4.2.4. Materiales y proceso de elaboración.

Los micropilotes se han construido con armadura tubular lisa de acero API N80 tipo 562/703 MPa con 6 mm de espesor y 73 mm de diámetro exterior. A este tubo se soldaron 4 barras de acero B500S de diámetro nominal 16 mm. En uno de los extremos de la armadura tubular se soldó una placa de acero de dimensiones 200×200×5 mm de acero S355JR para poder aplicar la carga en la prensa de carga de ensayos. La lechada de cemento que rodea el armado de los micropilotes se elaboró mediante una mezcla de cemento CEM II/A-LL 42,5R y una relación a/c de 0,5. La resistencia a compresión y a tracción a 28 días fue de 58,3 MPa y 2 MPa, respectivamente, lo que confirma la hipótesis de considerar la resistencia del hormigón en las formulaciones para estimar la tensión de adherencia (4.1.2). Los hormigones c17,5/22 y c30/37 fueron elaborados en central homologada con consistencia blanda y tamaño máximo del árido de 20 mm.

Los pasos seguidos para la elaboración de las muestras fueron: (i) encofrado de madera para los bloques de hormigón. El fondo del encofrado se realizó con poliespán para que la perforación atravesara todo el bloque (Figura 12a). (ii) Vertido y vibrado del hormigón con la colocación de unas asas de acero corrugado para su posterior izado y traslado. (iii) Desencofrado y perforación de los bloques a los 28 días mediante corona de diamante montada en un equipo de taladro sobre columna (Figura 12b). (iv) Colocación de encofrado de los micropilotes a base de tubos de PVC y fijación mediante resina a los bloques de

hormigón (Figura 12c). (v) Inyección de lechada de cemento en el hueco perforado en la zapata y el micropilote. (vi) Introducción de la armadura de los micropilotes. Las placas tienen una perforación para introducir más lechada conforme va fraguando. Así se evita que la lechada se desprege de la placa por la retracción (Figura 12d). (vii) Desencofrado de los micropilotes (Figura 12e). En las probetas con sombrero y armado, el refuerzo con barras corrugadas se coloca antes de la colocación del encofrado con tubos de PVC (Figura 12f).



Figura 12. Proceso de fabricación de las probetas: a) Encofrado bloques de hormigón. b) Desencofrado y perforación de los huecos. c) Colocación de encofrado con diferentes tubos de PVC para definir la nueva conexión. d) Armaduras tubulares con las barras corrugadas soldadas. e) Especímenes obtenidos. f) Barras corrugadas para reforzar la nueva conexión propuesta. Fuente: Elaboración propia.

4.2.5. Justificación del diseño de las probetas.

Los especímenes fueron diseñados considerando la resistencia esperada para los posibles modelos de rotura. Para los especímenes sin sobre-ancho (C1-C8) se ha calculado la resistencia para los tres tipos de fallos contemplados en las normativas internacionales [2, 7, 8, 12]: i) resistencia en la interfaz lechada-hormigón, ii) resistencia en la interfaz acero-lechada, y iii) resistencia del propio micropilote a compresión. Para el resto de especímenes (S1-S16 y SA1-SA16) se ha incluido la rotura por punzonamiento de la lechada en la zona del sombrero [17]. A la vista de los cálculos realizados para el diseño de los especímenes, la rotura esperada para la conexión directa es el deslizamiento en la interfaz lechada-hormigón. Mientras que para las conexiones con sombrero, se espera una rotura por punzonamiento en la cabeza de la unión, y después el deslizamiento del micropilote (Tabla 7). En los textos normativos no se contempla la rotura frágil del bloque monolítico por tracción inducida por dilatación del micropilote en su interior.

Probeta		Resistencias esperadas			
Código Corto	Código Largo	R_{ck} (kN)	$R_{adh,d}$ (kN)	R_{gp} (kN)	$N_{c,Rd}$ (kN)
C1-2	17,5/160/-/AN (A y B)	51,9	356,6	-	1.055
C3-4	17,5/200/-/AN (A y B)	64,8	369,4		
C5-6	30/160/-/AN (A y B)	67,9	356,6		
C7-8	30/200/-/AN (A y B)	84,9	369,4		
S1-2	17,5/160/235/AN (A y B)	51,9	356,6	436,4	
S3-4	17,5/160/321/AN (A y B)				
S5-6	17,5/200/285/AN (A y B)	64,8	369,4	545,5	
S7-8	17,5/200/362/AN (A y B)				
S9-10	30/160/235/AN (A y B)	67,9	356,6	436,4	
S11-12	30/160/321/AN (A y B)				
S13-14	30/200/285/AN (A y B)	84,9	369,4	545,5	
S15-16	30/200/362/AN (A y B)				
SA1-2	17,5/160/235/AS (A y B)	51,9	356,6	436,4	
SA3-4	17,5/160/321/AS (A y B)				
SA5-6	17,5/200/285/AS (A y B)	64,8	369,4	545,5	
SA7-8	17,5/200/362/AS (A y B)				
SA9-10	30/160/235/AS (A y B)	67,9	356,6	436,4	
SA11-12	30/160/321/AS (A y B)				
SA13-14	30/200/285/AS (A y B)	84,9	369,4	545,5	
SA15-16	30/200/362/AS (A y B)				

Tabla 7. Resistencias esperadas según los diferentes modos de rotura o fallo: interfaz lechada-hormigón (R_{ck}), interfaz lechada-acero ($R_{adh,d}$), punzonamiento en sombrero (R_{gp}), compresión del micropilote ($N_{c,Rd}$). Fuente: Elaboración propia.

4.2.5.1. Resistencia en la interfaz lechada-hormigón en conexión directa.

Como se indica previamente, la normativa vigente de micropilotes en Europa [8] recomienda aplicar la formulación de rasante del Eurocódigo 2 [18] para estimar la resistencia en la interfaz lechada-hormigón (Ecuación 9). En la conexión no hay armadura transversal ($\sigma_n = 0$) ni tampoco confinamiento activo mediante pretensado ($\rho = 0$), quedando la Ecuación 10 que sólo depende del parámetro c y de la resistencia de diseño a tracción del hormigón de la cimentación (f_{ctd}). Como la perforación deja una rugosidad lisa se ha tomado $c = 0,2$ (mismo parámetro que en el estudio económico).

Las dos tensiones de unión lechada-hormigón (τ_{adh}) para cada tipo de hormigón se multiplica por la superficie cilíndrica de contacto de los dos diámetros de perforación (Ecuación 14). Los resultados se muestran en la Tabla 7.

Ecuación 14. Resistencia de la conexión directa convencional.

$$R_{ck} = (D_h \cdot \pi \cdot h) \cdot \tau_{ad}$$

4.2.5.2. Resistencia en la interfaz lechada-acero.

La lechada está en contacto con dos armaduras diferentes: tubular y barras corrugadas. La resistencia se calcula multiplicando la superficie de contacto de cada tipo de armadura por la tensión de unión correspondiente. Para la interfaz lechada-armadura tubular (τ_{sg-t}) se ha seguido la formulación del Eurocódigo 4 [62] en la que se establece un valor de τ_{sg-t} en función del recubrimiento del acero (r). Hay 2 recubrimientos diferentes ya que hay 2 diámetros de perforación distintos y una misma armadura tubular (43,5 y 63,5 mm). Se obtienen 2 valores de τ_{sg-t} (0,321 y 0,441 MPa). Estos valores son similares a los recomendados en textos normativos [7] e inferiores a los que obtuvo Pachla [30] por experimentación en la zona de conexión, ya que no se está considerando el efecto de confinamiento que se produce en la zona de conexión. Para la interfaz lechada-barra corrugada se ha aplicado la tensión de unión de una barra corrugada en hormigón τ_{sg-r} según la formulación del Eurocódigo 2 [18], lo que proporciona un valor de 4,29 MPa para una lechada de resistencia característica a compresión de 50 MPa (valor justificado con ensayos a compresión realizados a la lechada empleada que se muestran en la sección 4.2.5.4). Este valor de 4,29 MPa estaría validado por la experimentación realizada para barras corrugadas embebidas en lechada de cemento [63].

Ecuación 15. Resistencia en la interfaz lechada-acero en la zona de conexión.

$$R_{adh,d} = A_{stt}\tau_{sg-t} + A_{sr}\tau_{sg-r}$$

El valor final es la suma de las tensiones en ambas armaduras, como muestra la Ecuación 15, donde A_{stt} es la superficie de contacto de la armadura

tubular con la lechada y A_{sr} es la superficie de contacto de las 4 barras corrugadas soldadas. Los resultados para los especímenes se muestran en la Tabla 7.

4.2.5.3. Resistencia por punzonamiento en la nueva conexión.

Se ha estimado la resistencia de la nueva conexión mediante un modelo de rotura por punzonamiento en la zona del sombrero. Este modelo consiste en multiplicar la resistencia a cortante de la lechada (τ_{gp}) por la superficie cilíndrica de la prolongación de la perforación dentro del sombrero Ecuación 16.

Ecuación 16. Resistencia del modelo de rotura por punzonamiento en el sombrero.

$$R_{gp} = \tau_{gp} \pi D_h 300$$

Se ha tomado como referencia para estimar la resistencia a cortante de la lechada, la formulación de la resistencia a cortante del hormigón Ecuación 17 según la ACI-318 [17], pero utilizando la resistencia de cálculo a compresión de la lechada (f_{gd}). Los resultados se muestran en la Tabla 7.

Ecuación 17. Resistencia a cortante de la lechada según la formulación de la resistencia del hormigón.

$$\tau_{gp} = 0,5 \sqrt{f_{gd}}$$

4.2.5.4. Resistencia del propio micropilote a compresión.

La carga que resiste el propio micropilote se ha calculado asumiendo igualdad de deformaciones longitudinales de acero y lechada, por lo que se limita la resistencia del acero a 400 MPa (f_{yd}) por la deformación unitaria máxima permitida del hormigón a 0,002. Se aplica pues la Ecuación 18 en la que A_c es el área de lechada de cemento y A_s es el área de acero. La resistencia de diseño a compresión de la lechada (f_{gd}) es la resistencia característica de la lechada (f_{gk}) disminuida por un coeficiente de seguridad parcial de 1,5. La resistencia media obtenida para la lechada fue de 58,3 MPa, lo que implica una resistencia característica de 50,3 MPa (se asume $f_{gm} = f_{gk} + 8$), por lo que $f_{cd} = 33,5$ MPa. El resultado es de 1055 kN, que es mayor que en la práctica de los recalces por dos motivos: i) no se minora la resistencia por la inestabilidad por pandeo dada la

longitud del micropilote; ii) no se considera la pérdida de sección de la armadura tubular por corrosión al ser un ensayo de laboratorio controlado.

Ecuación 18. Resistencia a compresión del propio micropilote según el método de la Guía de Carreteras [7] que se ha simplificado para el caso de las probetas ensayadas.

$$R_{N,m} = (A_c f_{cd} + A_s f_{yd})$$

4.2.6. Realización de los ensayos.

Las muestras se han llevado a rotura en un pórtico de rotura de 100 Tn aplicando una carga a compresión en la placa superior de la armadura del micropilote (Figura 13a). Para permitir el descenso relativo del micropilote en el interior de la perforación, se han colocado placas de 70 mm de espesor dejando un hueco en el centro del dado de hormigón (Figura 13b). La carga aplicada se ha medido con el manómetro de la prensa y los desplazamientos relativos de micropilote y zapata colocando extensómetros según se muestra en la Figura 14. La velocidad de carga ha sido de 0,030 Tn/seg.

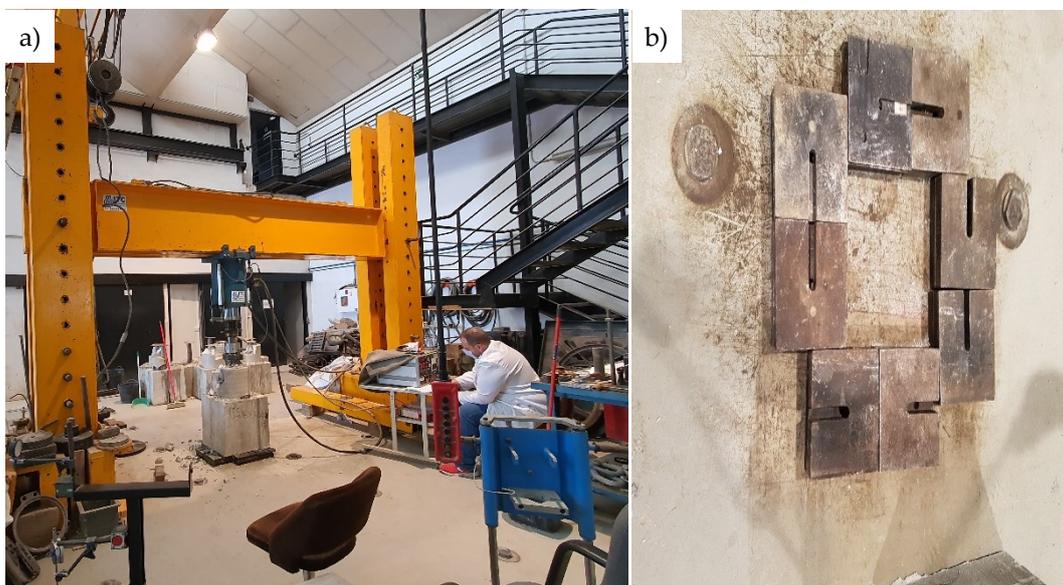


Figura 13. Imágenes del desarrollo de los ensayos. a) Pórtico de carga de 100 toneladas. b) Detalle de placa metálica para permitir el desplazamiento relativo del micropilote a través del cubo que de hormigón. Fuente: Elaboración propia.

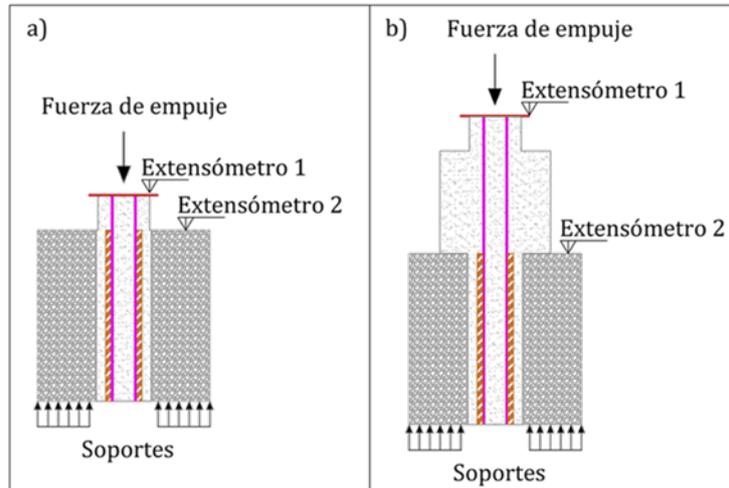


Figura 14. Esquema del ensayo a compresión hasta rotura en pórtico de carga: a) disposición de extensómetros en probeta de conexión convencional. b) Disposición de extensómetros en probeta con conexión con sombrero, con y sin armado. Fuente: Elaboración propia.

4.3. SIMULACIÓN NUMÉRICA.

El estudio de las tensiones y deformaciones que se generan en el fenómeno físico de la conexión directa de los micropilotes a las cimentaciones existentes se enmarca dentro del Problema Elástico de la Mecánica de Medios Continuos de los sólidos deformables. La resolución de este problema se puede abordar de forma analítica, numérica o mixta.

Encontrar una solución analítica al Problema Elástico sólo es posible cuando el problema se simplifica con el objetivo de captar la esencia del mismo. Esto sucede cuando se define un problema elástico lineal con simetría geométrica, de materiales y de cargas [83]. En estos casos se asumen hipótesis en las que se toman como nulas ciertas deformaciones o tensiones, obteniéndose los clásicos problemas de elasticidad plana [84-86] o con simetría axial [31]. Sin embargo, cuando el problema a resolver tiene la más mínima complejidad geométrica o de cargas, la resolución analítica se complica y una opción es recurrir a una solución en forma de series [87]. Por lo que queda una solución a medio camino entre lo analítico y lo numérico. Por último, la resolución numérica es la opción más versátil, ya que permite aproximar la solución del Problema Elástico para casos

con geometrías difíciles, y para diferentes estados de cargas y de condiciones de contorno. Entre los diferentes métodos de resolución numérica que se vienen aplicando en la mecánica computacional, el Método de los Elementos Finitos (MEF) es el más extendido y recurrido dadas las potentes herramientas informáticas comerciales disponibles, como Ansys, ABAQUS, ATENA o SAP2000, entre otras [88].

La resolución del Problema Elástico representativo de las probetas ensayadas, aunque se adelanta que se va a estudiar en régimen elástico y lineal, tiene la suficiente complejidad geométrica para optar por la simulación numérica, por lo que se ha recurrido al MEF del programa comercial Ansys para su resolución, al ser uno de los más recurridos en investigación [89-91]. Además, esta herramienta ayuda a resolver un mayor número de probetas y proporciona una interfaz gráfica de salida de resultados que facilita la comprensión de los mismos.

Antes de comentar brevemente como se han definido las probetas del plan de simulación con el programa Ansys, y de especificar las características de dicho plan, es conveniente introducir una descripción general del Problema Elástico, con el fin de exponer las bases científicas del problema que se está tratando. También se explica el objetivo de resolver el Problema Elástico, y del empleo de los criterios de rotura a la hora de interpretar los resultados.

4.3.1. Descripción general del Problema Elástico.

4.3.1.1. Definición

Se define el Problema Elástico como aquel problema que consiste en encontrar los desplazamientos, deformaciones y tensiones de un sólido deformable elástico sometido a un conjunto de fuerzas (volumen y superficie). La solución del problema debe cumplir ciertas premisas: el sólido debe estar en equilibrio (fuerzas y momentos) y debe existir compatibilidad de desplazamientos y deformaciones en todos los puntos. Además, se debe definir un modelo constitutivo que especifique matemáticamente las relaciones entre tensiones y deformaciones [92]. Entre las diferentes propuestas de modelos constitutivos, el más empleado, por su sencillez y por su eficacia a la hora de reproducir la relación tensiones-deformaciones cuando el material está en

régimen elástico, es la conocida Ley de Hooke generalizada [93]. Este modelo constitutivo propone un modelo constitutivo elástico y lineal.

En otras palabras, resolver el Problema Elástico consiste en encontrar una solución al problema de someter a un sólido deformable a un estado de cargas bajo unas condiciones de contorno cinemáticas (definir los puntos en los que ciertos movimientos son conocidos, generalmente con valor nulo). Es decir, cuando un sólido deformable se somete a un conjunto de fuerzas de volumen y de superficie (ya sean acciones o reacciones), los puntos del sólido van a modificar su estado tensional y, por tanto, se van a deformar. El modelo constitutivo son las expresiones matemáticas que establecen la relación entre tensiones y deformaciones, y que dependen de ciertos parámetros característicos de cada material (como el módulo de deformación longitudinal o el coeficiente de Poisson). Por último, la acumulación de estas deformaciones unitarias, dadas unas condiciones de contorno cinemáticas, proporciona los desplazamientos de los puntos del sólido. Una vez conocidas las tensiones, deformaciones y desplazamientos en el sólido deformable, que son compatibles con las fuerzas aplicadas y las condiciones de contorno, se ha encontrado una solución al Problema Elástico.

Esta explicación desde fuerzas a desplazamientos, se puede realizar de forma inversa. Es decir, dado un sólido deformable al que se le ha impuesto unos determinados desplazamientos en todos sus puntos, se calculan las deformaciones unitarias, después los estados tensionales asociados a cada punto, y por último las fuerzas de superficie y de volumen acordes con dichos desplazamientos.

Generalmente, un problema real es una combinación de las dos explicaciones anteriores. Se establece la geometría del sólido deformable y el material (que define el modelo constitutivo), y se establecen las condiciones a las que está sometido dicho sólido deformable. Por un lado se establecen las fuerzas de volumen y de superficie (cargas o acciones en el cálculo de estructuras), y por otro lado se indican los puntos en los que se conocen los desplazamientos (reacciones en el cálculo de estructuras). Como se acaba de indicar, el problema consiste en encontrar una solución que dé respuesta a todos los condicionantes expuestos y que cumpla las condiciones: el sólido debe estar en equilibrio y debe existir compatibilidad de deformaciones.

Hay que destacar que el problema se aplica a un sólido con cierto volumen, y las variables a conocer (tensiones, deformaciones o desplazamientos) se expresan en términos de campo. Por ejemplo, si la solución es analítica, el campo de tensiones será una expresión matemática que proporcione el estado tensional de cada punto del sólido. Por lo que, para estos casos, es imprescindible toda la matemática tensorial y operadores diferenciales relacionados con los campos escalares y vectoriales. Si la resolución fuera numérica, se conocería la información para ciertos puntos del sólido, y la información en puntos intermedios se obtendría mediante interpolación.

4.3.1.2. *Objetivo, resultados y criterios de rotura*

Conviene resaltar que, independientemente del método de resolución, el objetivo final de resolver el Problema Elástico para un caso práctico es conocer esos campos de tensiones, deformaciones y desplazamientos. Éstos proporcionan la información necesaria para identificar las zonas en las que se generan desplazamientos excesivos o aquellas en las se concentran tensiones que los materiales no pueden asumir.

Los desplazamientos excesivos dependen de cada caso, y vendrán condicionados por la funcionalidad de la estructura a la que pertenezca el sólido deformable. Pero, para decidir si el material no resiste el estado tensional, es preciso conocer sus características mecánicas (resistencia a compresión y tracción, curva tensión-deformación), con las que se establece el criterio de rotura/plastificación que mejor se le adapte. Si bien, estos criterios de rotura se suelen establecer en función de la resistencia a cortante del material o la energía desviadora, ambas definidas a partir de las tensiones principales, hay algunos criterios establecidos por la deformación unitaria máxima, como la teoría o criterio de Saint-Venant [93]. Por tanto, para conocer las zonas con mayor riesgo de rotura se determinan las tensiones principales en los diferentes puntos del campo de tensiones, ya que éstas se emplean para calcular los principales criterios de rotura/plastificación. Además, a partir de las tensiones principales es posible conocer todos los estados tensionales según la dirección que nos interese. Esto permite, por ejemplo, identificar zonas en las que hay tracciones (alguna dirección principal es positiva) de zonas que siempre están comprimidas independientemente de la dirección que se estudie (todas las tensiones

principales son negativas). Estos son los motivos de la gran importancia de conocer las tensiones principales.

Hay muchas propuestas de criterios de rotura (materiales frágiles) o plastificación (materiales dúctiles). Estas propuestas sirven para predecir el momento de fallo del material bajo un estado tensional tridimensional a partir de los resultados de un ensayo unidimensional [93]. Es decir, a partir de las tensiones principales de un estado tensional tridimensional ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$) se calcula una tensión equivalente σ_{eq} que se compara con el resultado del ensayo a tracción simple o compresión simple (σ_L). Los más conocidos son los criterios de Rankine [94], Mohr [95], Tresca [96, 97] o von Mises [98].

4.3.1.3. *El Método de Elementos Finitos*

El MEF es actualmente, el principal método de resolución del Problema Elástico en la mecánica de medios continuos aplicada a los sólidos, independientemente de las características de los materiales y de las teorías aplicadas [99]. Dentro de este campo, una de las ramas más utilizada por su sencillez y aplicabilidad es la teoría de la elasticidad, que es la que se va a emplear en este estudio [100].

En MEF consiste en dividir el continuo que se quiere estudiar en partes más pequeñas que se denominan elementos. Existen diferentes tipos de elementos según el número de dimensiones que contengan (tridimensionales, planos, lineales), y su elección depende de la forma del sólido que van a representar. Para el caso tridimensional, que es el que se emplea para simular las probetas ensayadas, las formas geométricas más empleadas para dividir el continuo son los tetraedros y los hexaedros. Los elementos finitos se componen de nodos, que son puntos que concentran la información más relevante a la hora de resolver el Problema Elástico. Estos nodos son los vértices de las formas geométricas de los elementos finitos, aunque también se pueden añadir los puntos medios de las aristas, o incluso un punto interior al mismo.

Una vez obtenidos los resultados de los nodos en forma de desplazamientos, se obtienen las deformaciones y, en función del modelo constitutivo empleado, las tensiones. En los puntos intermedios entre nodos, se puede obtener la información del campo correspondiente mediante interpolación numérica. Información más detallada sobre los fundamentos y métodos de

resolución del MEF se puede encontrar en los libros de Vázquez [100] y Hughes [99].

4.3.2. Plan de simulación numérica de las probetas

En este apartado se describe el plan de simulación numérica llevado a cabo con Ansys: definición de probetas, datos de entrada, resultados obtenidos, etc. Cabe destacar que se van a modelizar dos tipos de probetas: unas con micropilote sin armadura tubular (micropilote compuesto sólo por lechada), y otras con armadura tubular (micropilote compuesto por lechada y armadura). Se ha creído conveniente incluir esta diferenciación para ver la influencia de esta discontinuidad de rigidez en los resultados numéricos.

4.3.2.1. Descripción del procedimiento seguido con Ansys

La resolución numérica de los Problemas Elásticos que suceden en las probetas ensayadas se ha realizado por el MEF mediante la utilización del programa Ansys. Por lo tanto, el plan de simulación numérica consiste en recrear modelos de los ensayos de las probetas realizados (Tabla 6). En concreto, se realizan dos modelos por cada tipo de probeta (uno con armadura tubular y otro sin armadura tubular). Como cada probeta se ha ensayado con replicación (dos probetas con el mismo diseño), la carga máxima que se le introduce a cada modelo es la media de las cargas de rotura obtenidas para ambas probetas.

El procedimiento seguido con Ansys a la hora de definir cada uno de los modelos consta de las siguientes fases: i) definición geométrica, ii) asignación de materiales y sus propiedades, iii) definición de contactos y mallado, iv) fuerzas aplicadas y condiciones de contorno, v) obtención de resultados.

La definición geométrica se ha realizado definiendo los elementos en 2 dimensiones y, aplicando las herramientas de extrusionado y truncamiento, se ha conseguido obtener los elementos en 3D. Por ejemplo, se extrusiona un cuadrado de 500x500 mm con una altura de 500 mm y se le resta el círculo de la perforación de 200 mm de diámetro extruido también con una altura de 500 mm. Posteriormente se le añade el mismo cilindro de 200 mm de diámetro y altura de 500 mm y se le añade después otro cilindro que simula el micropilote. Este procedimiento varía según cada caso, pero en esencia es parecido para todas las

probetas. Durante esta fase, hay que diferenciar adecuadamente los elementos que componen las probetas, porque en la siguiente fase (ii) se asigna a cada uno de estos elementos volumétricos el material correspondiente. Las características de los materiales son las que se han indicado previamente en la definición de las probetas (4.2.4).

La tercera fase es la asignación de contactos entre los diferentes materiales, a los que se ha aplicado la condición de unidos (*bonded*). Las zonas de contacto son la superficie cilíndrica de perforación y, para las probetas con sombrero, la zona de contacto entre la corona del sombrero y el cubo de la zapata. Existen varias opciones para definir la zona de contacto y se barajó la opción de modelizar el contacto por rozamiento (*friction*), pero el modelo sólo convergía para ciertos valores de coeficiente de rozamiento muy elevados y los resultados eran poco fiables. Además, el interés de la simulación es conocer el funcionamiento estructural de la conexión antes de producirse deslizamiento, para el caso convencional, y de la rotura de la del sombrero. Por lo que interesa conocer deformaciones y tensiones en ambos tipos de conexión en régimen elástico y lineal. Es decir, estas simulaciones van a servir para visualizar las zonas de la conexión con mayor riesgo de rotura/plastificación y contrastar estos resultados con lo experimentado en los ensayos de las probetas. En esta misma fase, se genera el mallado o la definición geométrica de los elementos finitos. Siempre que la geometría de los bloques en contacto lo ha permitido, se ha procurado generar un mallado con elementos finitos tipo hexaedro (conexión convencional). En las probetas con sombrero se ha recurrido a elementos finitos tipo hexaedro y tipo tetraedro.

Las condiciones de contorno (cuarta fase) ha sido impedir el movimiento de la base, que es donde se colocan las chapas metálicas que dejan un hueco en el interior que permite el deslizamiento del micropilote en caso de rotura (Figura 13b). En esta misma fase se aplica la carga en la parte superior del micropilote. Como se adelantó, la carga aplicada en cada probeta es el resultado de los ensayos y se muestra posteriormente en el capítulo de Resultados.

Para finalizar, una vez resueltos los diferentes modelos, queda la generación de resultados. Los resultados que ofrece son los campos de desplazamientos, deformaciones y tensiones (todos en 3 dimensiones), con los que calcula los campos de tensiones principales, de tensión tangencial máxima o del criterio de

rotura de von Mises. En resultados se presentarán: desplazamientos totales en varias direcciones, tensión principal máxima (con el fin de conocer zonas traccionadas), deformaciones (criterio de Saint-Venant) y criterio de rotura de von Mises.

4.3.2.2. *Probetas diseñadas con armadura tubular y sin armadura tubular.*

En una primera fase de la simulación numérica se modelizaron las probetas considerando los volúmenes del dado, el micropilote y el sombrero, aplicando la carga sobre el conjunto en la parte superior de la superficie horizontal del micropilote (Figura 15).

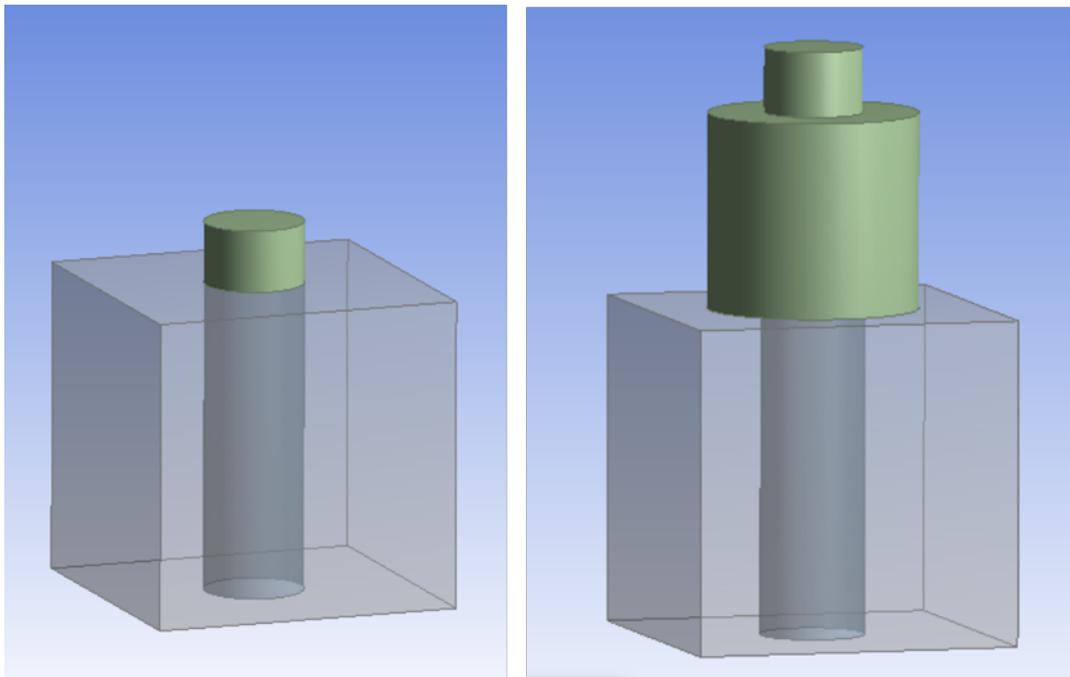


Figura 15. Modelos de muestras en ANSYS del sistema de conexión convencional y el nuevo sistema con sombrero considerando los volúmenes de dado, micropilote y sombrero. Fuente: Elaboración propia.

En una segunda fase de la simulación numérica se modelizaron las muestras considerando los volúmenes del dado, el micropilote y el sombrero, estando todas ellas atravesada por la armadura tubular del micropilote (Figura 16). En este caso la carga sobre el conjunto se aplicó en la superficie superior de la armadura tubular que es la que está en contacto directo con la chapa de carga.

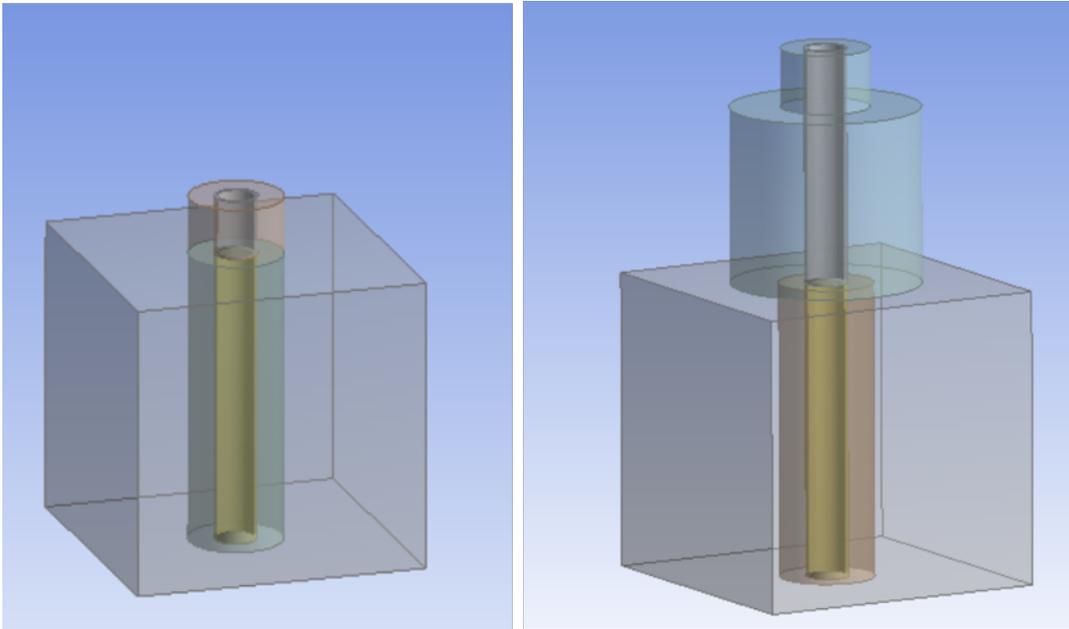


Figura 16. Modelos de muestras en Ansys del sistema de conexión convencional y el nuevo sistema con sombrero considerando los volúmenes de dado, micropilote y sombrero estando todos ellos atravesados por la armadura tubular del micropilote. Fuente: Elaboración propia.

V – RESULTADOS

V - RESULTADOS

Este capítulo recoge los resultados obtenidos en las tres perspectivas empleadas para analizar la problemática de la conexión directa de los micropilotes. Empieza por los resultados del estudio económico, después presenta y analiza los resultados de los ensayos de las probetas elaboradas y, finalmente, muestra los resultados de la simulación numérica.

5.1. JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA.

5.1.1. Análisis determinístico.

El primer resultado de esta sección es el diseño de los proyectos de recalce en función de la tensión de adherencia empleada. Se analiza de forma conjunta para los 29 proyectos comparando los siguientes parámetros: número de micropilotes construidos (n), longitud media de los micropilotes (\bar{L}), coste medio de construcción de los micropilotes (\bar{C}), medición total de los micropilotes ($\sum L$), y coste de construcción global (CC).

Los resultados indican que el número de micropilotes a construir se reduce conforme aumenta el valor de la tensión de adherencia empleado. Mientras que reducir el número de micropilotes implica que éstos tienen mayor longitud y coste unitario, esto no se traduce en un incremento a nivel global. Es decir, la medición total y el coste global se reducen por el fuerte descenso en el número de micropilotes requeridos. Estos ahorros en unidades de construcción se traducen directamente en ahorros económicos. En términos relativos, cambiar de la formulación del Eurocódigo 2 [18] y Código Estructural [20] a la americana ACI-318-19 [17] implica una reducción del 57% de perforaciones, del 39% de la medición de los micropilotes, del 40% del ahorro económico total. Estos ahorros pueden ser ligeramente superiores si se emplea la formulación propuesta por Oteo [21] en lugar del valor de la ACI-318-19[17] (Tabla 8).

		Valores agregados					Ahorros (%) respecto Eurocódigo 2 [18]		
Tensión de adherencia (τ_{adh}) (MPa)		n	\bar{L} (m)	\bar{C} (€)	ΣL (m)	CC(M€)	n (%)	ΣL (%)	CC (%)
En vigor	0,206 [18]	3137	9,12	778,3	28.606	2.442	-	-	-
	0,552 [17]	1345	13,10	1097,1	17.516	1.476	-57%	-39%	-40%
Derogadas	0,219 [19]	2942	9,28	790,6	27.298	2.326	-6%	-5%	-5%
	0,566 [23]	1332	13,08	1103,2	17.423	1.469	-58%	-39%	-40%
	0,637 [24]	1241	13,58	1149,6	16.857	1.427	-60%	-41%	-42%
	0,653 [26]	1206	13,80	1171,5	16.648	1.413	-62%	-42%	-42%
	0,679 [21]	1186	13,92	1182,8	16.504	1.403	-62%	-42%	-43%

n: número de micropilotes – número de perforaciones (unidad); \bar{L} : longitud media de los micropilotes (m); \bar{C} : coste medio por micropilote (€); ΣL : medición total de los micropilotes (m); CC: coste de construcción de los proyectos de recalce (M€: millones de euros).

Tabla 8. Coste de los proyectos de recalce dependiente de la formulación de tensión de adherencia empleada. Fuente: Elaboración propia.

Un análisis más detallado comparando el Eurocódigo 2 y la norma americana ACI-318-19 se muestra en la Figura 17. La disminución de n, ΣL y CC se relaciona con otros parámetros: espesor de la cimentación (h), espesor de la capa de suelo no resistente (e_0), tensión media de rozamiento por fuste (τ_f), y carga promedio que recibe el elemento de cimentación (\bar{Q}). La máxima disminución en perforaciones se encuentra en el 60%, la reducción media en la medición de los micropilotes podría alcanzar el 50%, mientras que el ahorro económico podría incluso superar el 50%. Pero la mayoría de los ahorros se encuentra en el rango del 20-50%. En esta gráfica, el espesor de la cimentación no parece ser un parámetro relevante. Sin embargo, para el único caso en el que el espesor de la cimentación es elevado (1600 mm), apenas hay disminuciones de los parámetros analizados. Esto se debe a la gran superficie de contacto en estas conexiones directas (gracias al gran canto de esta cimentación superficial).

No se observan relaciones para los siguientes parámetros: espesor de la capa de rellenos no resistente y el rozamiento por fuste en los terrenos más profundos. Pero, sí que se observa que cuanto mayor es la carga media por elemento de cimentación, mayor es la disminución de los parámetros de salida: n , $\sum L$ y CC . Esta relación es especialmente clara entre la carga promedio y la disminución de las perforaciones. Esta reducción de las perforaciones es casi lineal hasta alcanzar el 60%, cuando las cargas alcanzan un valor medio en torno a 1000 kN. Entonces esta reducción se estabiliza en el valor del 60%.

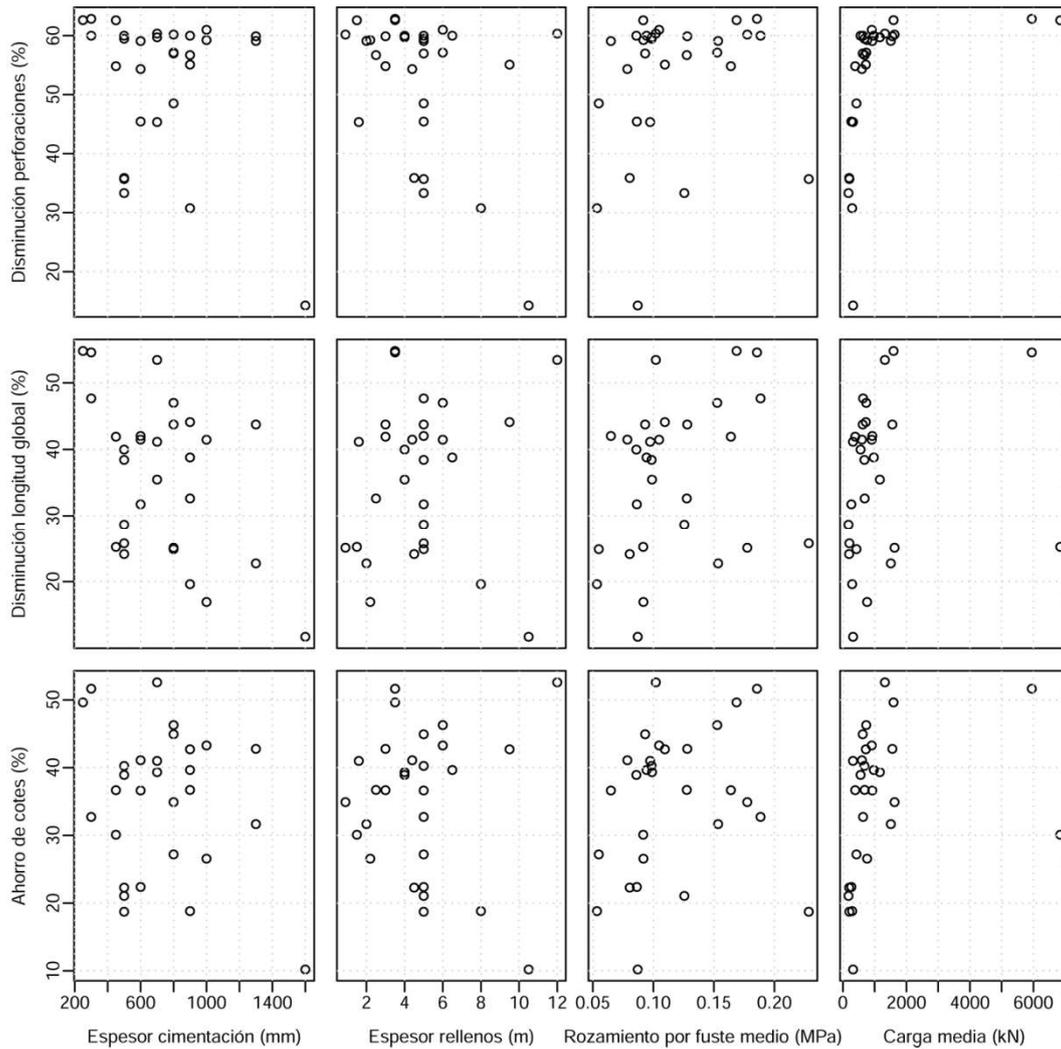


Figura 17. Disminución del número de perforaciones (n), de la medición total de los micropilotes ($\sum L$), y del ahorro económico para cada proyecto de recalce (CC), teniendo en cuenta el espesor de la cimentación (h), el espesor de la capa de rellenos no resistente (e_0), y la tensión media de rozamiento por fuste (τ_f) y la carga promedio. Fuente: Elaboración propia.

Las cargas han resultado decisivas en las diferencias de coste entre las dos tensiones de adherencia comparadas (Eurocódigo 2 y ACI-318). Por lo tanto, en este sentido, se realiza un análisis más detallado por cada elemento de cimentación. La Figura 18a indica que el número de perforaciones empieza a descender cuando las cargas están alrededor de 500 kN, y este puede ser incluso superior al 60% cuando las cargas son superiores a 700 kN. En el mismo sentido, la longitud total de los micropilotes por elemento empieza a descender cuando la carga es superior a 500 kN (Figura 18b). Pero, en el caso de la longitud global, hay algunos elementos cuya reducción se encuentra alrededor del 20% y otros que su reducción se encuentra en el rango 35-45%.

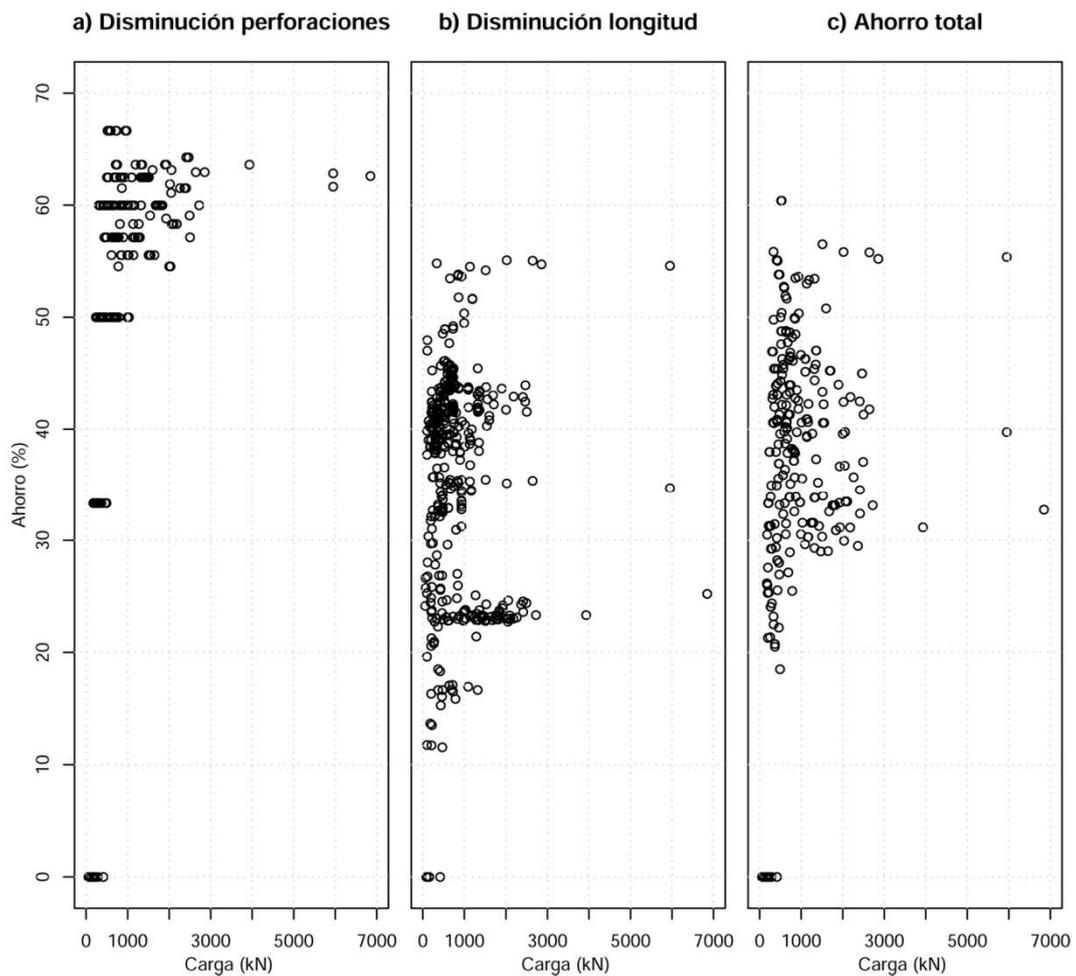


Figura 18. a) Disminución del número de perforaciones por zapata según la carga que reciben. b) Descenso en la medición global de micropilotes por zapata (aislada, corrida o losa) según la carga que reciben. c) Ahorros económicos por zapata según la carga que reciben. Fuente: Elaboración propia.

La razón detrás de esta diferencia es el suelo. Específicamente, se debe al espesor de los estratos poco resistentes, sobre todo el más superficial que generalmente no se considera en los cálculos (como sucede con los rellenos).

Cuanto mayor es el espesor de este estrato, es interesante construir el menor número de micropilotes, ya que dejan de construirse tramos de micropilote que no colaboran en la comprobación de hundimiento. Los ahorros por elemento pueden alcanzar el 60% (Figura 18c), teniendo un comportamiento similar a la disminución en la longitud total de los micropilotes (Figura 18b), por lo que es la variable clave a la hora de reducir costes. Finalmente, se observa que el valor de tensión de adherencia usado deja de tener importancia cuando las cargas son inferiores a 200 kN (ver Tabla 17, Tabla 18, Tabla 19, Tabla 20 y Tabla 21 del Anexo 1). Por lo tanto, para cimentaciones que reciben cargas pequeñas (200-300 kN), la resistencia de la conexión directa con dos micropilotes usando el Código Estructural es adecuada, e incrementar la tensión de adherencia no reduciría el número mínimo de micropilotes ($n=2$) y las longitudes totales de los micropilotes serían las mismas. Esta conclusión preliminar para los 29 proyectos de recalces analizados se generaliza en un análisis independiente posterior.

5.1.2. Resultados de la Simulación Monte Carlo.

Como se ha comentado previamente se emplea la distribución de probabilidad de las tensiones de adherencia obtenidas por Pachla [4] para zapatas de hormigón en masa tipificado por c20/25. Se recuerda que esta distribución tiene los siguientes parámetros de cálculo: $\tau_{m,d}$ 0,767 MPa y $\sigma_d = 0,129$ MPa. Además, la Simulación Monte Carlo, como se indica en Metodología, se lleva a cabo generando 50.000 valores aleatorios de esta distribución.

El primer resultado de esta simulación es la distribución de costes de recalces globales (CC) asociada al parámetro tensión de adherencia. Se ha representado en forma de histograma (Figura 19), en el que se observa que es una distribución con un sesgo positivo y una cola derecha muy pesada (que no se aprecia dada la escala). Esto indica que la mayoría de los presupuestos de estos proyectos se concentran en valores relativamente altos de tensión de adherencia. En términos probabilísticos, los valores de las normativas americana ACI-318-19 [17] y española EH-80 [23] se encuentran en el percentil 95%. En esta misma línea, el uso de las formulaciones de Rodríguez-Ortiz [24] y Oteo [21] estarían por debajo de este percentil, entre el 85-95%. Por el contrario, los proyectos más caros serían los que se calcularan con la normativa EHE-08 [19] y Eurocódigo 2 [18], que

estarían en los percentiles 99,998% y 99,999%, respectivamente. Por lo tanto, aplicar las formulaciones de estos códigos estructurales de esta forma implica diseñar los proyectos de recalce más caros, especialmente si el Eurocódigo 2 [18], que es equivalente al Código Estructural [20] es aplicado.

Este hecho se observa de manera más clara cuando los valores de coste global (CC) de la Tabla 8 se incluyen, de forma ordenada de menor a mayor, en la Figura 19, destacando los valores correspondientes a las normativas americana [17] y europea [18].

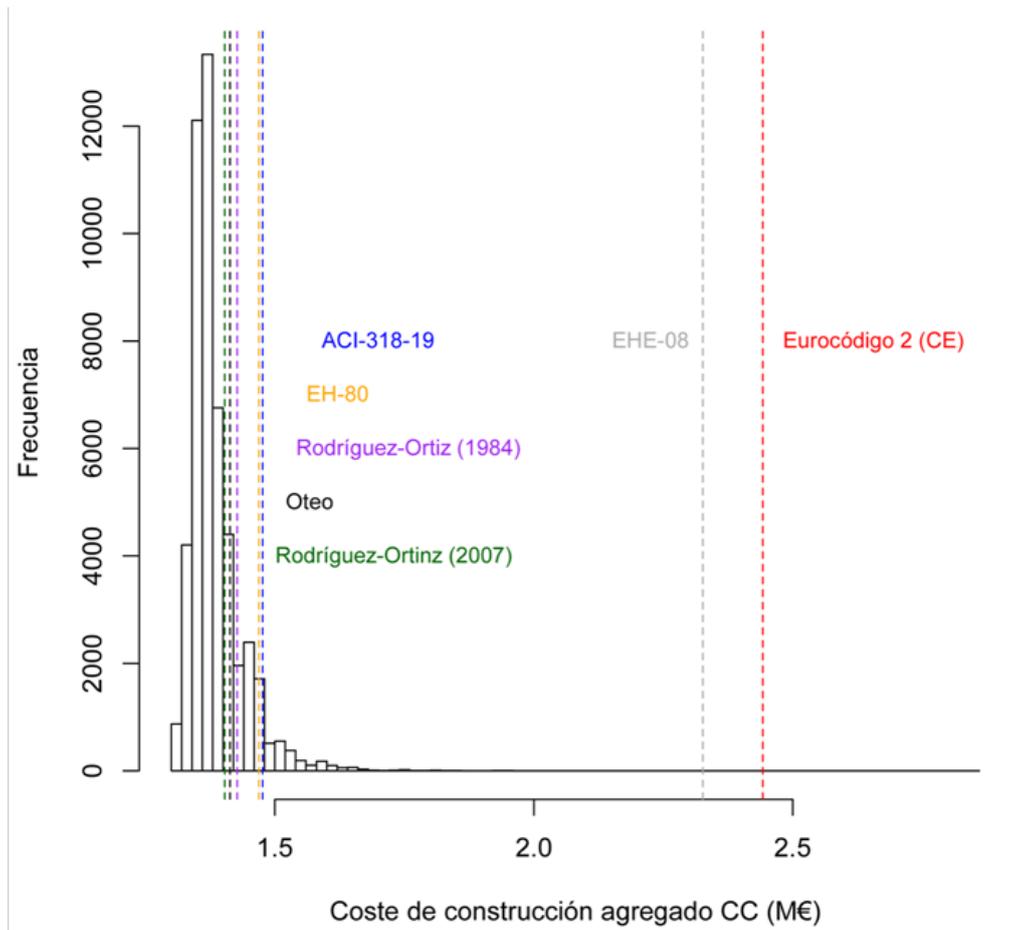


Figura 19. Histograma del coste agregado (CC) de los proyectos de recalce que resulta de la Simulación Monte Carlo. Fuente: Elaboración propia.

La representación ordenada de los resultados de la Simulación Monte Carlo (CC frente a tensión de adherencia) muestra como disminuye el coste conforme se incrementa la resistencia de la tensión de adherencia en la fase de diseño (Figura 20). En la Figura 20, los resultados del coste agregado calculado previamente para las siete formulaciones también se incluyen (resultados de la Tabla 8). Esta gráfica

también indica que el valor más restrictivo es el de la normativa europea [18]. El descenso del coste es muy pronunciado al comienzo de la curva, empezando a estabilizarse a partir de los valores de las normativas ACI-318-19 [17] y EH-80 [23]. La distribución normal de tensiones de adherencia utilizada en la Simulación Monte Carlo se representa en el fondo de la gráfica. La línea roja vertical representa el percentil del 5% (que tiene una probabilidad de ser superado del 95%) o valor característico de la tensión de adherencia. Este valor es de 0,558 MPa. Esta línea gráficamente indica que hay tres formulaciones dentro de este grupo, siendo el valor de la normativa americana el que mejor se ajusta a este valor. Además, usar valores de tensión de adherencia superiores a 0,558 MPa no estaría económicamente justificado ya que los ahorros económicos empiezan a ser poco relevantes. En este sentido, las formulaciones propuestas por Rodríguez-Ortiz [24, 26] y Oteo [21] tendrían un menor coeficiente de seguridad, aunque se encuentren en la cola izquierda de la distribución. Una interesante conclusión que se deriva de estos resultados es que sería económicamente ineficiente usar un valor de tensión de adherencia superior a 1 MPa, ya que a partir de este valor los costes se estabilizan y no se lograría ningún tipo de ahorro económico.

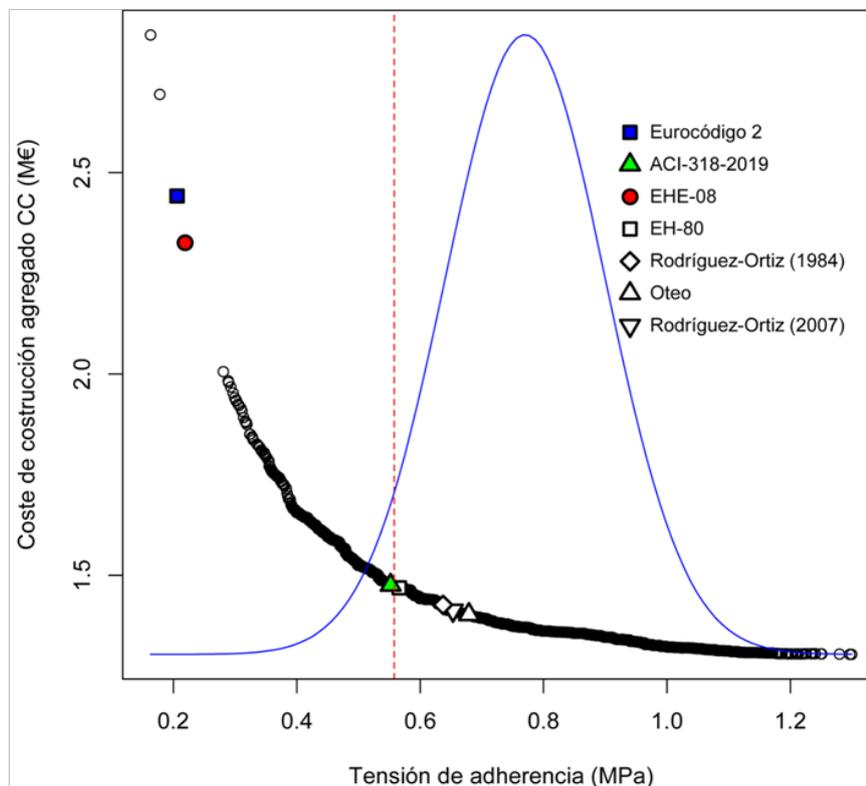


Figura 20. Representación conjunta de la variación del coste de los proyectos agregados (CC) junto con la distribución normal de tensión de adherencia en el fondo. Fuente: Elaboración propia.

Otra importante conclusión que se desprende al ver la Figura 20 es que, conforme se aumenta el valor de la tensión de adherencia, el coste siempre descende independientemente del resto de parámetros. Esto confirma que la comprobación resistente de la conexión es limitante en el diseño de recalces, sobre todo en el rango 0,20-0,40 MPa, que es el que más se usaría al aplicar estrictamente las normativas vigentes en Europa.

5.1.3. Discusión del estudio económico.

La revisión bibliográfica realizada ha puesto de manifiesto que no hay una formulación específica adaptada al fenómeno físico resistente en la conexión directa de los micropilotes. En un principio, en ausencia de alguna metodología, se recurrió a la resistencia a cortante del hormigón, y ahora la práctica más extendida es usar la formulación de cálculo de esfuerzo rasante en juntas de hormigonado. Tiene lógica usar ésta, ya que la conexión directa también es una junta de hormigonado, pero entre hormigón y lechada. El problema es que en Europa, el cambio en el método de cálculo implica que la resistencia de la conexión directa se reduzca a la mitad, lo que implica un incremento medio de los costes en los proyectos de recalce del 40%. Los mayores incrementos ocurren para grandes estructuras que transmiten grandes cargas a las cimentaciones, como las losas de cimentación, sobre suelos con grandes rellenos en las capas más superficiales (Figura 17). Además, este cambio supone un incremento en el tiempo de ejecución, de materiales y de generación de residuos. Sin embargo, se podría utilizar un valor de tensión rasante de la normativa americana ACI-318-19 [17] del mismo orden de magnitud que los utilizados anteriormente en Europa.

La simulación Monte Carlo proporciona un análisis de sensibilidad completo que permite entender las relaciones no lineales entre la tensión de adherencia y el coste de los proyectos de recalce en términos probabilísticos. El histograma obtenido confirmaría que la tensión de adherencia es el parámetro más limitante ya que para sus valores más bajos se obtendrían los proyectos más caros, independientemente del resto de parámetros. Esta marcada relación no ocurriría con otra de las verificaciones estructurales, como es la propia resistencia del micropilote, ya que su valor mínimo es mucho mayor que la resistencia de la conexión directa.

Tomando como referencia las siete formulaciones usadas, no merece la pena exceder la tensión de adherencia que proporciona la normativa americana ACI-318-19, ya que no se alcanzaría un ahorro económico sustancial. La diferencia

de coste de aplicar la normativa americana y la formulación propuesta por Oteo sería sólo del 3%. Por lo que este ahorro no justificaría el incremento de riesgo según la distribución de probabilidad usada, pasando del percentil del 4,78% al 24,76%. En línea con esto, no estaría económicamente justificado usar valores elevados de tensión de adherencia, ya que la comprobación de la resistencia de la conexión directa dejaría de ser limitante, como se ha comentado previamente. Ahora, vistas las resistencias del resto de comprobaciones, la limitación estaría en la interfaz lechada-acero. Esto implicaría aumentar el número de barras corrugadas en la zona de conexión (A_{sr}), especialmente si el espesor de la cimentación es pequeño. Para valores de tensión de adherencia superiores 1,0 MPa la carga que recibe cada micropilote es elevada y sería necesario aumentar la armadura tubular (A_{st}). Esta última variable es la que más incrementa el coste ya que es necesario reforzar toda la longitud del micropilote. El recubrimiento de la lechada debe garantizar la correcta transmisión de fuerzas [30], y puede que sea también necesario incrementar el diámetro del micropilote, lo que supone utilizar mayor volumen de lechada. La última consideración es el pandeo de los micropilotes, que para los casos estudiados se alcanza un valor máximo de 22 metros, que supone una esbeltez geométrica menor de 150, por lo que, en principio, no hay riesgo de inestabilidad por pandeo [60].

Para completar las reflexiones anteriores, se ha visto conveniente ampliar los cálculos realizados con otro análisis más detallado independiente de los casos de estudio con el fin de cuantificar el ahorro esperado cuando la tensión de adherencia varía en el rango 0,20-1,20 MPa que, visto lo anterior (ver Figura 7 y Figura 20), parece el intervalo más razonable. En este análisis se incluyen todos los parámetros incluidos previamente: i) cargas, ii) espesor de la capa de rellenos, iii) rozamiento por fuste medio del suelo (τ_f), y iv) el espesor de la cimentación (h). Los cálculos se realizan para un único micropilote y se ha reducido el incremento de longitud en el algoritmo (ΔL) de cálculo a 10 mm.

Para ello, los puntos de las curvas son los ahorros medios debidos a incrementar la tensión de adherencia desde un valor mínimo de 0,200 MPa hasta un valor máximo de 1,200 MPa. Es decir, cuando se aplica el primer valor de 0,200 MPa el ahorro es nulo. Para incluir la influencia de la carga, cada punto de las curvas es el ahorro medio obtenido de cambiar la carga en el intervalo [400-4.000] (kN) con un incremento de 100 kN, ya que se ha visto que son los valores más representativos de los casos anteriores. Es decir, para cada valor de tensión de adherencia se calcula el presupuesto de 36 cargas y se representa el ahorro medio respecto a la tensión de adherencia más baja (0,200 MPa).

Los cálculos se han repetido para diferentes espesores de capa de rellenos de suelo más superficiales. Se han considerado 6 espesores: de 0 a 5 metros con incremento de 1 metro. También se ha incluido la influencia de la resistencia media por fuste del terreno (0,08 MPa a 0,20 MPa) y el espesor de la cimentación considerando tres casos diferentes: 0,50 m, 0,75 m y 1,0 m.

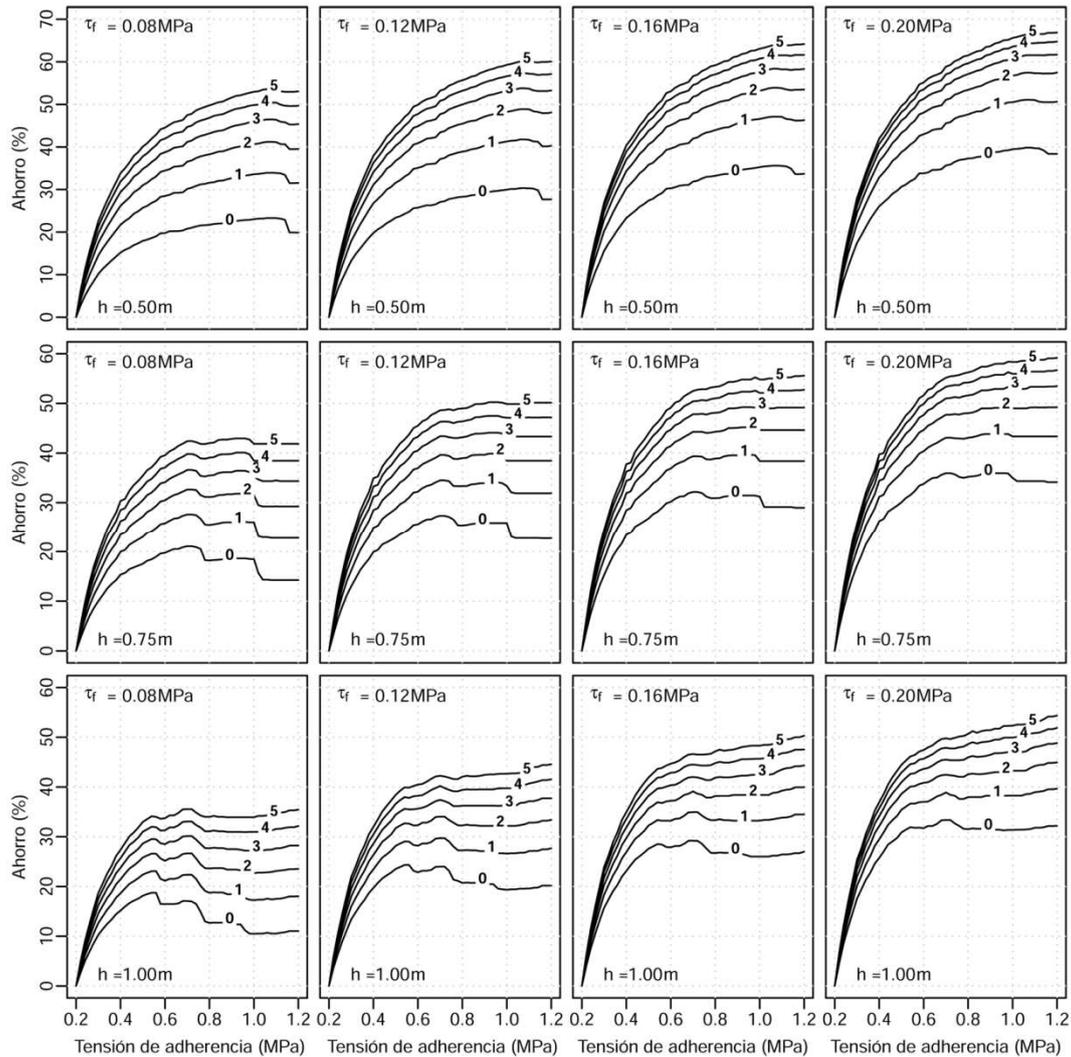


Figura 21. Ahorros medios relacionados con: la tensión de adherencia en MPa, el espesor de la capa de rellenos (e) en metros que son los números insertados en las curvas, el rozamiento por fuste en MPa, y el espesor de la cimentación (h) en metros. Fuente: Elaboración propia.

El resumen de estos cálculos se muestra en la Figura 21, que aglutina varias gráficas en las que se dibuja el ahorro esperado dentro del intervalo de carga seleccionado frente a la tensión de adherencia media. En cada gráfica, dicho

ahorro medio se muestra por espesor de capa de rellenos. Las 12 gráficas se dividen según el rozamiento por fuste (τ_f) y según el espesor de la cimentación (h).

Los resultados confirman que los ahorros sustanciales siempre ocurren cuando aumenta el espesor de la capa de rellenos. Se ha incluido la opción de que no haya capa de rellenos, pero no es lo habitual en proyectos de recalces, ya que en la práctica esta capa más superficial no suele ser considerada en los cálculos (al menos los dos primeros metros), con el fin de evitar posibles riesgos de lavados de finos por filtraciones de agua en el edificio.

Se observa que cuando la capacidad de carga del suelo es pequeña, los ahorros relativos son menores ya que la longitud de los micropilotes es mucho mayor, y no construir un micropilote es menos relevante en términos relativos.

El espesor de la cimentación también resulta decisivo. Para zapatas con poco espesor, la resistencia de la conexión se incrementa sustancialmente cuando aumenta la tensión de adherencia, reduciendo el número de micropilotes sin necesidad de incrementar el refuerzo local en la zona de la conexión. Esta conclusión es especialmente relevante para losas de cimentación flexibles con pequeño espesor.

Por último, este análisis vuelve a indicar que no está justificado económicamente exceder el valor de 0,60 MPa. Los ahorros no compensan el incremento de riesgo. Incluso alcanzado sólo este valor de 0,60 MPa se pueden conseguir grandes ahorros en el momento del diseño, sobre todo en cimentaciones con pocos espesores sobre terrenos resistentes.

Finalmente, es necesario destacar que el valor propuesto por la ACI-318-19 es el percentil 5% de la distribución de probabilidad de la tensión de adherencia obtenida por Pachla [4] para cimentaciones de hormigón en masa con resistencia c20/25. Los valores de esta distribución han sido minorados por el coeficiente de seguridad de los materiales. Por lo que, si se añade el incremento de seguridad debido a la mayoración de cargas, la garantía de la resistencia de la conexión alcanzaría el 100%. Por lo que, si los resultados de los ensayos de laboratorio de Pachla [4] fueran una referencia a la hora de diseñar la resistencia de la conexión directa, sería recomendable utilizar el valor mínimo de tensión rasante que incluye la ACI-318-19 [17] en lugar de emplear la normativa del Eurocódigo 2 [18]. Además, es bueno reseñar que la distribución de probabilidad utilizada es la de probetas de hormigón en masa, cuyo valor de tensión de adherencia es menor que los de hormigón armado ($\tau_m = 2,38$ and $\sigma = 0,32$ MPa). Por lo que, esta

comparativa apoya, en términos de seguridad, el uso de los valores de tensión de adherencia de la ACI-318-19 en cimentaciones de hormigón armado.

5.2. RESULTADOS EXPERIMENTALES.

Los resultados experimentales se presentan en tres apartados sucesivos. En primer lugar se describen cualitativamente los ensayos realizados, centrandose esta descripción en las diferentes tipologías de fallo. En segundo lugar se muestran los resultados numéricos obtenidos, en términos de carga última de rotura (P_u) y deformaciones (δ_u). Por último, se presentan los resultados del análisis estadístico de los datos numéricos anteriores mediante la herramienta matemática ANOVA, que es la técnica estadística de contraste empleada en el Diseño de Experimentos (DoE).

5.2.1. Descripción de los tipos de fallo en los ensayos.

A la hora de describir los modos de fallo de los ensayos se diferencian cuatro zonas en las probetas: zona micropilote, zona zapata, zona sombrero, zona interna del micropilote (Figura 22). Además, se ha definido la rotura dúctil como aquella en la que no se ha producido la rotura monolítica de la zapata y la conexión mantiene resistencia después de alcanzar la carga pico de rotura (P_u). Por el contrario, se ha considerado rotura frágil, cuando el proceso desde la aparición de la primera fisura hasta alcanzar la carga máxima se ha producido rápidamente, rompiéndose la zapata de forma monolítica o produciéndose un desplazamiento relativo del micropilote tal que impide a la conexión mantener una resistencia residual después de la carga pico de rotura (P_u).

De forma general, en el desarrollo de los ensayos se han observado dos tipologías de fallo comunes a todas las probetas: (i) rotura de la cabeza del micropilote (zona micropilote) por separación lechada-acero y (ii) rotura monolítica del bloque de hormigón en masa (zona zapata). No obstante, también se han presentado otras tipologías de fallo características del tipo de conexión: convencional, con sombrero y con sombrero armado.

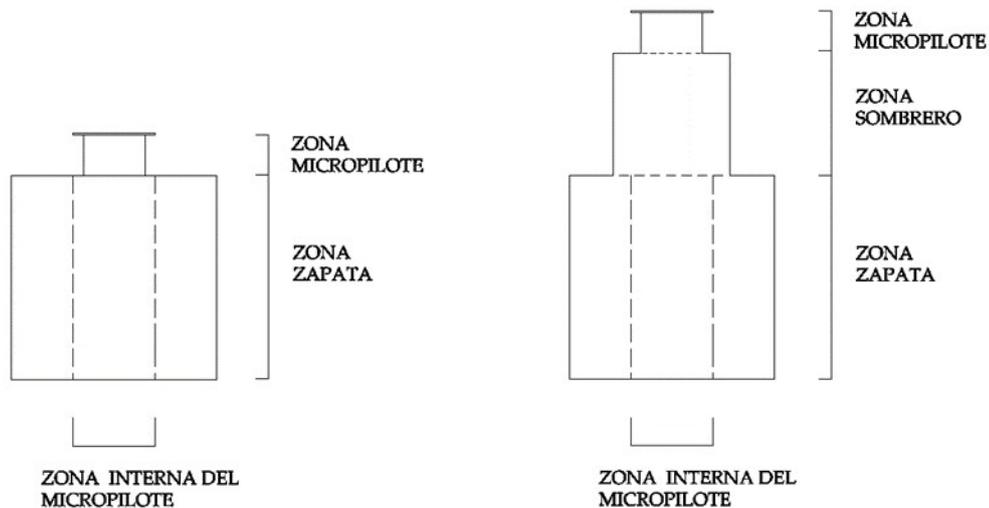


Figura 22. Esquema de las diferentes zonas de las probetas a la hora de analizar los resultados de los ensayos.
Fuente: Elaboración propia.

De forma general para todas las probetas, el desarrollo de los ensayos ha mostrado que el diseño de la cabeza del micropilote que recibe la carga de la prensa no es capaz transmitir el axil de forma uniforme. A pesar de haber garantizado la conexión entre la placa de carga y la lechada mediante la perforación de la placa metálica de conexión. En la mayoría de los especímenes se ha producido la rotura frágil de la lechada en la cabeza al despegarse de la armadura tubular, debido a la deformación diferencial que experimentan ambos materiales. Este fenómeno, que se observa claramente en la Figura 23a para una probeta de conexión convencional, no se ha extendido a la zona interna del micropilote, donde hay barras corrugadas soldadas, por lo que se deberían haber prolongado estas barras a toda la armadura tubular con el fin de aumentar la adherencia lechada-acero en esta zona. Esto indica la dificultad de garantizar la hipótesis de Saint-Venant en la sección del micropilote. No obstante, el despegue de la lechada no implica la rotura del micropilote, ya que la carga se sigue transmitiendo por la armadura tubular y las barras soldadas hacia la conexión, como ocurre en ensayos de otros autores que habían dejado la armadura sin recubrimiento en la parte externa de la conexión [4, 6, 29].

Respecto a los especímenes sin sombrero (C1 a C8), la mayoría han experimentado fallo por deslizamiento brusco del micropilote dentro del bloque (Figura 23b). En muchos casos han aparecido fisuras en la zona de la zapata

(Figura 23c), e incluso en un caso se ha llegado a producir una rotura monolítica (frágil) de la misma (Figura 23d).



Figura 23. Fotografías de roturas en los ensayos de la conexión convencional: a) rotura de la cabeza del micropilote; b) deslizamiento del micropilote; c) fisuras en la zapata; d) rotura monolítica de la zapata. Fuente: Elaboración propia.

En los especímenes con sombrero y sin armadura se produce un mecanismo de rotura mixto (S1-S16). En general, se inicia con la fisuración de la cabeza del micropilote al igual que en las probetas C1-C8 (Figura 24a). A continuación se propagan o inician estas fisuras a la parte superior del sombrero, indicando que la zona de unión micropilote-sombrero es una zona de concentración de tensiones (Figura 24b). Estas fisuras se transforman en micro-roturas dentro de la lechada en la zona del sombrero que, junto con la deformación del acero del micropilote, hacen que se produzca un pequeño deslizamiento relativo del mismo respecto al dado de hormigón, que se observa al finalizar el ensayo (Figura 24c). Al seguir aumentando la carga se producen dos tipos de fallo: i) rotura del sombrero por

punzonamiento y desplazamiento del micropilote (rotura más dúctil), ii) fisuras del bloque de hormigón que derivan en la rotura monolítica del mismo. A veces el fallo es mediante una combinación de ambos, que se genera de forma repentina provocando una rotura frágil que genera un descenso brusco del micropilote (Figura 24d).



Figura 24. Fotografías de roturas en los ensayos de la conexión con sombrero sin armadura: a) rotura de la cabeza del micropilote; b) deslizamiento del micropilote; c) fisuras en la zapata; d) rotura monolítica de la zapata. Fuente: Elaboración propia.

Respecto a las probetas con sombrero armadas (SA1-SA16), se producen los mismos mecanismos de rotura mixtos que para las probetas S1-S16. Primero,

fisuración de la cabeza del micropilote (Figura 25a). Después, propagación hacia la parte superior del sombrero y deslizamiento del acero del micropilote que, si la zapata resiste, termina incrustando la armadura en el sombrero (Figura 25b). Lo que provoca el deslizamiento del micropilote a través de la zapata, saliendo por la parte inferior según la posición del ensayo (Figura 25c). Al igual que antes, la concentración de tensiones hace que se produzca o i) la rotura del sombrero y desplazamiento del micropilote (Figura 25d) o ii) fisuras del bloque de hormigón que derivan en la rotura monolítica del mismo (Figura 25e). Aunque es habitual el fallo combinado que provoca un descenso brusco del micropilote (Figura 25f).

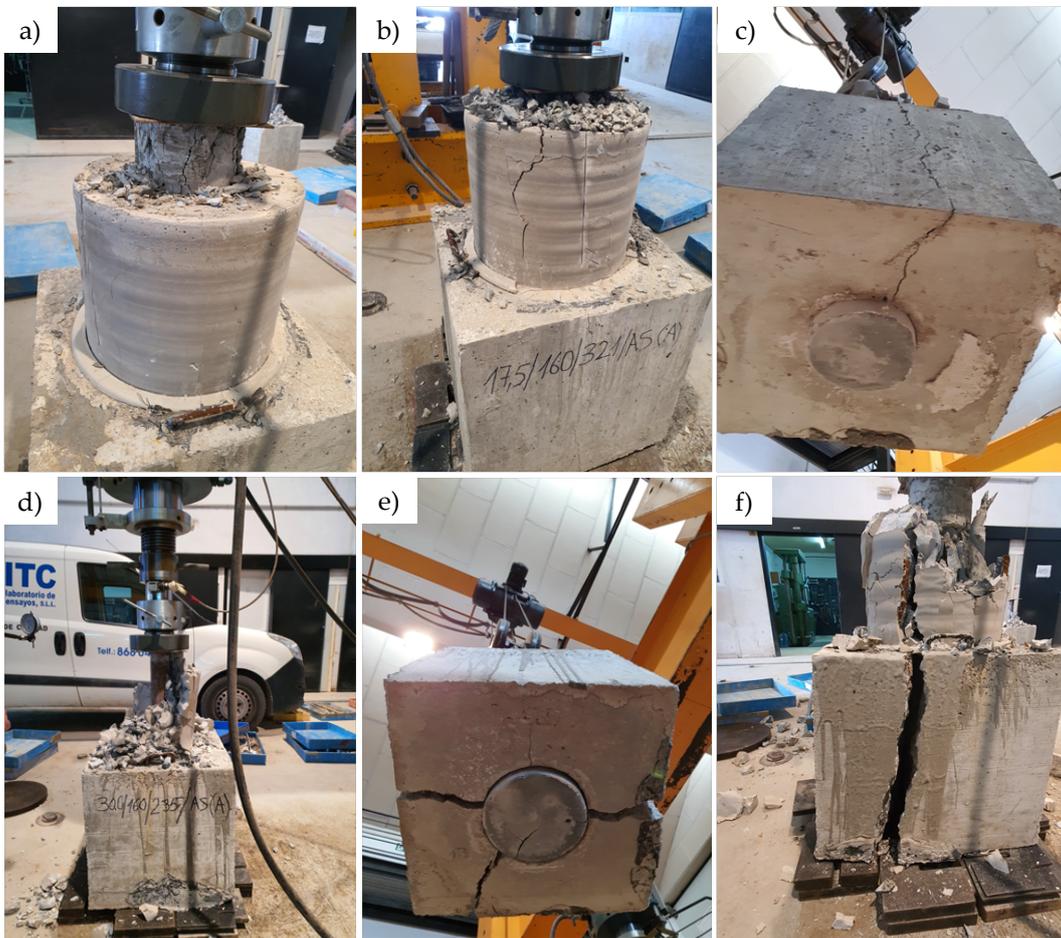


Figura 25. Fotografías de roturas en los ensayos de la conexión con sombrero con armadura (SA1-SA16): a) rotura de la cabeza del micropilote; b) deslizamiento del micropilote dentro del sombrero y de la perforación; c) deslizamiento del micropilote; d) rotura del sombrero; e) rotura monolítica de la zapata; f) rotura monolítica del sombrero y la zapata. Fuente: Elaboración propia.

Como norma general, cuando se produce la rotura monolítica del bloque, la zona interna del micropilote (ver Figura 22) permanece intacta (Figura 26a), lo que indica que las barras soldadas a la armadura tubular proporcionan una gran resistencia a esta zona. Sin embargo, en algunas probetas se ha producido un estado de fracturación tal que ha permitido observar claramente las fisuras o fracturas generadas en distintas zonas de las probetas (Figura 26b).

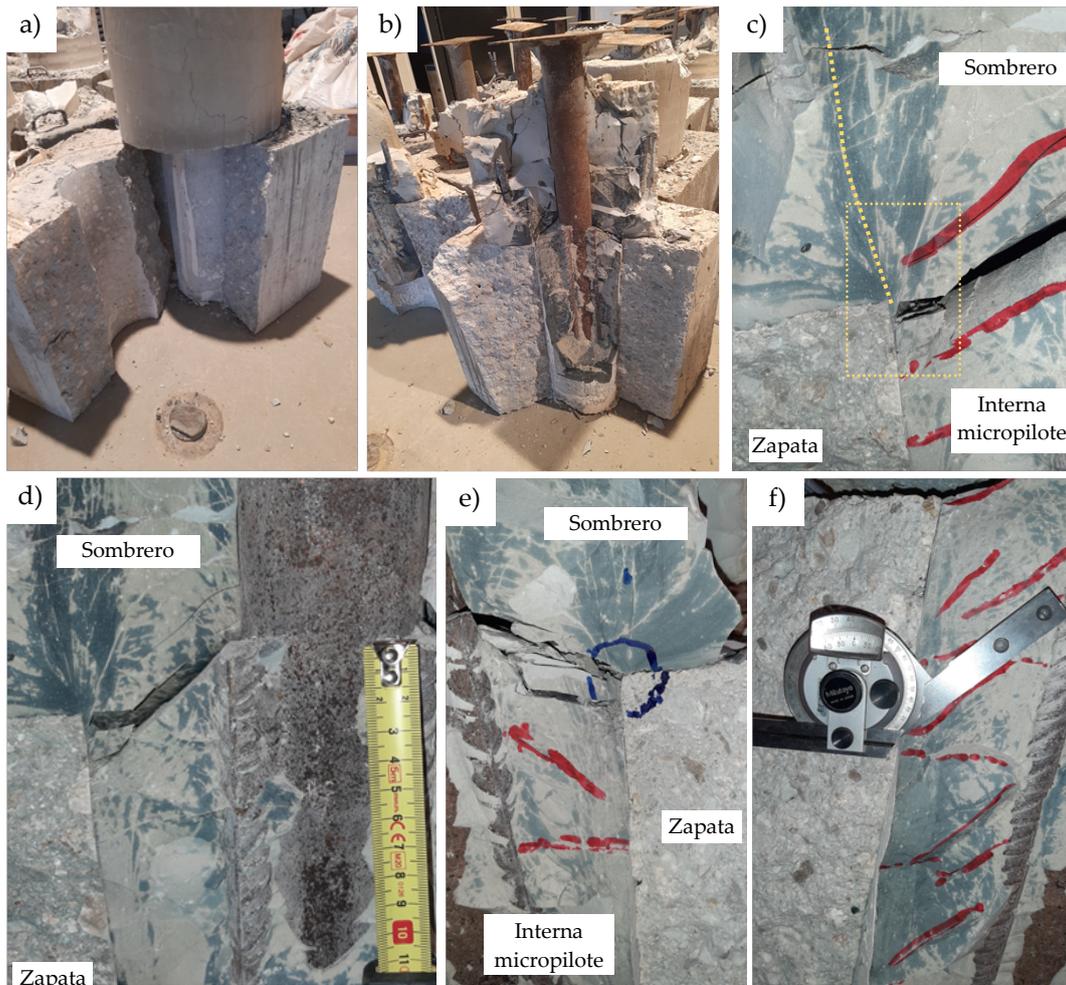


Figura 26. Fotografías de roturas en la lechada en la zona de la conexión en algunas probetas con sombrero (SA1-SA16): a) zona interna del micropilote sin romper; b) zona interna del micropilote fracturada; c) fisuras que se generan en la zona del sombrero justo antes de la zona interna del micropilote; d) fotografía en la que se visualiza el plano de rotura de cortante; e) fotografía en la que se muestran las fisuras/fracturas en forma de celosía en la zona interna del micropilote en la perforación; f) inclinación fracturas en la zona interna del micropilote. Fuente: Elaboración propia.

Estas fisuras permiten identificar las zonas más tensionadas y verificar como se han producido las roturas dentro de la zona sombrero y micropilote. En la Figura 26c se observa cómo hay dos planos de rotura en el interior del

micropilote-sombrero: uno vertical y otro horizontal. El vertical es el plano de rotura por punzonamiento en el que se observa la concentración de tensiones en la zona oscurecida de la lechada (línea de puntos amarilla). Además, se visualiza un pequeño desplazamiento de lechada del sombrero en la zona interna del micropilote de unos 3-4 mm (dentro del recuadro de puntos amarillo). El plano horizontal de rotura lo establece el final de las barras corrugadas, que representa una discontinuidad de rigidez en esa zona (fractura entre las líneas rojas de rotulador). En la Figura 26d se observa el mismo tipo de rotura para otra probeta: concentración de tensiones en el borde de la conexión por la rotura por punzonamiento (plano vertical), y rotura en el final de las barras soldadas (planos horizontales). Por último, para los casos en los que se ha fracturado la zona interna del micropilote, la inclinación de las fracturas muestra con claridad el estado tensional dentro del material (Figura 26e). La forma de las fracturas en forma de cercha metálica a unos 36° (Figura 26f) en lugar de a 45° es otra prueba más de que la tensión de adherencia en los micropilotes no es un estado de tensiones tangenciales puro, sino que hay una componente normal que cambia la orientación de las direcciones principales de rotura.

5.2.2. Resultados numéricos obtenidos en los ensayos.

Respecto a los resultados numéricos, en la Tabla 9 se muestran los valores medios de la carga pico de rotura (P_u), la tensión de adherencia correspondiente (τ_{adh}) y el desplazamiento axial producido (δ_u) justo en el momento en el que se alcanza el pico de rotura, obtenidos de los ensayos de compresión. La tensión media de adherencia, τ_{adh} (MPa), es la carga pico de rotura P_u (kN) dividida por la superficie de contacto de la perforación en cada bloque. Mientras que δ_u (mm) es la diferencia entre las mediciones entre los dos extensómetros colocados (Figura 14). En los especímenes sin sombrero, τ_{adh} representa la tensión media de adherencia lechada-hormigón. Mientras que en los especímenes con sombrero, donde el mecanismo de rotura producido es diferente, se calcula τ_{adh} para así poder comparar resultados.

Probeta	Código largo	P_u (kN)	τ_{adh} (MPa)	δ_u (mm)
C1-2	17,5/160/-/AN (A y B)	332	1,32	2,62
C3-4	17,5/200/-/AN (A y B)	343	1,09	1,76
C5-6	30/160/-/AN (A y B)	487	1,94	2,03
C7-8	30/200/-/AN (A y B)	391	1,24	2,30
S1-2	17,5/160/235/AN (A y B)	361	1,44	1,72
S3-4	17,5/160/321/AN (A y B)	535	2,13	0,81
S5-6	17,5/200/285/AN (A y B)	629	2,00	1,92
S7-8	17,5/200/362/AN (A y B)	674	2,15	3,29
S9-10	30/160/235/AN (A y B)	479	1,90	0,56
S11-12	30/160/321/AN (A y B)	590	2,35	3,13
S13-14	30/200/285/AN (A y B)	550	1,75	2,87
S15-16	30/200/362/AN (A y B)	571	1,82	2,27
SA1-2	17,5/160/235/AS (A y B)	452	1,57	1,66
SA3-4	17,5/160/321/AS (A y B)	500	1,89	3,08
SA5-6	17,5/200/285/AS (A y B)	575	2,09	0,57
SA7-8	17,5/200/362/AS (A y B)	580	2,09	3,05
SA9-10	30/160/235/AS (A y B)	425	2,19	2,08
SA11-12	30/160/321/AS (A y B)	595	1,81	2,54
SA13-14	30/200/285/AS (A y B)	495	1,89	2,91
SA15-16	30/200/362/AS (A y B)	520	1,83	1,68

Tabla 9. Resultados medios obtenidos para cada tipo de probeta ensayada: C1-C8, S1-S16 y SA1-SA16. Fuente: Elaboración propia.

La evolución de las deformaciones respecto a la carga se muestra en las gráficas $P_u - \delta_u$. Respecto a las probetas C1-C8 se observa una gran variedad de desplazamientos, desde 0,5 a 4 mm, lo que indica que no es posible predecir el inicio del deslizamiento brusco a partir de la deformación producida (Figura 27a). Al recargar las probetas, se ha observado que siguen manteniendo una resistencia residual de unos 50 kN, pero con deslizamiento constante. No obstante, cabe la posibilidad de un pequeño endurecimiento, tal y como ha sucedido en la probeta C1 (Figura 27b).

Los resultados de la conexión directa convencional arrojan un valor medio de tensión de adherencia de 1,40 MPa, similar a otros autores que han realizado ensayos con perforaciones lisas sin confinamiento externo [4, 28]. Para el caso concreto de los especímenes C5-C8 en bloque de hormigón tipo c17,5/22, la tensión de adherencia media obtenida es 1,21 MPa. Estos resultados son comparables con los obtenidos por Pachla [4] en especímenes de hormigón en masa del mismo tipo c20/25, cuyo valor medio fue de 1,15 MPa. La tensión de

adherencia media para los dados de hormigón c30/35 ha sido superior, siendo su valor medio 1,59 MPa (Tabla 9). Pero este valor medio es inferior al obtenido por Pachla para los bloques de hormigón armado con una resistencia c20/25, que es de 2,38 MPa, lo que viene a indicar la importante mejora que introduce el confinamiento por el armado en la zapata.

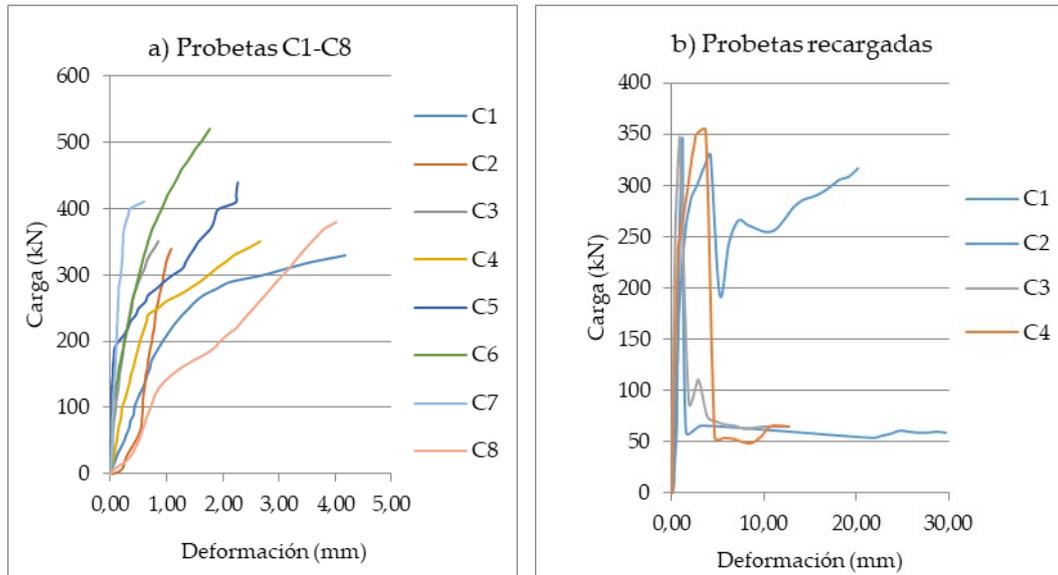


Figura 27. Gráficas carga-deformación obtenidas en los ensayos de las probetas C1-C8: a) curva de ascenso hasta la carga pico de rotura que provoca el primer deslizamiento brusco; b) gráficas de las curvas carga-deformación incluyendo la fase de recarga de algunas probetas. Fuente: Elaboración propia.

Las gráficas $P_u - \delta_u$ para las probetas con sombrero (S1-S16) también muestran una gran variedad de desplazamientos relativos, por lo que tampoco es posible prever el inicio de la rotura tomando este parámetro como referencia (Figura 28a). Las probetas que no han sufrido la rotura monolítica del hormigón, se han vuelto a recargar tras el primer desplazamiento brusco, y se ha observado que también hay una resistencia residual en la conexión. En los casos en los que la rotura de la cabeza del micropilote incluido el sombrero es total, aún queda una resistencia residual de unos 50-70 kN con deslizamiento constante, resultado similar a las conexiones convencionales. Si no se rompe totalmente el sombrero, esta resistencia residual es superior (100-200 kN). Incluso para dos probetas con las mismas características (S3-S4), se produce un endurecimiento que alcanza los 400-500 kN (Figura 28b).

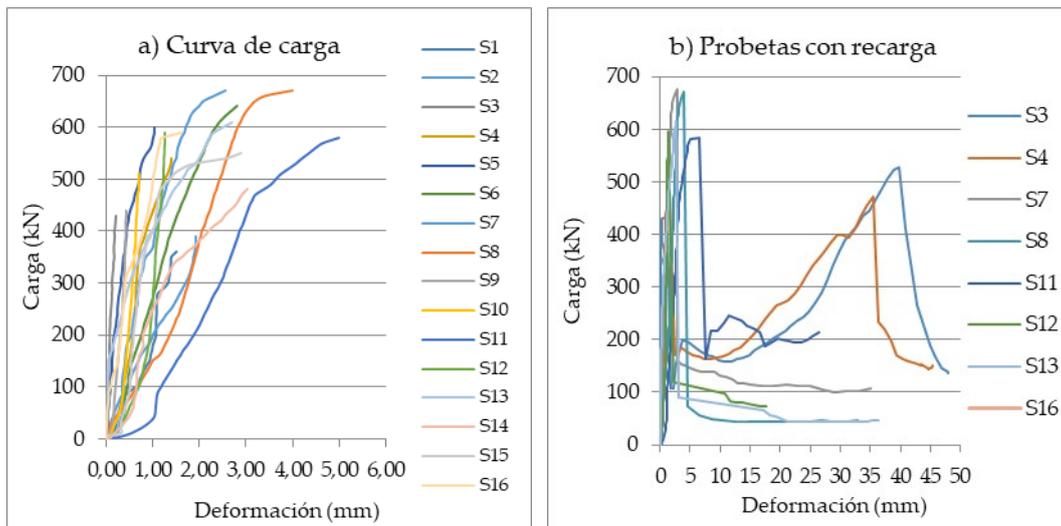


Figura 28. Gráficas carga-deformación obtenidas en los ensayos de las probetas S1-S16: a) curva de ascenso hasta la curva de rotura que provoca el primer deslizamiento brusco; b) gráficas de las curvas carga-deformación incluyendo la fase de recarga de algunas probetas. Fuente: Elaboración propia.

Si comparamos estos resultados con los obtenidos previamente para conexión convencional y con los del estudio de Pachla [4], hay que estimar un valor medio aproximado de τ_{adh} para los especímenes con sombrero, que sería de 1,92 MPa (calculados con el valor de P_u , no con el de recarga). Este valor es superior al de la conexión convencional directa en hormigón en masa (1,40 MPa en este trabajo y 1,15 MPa en Pachla [4], lo que indicaría que la conexión con sombrero mejora la resistencia de la unión entre el micropilote y cimentación existente (Tabla 9). Sin embargo es inferior al obtenido por Pachla para la misma conexión pero en dados de hormigón armado (2,38 MPa). Por lo que, en principio, una conexión convencional en una cimentación de hormigón armado resiste más que una conexión con sombrero en una cimentación de hormigón en masa.

Al igual que en los dos grupos de probetas anteriores, las gráficas $P_u - \delta_u$ para las probetas con sombrero armado (SA1-SA16) tienen un comportamiento similar. Hay una gran dispersión en los desplazamientos relativos obtenidos, por lo que no es posible prever el inicio del fallo tomando este parámetro como referencia (Figura 29a).

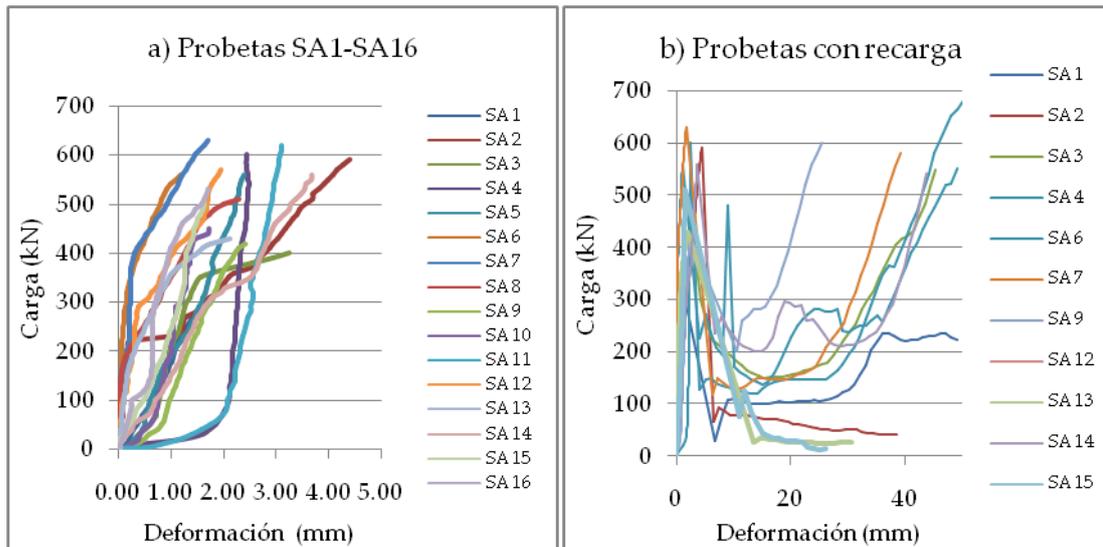


Figura 29. Gráficas carga-deformación obtenidas en los ensayos de las probetas SA1-SA16: a) curva de ascenso hasta la curva de rotura que provoca el primer deslizamiento brusco; b) Gráficas de las curvas carga-deformación incluyendo la fase de recarga de algunas probetas. Fuente: Elaboración propia.

Del mismo modo que antes, las probetas que no han roto de forma monolítica, se han vuelto a recargar tras la primera rotura que generaba un descenso brusco de la carga. Se ha observado que en este caso si la probeta rompe totalmente, queda una pequeña carga residual de 20-80 kN, mientras que el fenómeno que más veces ha ocurrido es un pequeño repunte de la carga a costa de grandes desplazamientos que no serían asumibles (Figura 29b). Hay probetas en las que la segunda carga alcanzada en la recarga ha sido incluso superior a la primera carga de rotura (P_u), pero ésta se ha alcanzado a costa de grandes desplazamientos que no sería asumibles. Este endurecimiento se produce por el gran rozamiento que hay entre las fracturas de la lechada y la armadura dispuesta. Por lo que si el armado del sombrero no ha servido para aumentar la carga última de rotura inicial, sí que ha ayudado en muchas probetas a incrementar sustancialmente la carga que resiste la conexión una vez roto el sombrero. Por último, la experimentación ha mostrado que, mientras no rompa el dado de forma monolítica, siempre queda una pequeña resistencia residual en la conexión.

5.2.3. Análisis estadístico del Diseño Experimental.

A continuación se presenta el análisis estadístico del experimento realizado mediante la herramienta matemática ANOVA. Se toma como variable de salida la carga pico de rotura de la conexión (P_u) para todas las probetas. En el primero (ANOVA 1) se estudia la resistencia en la conexión convencional y la influencia de dos factores a dos niveles: f_{ck} y D_h . En los dos siguientes (ANOVA 2 y ANOVA 3) se estudia la influencia del factor principal de esta tesis doctoral: la construcción del sombrero en la conexión directa. Se denomina la variable sombrero como **Hat** por simplicidad a la hora de presentar los resultados. Los ANOVAS 4 y 5 sirven para analizar el parámetro diámetro del sombrero (D_s), ya que los resultados de las probetas a escala reducida indican que puede ser relevante en la carga de rotura. Por último, en el ANOVA 6 se estudia la influencia de introducir un armado de refuerzo en la zona del sombrero de la nueva conexión (Tabla 10).

Conexión directa	Conexión con Sombrero (principales factores analizados en cada ANOVA)		
	Sombrero (Hat)	Diámetro Sombrero (D_s)	Armado Sombrero (A_{ss})
<u>ANOVA 1</u> Probetas: C1-C8 Factores: f_{ck} , D_h	<u>ANOVA 2</u> Probetas: C1-C8 y S1-S16 Factores: Hat , f_{ck} , D_h	<u>ANOVA 4</u> Probetas: S1-S16 Factores: D_s , f_{ck} , D_h	<u>ANOVA 6</u> Probetas: S1-S16 y SA1-SA16 Factores: A_{ss} , f_{ck} , D_h , D_s
	<u>ANOVA 3</u> Probetas: C1-C8 y SA1-SA16 Factores: Hat , f_{ck} , D_h	<u>ANOVA 5</u> Probetas: SA1-SA16 Factores: D_s , f_{ck} , D_h	

Tabla 10. Esquema del diseño experimental realizado. Fuente: Elaboración propia.

5.2.3.1. ANOVA 1. Resultados de la conexión convencional.

El primer análisis estadístico (ANOVA 1), en el que se toma como variable de referencia la carga pico de rotura (P_u) de la conexión convencional, indica que el factor más relevante es la resistencia del bloque de hormigón (f_{ck}). Por otro lado, no sale del todo significativo el diámetro de perforación (D_h), mientras que la interacción entre ambos factores ($D_h \cdot f_{ck}$) sí que sale estadísticamente significativa (Tabla 11).

Factor	Grados de libertad	Suma de cuadrados	F	Pr(>F)
f_{ck}	1	20337,8	39,402	0,00329 **
D_h	1	3551,6	6,867	0,05877 .
$f_{ck} \cdot D_h$	1	5810,4	11,235	0,02852 *
Residuos	4	2068,7		

Códigos de significación: 0 (***) 0,001 (**) 0,01 (*) 0,05 (.) 0.1 () 1

Tabla 11. Resultados del ANOVA 1 para los especímenes C1-C8 tomando la carga pico de rotura (P_u) como parámetro de referencia. Fuente: Elaboración propia.

La representación gráfica de la interacción de ambos factores muestra dos conclusiones en principio claras (Figura 30a). Cuando el hormigón es de mayor resistencia interesa hacer perforaciones pequeñas, y cuando el hormigón es de menor resistencia el diámetro de perforación no influiría (o sería preferible hacer un diámetro mayor). Esta conclusión no coincide con los resultados de trabajos previos de Veludo [6] y Darrel [101] que tomaban como variable de referencia la tensión de adherencia (τ_{adh}) en lugar de la carga última de rotura (P_u).

Por tanto, se repite el ANOVA 1, y la gráfica de interacción (Figura 30b), tomando ahora la tensión de adherencia (τ_{adh}) como parámetro de referencia, ya que las 8 probetas analizadas son con conexión convencional. Los resultados indican ahora que todos los factores son relevantes incluso la interacción entre ellos. De hecho, el factor más significativo pasa a ser el diámetro de perforación (Tabla 12).

Factor	gdl	Suma de cuadrados	F	Pr(>F)
f_{ck}	1	0,2932	40,083	0,00319 **
D_h	1	0,4227	57,778	0,0016**
$f_{ck} \cdot D_h$	1	0,1087	14,864	0,0182 *
Residuos	4	0,0293		

Códigos de significación: 0 (***) 0,001 (**) 0,01 (*) 0,05 (.) 0.1 () 1

Tabla 12. Resultados del ANOVA 1 para los especímenes C1-C8 tomando la tensión de adherencia (τ_{adh}) como parámetro de referencia. Fuente: Elaboración propia.

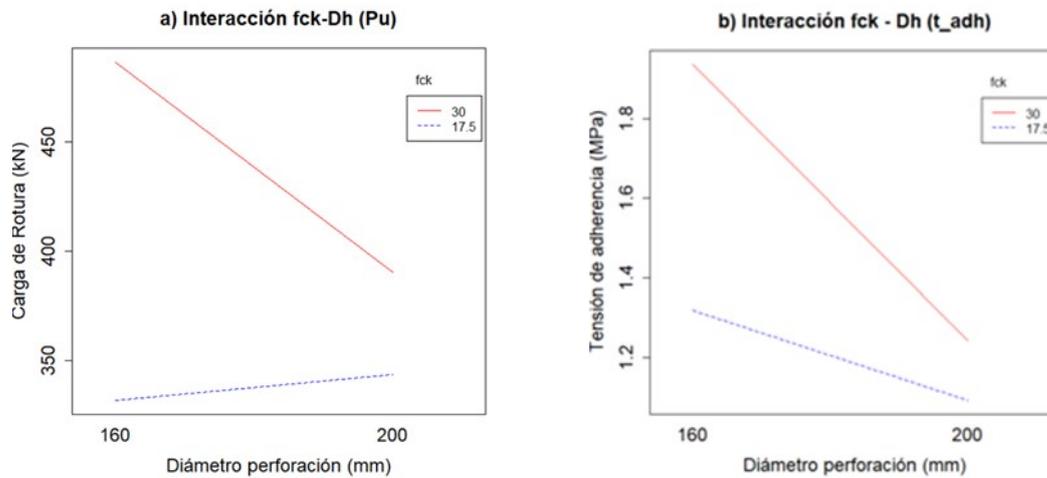


Figura 30. Interacción entre diámetro de perforación (D_h) y resistencia del hormigón (f_{ck}) de la cimentación: a) tomando como referencia la carga de rotura (P_u), y b) tomando como referencia la tensión de adherencia (τ_{adh}). Fuente: Elaboración propia.

La influencia de los dos factores se puede visualizar mejor con los gráficos de cajas de la Figura 31. En ella, se observa que hay mayor dispersión de resultados cuando la resistencia característica es de 30 MPa (Figura 31a), existiendo un pequeño solapamiento entre las distribuciones teóricas. De forma similar, hay mayor dispersión en los resultados cuando el diámetro de perforación es menor (Figura 31b), pero en este caso parece que no hay solapamiento en las distribuciones, lo que refuerza la significación estadística de la influencia del diámetro de perforación.

En términos numéricos, las probetas con diámetro de perforación menor (160 mm), arrojan un valor medio de tensión de adherencia de 1,63 MPa, frente al valor medio de 1,17 MPa cuando la perforación es de 200 mm. Mostrando que es el parámetro más influyente. Por otro lado, cuando la resistencia es mayor (c30/37), la tensión media obtenida es de 1,59 MPa frente a 1,21 MPa cuando la resistencia de los dados de hormigón es menor (c17,5/22). Las diferencias más significativas, se encuentran entre las probetas con diámetro menor (160 mm) y resistencia mayor (c30/37) que proporcionan una tensión de adherencia de 1,94 MPa, frente al caso opuesto de diámetro mayor (200 mm) con baja resistencia (c17,5/22) que indica un valor de casi la mitad (1,09 MPa).

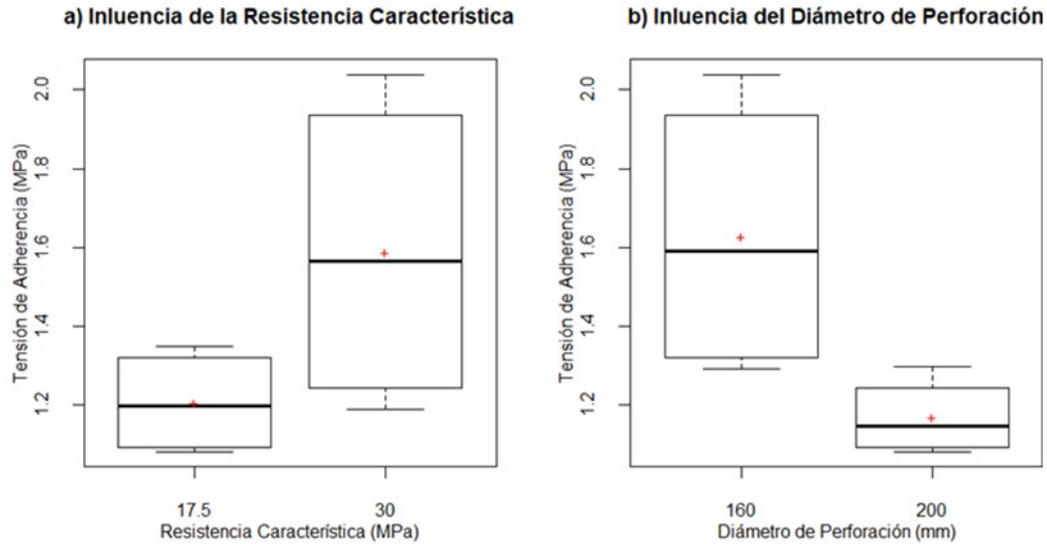


Figura 31. Gráfica de cajas para visualizar la influencia aislada sobre la tensión de adherencia (τ_{adh}) de los parámetros: a) resistencia característica del hormigón (f_{ck}); b) diámetro de perforación (D_h). Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, estos resultados indican que, a la hora de hacer un recalce con conexión directa convencional interesa hacer perforaciones con menor diámetro si hay un mayor grado de confinamiento. Es decir, si se sabe que el hormigón de la cimentación tiene una resistencia elevada y está armado, sería preferible realizar conexiones con perforaciones con menor diámetro. Además, la pérdida de superficie de contacto en el cálculo por rozamiento se compensaría por la mejora de la tensión de adherencia. Incluso cabe la posibilidad de que la carga total de la conexión aumente (ver P_u en la Tabla 9 de las probetas C5-C6).

5.2.3.2. ANOVAS 2 Y 3. Análisis del factor sombrero.

Respecto a la construcción del sombrero en la conexión (ANOVAS 2 y 3), se observa que el factor sombrero (Hat) es el más determinante, independientemente de que se disponga armadura (A_{ss}) en la zona del sombrero (Tabla 13). El valor medio de la carga última de rotura (P_u) para la conexión convencional es de 338 kN, mientras que para la conexión con sombrero sin armadura es de 541 kN, y de 509 kN para la conexión con sombrero armado. Por tanto, la construcción del sombrero supone un aumento del 39% si no se dispone armado, y del 31% si el sombrero se refuerza.

Factor	gdl	ANOVA 2			ANOVA 3		
		Suma de Cuadrados	F	Pr(>F)	Suma de Cuadrados	F	Pr(>F)
<i>Hat</i>	1	125753	40,84	0,000009 ***	78520	11,81	0,0034 **
<i>f_{ck}</i>	1	4227	1,37	0,2586	3674	0,55	0,4681
<i>D_h</i>	1	18558	6,07	0,0259 *	1460	0,22	0,6457
<i>Hat</i> · <i>f_{ck}</i>	1	16605	5,39	0,0337 *	17417	2,62	0,1251
<i>Hat</i> · <i>D_h</i>	1	28668	9,31	0,0076 *	10001	1,50	0,2378
<i>f_{ck}</i> · <i>D_h</i>	1	29665	9,63	0,0068 **	18017	2,70	0,1193
<i>Hat</i> · <i>f_{ck}</i> · <i>D_h</i>	1	808	0,26	0,6154	2	0,00	0,9850
Residuos	16	49267					

Códigos de significación: 0 (***) 0,001 (**) 0,01 (*) 0,05 (.) 0.1 () 1

Tabla 13. Resultados del ANOVAS 2 y 3 para los factores: *f_{ck}*, *D_h* y *Hat*. Fuente: Elaboración propia.

El resultado anterior se ve claramente cuando se representan los resultados en gráficas de cajas. La resistencia de la conexión es superior cuando se construye el sombrero. Sin embargo hay solapamientos en las distribuciones teóricas de las resistencias. Este solapamiento es menor cuando no hay armado en el sombrero (Figura 32a). Incluso hay una parte de la distribución de los resultados sombrero y armado que es menor que la distribución de la conexión convencional (Figura 32b). Este resultado se refina posteriormente cuando se analiza en detalle la influencia del diámetro del sombrero.

De forma general se observa que, cuando se construye el sombrero sin armado (ANOVA 2) hay factores e interacciones relevantes, además del factor sombrero (*Hat*). Sin embargo, cuando se construye el sombrero con armado, todos los factores (excepto *Hat*) y todas las interacciones dejan de ser influyentes (ANOVA 3). Hay que remarcar que al incluir en cada análisis probetas con sombrero y sin sombrero, hay efectos que están camuflados y es difícil sacar conclusiones generales sólo con estos dos análisis (Tabla 13).

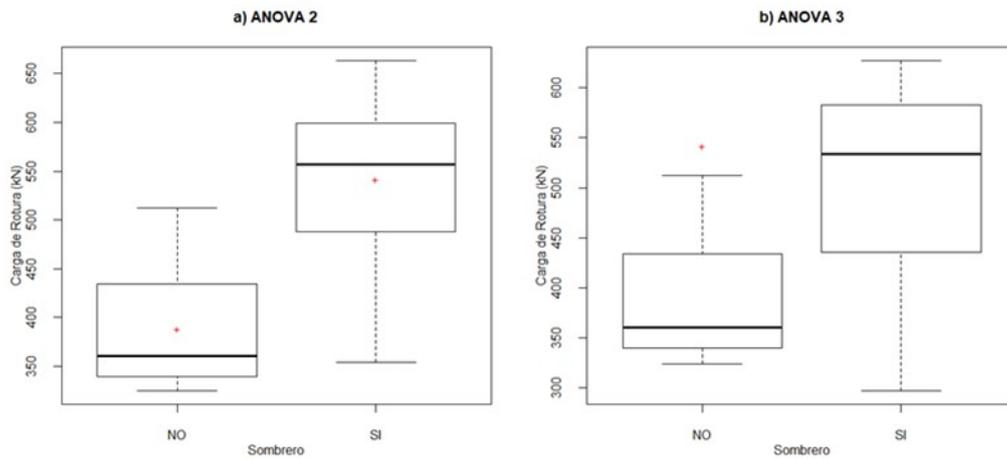


Figura 32. Gráfica de cajas para visualizar la influencia aislada del sombrero (Hat) sobre la carga de rotura (P_u): a) probetas con conexión convencional (C1-C8) y con sombrero (S1-S16); b) probetas con conexión convencional (C1-C8) y con sombrero armado (SA1-SA16). Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, una conclusión común para ambos análisis (ANOVA 2 y 3) es que la resistencia del hormigón (f_{ck}) de la zapata deja de ser relevante si se construye el sombrero, tanto en la conexión sin armadura como en la que se dispone de armadura (Tabla 13). Esto se visualiza cuando se muestran las gráficas de las interacciones lineales (ver Figura 33a para la conexión sin armado y la Figura 33b para la conexión con armado).

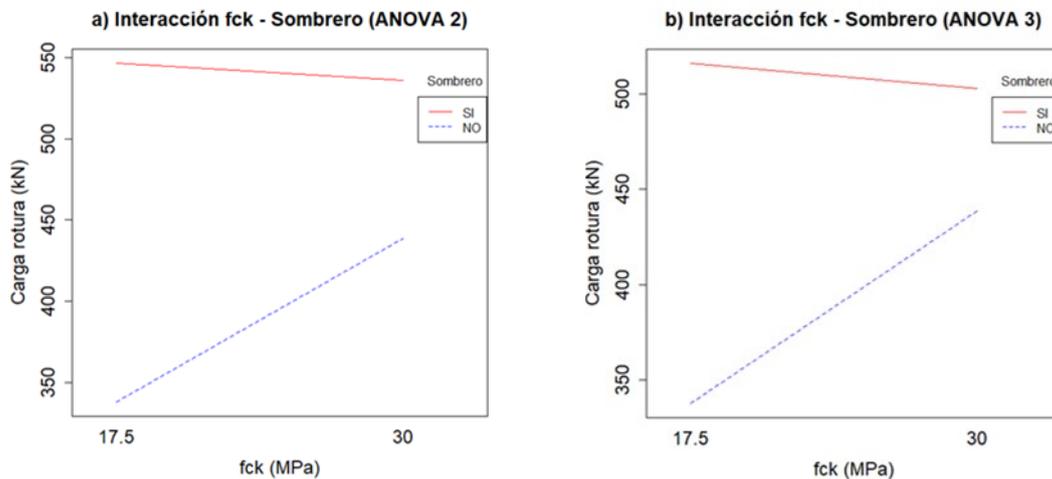


Figura 33. Interacción entre la resistencia del hormigón del dado (f_{ck}) y la construcción del sombrero (Hat): a) comparando conexión convencional y conexión con sombrero sin armado (C1-C8 y S1-S16); b) comparando conexión convencional y conexión con sombrero armado (C1-C8 y SA1-SA16). Fuente: Elaboración propia.

Respecto al factor diámetro de perforación (D_h), hay diferencias entre los resultados con y sin armado del sombrero. Estos resultados preliminares indican

que, la conexión con sombrero sin armado sigue siendo relevante (ANOVA 2), mientras deja de serlo cuando se refuerza el sombrero (Tabla 13). Esta conclusión preliminar (al estar mezcladas probetas son sombrero y sin sombrero) se interpreta mejor al representar la interacción $\text{Hat} \cdot D_h$. Esta gráfica muestra que hacer un diámetro de perforación mayor cuando la conexión es con sombrero aumenta la carga última de rotura, independientemente de que se refuerce el sombrero. La diferencia es que la interacción es más marcada cuando no se refuerza (Figura 34a) frente al caso contrario (Figura 34b), que es lo que explica que en un caso sea relevante y en otro no.

La interacción entre la resistencia característica y el diámetro de perforación no es necesario representarla ya que su explicación es la mezcla de probetas en el análisis. Es decir, la resistencia del hormigón es relevante para la conexión convencional y no lo es para la conexión con sombrero. Esta interacción es más marcada en el ANOVA 2 porque el diámetro de perforación es más relevante cuando el sombrero es sin armado (Tabla 13).

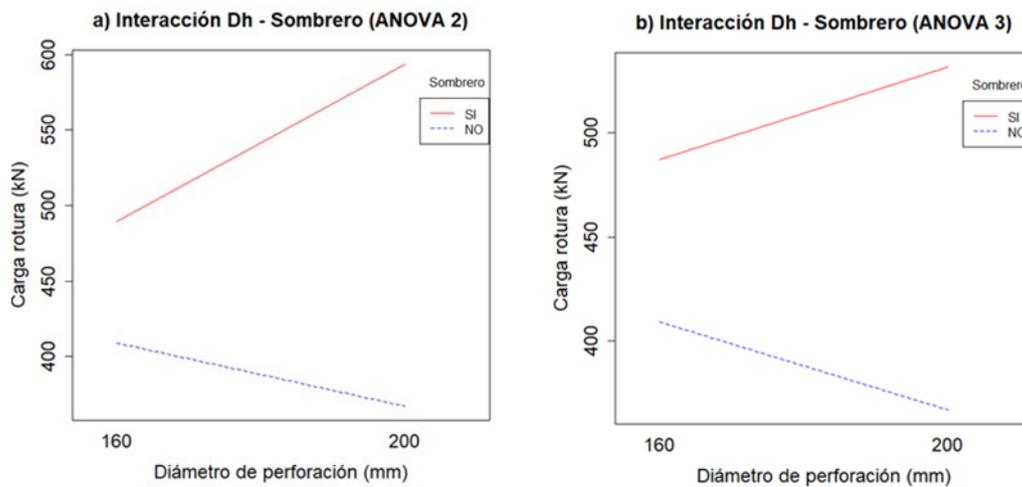


Figura 34. Interacción entre el diámetro de perforación (D_h) y la construcción del sombrero (Hat): a) comparando conexión convencional y conexión con sombrero sin armado (C1-C8 y S1-S16); b) comparando conexión convencional y conexión con sombrero armada (C1-C8 y SA1-SA16). Fuente: Elaboración propia.

Ahora, repitiendo los dos ANOVA anteriores (2 y 3) pero eliminando el factor que no ha resultado significativo (f_{ck}), se confirman los resultados anteriores. La principal diferencia es que el diámetro de perforación deja de ser relevante en los dos casos. Este resultado viene camuflado ya que cuando la conexión es convencional interesa hacer un diámetro de perforación menor, mientras que sucede lo contrario con la conexión con sombrero. Esto se muestra

en la interacción $\text{Hat} \cdot D_h$ cuando no se dispone armadura (Tabla 14 y ver Figura 34).

Factor	gdl	ANOVA 2'			ANOVA 3'		
		Suma de Cuadrados	F	Pr(>F)	Suma de Cuadrados	F	Pr(>F)
<i>Hat</i>	1	125753	25,01	0,000006 ***	78520	10,79	0,0037 **
<i>D_h</i>	1	18558	3,69	0,0691 .	1460	0,20	0,6590
<i>Hat · D_h</i>	1	28668	5,70	0,0269 *	10001	1,37	0,2548
Residuos	20	100573			145521		

Códigos de significación: 0 (***) 0,001 (**) 0,01 (*) 0,05 (.) 0.1 () 1

Tabla 14. Resultados del ANOVAS 2 y 3 para los factores: D_h y *Hat*. Fuente: Elaboración propia.

5.2.3.3. ANOVAS 4 Y 5. Análisis del diámetro del sombrero.

A continuación se analizan los resultados de las probetas con sombrero con el fin de verificar si el diámetro del sombrero (D_s) condiciona los resultados. Para ello se realizan los ANOVAS 4 y 5, en los que se incluyen como factores los diámetros de sombrero (D_s) y de perforación (D_h). Por tanto, se elimina la resistencia característica del hormigón (f_{ck}) del análisis porque cuando se construye el sombrero en la conexión este factor deja de ser significativo al cambiar el mecanismo resistente. De hecho, se han realizado los dos ANOVAS (4 y 5) con la resistencia característica como factor y se ha visto que no influye (este resultado no es relevante y no se incluye). Además, en estos casos no se pueden estudiar las interacciones entre los factores al no haber suficientes grados de libertad. Los resultados se resumen en la Tabla 15.

Los dos resultados más llamativos están relacionados con los dos factores analizados: diámetro de perforación (D_h) y de sombrero (*Hat*). Respecto al primero, el análisis indica que si se realiza la conexión con sombrero y se refuerza, la resistencia de la conexión no depende del factor diámetro de perforación (Tabla 15). Sin embargo, la representación gráfica de los resultados muestra que interesa hacer una perforación de mayor diámetro, tanto con armado como sin armado (Figura 35). Sobre todo en el sombrero sin armado (Figura 35a), tal y como muestra el nivel de significación del ANOVA 4 anterior. Cuando el sombrero está armado, aunque el valor medio es mejor con el diámetro de perforación mayor (200 mm), las distribuciones teóricas se solapan (Figura 35b), hecho que hace que este factor no sea relevante cuando se refuerza el sombrero.

Factor	gdl	ANOVA 4			ANOVA 5		
		Suma de Cuadrados	F	Pr(>F)	Suma de Cuadrados	F	Pr(>F)
D_h	2	43675	13,15	0,0035 **	7909	0,98	0,3429
D_s	1	32465	4,89	0,0280 *	19929	1,23	0,3271
Residuos	11	39851			97334		

Códigos de significación: 0 (***) 0,001 (**) 0,01 (*) 0,05 (.) 0.1 () 1

Tabla 15. Resultados de los ANOVAS 4 y 5 para las probetas S1-S16 y SA1-SA16, respectivamente, en las que se analizan los factores D_h y D_s . Fuente: Elaboración propia.

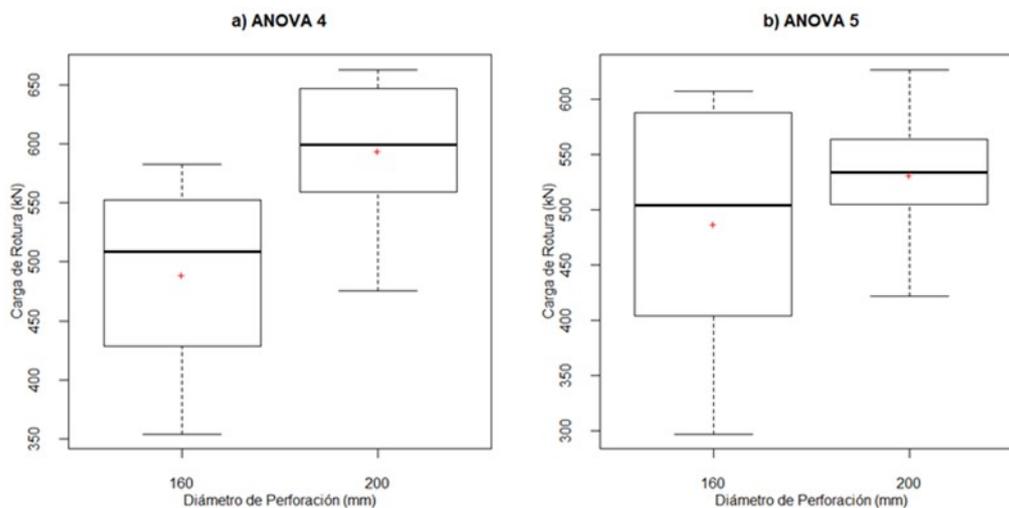


Figura 35. Gráfica de cajas para visualizar la influencia aislada del diámetro de perforación (D_h) sobre la carga de rotura (P_u): a) probetas con conexión con sombrero sin armar (S1-S16); b) probetas con conexión con sombrero armadas (SA1-SA16). Fuente: Elaboración propia.

Respecto al diámetro del sombrero, los resultados de los ANOVAS indican que este factor es significativo cuando no se refuerza el sombrero, y no lo es cuando se refuerza (Tabla 15). Este resultado se complementa con la representación con gráficos de cajas, en los que se ve que la carga pico de rotura (P_u) aumenta si se incrementa el diámetro de sombrero. En la conexión sin armado se ve claramente que la resistencia es mayor a partir de un diámetro de sombrero de 285 mm (Figura 36a). Mientras que el sombrero con armado, aunque se presenta un resultado similar, no es tan claro, ya que las distribuciones de algunos diámetros se solapan parcialmente (Figura 36b).

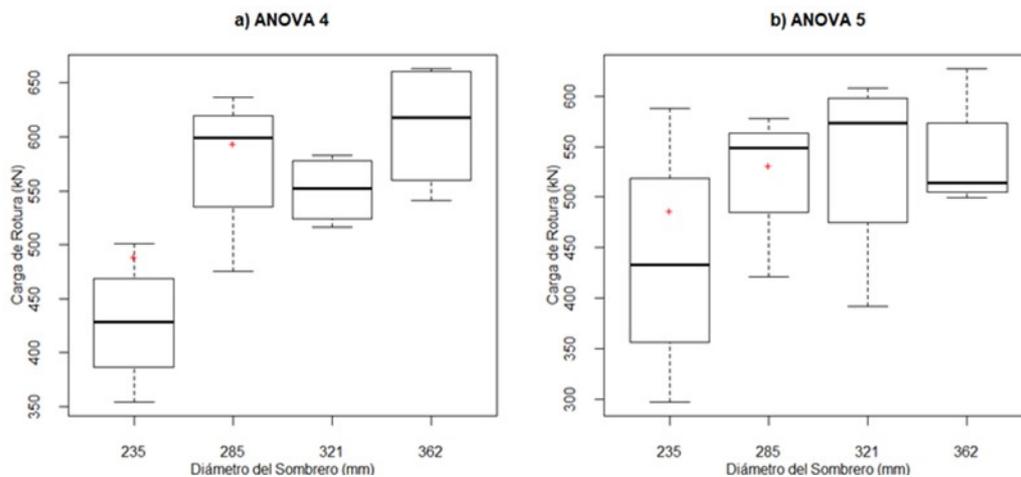


Figura 36. Gráfica de cajas para visualizar la influencia aislada del diámetro del sombrero (D_s) sobre la carga de rotura (P_u): a) probetas con conexión con sombrero (S1-S16); b) probetas con conexión con sombrero armadas (SA1-SA16). Fuente: Elaboración propia.

Visto que las dimensiones de los diámetros pueden influir en la carga de rotura, se realiza un análisis con las ratios entre los diferentes diámetros de la conexión. En primer lugar, el ratio entre diámetro de sombrero y del micropilote (D_s/D_m), muestra un resultado idéntico que en la Figura 36. Sin embargo, sirve para indicar que interesa hacer un sombrero de diámetro el doble que el del micropilote, sobre todo cuando no se dispone armado (Figura 37a). Para el caso de sombrero con armadura, los resultados indican la misma conclusión (Figura 37b), pero el nivel de significación del ANOVA 5 no es concluyente por el mismo motivo de antes.

En segundo lugar, el ratio entre diámetro de sombrero y de la perforación (D_s/D_h), muestra un resultado poco concluyente. Se obtienen buenos resultados para los valores de diámetro de perforación de 200 mm, y los peores cuando el diámetro de perforación es 160 mm y el diámetro del sombrero es 235 mm. Este comportamiento es muy marcado cuando el sombrero no está armado (Figura 38a). De hecho, si se hace un ANOVA con los datos S1-S16 tomando D_s/D_h como factor, resultaría significativo, tal y como ha resultado el diámetro del sombrero en el ANOVA 4 ($\text{Pr}(>F) = 0,0040^{**}$). Sin embargo, no ocurre lo mismo cuando se refuerza el sombrero (Figura 38b), en la que no se puede asegurar que un valor medio es diferente que el resto. El p-valor de este contraste es $\text{Pr}(>F) = 0,3709$ en el ANOVA 5, por lo que se tendría que aceptar la hipótesis nula que el factor ratio no afecta cuando se refuerza el sombrero.

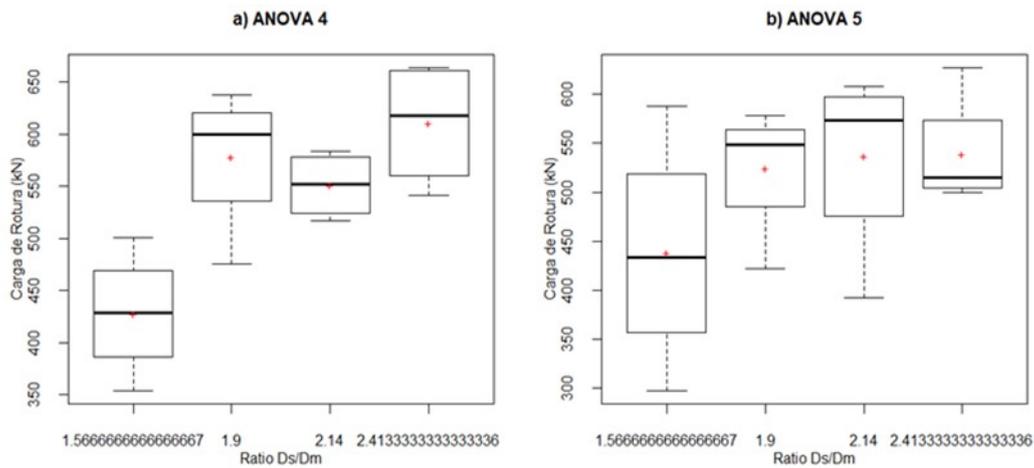


Figura 37. Gráfica de cajas para visualizar la influencia del ratio entre diámetro de sombrero (D_s) y diámetro de micropilote ($D_m = 150 \text{ mm}$) sobre la carga de rotura (P_u): a) probetas con conexión con sombrero (S1-S16); b) probetas con conexión con sombrero armadas (SA1-SA16). Fuente: Elaboración propia.

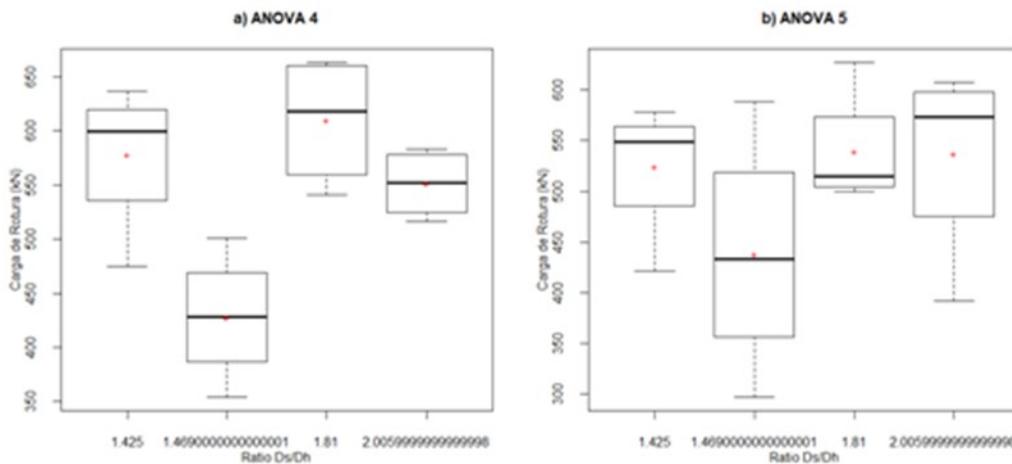


Figura 38. Gráfica de cajas para visualizar la influencia del ratio entre diámetro de sombrero (D_s) y diámetro de perforación (D_h) sobre la carga de rotura (P_u): a) probetas con sombrero sin armado (S1-S16); b) probetas con sombrero armado (SA1-SA16). Fuente: Elaboración propia.

5.2.3.4. ANOVAS 6. Análisis del armado del sombrero.

Por último se realiza un análisis específico para el factor armado en el sombrero (A_{ss}). El factor de la resistencia (f_{ck}) no se incluye ya que se ha visto que no tiene influencia cuando se realiza la conexión con sombrero. Se han considerado los factores relacionados con los diámetros (D_h y D_s), para corroborar los análisis previos. El resultado indica que la incorporación del armado en el sombrero no es estadísticamente significativa (Tabla 16). Además, anteriormente

se ha visto que la resistencia de la conexión con sombrero sin armado es mayor que con armado.

		ANOVA 6		
Factor	gdl	Suma de Cuadrados	F	Pr(>F)
A_{SS}	1	8304	1,54	0,2249
D_h	1	44378	8,25	0,0079**
D_s	3	51483	4,78	0,0167 *
Residuos	11	39851		

Códigos de significación: 0 (***) 0,001 (**) 0,01 (*) 0,05 (.) 0.1 () 1

Tabla 16. Resultados del ANOVAS 6 para las probetas S1-S16 y SA1-SA16, respectivamente, en las que se analizan los factores A_{SS} , D_s y D_h . Fuente: Elaboración propia.

Esta comparativa, entre probetas con sombrero sin y con armado (Figura 39), se observa que los resultados son prácticamente los mismos, aunque ligeramente inferiores en la opción con armado.

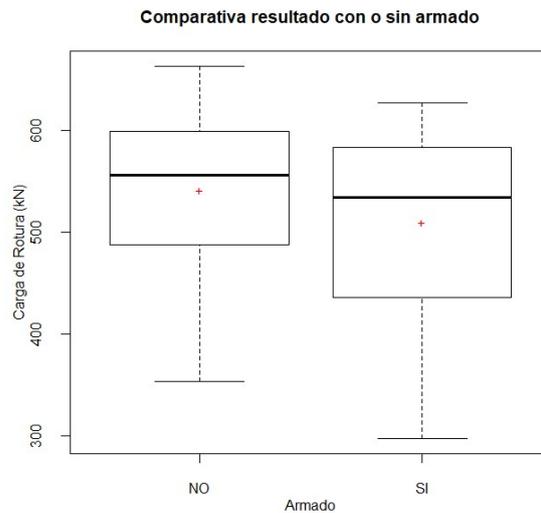


Figura 39. Gráfica de cajas para visualizar la influencia del armado del sombrero (A_{SS}). Se comparan las distribuciones entre probetas con sombrero sin armado (S1-S16) y las probetas con sombrero y armado (SA1-SA16). Fuente: Elaboración propia.

5.2.4. Discusión y conclusiones del programa experimental

En primer lugar se quiere hacer un comentario sobre el trabajo desarrollado en el laboratorio, con el fin de orientar a los futuros investigadores que se embarquen en una tesis doctoral de estas características. En concreto, durante el

diseño y desarrollo del programa experimental se han adquirido unos conocimientos y experiencias difíciles de resumir con palabras en el documento de esta tesis doctoral. Por ejemplo, para poder desarrollar el programa experimental ha sido necesario invertir un elevado coste de tiempo y recursos materiales y humanos (al final hay muchas personas implicadas). Por lo que, iniciar un diseño experimental de estas características precisa poder disponer de medios materiales y humanos adecuados. No obstante, ha merecido la pena el esfuerzo por la calidad de los resultados que se han obtenido, generando información nueva a disposición del mundo científico, así como por la experiencia personal vivida que es única.

Volviendo al contenido de la tesis doctoral, el programa experimental desarrollado en el laboratorio ha servido para mostrar la dificultad de recrear con exactitud el modelo teórico pretendido. Un claro ejemplo ha sido el despegue de la lechada en la cabeza del micropilote. No es un error que invalide los resultados, ya que otros autores no recubrían la armadura tubular con lechada. En estos trabajos no se justificaba el hecho de no incluir la lechada, por lo que se pensaba que era por facilitar los trabajos de preparación de las probetas. Aquí se incluyó con el fin de obtener unas probetas que reproduzcan mejor la realidad de las conexiones.

Este resultado (despegue de la lechada) es un conocimiento de gran ayuda para posteriores ensayos. Es decir, o se deja la armadura desnuda o, si se quiere recrear el micropilote de forma completa habría que hacer cambios en el diseño: soldar barras en toda la longitud o confinar la lechada (por ejemplo con fibra de carbono). En definitiva, de esta experiencia se obtiene una conclusión importante: hay que tener especial cuidado en el diseño de las probetas porque se puede confundir la realidad del caso práctico que se quiere recrear con el diseño de la probeta y con los modelos teóricos.

La rotura monolítica del dado de algunas probetas ha sido un modo de fallo esperado, ya que también lo habían advertido (y obtenido) otros autores [4, 6]. Este resultado vuelve a confirmar que la rotura de la conexión directa no es siempre por deslizamiento del micropilote, ya que cabe la posibilidad de rotura frágil de la zapata por tracciones en la misma. Por lo tanto, y tal y como indican autores previos, este tipo de fallo es menos probable en zapatas armadas que incrementan la ductilidad de la respuesta. Para estos casos, sigue existiendo el riesgo de fisuración de la zapata, ya que el armado incrementa el confinamiento y permite generar más tensión de adherencia, por lo que también se aumentan las tracciones. Ahora bien, se reduce el riesgo de rotura monolítica.

Respecto a los resultados, hay que destacar que el valor de tensión de adherencia obtenido para las probetas con conexión convencional coincide con los de Pachla [4], lo que verifica tanto sus resultados como los aquí presentados. Además, queda demostrado que el nuevo sistema de conexión directa con sombrero mejora sustancialmente la conexión convencional.

Siguiendo con los resultados numéricos, hay que destacar que las resistencias de las probetas con conexión convencional han arrojado valores muy superiores a los esperados al aplicar la formulación de rasante de la normativa europea del Eurocódigo 2 [18] de forma estricta. Es decir, se han utilizado parámetros de cohesión (c) y rozamiento (μ) bajos por tener una superficie de contacto lisa, y considerar nula la tensión normal en la perforación (σ_n) que implica despreciar totalmente la componente de rozamiento. Entre estas asunciones, es posible que la más lejana de la realidad física sea despreciar esta tensión normal. Por lo tanto, el hecho de incluir una pequeña tensión normal en el entorno de 2 MPa, que es el valor que se transmitiría a la zapata en forma de tracciones que haría fisurar la misma, tal y como se ha visto en experimentación, sería suficiente para pasar de una tensión de adherencia de cálculo de 0,206 MPa a 0,606 MPa. Este último valor está más en línea con los resultados obtenidos en laboratorio y cercano al valor empleado que recomienda la normativa americana ACI-318-19.

En términos globales de carga última de rotura (P_u), el valor medio teórico de la resistencia por deslizamiento en la interfaz lechada-hormigón en las probetas con conexión convencional (R_{gc}) ha sido de 67 kN (C1-C8 de la Tabla 7), muy lejano del valor medio obtenido en los ensayos, que es de 388 kN (C1-C8 de la Tabla 9). Por lo que habría un coeficiente de seguridad de 5,8. Sin embargo, si se considerara una tensión normal (σ_n) de 2 MPa en la formulación del Eurocódigo 2, la tensión de adherencia a aplicar sería de 0,606 MPa, que coincide con el valor máximo a partir del cual no implicaría un mayor ahorro económico (ver Figura 20 y Figura 21), la resistencia media teórica de la conexión convencional sería de 198 kN, lo que implicaría un coeficiente de seguridad de 2,0 en esta comparativa. A este coeficiente de seguridad cabría añadir la mayoración de cargas (acciones) que vienen en las diferentes normativas, por lo el coeficiente de seguridad final sería muy superior.

Considerando ahora las probetas con conexión convencional, los resultados numéricos de la carga última de rotura (P_u) obtenidos en laboratorio han sido muy similares a los teóricos aplicando un modelo de rotura por punzonamiento (R_{gp}). En concreto, el valor teórico medio es de (491 kN), y el valor medio de los

ensayos ha sido de (533 kN). Siguiendo con el análisis en esta misma línea, pero mejorando el grado de detalle del análisis al conocer, gracias a los resultados experimentales (Figura 35), que esta resistencia depende del diámetro de perforación (D_h), se repite esta comparativa diferenciando por D_h . Cuando $D_h = 160$ mm, los resultados teórico y experimental son 436,4 kN y 492,1 kN, respectivamente. Mientras que, con $D_h = 200$ mm, los resultados teórico y experimental son 545,5 kN y 574,3 kN, respectivamente. Por lo tanto, los resultados teóricos (resistencia por punzonamiento) y los experimentales coinciden. De hecho, si se hiciera un simple contraste estadístico para medias con los resultados de la Tabla 9, en el que la hipótesis nula fuera que la media de los resultados obtenidos (\bar{x}) para un diámetro de perforación es igual a la media teórica (μ) de R_{gp} de la Tabla 7, el resultado indicaría que no sólo habría que aceptar la hipótesis nula ($H_0: \mu = \mu_0$), sino que sería posible aceptar la hipótesis alternativa ($H_a: \mu > \mu_0$) con un nivel de significación del 5% .

En definitiva, este último análisis a partir de los resultados obtenidos, viene a apoyar la hipótesis inicial que el nuevo sistema de conexión directa cambia el modelo resistente que pasa a ser de punzonamiento.

5.3. SIMULACIÓN NUMÉRICA.

Los principales resultados de la simulación numérica que se presentan a continuación son los desplazamientos totales en valor absoluto, desplazamientos según una dirección determinada, la tensión equivalente de von Mises ($\sigma_{eq,vM}$), las deformaciones unitarias máxima (ε_1) y mínima (ε_3), y la tensión principal máxima (σ_1).

El conocimiento de los desplazamientos absolutos sirve para identificar las zonas en las que se generan las mayores deformaciones acumuladas. Estos resultados son los más sencillos de emplear para calibrar el modelo, ya que las mediciones de desplazamientos en los ensayos de laboratorio son relativamente sencillos, y son los que se han obtenido en el programa experimental. Asimismo, pueden servir, para los casos en los que las direcciones de los desplazamientos estén claras, para detectar de forma preliminar si una zona está comprimida o traccionada, pero el resultado hay que tomarlo con cautela ya que los valores son en valor absoluto. Aquí se van a emplear para comparar los resultados de las simulaciones con las mediciones de los desplazamientos de los extensómetros colocados en las probetas durante los ensayos, y también para identificar de

forma preliminar las zonas en las que hay tracciones, que serán aquellas donde el material frágil, como el hormigón o la lechada de cemento, puede romper.

El equivalente de von Mises ($\sigma_{eq,vM}$), si bien es un criterio de plastificación de materiales dúctiles, sirve para detectar zonas donde se concentran tensiones, y zonas en las que la tensión cortante es máxima. Por lo que es un buen indicador para detectar la fisuración/fractura de un material, aunque sea frágil como el hormigón.

La tensión principal máxima (σ_1) sí que sirve para identificar zonas con tracciones. Si la dirección principal máxima es positiva significa que en el entorno de esos puntos del modelo hay una dirección en la que la tensión es de tracción. Sin embargo, cuando la dirección principal máxima es negativa, indica que en los puntos de esa zona sólo hay compresiones.

Por último, las deformaciones unitarias máxima (ε_1) y mínima (ε_3) también se pueden emplear para detectar zonas de iniciación de rotura. De hecho, la deformación máxima es en sí misma un criterio de rotura (Saint-Venant). Pero, para el caso aquí estudiado, se pretende comparar las deformaciones unitarias de los modelos con los valores máximos y mínimos que se aplican en la normativa de hormigón cuando está comprimido [19]: 0,0035 en flexo-tracción, y 0,002 en compresión (signo negativo en los resultados de los modelos).

Asimismo, algunos resultados se presentan diferenciando entre modelos con armadura tubular y sin armadura tubular. Los modelos sin armadura tubular fueron los primeros que se simularon pero, al ver la rotura de la cabeza de la mayoría de los micropilotes en los ensayos con las probetas, se incluyó la armadura tubular con el fin de justificar este tipo de rotura.

Por último, y de forma genérica para todos los modelos realizados, recordar que la máxima carga que se aplica es la carga pico de rotura (P_u) media que se ha obtenido en los ensayos de laboratorio (Tabla 9).

5.3.1. Desplazamientos en las probetas sin considerar armadura tubular.

Los desplazamientos (*Total Deformation*) de las cuatro probetas con conexión directa convencional simuladas se muestran en la Figura 40. Se ha aplicado la misma escala gráfica de colores para poder comparar los resultados de forma cualitativa.

El desplazamiento máximo que resulta de la simulación numérica es el descenso del micropilote. En la simulación no se ha permitido el deslizamiento del micropilote en el interior de la perforación, por lo que este desplazamiento sólo se debe a la deformación del material en régimen elástico y lineal. El desplazamiento máximo o descenso máximo se produce para las probetas con dado de hormigón de resistencia característica 30 MPa y con diámetro 160 mm. Este resultado numérico, que sería de 0,19 mm (ver gráfica 30/160/-/AN en la Figura 40), no corresponde con los resultados obtenidos mediante experimentación (unos 2 mm), por lo que el modelo elástico y lineal con contacto totalmente unido (*bonded*) empleado no es capaz de captar la complejidad de los fenómenos resistentes que se generan en la conexión directa. Sobre todo, porque no es capaz de reproducir el deslizamiento. Igualmente sucede con los descensos de las cabezas de los micropilotes en el resto de probetas simuladas, que son muy inferiores a los resultados de los ensayos (Figura 40).

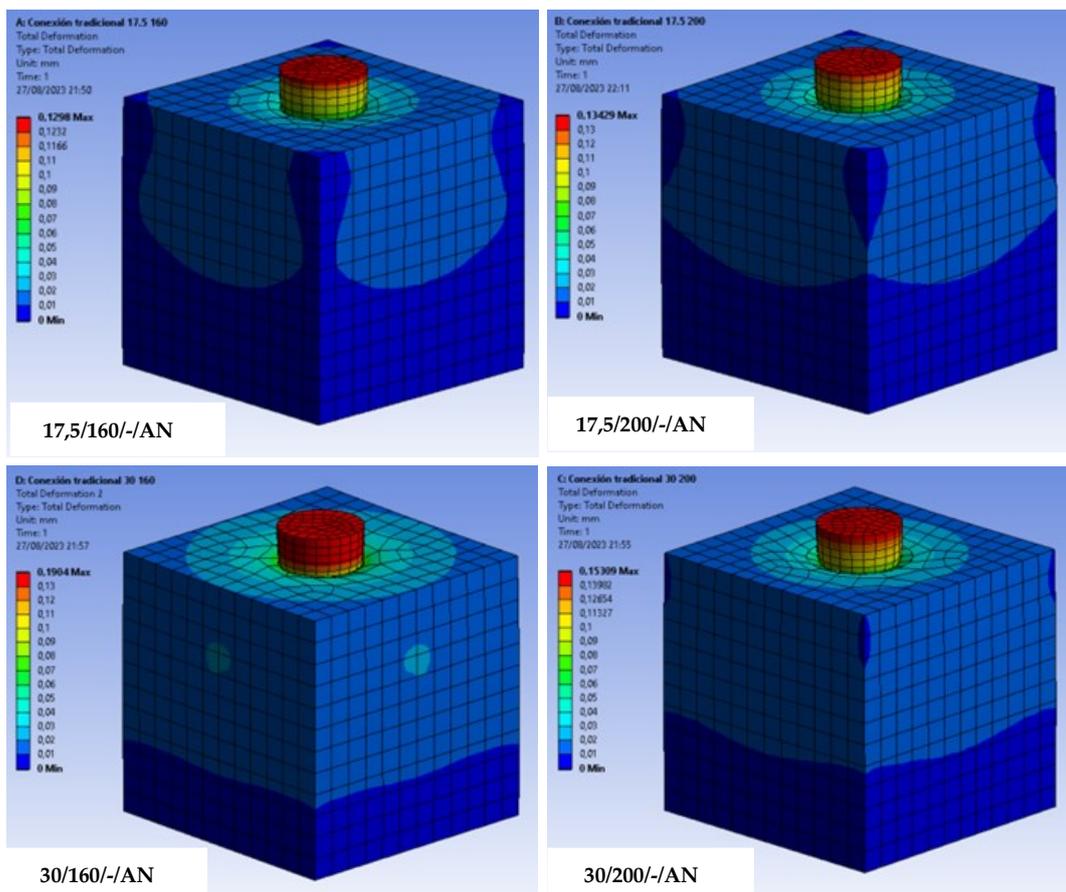


Figura 40. Deformaciones de las probetas de conexión convencional modelizadas en Ansys. Fuente: Elaboración propia.

No obstante, los resultados indican que hay una deformación en las caras del dado de hormigón que corresponden a una dilatación del mismo por el efecto Poisson del micropilote en la perforación. Esta conclusión preliminar, que se visualiza mejor con la deformación direccional al final de esta sección, se justifica mejor posteriormente con los parámetros tensión principal máxima (σ_1) y deformación principal máxima (ϵ_1), que son indicativos de la existencia de tracciones en el cubo (Figura 40). Esto se visualiza en la parte central de las caras, siendo un claro ejemplo la probeta 30/160/-/AN de la Figura 40.

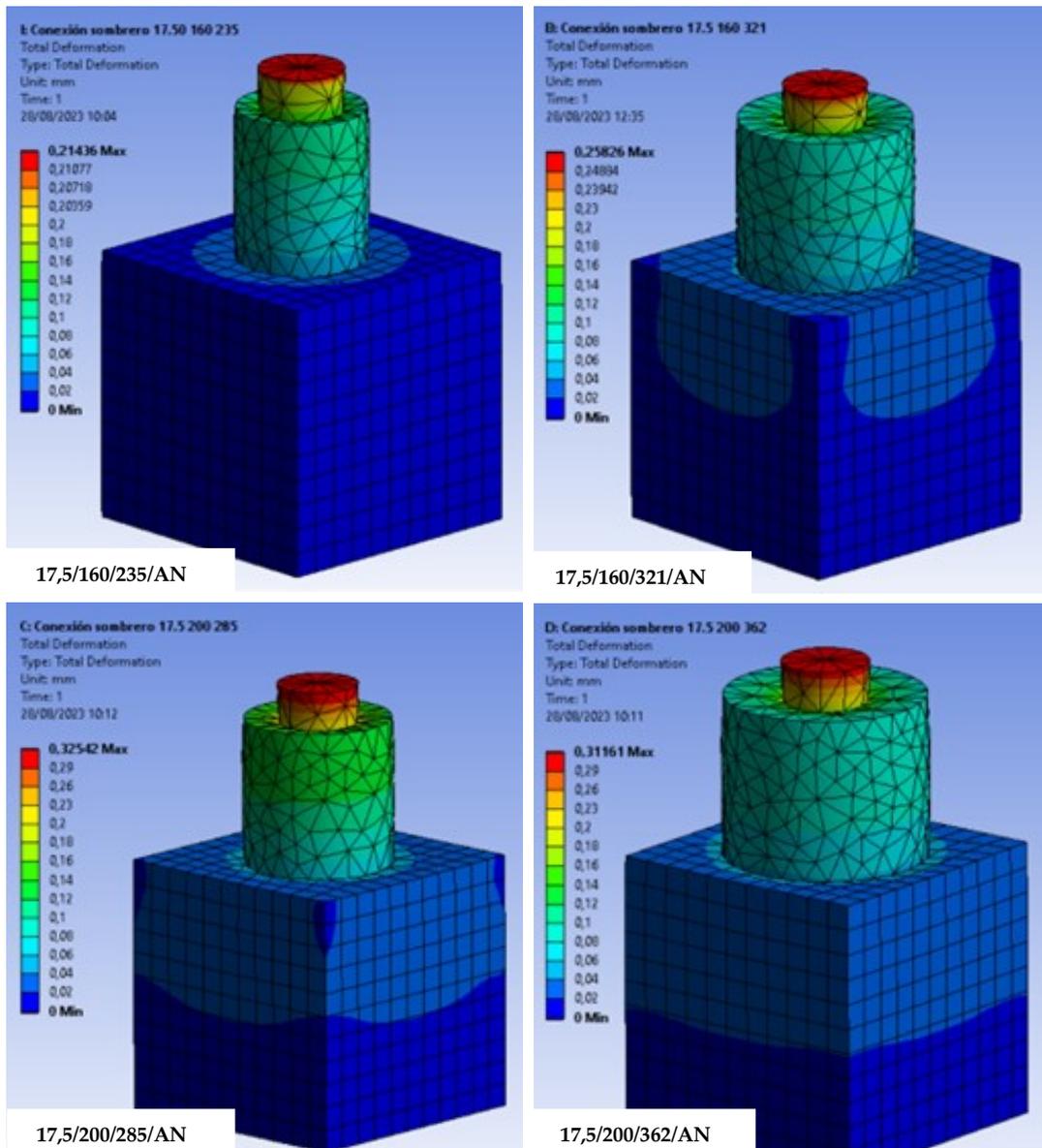


Figura 41. Deformaciones de las probetas del nuevo sistema de conexión con sombrero modelizadas en Ansys con hormigón de resistencia a compresión simple de 17,5 MPa. Fuente: Elaboración propia.

Respecto a los resultados de los modelos de las probetas que simulan la conexión con sombrero (ver Figura 41 y Figura 42), se observa que los mayores desplazamientos se generan en el micropilote y en la zona del sombrero junto al micropilote. En concreto, los mayores desplazamientos se generan en la cabeza del micropilote y en la intersección de éste con el sombrero, por lo que esas zonas son las que están soportando un mayor nivel de tensiones.

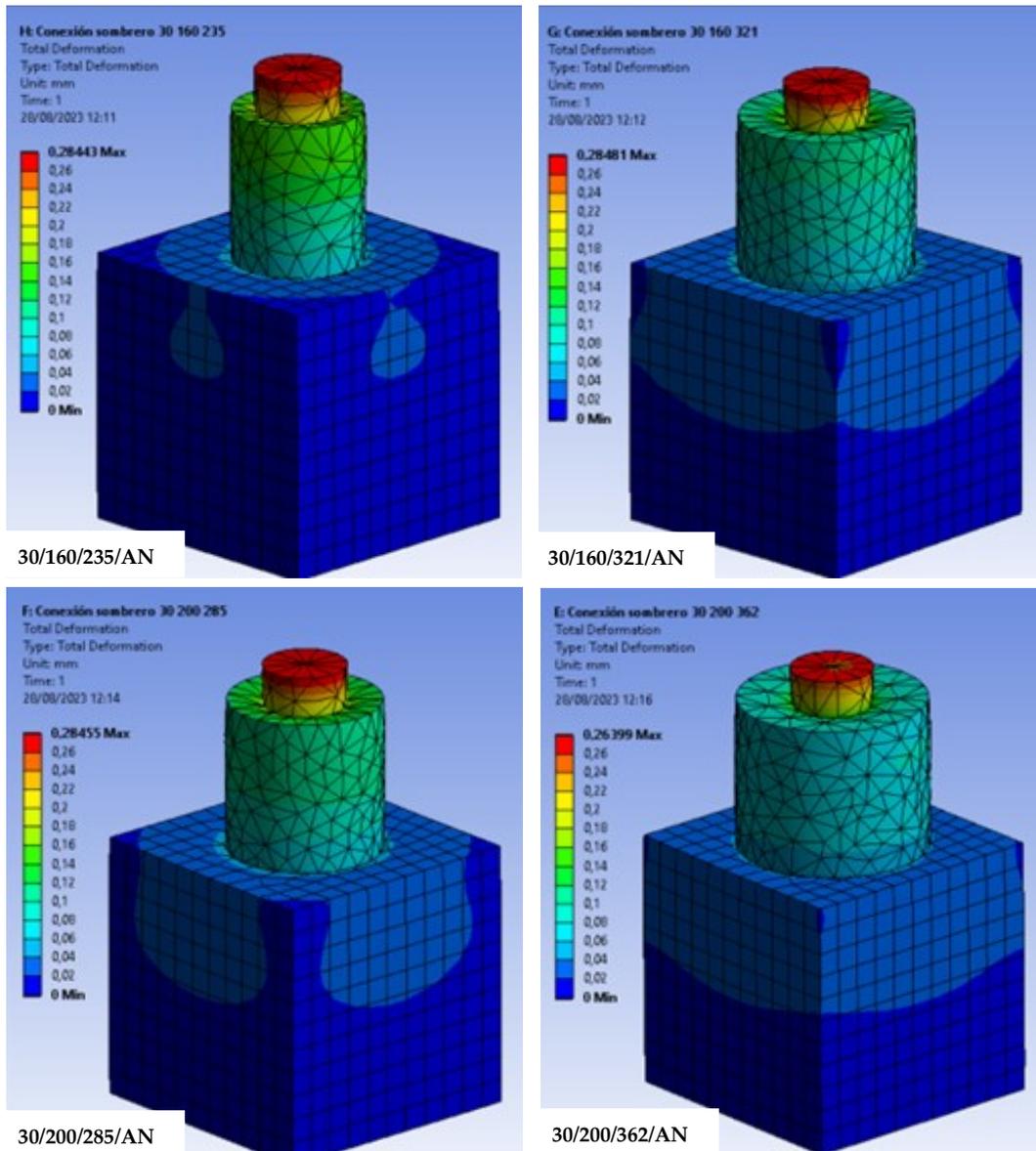


Figura 42. Deformaciones de las probetas del nuevo sistema de conexión con sombrero modelizadas en Ansys con hormigón de resistencia a compresión simple de 30 MPa. Fuente: Elaboración propia.

Otra forma de visualizar la dilatación de los cubos es con el desplazamiento en la dirección del eje horizontal (eje Y según el sistema de referencia del modelo presentado). En este caso el desplazamiento tiene signo ya que el origen de desplazamientos es el eje de simetría de los modelos: son positivos si son hacia la izquierda y son negativos hacia la derecha. Ese hecho se produce tanto para la conexión convencional (Figura 43a), como para la conexión con sombrero (Figura 43b). En ambos casos queda claro que el dado de hormigón se dilata, y que ésta es máxima en el centro de las caras. Además, esta dilatación también se produce en el sombrero, y también es máxima en el centro del sombrero.

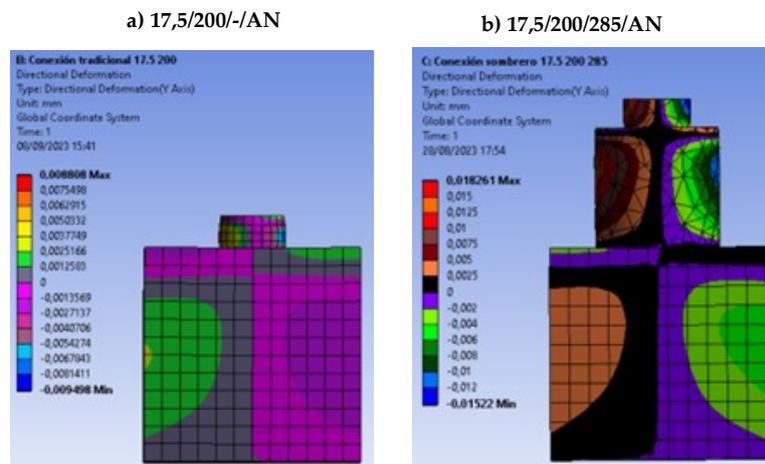


Figura 43. Desplazamientos en el eje horizontal de diferentes modelos con Ansys: a) conexión convencional, b) conexión con sombrero. Fuente: Elaboración propia.

5.3.2. Desplazamientos en las probetas considerando armadura tubular.

La repetición de los modelos con armadura tubular en los micropilotes muestra unos desplazamientos de la cabeza de los micropilotes ligeramente inferiores a los obtenidos previamente, ya que se ha introducido un elemento que rigidiza el elemento estudiado. Por tanto, y como era de esperar, estos resultados difieren aún más de los obtenidos en experimentación.

Sin embargo, este resultado visual es muy esclarecedor para entender cuál puede ser la razón que explica la rotura de la cabeza de los micropilotes: la cabeza de los micropilotes no cumple las hipótesis de Saint-Venant y de Navier-Bernoulli (ver Figura 44, Figura 45y Figura 46). En concreto, estas hipótesis suponen una distribución de deformaciones unitaria uniforme para que las secciones que inicialmente son planas (y perpendiculares a la directriz), permanezcan planas (y

perpendiculares a la directriz si sólo hay esfuerzo axial), una vez se haya deformado el material (hipótesis que se aplica en elementos tipo viga, que no es el caso). Esto requiere además, que la distribución de tensiones se adecúe a las características de cada material que está en contacto y que la unión entre ellos resista las diferencias de tensión (tensión rasante que pueda aparecer).

Estas hipótesis, más que aceptadas en teoría de vigas, se asumen en el método de cálculo de la resistencia del propio micropilote ($N_{c,Rd}$), no se puede asumir en las probetas ensayadas. Los resultados muestran que para la sección superior del micropilote, el descenso del micropilote es mayor (casi el doble) que en el borde exterior del micropilote. Esta deformación diferencial, junto con la falta de adhesión acero-lechada por no haber soldado barras en la zona del micropilote, pueden ser las responsables del despegue de la lechada. Con la visualización posterior de las deformaciones unitarias, se comprobará si los materiales han superado los límites aceptables, lo que apoyará con datos numéricos el despegue de la lechada.

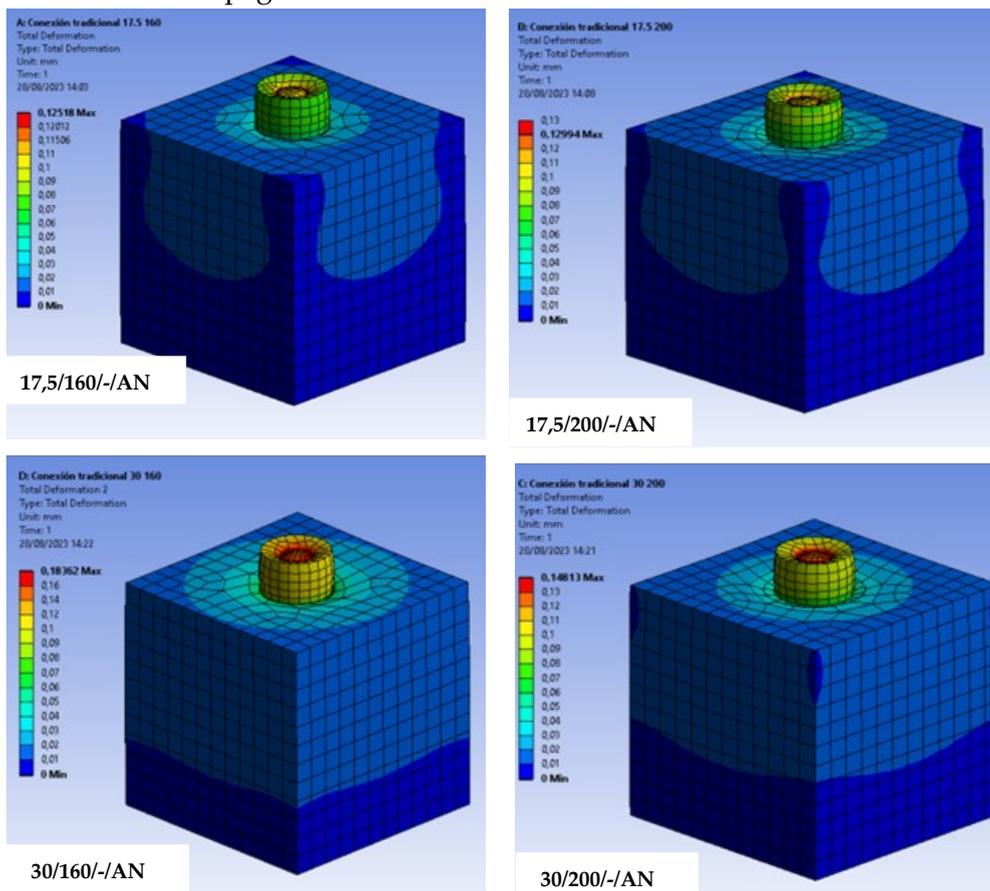


Figura 44. Deformaciones de las probetas de conexión convencional modelizadas en Ansys introduciendo en el modelo la armadura tubular que atraviesa todos los cuerpos. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, las imágenes de la Figura 45 y Figura 46, también sirven para explicar por qué se va insertando la armadura dentro del micropilote en las probetas con conexión con sombrero una vez despegada la lechada de cemento alrededor del micropilote (ver Figura 25).

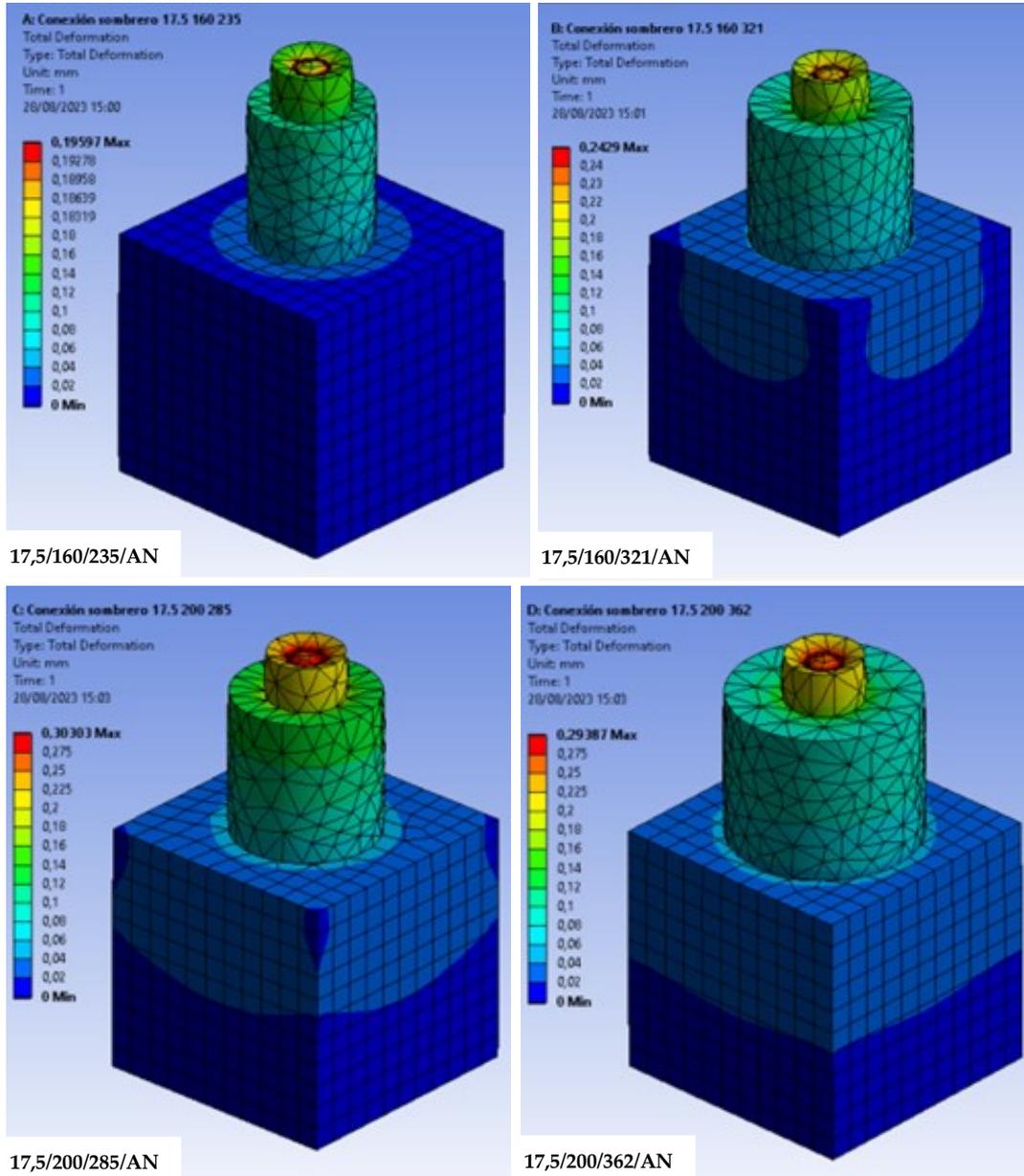


Figura 45. Deformaciones de las probetas del nuevo sistema de conexión con sombrero modelizadas en Ansys con hormigón de resistencia a compresión simple de 17,5 MPa introduciendo en el modelo la armadura tubular que atraviesa todos los cuerpos. Fuente: Elaboración propia.

Por último, se observa que los menores desplazamientos en la zona del sombrero se obtienen cuando la perforación es de 200 mm y el diámetro de sombrero es de 362 mm, independientemente de que estén armados los sombreros. Este resultado coincide con las probetas que han arrojados unas mayores cargas últimas de rotura (ver Tabla 9).

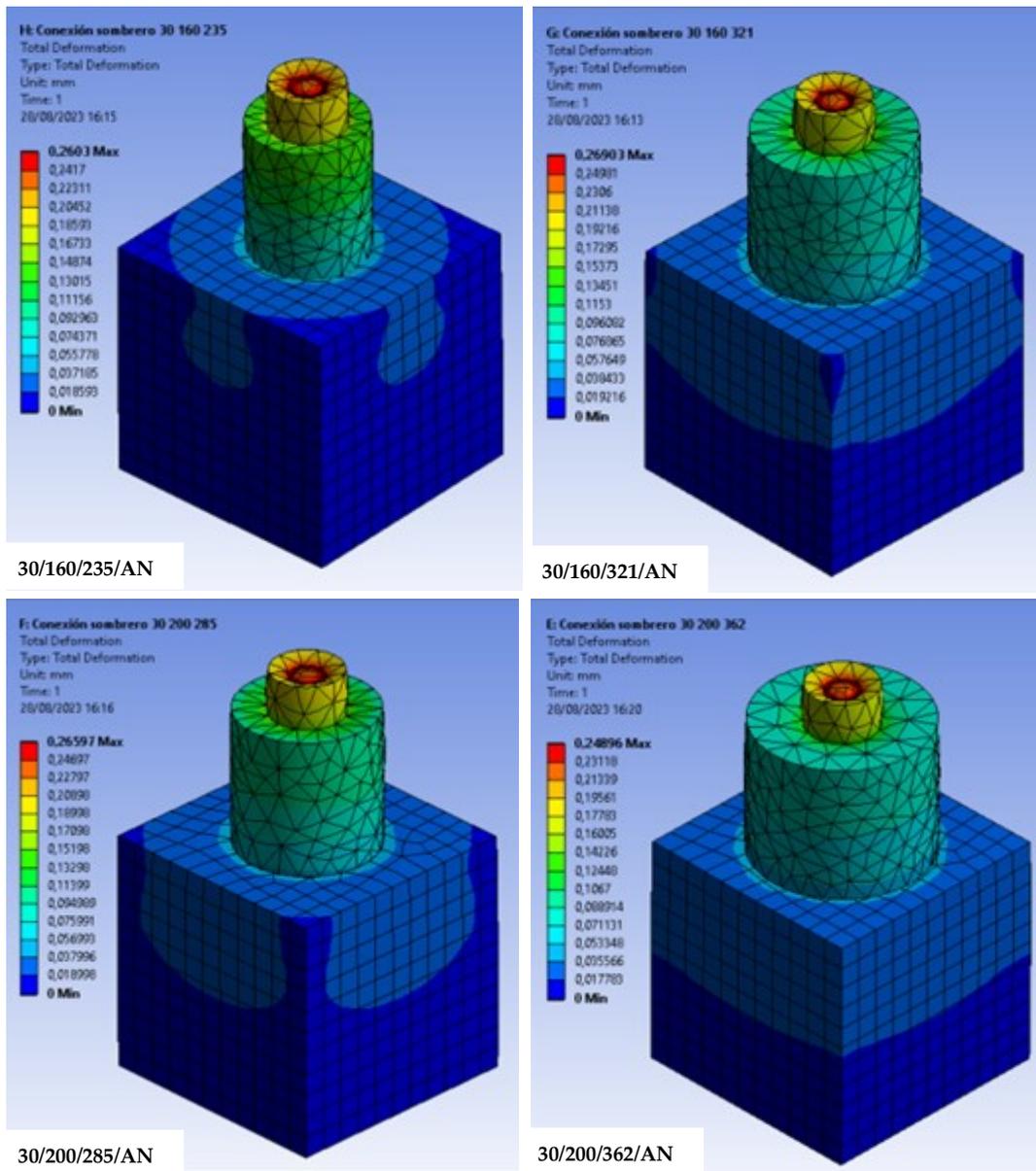


Figura 46. Deformaciones de las probetas del nuevo sistema de conexión con sombrero modelizadas en Ansys con hormigón de resistencia a compresión simple de 30 MPa introduciendo en el modelo la armadura tubular que atraviesa todos los cuerpos. Fuente: Elaboración propia.

5.3.3. Tipos de rotura de las probetas.

Después de la presentación del campo de desplazamientos en valor absoluto, se presentan otros resultados de la modelización con el fin de justificar o explicar los diferentes tipos de rotura que han experimentado las probetas en el laboratorio. En concreto se explica la rotura de la cabeza del micropilote, el inicio del deslizamiento del micropilote en la conexión convencional, y la rotura del dado. Para ello, se va a emplear, según el caso, los resultados de tensión equivalente de von Mises ($\sigma_{eq,VM}$), tensión máxima principal (σ_1), deformaciones principales máxima (ε_1) y mínima (ε_3).

5.3.3.1. Rotura de la zona de la cabeza del micropilote.

Como se ha adelantado, en la mayoría de las probetas ensayadas se ha producido la rotura y despegue de la lechada en la zona de micropilote (Figura 47). Esto se debe a la deformación que experimenta la armadura tubular y que la lechada no es capaz de acompañar, tal y como se muestra en la sección anterior con los resultados de los desplazamientos totales (ver Figura 44, Figura 45 y Figura 46).



Figura 47. Probetas llevadas a rotura en pórtico que han desarrollado una rotura en la zona de la cabeza del micropilote. Fuente: Elaboración propia.

Para corroborar las afirmaciones anteriores, se muestra, en primer lugar, el equivalente de von Mises (*Equivalentet (von-Mises) Stress*) en varias probetas modeladas con armadura tubular. Este resultado muestra claramente que la

cabeza del micropilote y la zona del sombrero son las que acumulan más tensiones (Figura 48). Si además, se presenta una sección de las mismas (Figura 49), se observa claramente tanto la acumulación de tensiones en la zona, como la deformación curva de la armadura tubular en la zona del micropilote (cuadro rojo). Además, se observa un fuerte gradiente de tensiones entre los dos materiales, lo que implica la existencia de una tensión rasante entre ambos materiales que, sin el adecuado contacto hace que se despeguen.

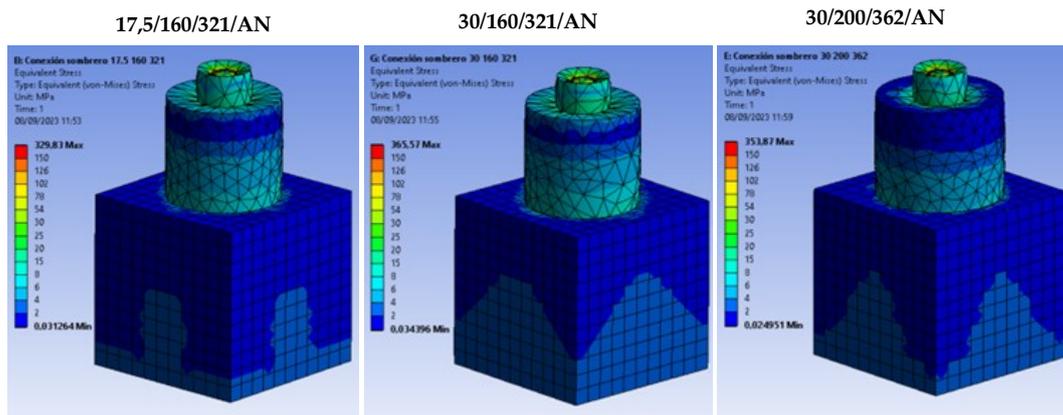


Figura 48. Tensión equivalente de von-Mises de diferentes modelos con Ansys. Fuente: Elaboración propia.

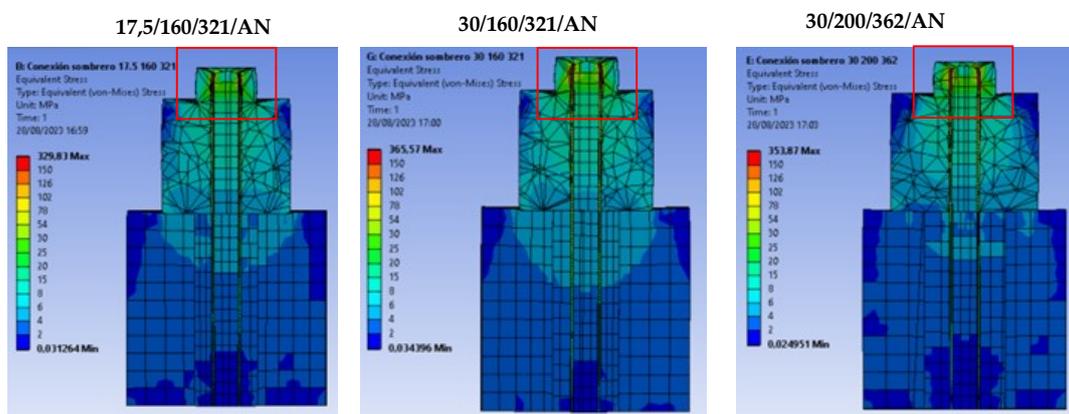


Figura 49. Secciones de Tensión equivalente de von-Mises de diferentes modelos con Ansys. Fuente: Elaboración propia.

En segundo lugar se muestran las deformaciones principales máximas (ε_1 : *Maximum Principal Elastic Strain*) y mínimas (ε_3 : *Minimum Principal Elastic Strain*) para los dos tipos de conexiones. En ellas se observa que las deformaciones positivas más elevadas se encuentran alrededor de la armadura tubular en la zona del micropilote, tanto en las de conexión convencional (Figura 50a) como con sombrero (Figura 50b). Estas deformaciones unitarias positivas son resistidas por

el acero del micropilote, sin embargo la lechada no es capaz de soportar las tensiones de tracción necesarias para poder acompañar al acero en dichas deformaciones. Por otro lado, al analizar las deformaciones negativas, si bien no se alcanza el máximo de flexo-tracción (-0,0035), sí que hay zonas en la cabeza del micropilote en las que se supera el límite establecido de -0,002 (compresiones). En las conexiones convencionales se supera de forma puntual (Figura 51a), mientras que en las conexiones con sombrero hay zonas más amplias en las que se supera dicho límite (Figura 51b). Por lo tanto, ambos resultados numéricos están en línea con los resultados experimentales, en los que el despegue de la lechada de cemento se produce de forma casi generalizada.

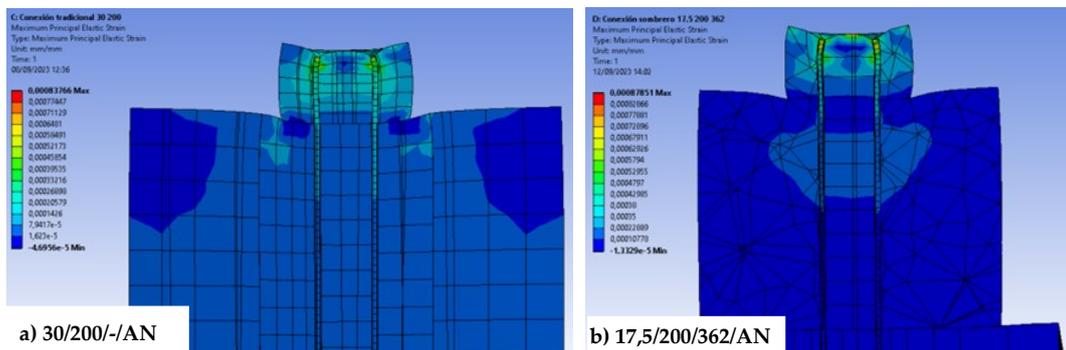


Figura 50. Sección con deformaciones principales máximas (ϵ_1) modeladas con Ansys para dos probetas: a) conexión convencional; b) conexión con sombrero. Fuente: Elaboración propia.

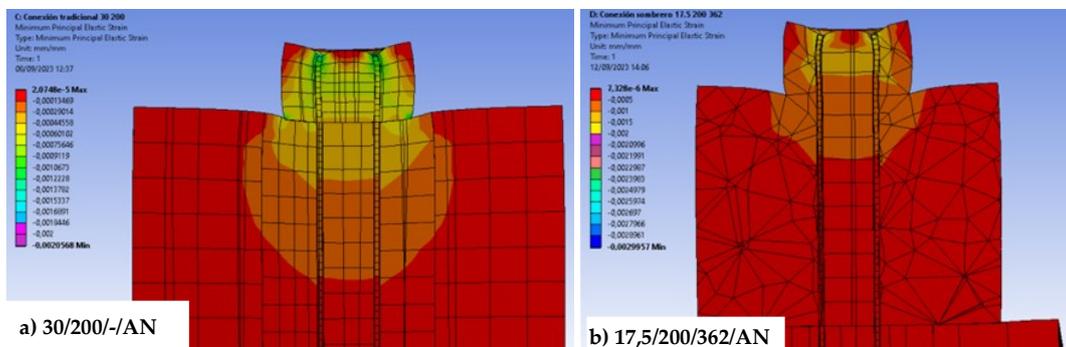


Figura 51. Secciones con deformaciones principales mínimas (ϵ_3) modeladas con Ansys para dos probetas: a) conexión convencional; b) conexión con sombrero. Fuente: Elaboración propia.

5.3.3.2. Fallo por deslizamiento del micropilote en conexión convencional.

El fallo habitual en las probetas con conexión convencional ha sido por deslizamiento del micropilote a través del dado de hormigón (Figura 52), excepto una que el fallo ha sido por rotura monolítica de la zapata. Este descenso se materializa con la separación de la lechada de cemento del micropilote con el hormigón del dado de hormigón que simula la zapata.



Figura 52. Probetas llevadas a rotura en pórtico que han desarrollado el descenso del micropilote en la zona de unión con la zapata. Fuente: Elaboración propia.

Las tensiones equivalentes de von Mises indican que el material está más tensionado en la zona en la que el micropilote se conecta a la zapata y es mínima en la parte inferior. Este resultado, apoya la teoría que la rotura por deslizamiento se inicia en la parte de la perforación junto a la cabeza del micropilote (Figura 53a) y, una vez cede esta zona, se va trasladando hacia el resto de la perforación.

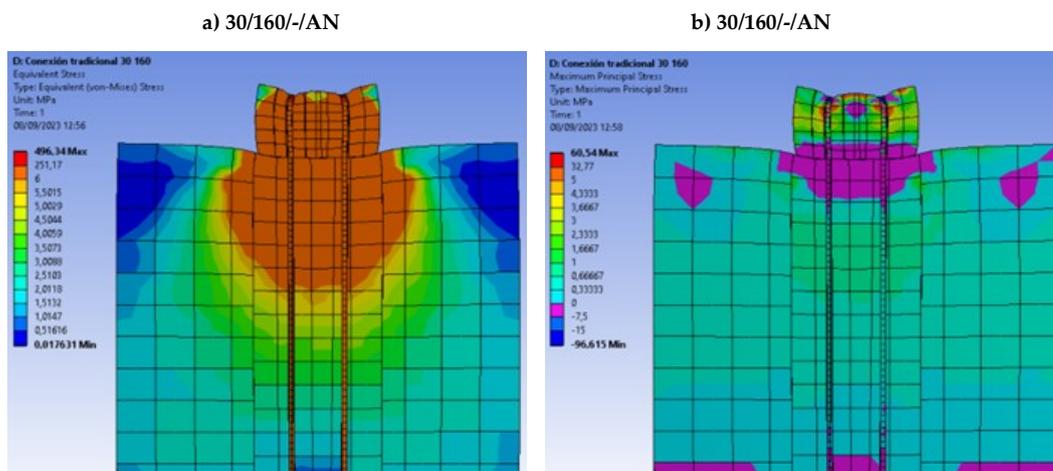


Figura 53. Resultados tensiones de un modelo de conexión convencional simulado con Ansys: a) tensión equivalente de von Mises ($\sigma_{eq,VM}$); b) tensión máxima principal (σ_1). Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, la representación gráfica de las tensiones principales máximas, muestra la existencia de tracciones en la interfaz de la conexión. En concreto, en la cabeza del micropilote son máximas en la interfaz lechada-acero (despegue de la lechada), y en la zona interna del micropilote al inicio de la conexión. Estas últimas van disminuyendo hacia la parte inferior. Estas tracciones en la interfaz de la perforación se encuentran en el intervalo 0,66 a 2,33 MPa,

requieren la existencia de unas compresiones normales (σ_n) justo en esa interfaz para mantener el equilibrio. Estas tensiones son fruto del efecto Poisson al dilatarse el material en la perforación (Figura 53b). No considerar el efecto de esta tensión implica despreciar totalmente la componente de rozamiento, que es una de las razones por las que la tensión de adherencia real sea superior a los valores que se emplean en el diseño teórico.

5.3.3.3. *Rotura del dado de hormigón que simula la zapata.*

La rotura monolítica del dado de hormigón se debe a tensiones de tracción que aparecen en las caras del mismo. En algunos casos, simplemente son fisuras, mientras que en otros se ha producido la rotura frágil y total del dado de hormigón (ver Figura 54).



Figura 54. Probetas llevadas a rotura en pórtico en las que han aparecido fisuras/fracturas en la zona de la zapata. Fuente: Elaboración propia.

Para conocer los puntos en los que se alcanzan estos valores máximos de tracciones se representan las tensiones principales máximas que aparecen en las caras de los dados, tanto para una probeta de conexión convencional (Figura 55a) como de conexión con sombrero (Figura 55b). En ella se visualizan que los centros de las caras de los dados son donde se concentran las mayores tensiones principales positivas de tracción, que es justo donde se han producido las mayores fisuras y fracturas cuando se han ensayado las probetas. Los valores máximos que alcanza el modelo están en el entorno de 1,5-2,0 MPa, similares a la

resistencia a tracción del hormigón, lo que justifica la rotura monolítica justo por esa zona.

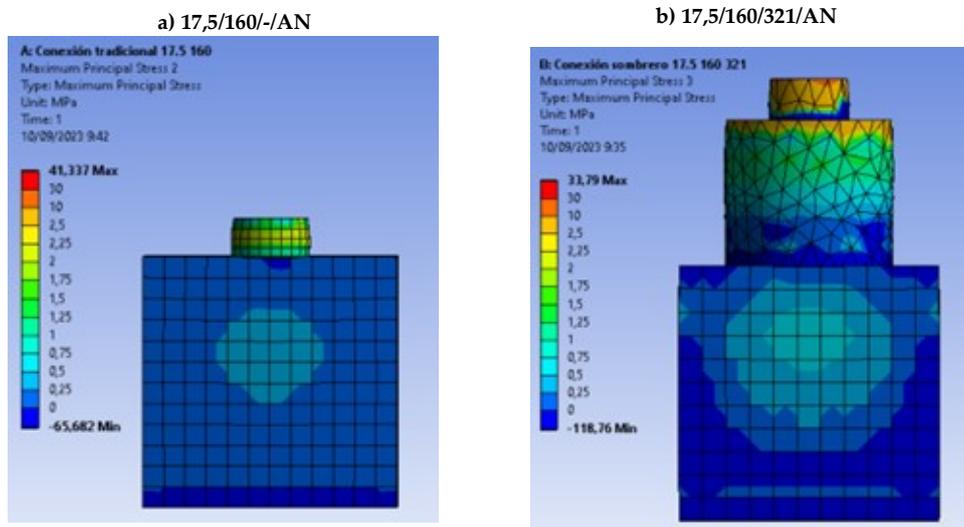


Figura 55. Tensiones principales máximas (σ_1) en dos modelos de probeta con Ansys: a) conexión convencional; b) conexión con sombrero. Fuente: Elaboración propia.

5.3.3.4. Rotura del sombrero.

Para finalizar, la rotura del sombrero se produce en la mayoría de las probetas ensayadas con este tipo de conexión, y ésta se produce básicamente de dos formas. La primera, que más veces ha sucedido, es que se inserte totalmente la armadura y parte de la lechada circundante dentro del sombrero y este permanezca intacto o con pequeñas fisuras (ver resultado probeta 17,5/160/321/AN en Figura 47). Esta rotura, que se explica con el estudio de las fracturas que se realiza en la sección 5.2.1 (ver Figura 26), se genera con la creación de un plano “cilíndrico” de rotura de punzonamiento en el sombrero que permite el deslizamiento del micropilote en la perforación (líneas rojas discontinuas en la Figura 56).

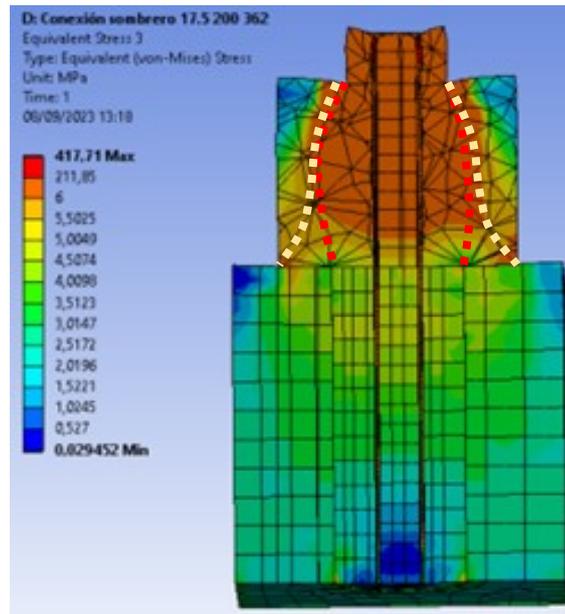


Figura 56. Rotura de la zona del sombrero mostrando las tensiones equivalentes de von Mises con Ansys.
Fuente: Elaboración propia.

La otra opción es que la matriz de lechada interna no permita que se inserte la armadura o que no se forme el plano de rotura cilíndrico. Entonces, el sombrero se dilata por efecto Poisson incrementando las tracciones en la lechada que rompen el sombrero de forma monolítica (ver resultado probeta 30/160/321/AN en Figura 54). En este caso, la energía acumulada en el material permite que el sombrero transmita la carga hacia la zapata por bielas de compresión en forma de campana dibujadas con líneas amarillas discontinuas. Cuando se rompe la zona del micropilote y las deformaciones de compresión en el sombrero pasan a ser inasumibles por la lechada, también se produce la rotura del sombrero (Figura 56).

5.3.4. Comparativa de los modelos de rotura según el tipo de conexión.

Del análisis de los tipos de rotura del apartado anterior se desprende que, según el tipo de conexión (convencional o con sombrero), existe un tipo de rotura predominante. En el caso de las probetas que simulan la conexión directa convencional, el tipo de rotura predominante es el desplazamiento de la zona de perforación del dado de hormigón respecto del propio dado (Figura 57a). Por lo que la fuerza axial del micropilote se resiste por un modelo de contacto materializado por la tensión de adherencia en la superficie de contacto de la

perforación (Figura 57b). Esta tensión de adherencia es variable a lo largo de la perforación, siendo máxima en la zona junto al micropilote (parte superior).

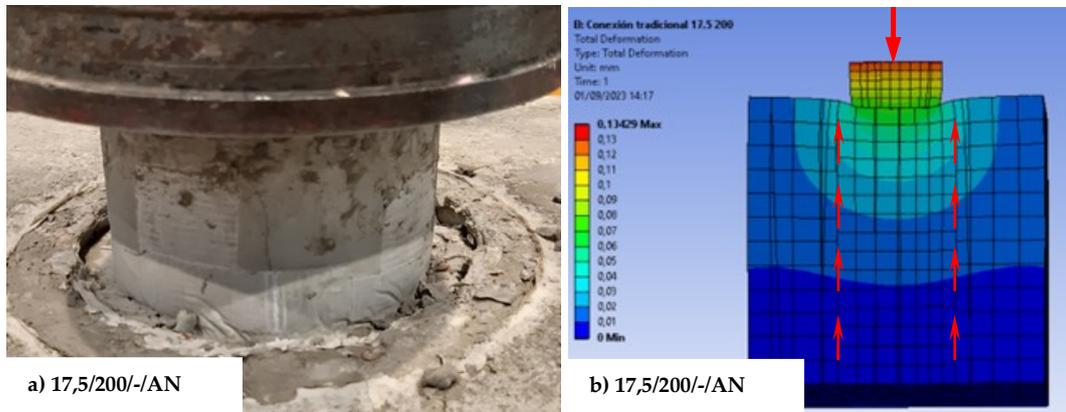


Figura 57. Deslizamiento de la zona de perforación de la zapata respecto de la propia zapata: a) imagen de los ensayos en pórtico de carga. b) Representación esquemática del modelo resistente sobre una sección del campo de desplazamientos. Fuente: Elaboración propia.

Por el contrario, en el caso de las probetas que simulan la conexión directa con sombrero, el tipo de rotura predominante es la rotura del sombrero por punzonamiento (Figura 58a). La carga axial se transmite por resistencia a cortante a través de un plano aproximadamente cilíndrico (o tronco-cónico) en el interior del sombrero que apoya en el dado de hormigón que simula la zapata (Figura 58b).

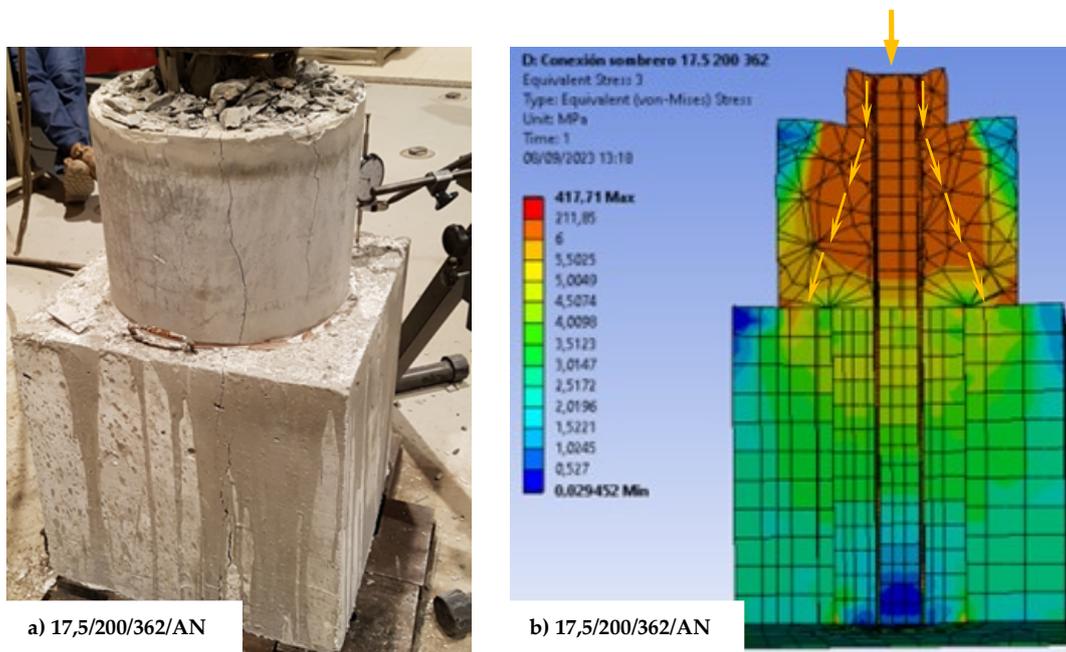


Figura 58. Rotura de la zona del sombrero: a) imagen de los ensayos en pórtico de carga. b) Tensiones equivalentes de von-Mises en la simulación con Ansys. Fuente: Elaboración propia.

VI – CONCLUSIONES

VI -CONCLUSIONES

La presente tesis doctoral analiza con profundidad todos los aspectos relacionados con la conexión directa de los micropilotes en los proyectos de recalce de cimentaciones de hormigón. Comenzando desde una perspectiva económica, esta tesis presenta el primer estudio sobre la repercusión económica que los últimos cambios normativos han tenido sobre los proyectos de recalces con micropilotes, cuyo resultado justifica la realización de la misma.

Además, la revisión histórica de formulaciones empleadas en el cálculo de la resistencia de la conexión directa convencional, necesaria para el estudio económico, ha servido para reflexionar y poner un poco de luz sobre la naturaleza de las comprobaciones resistentes que se están empleando, y cuyo modo de aplicación no está siendo el más adecuado dadas las características del fenómeno físico resistente que se genera en la conexión directa.

Respecto a la perspectiva experimental, la revisión bibliográfica de los escasos trabajos previos que han estudiado la conexión directa convencional ha sido fundamental para cumplir con esta parte de la tesis. Por un lado, han servido para entender cuáles son los fenómenos resistentes de la conexión directa, y cómo se trasladan realmente las cargas desde el terreno hacia la conexión. De hecho, tal y como viene recogido en las normativas relacionadas con el diseño de micropilotes, hay serias dudas de cómo se transmiten las cargas a través de todos los materiales, y cuáles son los factores más determinantes en el diseño de los mismos. Estas dudas surgen, sobre todo, cuando las normativas, en caso de duda aluden al cumplimiento de la correspondiente normativa de hormigón estructural. Este hecho ha puesto de manifiesto que algunas comprobaciones resistentes no se están aplicando de forma correcta, incluso haya otras importantes que no vienen recogidas ni en la normativa, como la rotura monolítica de la cimentación por un elevado estado tensional. Por otro lado, la revisión bibliográfica ha sido de gran ayuda a la hora de definir el DoE y el diseño de las probetas. Por ejemplo, decidir cuáles son los factores a incluir en el DoE y el número de niveles, el tamaño de las mimas, los materiales a emplear, entre otras.

Considerando por último la perspectiva de simulación numérica, se ha comprobado que es una herramienta útil a pesar de la dificultad de calibrar los modelos con una respuesta frágil e impredecible. Aunque de forma esencialmente cualitativa, ha sido capaz de explicar/predecir gran parte de los modos de fallos experimentados en laboratorio: despegue lechada-acero en la cabeza del micropilote, rotura del sombrero, incluso rotura monolítica del bloque de hormigón en masa.

Las principales conclusiones de esta tesis son:

- La formulación de rasante en juntas de hormigonado, que la normativa actual europea recomienda para el cálculo de la resistencia de la conexión directa convencional, es coherente con los mecanismos resistentes de la conexión directa: adhesión química y rozamiento. Sin embargo, en la práctica, por falta de mayor información técnica y desconocimiento, se aplica de forma muy conservadora, lo que ha hecho que la resistencia de la conexión se reduzca a la mitad en comparación con el método de cálculo anterior que suponía un modelo resistente por cortante.
- La drástica reducción de la resistencia de la conexión ha hecho que esta comprobación sea el eslabón más débil, siendo necesario aumentar el número de micropilotes para repartir la carga que recibe la cimentación en un mayor número de perforaciones. Esto ha supuesto un incremento promedio de coste del 40% en estos tipos de proyectos, que puede llegar a ser del 60% dependiendo de las características de la cimentación y del terreno.
- El valor de la tensión de adherencia, o de la resistencia de la conexión, es crítico en proyectos de recalces de cimentaciones que reciben grandes cargas, con cimientos de pequeño espesor y sobre terrenos con alta capacidad portante. Para estructuras que cumplen estos criterios, el incremento de coste puede ser del 60%.
- Los resultados de la simulación Monte Carlo confirman que la conexión directa es el eslabón más débil del diseño de los recalces. Éstos muestran que, conforme aumenta el valor de la tensión de adherencia, disminuye

el coste del proyecto. También indican que la reducción, o incremento, de coste no es lineal y que, a partir de un valor de tensión de adherencia de 0,60 MPa no se generan ahorros significativos. Incluso los resultados desaconsejan invertir en procedimientos constructivos con el fin de alcanzar valores de 1,0 MPa, ya que los ahorros pueden ser nulos.

- El valor de la tensión de adherencia característica (percentil 5%) minorada que se obtiene de la distribución de probabilidad para hormigones en masa tipificados como c20/25, y que se emplea en la Simulación Monte Carlo, es de 0,552 MPa. Este valor, que procede de ensayos de laboratorio representativos de la conexión directa, coincide con el mínimo valor de rasante de juntas de hormigonado de la normativa americana ACI-318-19 que es de 0,558 MPa. Por lo que, a falta de información detallada, su uso podría ser un valor aceptable en el diseño de recalces de cimentaciones de hormigón armado.
- Los resultados experimentales de la conexión directa convencional coinciden con los del estudio utilizado como referencia a la hora de diseñar las probetas. Resultados que, por tanto, apoyan los obtenidos en ambas investigaciones. Además, también se ha cumplido que la tensión de adherencia crece cuando se incrementa la resistencia del material que confina al micropilote y cuando el diámetro de perforación se reduce.
- Los valores de los resultados de la tensión de adherencia de los ensayos son muy superiores a los que se obtienen con la aplicación de la formulación de comprobación a rasante en juntas de hormigonado de la normativa de hormigón estructural europea (Eurocódigo 2). Para equiparar estos resultados con seguridad habría que dejar de emplear valores de parámetros de cohesión y rozamiento tan conservadores. Asimismo, estos resultados son superiores al mínimo anteriormente expuesto de la ACI-318-19.
- Los ensayos realizados con la nueva propuesta de conexión directa con sombrero han mostrado una resistencia estadísticamente superior a la convencional. En concreto incrementan la resistencia en un 39%, por lo

que estaría avalado su uso en casos en los que se quiera incrementar la resistencia de la conexión directa en recalces.

- Para la conexión directa con sombrero, el factor resistencia a compresión simple del hormigón de la cimentación deja de ser relevante. Esto se debe al cambio en el modelo resistente principal, que pasa a ser un mecanismo resistente por punzonamiento de la lechada del sombrero.
- El armado dispuesto en el sombrero para absorber las posibles tracciones que se generan en el mismo no mejora la resistencia de la conexión. De hecho, no ha supuesto ninguna diferencia estadísticamente significativa en la carga pico de rotura. Sin embargo, la conexión con sombrero armado ha tenido una respuesta más dúctil una vez alcanzada la carga pico. De hecho, en muchas probetas ha habido un endurecimiento incluso superior a la carga pico de rotura, a costa eso sí de grandes desplazamientos.
- La resistencia de la conexión con sombrero se incrementa cuando el diámetro de perforación es mayor. Esta conclusión está en consonancia con el modelo resistente por punzonamiento, ya que la superficie teórica de rotura es mayor. En este sentido, los valores de rotura obtenidos del modo de fallo por punzonamiento se ajustan a los obtenidos teóricamente. Además, la inspección visual de las zonas de rotura, muestra claramente la formación de este plano de rotura.
- La resistencia de la conexión directa con sombrero crece conforme se incrementa la relación D_s/D_m . Esto ocurre tanto en las probetas a escala reducida como a escala real. Pero el valor de este ratio se estabiliza cuando alcanza un valor en torno a 2, es decir el diámetro del sombrero es el doble que el diámetro de perforación de la cimentación.
- En resumen, con los resultados obtenidos, la mejor conexión directa con sombrero es aquella que se realiza sin armado del mismo, con el mayor diámetro de perforación y con una relación D_s/D_m igual a 2. Además, en principio, el resultado es independiente de la resistencia del hormigón.
- La simulación numérica de la conexión directa, tanto la convencional como la nueva propuesta, tomando como referencia las probetas

ensayadas ha servido para predecir cualitativamente el comportamiento estructural del mismo. En concreto, los resultados explican las formas de rotura que se han producido: despegue de la lechada del acero en la cabeza del micropilote, deslizamiento del micropilote en la conexión convencional, la rotura monolítica y las zonas de rotura del sombrero.

- El despegue de la lechada de cemento en la cabeza del micropilote se debe a la diferencia de deformaciones entre el acero y la lechada. En concreto, al abombamiento de la armadura tubular que no puede seguir la lechada por su rigidez y por la falta de adhesión entre ambos materiales.
- Respecto a la conexión convencional, los resultados de las deformaciones muestran que existe una dilatación del micropilote dentro de la perforación. Esto demuestra que hay una compresión radial y normal que ayudaría a la componente de resistencia por rozamiento que justifica los elevados valores de tensión de adherencia obtenidos en los ensayos si se comparan con los que se emplean en el diseño según normativa. Además, la zona con mayor nivel de tensiones es la zona interna del micropilote junto a la unión, lo que indica que en esta zona es donde se produce el fallo que inicia el deslizamiento.
- En ambos tipos de conexiones se visualiza la dilatación del micropilote en el interior de la perforación gracias a los resultados de las deformaciones, sobre todo en la conexión convencional. Este resultado indica también, gracias a los resultados de las tensiones principales, que en el bloque de hormigón hay zonas traccionadas que justifican su rotura monolítica al no haber dispuesto armado en el mismo.
- En la conexión con sombrero la zona más tensionada es la parte del sombrero que apoya en la zapata, donde comienza el fallo de la conexión. Este resultado se confirma con el estudio de las fracturas de los ensayos, en los que se visualiza un plano cilíndrico de rotura que comienza justo alrededor del diámetro de perforación y se introduce dentro del sombrero. Ambos resultados, justifican la hipótesis de rotura por punzonamiento planteada en el diseño de la nueva conexión.

VII - FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

VII - FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Se van a plantear 3 posibles líneas de investigación para continuar con la mejora de la conexión directa de micropilotes con estructuras existentes de hormigón. La primera es estudiar diferentes tipos de armado de la zona del sombrero. La segunda es conocer mejor cómo influye en la resistencia total del nuevo sistema cada uno de los mecanismos resistentes, es decir, en qué medida aporta resistencia la tensión de adherencia y en qué medida la rotura por punzonamiento. La tercera línea de investigación es estudiar, de forma cuantitativa, cómo influye la rugosidad de la superficie de perforación de la conexión en la resistencia de la misma.

Primera nueva línea de investigación. Como demuestra el trabajo realizado, la incorporación del sombrero mejora la capacidad de carga de la conexión directa convencional. Sin embargo, el armado de la zona del sombrero no ha sido efectivo, al no mejorar la carga última de rotura de la conexión respecto del sistema con sombrero y sin armadura. Por lo tanto, una futura línea de investigación es continuar el estudio realizado, proponiendo nuevos sistemas de armado del sombrero que permitan absorber las tracciones que se generan en su interior. Uno de los puntos de partida es aplicar estos nuevos sistemas de armado de sombrero al diseño con sombrero que mejor ha funcionado: diámetro de perforación de 160 mm y diámetro de sombrero de 321 mm.

Segunda nueva línea de investigación. La siguiente propuesta de nueva línea de investigación tiene por objetivo conocer mejor cómo se produce la transmisión de cargas en el nuevo sistema de conexión. Es decir, cómo colaboran las dos superficies de contacto: la primera es la conexión convencional por tensión de adherencia, y la segunda el anillo de contacto del sombrero con la cimentación. El objetivo es cuantificar la relación entre ambos mecanismos de transmisión de carga: si son independientes, si se producen a la vez, o si uno actúa primero y una vez superado entra el otro en funcionamiento. Para ello, y puesto que el mecanismo de la conexión directa convencional (superficie cilíndrica) ya se ha estudiado en el presente trabajo, se propone llevar a rotura probetas en las que se elimine la contribución a la resistencia de la zona cilíndrica. Se diseñarían probetas similares a las realizadas en la presente tesis doctoral, pero sin rellenar

de lechada la zona cilíndrica, lo que se puede conseguir protegiendo con algún material impermeable la zona de la perforación. Después se llevarían a rotura las muestras y se compararían resultados.

Tercera línea de investigación. Relacionada con esta futura línea de investigación se encuentra el problema de poder aplicar los conocimientos adquiridos en esta tesis con la normativa actual de diseño de recalces con micropilotes. La normativa actual no recoge gran parte del conocimiento que se desprende de esta tesis doctoral ni de otros trabajos previos similares, como la influencia del diámetro de perforación, ni mucho menos los resultados del nuevo sistema de conexión con sombrero. Este hecho provoca cierto rechazo a su aplicación por parte de los ingenieros calculistas, ya que no están apoyados por la normativa vigente. Por lo que, si se quiere que un nuevo sistema de conexión tenga una acogida más fácil entre los profesionales del sector, se debe proponer un sistema que aparezca en textos normativos. En línea con esto, uno de los aspectos más ambiguos y que se puede investigar es la rugosidad de la superficie de contacto entre lechada-hormigón. Como se ha comentado previamente los coeficientes relacionados con la rugosidad de dicha superficie, c y μ del Eurocódigo 2 [18], dependen de la experiencia del calculista, y la tensión normal (σ_n) se suele despreciar. Por tanto, la tercera línea de investigación propuesta iría dirigida a estudiar los valores de c y μ que se deberían de emplear en función de la rugosidad de la perforación, y la tensión normal que se genera (σ_n) en función del nivel de confinamiento y del diámetro de perforación. De esta manera no debería haber reticencia entre los técnicos a la aplicación de los resultados del nuevo estudio, al estar todo respaldado por ensayos de laboratorio y recogida la formulación en la normativa actual.

VIII - REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

VIII - REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Lizzi F. Micropiles: Past; Present and Future. Developments in: Geotechnical Engineering; 2000; Bangkok.
- [2] Sabatini JP, Tanyu B, Armour T, Groneck P, Keeley J. Micropile Design and Construction. Washington DC: Fed. Highw. Adm. FHWA-NHI; 2005.
- [3] Bruce DA, Juran I. Drilled and Grouted Micropiles: State-of-Practice Review. Dallas: ADSC The International Association of Foundation Drilling; 1997.
- [4] Pachla H. Conditions of proper interaction of Low-pressure Injection Piles (LIP) with structure and soil, carrying capacity of pile anchorage in foundation. *Studia Geotechnica et Mechanica*. 2016; 38(4): 33-49.
- [5] Echave-Rasines JM. Conexión de micropilotes a estructuras. Jornadas técnicas SEMSIG-AETESS. 3ª Sesión: Micropilotes, Naos Livros, p. 131-141. 2003 febrero; Madrid.
- [6] Veludo J, Dias-da_Costa D, Júlio ENBS, Pinto PL. Bond strength of textured micropiles grouted to concrete footings. *Engineering Structures*. 2012; 35(1): 288-295
- [7] Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera. Madrid: Dirección General de Carreteras. Ministerio de Fomento; 2006.
- [8] Execution of special geotechnical works – Micropiles (CEN. (2019). EN 14199:2019). Brusseles: European Committee for Standardization; 2019.
- [9] Bruce DA, Di Millio AF, Juran I. Introduction to micropiles: An international perspective. *Geotechnical Special Publication*. 1995; 50: 1-26.
- [10] Bruce DA, Di Millio AF, Juran I. Primer on micropiles. *Civil Engineering-ASCE*. 1995; 65(12): 51-54.
- [11] Juran I, Bruce DA, Dimillio A, Benslimane A. Micropiles: the state. Part II: Design of single micropiles and groups and networks of micropiles. *Ground Improvement*. 1999; 3: 89-110.
- [12] Armour T, Groneck P, Keeley J, Sharma S. Micropile Design and Construction Guidelines - Implementaion manual. Federal Highway Administration - US Department of Transportation. 2000

- [13] Azuar MJJ, Renault MJ. Lex micropieux. Ministère de L'Urbanisme du Logement et des Transports. Direction des Routes. 1986
- [14] Travaux de fondations profondes pour le bâtiment – Partie 1: Cahier des clauses techniques (NF. P 11-212). Paris: Normative française; 1992.
- [15] Cyna H, Schlosser F, Frank R, Plumelle C, Estephan R, Altamayer F. FOREVER: Synthèse des resultants et recommandations du project national sur les micropieux (1999-2003): Presses de L'Ecole National des Ponts et Chaussées; 2004.
- [16] Execution of special geotechnical works – Micropiles (CEN. (2006). EN 14199:2006). Brusseles: European Committee for Standardization; 2006.
- [17] Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-19). Detroit: American Concrete Institute; 2019.
- [18] Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings (CEN. EN 1992-1-1). Brussels: European Committee for Standardization; 2010.
- [19] Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08). Madrid: Real Decreto 1247/2008, Boletín Oficial del Estado (BOE) n° 203; 2008.
- [20] Código Estructural. Madrid: Ministerio de la Presidencia, Relaciones con las Cortes y Memoria Democrática; 2021.
- [21] Oteo CS. Micropilotes. Criterios para el diseño de micropilotes. Presentado en: Jornadas Técnicas SEMSIG-AETESS 3ª Sesión. Micropilotes; 2003 febrero; Madrid.
- [22] Instrucción EH-73. (1973). Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado (EH-73). Madrid: Decreto 3062/1973. Boletín Oficial del Estado (BOE) n° 293; 1973.
- [23] Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado (EH-80). Madrid: Real Decreto 2868/1980, Boletín Oficial del Estado (BOE) n° 9; 1980.
- [24] Rodríguez-Ortiz JM. Curso de rehabilitación. 4ªEd. Madrid: Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid; 1984.
- [25] Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-02). Detroit: American Concrete Institute; 2002.

- [26] Rodríguez-Ortiz JM. Actuaciones y rehabilitación en construcciones históricas y singulares. Presentado en: Jornadas Técnicas SEMSIG-AETESS 7ª Sesión. Intervenciones en cimentación: Técnicas aplicables y patología; 2007 febrero; Madrid.
- [27] Instrucción de Hormigón Estructural (EHE). Madrid: Real Decreto 2661/1998. Boletín Oficial del Estado (BOE), nº 11; 1999.
- [28] Gómez J, Cadden A, Traylor RP, Bruce DA, Eng C. Connection Capacity between Micropiles and Concrete Footings: Interpretation of Test Results and Design Recommendations. Article presented in the GEO3 Conference; 2005 november; Dallas.
- [29] Veludo J. Compressive strength of micropile-to-grout connections. *Construction and Building Materials*. 2012; 26(1): 172-179.
- [30] Pachla, H. Experimental verification of integrity of low-pressure injection piles structure – pile internal capacity. *Studia Geotechnica et Mechanica*. 2017; 39(4): 77-85.
- [31] Wang MZ. On the completeness of solutions of Boussinesq, Timpe, Love, and Michell in axisymmetric elasticity. *Journal of Elasticity*. 1988; 19: 85–92.
- [32] Xie X, Wang L. Research and application of micropile technology on expansive soil and saline soil in geotechnical engineering. *Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021; 804(2): 2-21
- [33] Babu GLS, Murthy BS, Murthy DSN, Nataraj MS, Turner JP, Mayne PW. Bearing Capacity Improvement Using Micropiles: A Case Study. *Geotechnical Special Publication.*, (124), 692-699.
- [34] El Sawwaf A, El Sawwaf M, Farouk A, Aamer F, El Nagggar H. Restoration of Tilted Buildings via Micropile Underpinning: A Case Study of a Multistory Building Supported by a Raft Foundation. *Buildings*. 2023; 13: 422.
- [35] Prat PC. Numerical investigation into the failure of a micropile retaining wall. *Computers and geotechnics*. 2017; 81: 262-273.
- [36] Castro Neto J R, Albuquerque P J R, Barbosa Y, Fiscina L F G. Experimental study on the behavior of a new post-grouted micropile in a tropical soil. *Soils and Rocks*; 2022; 45(4), e2022005322.

- [37] El Kamash W, El Naggar H, To P, Sivakugan N. The effect of long-term consolidation on foundations underpinned by micropiles in soft clay. *Ain Shams Engineering Journal*. 2022; 13(1), 101487.
- [38] Bellato D, D'Agostini S, COLA S, Simonini P. Behaviour of micropiles in heterogeneous coarse soils. ICE publishing Thomas Telford. 2016;169(3): 250-263.
- [39] Abd El-aziz AY. Performance of Hollow Bar Micropiles Under Axial and Lateral Loads in Cohesive Soils. *Scholarship@Western*. 2012.
- [40] Malik BA, Shah MY, Sawant VA. Influence of micropile parameters on bearing capacity of footings. *Environmental Science and Pollution Research International*. 2021; 28(35): 48274-48283.
- [41] Chengcan W, Han J, Jang Y. Experimental Investigation of Micropile Stiffness Affecting the Underpinning of an Existing Foundation. *Applied Sciences*. 2019; 9(12): 12-24.
- [42] Petrenko V, Bannikov D, Kharchenko V, Tkach T. Regularities of the deformed state of the geotechnical system soil base - micropile. *Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022; 970(1), 012028.
- [43] Al-Obaidi A, Al-Karawi A. Favorable of grouted micropiles for the load transfer in weak sandy soils. *MATEC Web of Conferences*. 2018, 162.
- [44] Haghigly P. Improving the Bearing capacity of foundations using micropiles. *International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering*. 2017; 3(2)
- [45] Shahrour I, Alsaleh H, Souli M. 3D elastoplastic analysis of the seismic performance of inclined micropiles. *Computers and Geotechnics*. 2011; 39: 1-7.
- [46] Sadek M. Influence of the head and tip connection on the seismic performance of micropiles. *Soil dynamics and earthquake engineering*. 2006; 26(5): 461-468.
- [47] Abdollahi K, Mortezaei A. Parametric Analysis Of Effective Factors On The Seismic Rehabilitation Of The Foundations By Network Micropile. *Zenodo*. 2013.

- [48] Stay Coello D, Herbozo Alvarado E. Cimentación en suelos potencialmente licuables mediante un bloque de suelo reforzado utilizando micropilotes con inyecciones cementicias. *Espirales: Revista Multidisciplinaria de Investigación*. 2017; 1(11).
- [49] Aboutabikh MARM. Application of Treated Oil Sands Drill Cuttings Waste in Micropiles Construction. *Scholarship@Western*. 2016
- [50] Pastor JL. Microstructure and durability of fly ash cement grouts for micropiles. *Construction & Building Materials*. 2016; 117 (1): 47-57.
- [51] Liu N, Huang Y-X, Wu B, Huang W. Experimental Study on Lateral Bearing Mechanical Characteristics and Damage Numerical Simulation of Micropile. *Advances in Civil Engineering*. 2021; 1-17, 9927922.
- [52] Shi H, Bai M, Li C, Zhang Y, Tian G. Correspondence Analysis of Soil around Micropile Composite Structures under Horizontal Load. *Mathematical Problems in Engineering*. 2015, .
- [53] Allam MM, Rao KSS, Subramanya BVV. Frame soil interaction and winkler model. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Part 2-Research and Theory*. 1991; 91: 477-494.
- [54] Liu Z, Zou W, Deng S, Fu Y, Tang S, Gou D, Xu F. A Simulation Study of the Emergency Double-Row Micropile Reinforcement of the Xituo Landslide, *Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020; 570(2); 22-39.
- [55] Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions. *Users Guide 9*. Minneapolis: Itasca Consulting Group; 2023.
- [56] Wenpei W, Yueping Y, Dehua L, Minghui M, Gang L, Zhihua Z. Numerical Simulation Study of the Load Sharing of an Arched Micropile Group in the Tizicao High-Position Landslide, China. *IOP Conference Series. Earth and Environmental Science*. 2022; 570.
- [57] Ding X, He H, Qu Y, Yang Y. Analysis of the Pile-Soil Combined Effect of Micropiles in Strengthening Expansive Soil Landslide in Southern Shaanxi Based on the Dynamic Soil Arch Model. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2022; 1-6.
- [58] Chao W, Yang J, Liu W, Pan S, Deng Z, Jin Y, Fu G. Calculation Model and Numerical Validation of Horizontal Capacity of Micropiles with Different Section Forms. *Advances in Civil Engineering*. 2022.

- [59] Cadden A, Gómez J. Buckling of micropiles. A review of historic research and recent experiences. ADSC-IAF – Micropile Committee and Schnabel Engineering Associates; 2002; West Chester.
- [60] Gatto MPA, Montrasio L. Analysis of the Behaviour of Very Slender Piles: Focus on the Ultimate Load. *International Journal of Civil Engineering*. 2021; 19: 145-153.
- [61] Seguridad estructural cimientos (DB SE-C). Madrid: Ministerio de Vivienda; 2006.
- [62] Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings (CEN. EN 1994-1-1). Brussels: European Committee for Standardization; 2009.
- [63] Moosavi M, Jafari A, Khosravi A. Bond of cement grouted reinforcing bars under constant radial pressure. *Cement & Concrete Composites*. 2005; 27(1): 103-109.
- [64] Serrano-Alcudia F. Patología de la edificación. El lenguaje de las grietas. 1ªed. Madrid: Fundación Escuela de la Edificación; 1998.
- [65] Walker WE, Harremoës P, Rotmans J, van der Sluijs JP, van Asselt MBA, Janssen P, Kraayevon Krauss MP. Defining uncertainty: a conceptual basis for uncertainty management in model-based decision support. *Integrated Assessment*. 2022; 4(1): 5-17.
- [66] Martínez-Paz JM, Pellicer-Martínez F, Colino J. A probabilistic approach for the socioeconomic assessment of urban river rehabilitation projects. *Land Use Policy*. 2014; 36(1): 468-477.
- [67] Nguyen HD, Shin M, Torbol M. Reliability assessment of a planar steel frame subjected to earthquakes in case of an implicit limit-state function. *Journal of Building Engineering*. 2020; 32: 10-17.
- [68] Vazirizade SM, Nozhati S, Zadeh MA. Seismic reliability assessment of structures using artificial neural network. *Journal of Building Engineering*. 2017; 11(1): 230-235.
- [69] Skrzypczak I, Słowik M, Buda-Ozóg L. The application of reliability analysis in engineering practice - Reinforced concrete foundation. *Procedia Engineering*. 2017; 193(1): 144-151.

- [70] Marek P, Gustar M, Anagnos T. Codified design of steel structures using Monte Carlo techniques. *Journal of Constructional Steel Research*. 1999; 52(1): 69-82.
- [71] Vose D. *Risk Analysis - A quantitative guide*. Third ed. Chichester: John Wiley and Sons; 2008.
- [72] Melo OO, López LA, Melo SE. *Diseño de Experimentos: Métodos y Aplicaciones*. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Bogotá, Colombia; 2020.
- [73] Tanco-Rainusso, PM. *Metodología para la aplicación del Diseño de Experimentos (DoE) en la industria*. Tesis doctoral. Publicaciones de la Universidad de Navarra; 2008.
- [74] Lye LM. Tools and toys for teaching design of experiments methodology. 33rd Annual General Conference of the Canadian Society for Civil Engineering. Toronto, Ontario, Canada. 2005.
- [75] Jankovic A, Chaudhary G , Goia F. Designing the design of experiments (DOE) – An investigation on the influence of different factorial designs on the characterization of complex systems. *Energy and Buildings* 2021, 250, 111298.
- [76] Peng C, Chen C, Guo T, Xu W. AK-SEUR: An adaptive Kriging-based learning function for structural reliability analysis through sample-based expected uncertainty reduction. *Structural Safety* 2024, 106, 102384.
- [77] Saleh M, Anwar S, Al-Ahmari AM, Al Faify AY. Prediction of Mechanical Properties for Carbon fiber/PLA Composite Lattice Structures Using Mathematical and ANFIS Models. *Polymers* 2023; 15,1720.
- [78] Ferro CG, Varetti S, Vitti F, Maggiore P, Lombardi M, Biamino S, Manfredi D, Calignano FA. Robust Multifunctional Sandwich Panel Design with Trabecular Structures by the Use of Additive Manufacturing Technology for a New De-Icing System. *Technologies* 2017, 5, 35.
- [79] de Luca A, Perfetto D, Caputo F. A Numerical Approach for the Investigation of Guided-Waves Propagation Mechanisms in Reinforced Polymers through a DoE Analysis. *MSF* 2019; 957:329–39.
- [80] Lipschutz S, Schiller J. *Introducción a la Probabilidad y Estadística*. McGraw-Hill/InterAmericana de España, S.A.U. Madrid; 2001.

- [81] Casas-Sánchez JM, García-Pérez C, Rivera-Galicia LF, Zamora-Sanz AI. Problemas de estadística: Descriptiva, probabilidad e inferencia. Ediciones Pirámide. Madrid, España. 1998.
- [82] Romero-Villafranca R, Zúñica-Ramajo LR. Métodos estadísticos para ingenieros. Publicaciones Universidad Politécnica de Valencia. Valencia. España. 2013.
- [83] Liu S, Duan S. Analytical solutions of crack emanating from an elliptic hole in an infinite plate under tension. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2014; 27: 1057–1063.
- [84] Jesson DE, Cottingham WN. An investigation of beam theory using the Airy stress function coupled with analytic function theory. *Journal of Engineering Mathematics*. 1986; 20: 73–79.
- [85] Kashtalyan MY, Rushchitsky JJ. Love solutions in the linear inhomogeneous transversely isotropic theory of elasticity. *International Applied Mechanics*. 2010; 46: 121–129.
- [86] Dell'Isola F, Batra R. Saint-Venant's Problem for Porous Linear Elastic Materials. *Journal of Elasticity*. 1997; 47: 73–81.
- [87] Kozhevnikov A, Lepsky O. Power series solutions to basic stationary boundary value problems of elasticity. *Integral Equations and Operator Theory*. 1998; 31: 449–469.
- [88] Arruda MRT, Castro LMS. Non-linear dynamic analysis of reinforced concrete structures with hybrid mixed stress finite elements. *Advances in Engineering Software*. 2021; 153.
- [89] Stolarski T, Nakasone Y, Yoshimoto S. Application of ANSYS to stress analysis, en *Engineering Analysis with ANSYS Software*. Second Edition. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2018.
- [90] Ghouilem K, Mehaddene R, Ghouilem J, Kadri M, Boulifa D. ANSYS modeling interface and creep behavior of concrete matrix on waste glass powder under constant static stress. *Materials Today: Proceedings*. 2022; 49 (4): 1084-1092.
- [91] Comlekci T, Marín-Pérez J, Milne L, Gorash Y, Mackenzie D. Structural steel crack propagation experimental and numerical analysis. *Procedia Structural Integrity*. 2022; 42: 694-701.

- [92] Ortiz-Berrocal L. Elasticidad. Tercera Edición. Madrid: Editorial McGraw-Hill/Interamericana de España; 1998.
- [93] Vázquez M, López E. El Método de los Elementos Finitos aplicado al análisis estructural. Madrid: Editorial Noelia; 2001.
- [94] Boresi AP, Schmidt RJ, Sidebottom OM. Advanced Mechanics of Materials. 5th Edition. Hoboken: John Wiley & Sons; 1993.
- [95] Collins JA. Failure of Materials in Mechanical Design: Analysis, Prediction, Prevention. 2nd edition. Hoboken: Wiley-Interscience; 1993.
- [96] Aleksandrova N. Efficiency of the Tresca yield criterion in modeling of annular plates with rigid constraint. Applied Mathematical Modelling. 2019; 75: 371-384.
- [97] Unger DJ. Path independent integral for an elliptical hole in a plate under tension for plane stress deformation theory. Journal of Elasticity. 2008; 92: 217-226.
- [98] Pascale P, Kumar V. A variational model of Elasto-Plastic Behaviour of Materials. Journal of Elasticity. 2021; 147(1): 257-289.
- [99] Hughes TJR. The finite element method, linear static and dynamic finite element analysis. Mineloa: Dover Publications; 2003.
- [100] Vázquez M. Resistencia de Materiales. Cuarta Edición. Madrid: Editorial Noelia; 2000.
- [101] Darrel W, Gómez J, Cadden AW, Traylor RP, Pilkington M. Compressive Load Transfer in Micropiles through Concrete Footings: A FullScale Test Program. Article presented in Geo3 Conference; 2005 november; Dallas.

IX – ANEXOS

IX - ANEXOS

ANEXO 1. Casos analizados en el estudio económico.

En este anexo se pueden ver las características en detalle de los 29 edificios que se han considerado en el estudio económico. Ver Tabla 17, Tabla 18, Tabla 19, Tabla 20 y Tabla 21.

Número Proyecto		1	2	3	4	5	6
Geometría	\varnothing_m (mm)	152	152	152	152	152	152
	\varnothing_p (mm)	220	220	220	220	220	220
	h (mm)	1000	600	600	800	500	300
Capas de suelo	e ₀ (mm)	2200	4400	5000	900	5000	5000
	e ₁ (mm)	880	3600	6000	900	5000	1500
	e ₂ (mm)	820	-	3500	-	-	-
Rozamiento por fuste	$\tau_{f,0}$ (MPa)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	$\tau_{f,1}$ (MPa)	0,1470	0,0119	0,0588	0,1275	0,0392	0,1177
	$\tau_{f,2}$ (MPa)	0,1176	0,1129	0,1274	0,1864	0,1962	0,2453
	$\tau_{f,3}$ (MPa)	0,0980	-	0,0784	-	-	-
Carga para cada elemento de cimentación (kN)	1	473,70	100,00	1176,00	1024,11	82,60	635,69
	2	785,00	199,90	676,20	2049,37	106,14	-
	3	430,50	100,00		573,52	180,21	-
	4	726,50	799,70		2492,72	336,58	-
	5	1320,40	1599,40		1927,53	-	-
	6	716,70	799,70		2056,38	-	-
	7	690,20	100,00		1268,70	-	-
	8	635,50	199,90		-	-	-
	9	1091,20	100,00		-	-	-
	10	-	799,70		-	-	-
	11	-	1599,40		-	-	-
	12	-	799,70		-	-	-

Tabla 17. Características detalladas de las cimentaciones de los 29 edificios estudiados, edificios 1 a 6. Fuente: Elaboración propia.

		Número Proyecto	7	8	9	10	11	12
Geometría	ϕ_m (mm)	152	152	152	152	152	152	152
	ϕ_p (mm)	220	220	220	220	220	220	220
	h (mm)	800	500	700	1300	800	250	
Capas de suelo	e ₀ (mm)	5000	5000	1600	3000	6000	3500	
	e ₁ (mm)	7000	1000	11000	8000	4000	-	
	e ₂ (mm)	7000	-	-	4000	3000	-	
Rozamiento por fuste	$\tau_{f,0}$ (MPa)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	$\tau_{f,1}$ (MPa)	0,0245	0,1177	0,0000	0,0491	0,0863	0,1962	
	$\tau_{f,2}$ (MPa)	0,0981	0,2943	0,1962	0,0883	0,1766	-	
	$\tau_{f,3}$ (MPa)	0,2453	-	-	0,2453	0,2453	-	
Carga para cada elemento de cimentación (kN)	1	354,73	394,67	217,86	672,24	860,83	2857,02	
	2	419,15	111,68	431,87	740,05	860,83	333,47	
	3	425,65	241,32	479,55	895,26	1191,92	-	
	4	519,90	69,92	225,14	1126,76	1191,92	-	
	5	425,65	-	215,21	1149,01	993,26	-	
	6	519,90	-	379,03	1129,14	993,26	-	
	7	519,90	-	208,98	943,73	728,39	-	
	8	425,65	-	204,88	1364,74	728,39	-	
	9	419,15	-	417,83	1708,08	529,74	-	
	10	354,73	-	221,03	2002,75	529,74	-	
	11	503,72	-	226,46	2502,03	105,95	-	
	12	583,66	-	260,23	2464,28	105,95	-	
	13	592,93	-	194,02	2408,99	-	-	
	14	695,04	-	263,68	1555,78	-	-	
	15	592,93	-	287,78	1358,39	-	-	
	16	592,93	-	310,43	2185,57	-	-	
	17	695,04	-	299,44	1689,34	-	-	
	18	592,93	-	297,85	1315,87	-	-	
	19	583,66	-	294,14	1365,14	-	-	
	20	503,72	-	304,73	1361,56	-	-	

Carga para cada elemento de cimentación (kN)

21	529,33	-	302,22	1899,52	-	-
22	652,48	-	321,15	2469,25	-	-
23	662,27	-	188,46	1522,08	-	-
24	732,43	-	256,79	-	-	-
25	662,27	-	297,58	-	-	-
26	662,27	-	345,13	-	-	-
27	732,43	-	408,56	-	-	-
28	662,27	-	390,82	-	-	-
29	652,48	-	570,13	-	-	-
30	529,33	-	422,20	-	-	-
31	543,04	-	396,64	-	-	-
32	646,75	-	530,27	-	-	-
33	646,75	-	289,37	-	-	-
34	753,45	-	622,71	-	-	-
35	646,75	-	390,95	-	-	-
36	646,75	-	518,75	-	-	-
37	753,45	-	243,95	-	-	-
38	646,75	-	221,56	-	-	-
39	646,75	-	227,26	-	-	-
40	543,04	-	235,07	-	-	-
41	544,17	-	265,53	-	-	-
42	1092,86	-	139,59	-	-	-
43	863,59	-	167,40	-	-	-
44	1104,15	-	306,06	-	-	-
45	863,59	-	300,89	-	-	-
46	1092,86	-	290,17	-	-	-
47	544,17	-	221,56	-	-	-
48	-	-	222,62	-	-	-
49	-	-	299,44	-	-	-
50	-	-	518,09	-	-	-
51	-	-	270,43	-	-	-

52	-	-	269,64	-	-	-
53	-	-	528,55	-	-	-
54	-	-	268,98	-	-	-
55	-	-	269,64	-	-	-
56	-	-	457,03	-	-	-
57	-	-	272,68	-	-	-
58	-	-	465,64	-	-	-

Tabla 18. Características detalladas de las cimentaciones de los 29 edificios estudiados, edificios 7 a 12. Fuente: Elaboración propia.

Número Proyecto		13	14	15	16	17	18
Geometría	ϕ_m (mm)	152	152	152	152	152	152
	ϕ_p (mm)	220	220	220	220	220	220
	h (mm)	700	300	700	450	900	900
Capas de suelo	e_0 (mm)	4000	3500	12000	1500	9500	2500
	e_1 (mm)	-	-	-	-	-	3500
	e_2 (mm)	-	-	-	-	-	-
Rozamiento por fuste	$\tau_{f,0}$ (MPa)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	$\tau_{f,1}$ (MPa)	0,1177	0,2158	0,1962	0,0809	0,1766	0,0589
	$\tau_{f,2}$ (MPa)	-	-	-	-	-	0,1570
	$\tau_{f,3}$ (MPa)	-	-	-	-	-	-
Carga para cada elemento de cimentación (kN)	1	224,61	5950,30	2019,57	6847,02	474,25	366,84
	2	517,45	-	2643,26	-	785,74	929,69
	3	435,23	-	1133,26	-	430,94	929,69
	4	723,44	-	854,16	-	727,20	929,69
	5	252,84	-	1512,79	-	1321,70	479,41
	6	559,80	-	839,96	-	717,43	929,69
	7	663,87	-	933,36	-	690,91	1165,4 3
	8	418,28	-	651,65	-	636,22	1165,4 3
	9	617,99	-	-	-	-	479,41
	10	5950,30	-	-	-	-	450,28
	11	2019,57	-	-	-	-	366,84
	12	2643,26	-	-	-	-	479,41
	13	1133,26	-	-	-	-	611,85
	14	854,16	-	-	-	-	611,85
	15	1512,79	-	-	-	-	929,69
	16	839,96	-	-	-	-	929,69
	17	933,36	-	-	-	-	366,84
	18	651,65	-	-	-	-	479,41
	19	-	-	-	-	-	479,41

20	-	-	-	-	-	479,41
21	-	-	-	-	-	929,69
22	-	-	-	-	-	929,69
23	-	-	-	-	-	366,84

Tabla 19. Características detalladas de las cimentaciones de los 29 edificios estudiados, edificios 13 a 18.
Fuente: Elaboración propia.

		Número Proyecto	19	20	21	22	23	24
Geometría	ϕ_m (mm)	152	152	152	152	152	152	152
	ϕ_p (mm)	220	220	220	220	220	220	220
	h (mm)	450	900	600	900	800	1300	
Capas de suelo	e ₀ (mm)	3000	8000	5000	6500	5000	2000	
	e ₁ (mm)	3000	-	-	-	-	-	
	e ₂ (mm)	-	-	-	-	-	-	
Rozamiento por fuste	$\tau_{f,0}$ (MPa)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
	$\tau_{f,1}$ (MPa)	0,0000	0,0785	0,1079	0,1275	0,0686	0,1668	
	$\tau_{f,2}$ (MPa)	0,2158	-	-	-	-	-	
	$\tau_{f,3}$ (MPa)	-	-	-	-	-	-	
Carga para cada elemento de cimentación (kN)	1	441,45	368,46	188,35	540,53	153,29	1286,27	
	2	441,45	594,78	423,79	640,10	415,51	1404,69	
	3	176,58	294,80	188,35	896,14	469,15	1525,84	
	4	441,45	205,39	-	896,14	460,43	728,21	
	5	441,45	336,91	-	1137,96	217,24	872,43	
	6	-	200,34	-	1351,33	208,25	1820,93	
	7	-	263,93	-	1351,33	361,88	2413,30	
	8	-	272,10	-	-	820,10	2367,02	
	9	-	98,19	-	-	843,94	1838,90	
	10	-	-	-	-	830,01	1162,52	
	11	-	-	-	-	391,52	1756,09	
	12	-	-	-	-	217,52	2416,02	
	13	-	-	-	-	424,79	1920,57	
	14	-	-	-	-	422,14	994,99	
	15	-	-	-	-	414,70	462,79	
	16	-	-	-	-	196,22	1361,14	
	17	-	-	-	-	-	1834,81	
	18	-	-	-	-	-	971,85	

Carga para cada elemento de cimentación (kN)

19	-	-	-	-	-	1294,44
20	-	-	-	-	-	1646,98
21	-	-	-	-	-	1427,83
22	-	-	-	-	-	2092,07
23	-	-	-	-	-	1472,75
24	-	-	-	-	-	1779,17
25	-	-	-	-	-	3932,60
26	-	-	-	-	-	2723,64
27	-	-	-	-	-	1170,58
28	-	-	-	-	-	566,23
29	-	-	-	-	-	1241,41
30	-	-	-	-	-	2033,16
31	-	-	-	-	-	2108,40
32	-	-	-	-	-	1934,18
33	-	-	-	-	-	1031,74
34	-	-	-	-	-	835,74
35	-	-	-	-	-	2262,70
36	-	-	-	-	-	2179,18
37	-	-	-	-	-	1429,19
38	-	-	-	-	-	491,37
39	-	-	-	-	-	1755,87
40	-	-	-	-	-	1675,56
41	-	-	-	-	-	967,77
42	-	-	-	-	-	629,06
43	-	-	-	-	-	1525,84
44	-	-	-	-	-	1810,31
45	-	-	-	-	-	2066,21
46	-	-	-	-	-	1318,94
47	-	-	-	-	-	1275,39
48	-	-	-	-	-	1336,64
49	-	-	-	-	-	1505,42

50	-	-	-	-	-	975,94
51	-	-	-	-	-	604,35
52	-	-	-	-	-	283,88

*Tabla 20. Características detalladas de las cimentaciones de los 29 edificios estudiados, edificios 19 a 24.
Fuente: Elaboración propia.*

Número Proyecto		25	26	27	28	29
Geometría	ϕ_m (mm)	152	152	152	152	152
	ϕ_p (mm)	220	220	220	220	220
	h (mm)	1600	1000	500	500	500
Capas de suelo	e ₀ (mm)	10500	6000	5000	4000	4500
	e ₁ (mm)	-	3000	7000	6000	-
	e ₂ (mm)	-	-	-	-	-
Rozamiento por fuste	$\tau_{f,0}$ (MPa)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	$\tau_{f,1}$ (MPa)	0,1501	0,0721	0,0785	0,0883	0,0981
	$\tau_{f,2}$ (MPa)	-	0,1501	0,1472	0,1079	-
	$\tau_{f,3}$ (MPa)	-	-	-	-	-
Carga para cada elemento de cimentación (kN)	1	153,29	735,75	715,44	324,71	234,88
	2	415,51	735,75	1099,12	649,42	343,01
	3	469,15	735,75	1012,14	324,71	199,68
	4	460,43	735,75	745,60	649,42	281,78
	5	217,24	333,54	1541,01	649,42	411,35
	6	208,25	1324,35	860,64	649,42	238,68
	7	-	1324,35	263,73	649,42	132,60
	8	-	1324,35	494,50	-	193,44
	9	-	1324,35	735,08	-	112,71
	10	-	735,75	649,51	-	67,08
	11	-	1324,35	748,41	-	97,50
	12	-	1324,35	815,04	-	56,94
	13	-	1324,35	1100,52	-	-
	14	-	1324,35	453,11	-	-
	15	-	735,75	136,07	-	-
	16	-	1324,35	611,63	-	-
	17	-	1324,35	320,55	-	-
	18	-	1324,35	777,87	-	-
	19	-	735,75	1012,14	-	-
	20	-	735,75	502,91	-	-
	21	-	735,75	173,25	-	-
	22	-	735,75	535,88	-	-
	23	-	333,54	307,22	-	-
	24	-	333,54	-	-	-

25	-	735,75	-	-	-
26	-	735,75	-	-	-
27	-	735,75	-	-	-
28	-	333,54	-	-	-

*Tabla 21. Características detalladas de las cimentaciones de los 29 edificios estudiados, edificios 25 a 29.
Fuente: Elaboración propia.*

ANEXO 2. Resultados de los ensayos para conocer la resistencia de la conexión directa tradicional.

C1 (17,5/160/-/AN/A)

Las principales características de esta probeta son las que aparecen en la Tabla 22.

f_{ck} (N/mm ²)	Diámetro Perforación (mm)	Altura Micropilote (mm)	Hat	Código	Carga pico de rotura (kN)
17,5	160	100	NO	C1	331

Tabla 22. Principales características de la probeta C1. Fuente: Elaboración propia.



Figura 59. Fotografías de la probeta C1 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.

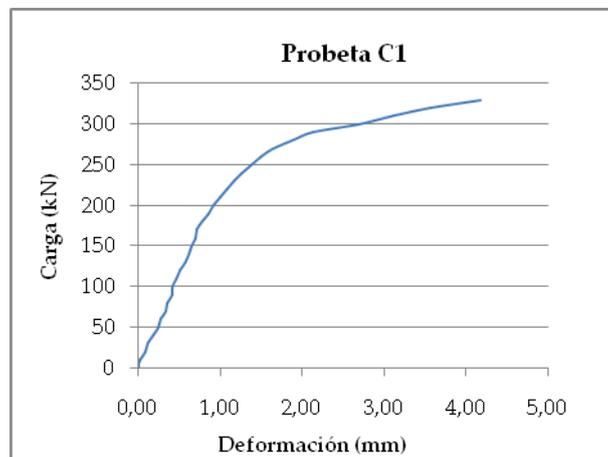


Figura 60. Gráfica de tensión deformación de probeta C1. Fuente: Elaboración propia.

C2 (17,5/160/-/AN/B)

Las principales características de esta probeta son las que aparecen en la Tabla 23.

f_{ck} (N/mm ²)	Diámetro Perforación (mm)	Altura Micropilote (mm)	Hat	Código	Carga pico de rotura (kN)
17,5	160	100	NO	C2	346

Tabla 23. Principales características de la probeta C2. Fuente: Elaboración propia.



Figura 61. Fotografías de la probeta C2 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.

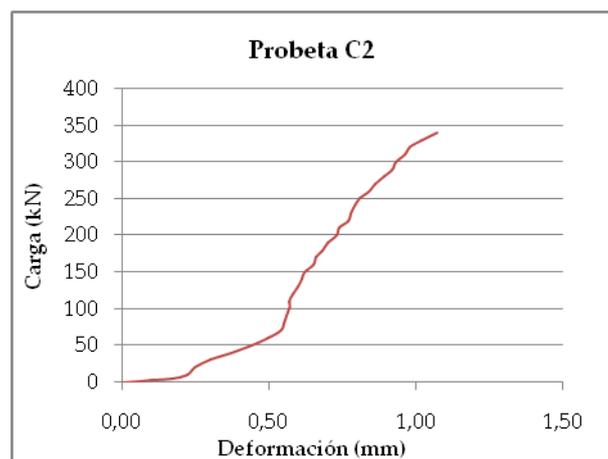


Figura 62. Gráfica de tensión deformación de muestra C2. Fuente: Elaboración propia.

C3 (17,5/200/-/AN/A)

Las principales características de esta probeta son las que aparecen en la Tabla 24.

f_{ck} (N/mm ²)	Diámetro Perforación (mm)	Altura Micropilote (mm)	Hat	Código	Carga pico de rotura (kN)
17,5	200	100	NO	C3	347

Tabla 24. Principales características de la probeta C3. Fuente: Elaboración propia.



Figura 63. Fotografías de la probeta C3 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.

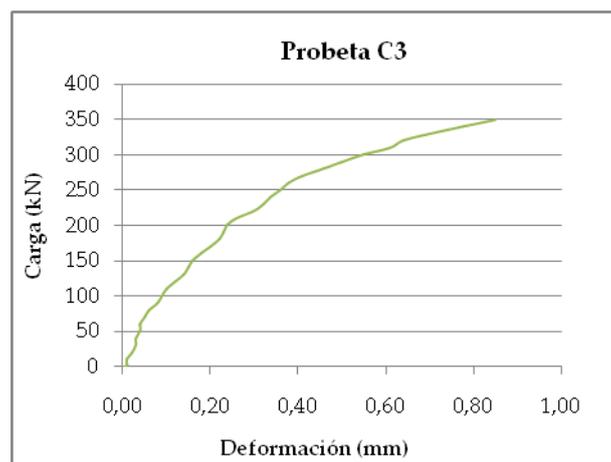


Figura 64. Gráfica de tensión deformación de probeta C3. Fuente: Elaboración propia.

C4 (17,5/200/-/AN/B)

Las principales características de esta probeta son las que aparecen en la Tabla 25.

f_{ck} (N/mm ²)	Diámetro Perforación (mm)	Altura Micropilote (mm)	Hat	Código	Carga pico de rotura (kN)
17,5	200	100	NO	C4	354

Tabla 25. Principales características de la probeta C4. Fuente: Elaboración propia.



Figura 65. Fotografías de la probeta C4 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.

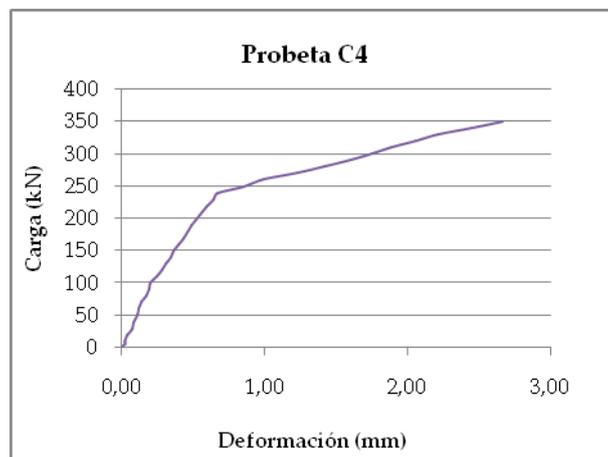


Figura 66. Gráfica de tensión deformación de probeta C4. Fuente: Elaboración propia.

C5 (30/160/-/AN/A)

Las principales características de esta probeta son las que aparecen en la Tabla 26.

f_{ck} (N/mm ²)	Diámetro Perforación (mm)	Altura Micropilote (mm)	Hat	Código	Carga pico de rotura (kN)
30	160	100	NO	C5	470

Tabla 26. Principales características de la probeta C5. Fuente: Elaboración propia.



Figura 67. Fotografías de la probeta C5 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.

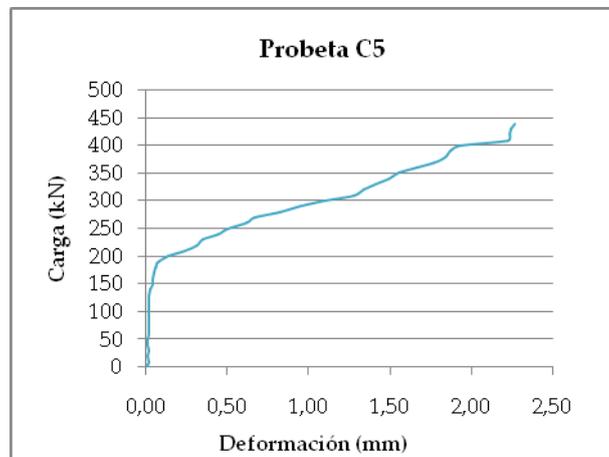


Figura 68. Gráfica de tensión deformación de probeta C5. Fuente: Elaboración propia.

C6 (30/160/-/AN/B)

Las principales características de esta probeta son las que aparecen en la Tabla 27.

f_{ck} (N/mm ²)	Diámetro Perforación (mm)	Altura Micropilote (mm)	Hat	Código	Carga pico de rotura (kN)
30	160	100	NO	C6	523

Tabla 27. Principales características de la probeta C6. Fuente: Elaboración propia.



Figura 69. Fotografías de la probeta C6 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.

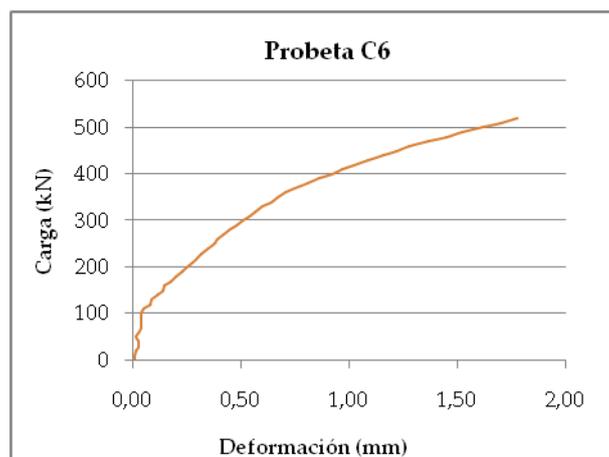


Figura 70. Gráfica de tensión deformación de probeta C6. Fuente: Elaboración propia.

C7 (30/200/-/AN/A)

Las principales características de esta probeta son las que aparecen en la Tabla 28.

f_{ck} (N/mm ²)	Diámetro Perforación (mm)	Altura Micropilote (mm)	Hat	Código	Carga pico de rotura (kN)
30	200	100	NO	C7	416

Tabla 28. Principales características de la probeta C7. Fuente: Elaboración propia.

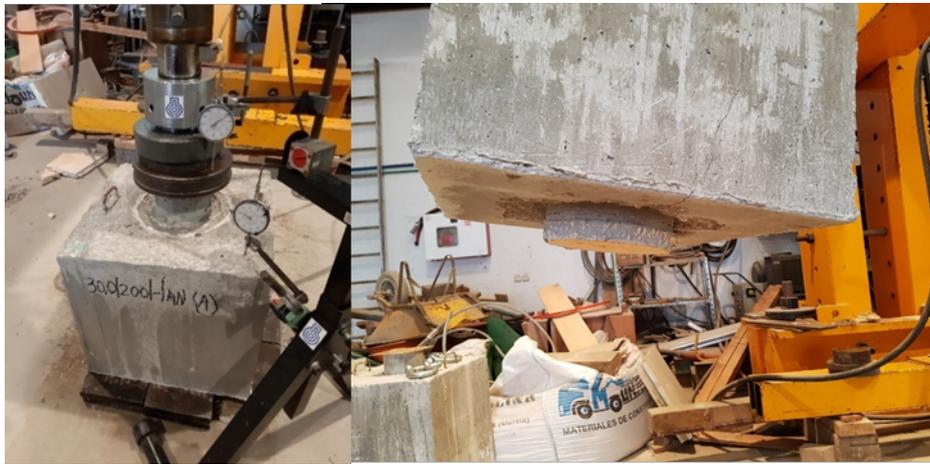


Figura 71. Fotografías de la probeta C7 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.

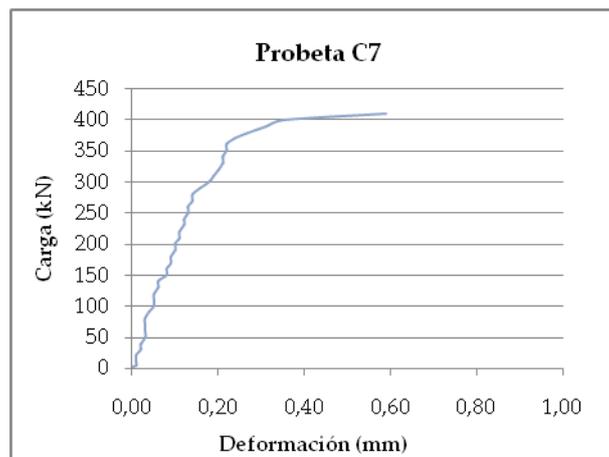


Figura 72. Gráfica de tensión deformación de probeta C7. Fuente: Elaboración propia.

C8 (30/200/-/AN/B)

Las principales características de esta probeta son las que aparecen en la Tabla 29.

f_{ck} (N/mm ²)	Diámetro Perforación (mm)	Altura Micropilote (mm)	Hat	Código	Carga pico de rotura (kN)
30	200	100	NO	C8	381

Tabla 29. Principales características de la probeta C8. Fuente: Elaboración propia.



Figura 73. Fotografías de la probeta C8 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.

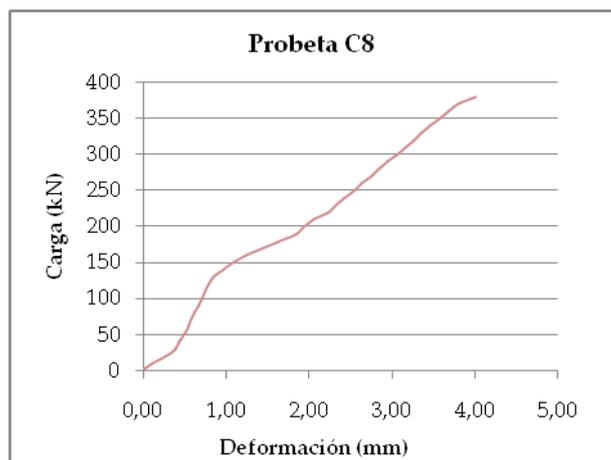


Figura 74. Gráfica de tensión deformación de probeta C8. Fuente: Elaboración propia.

PROBETA CILÍNDRICA 1

Las principales características de esta probeta son las que aparecen en la Tabla 30.

f_{ck} (N/mm ²)	Diámetro Perforación (mm)	Altura probeta (mm)	Altura Micropilote (mm)	Hat	Código	Carga pico de rotura (kN)
25	75,5	148	90,9	NO	Cilíndrica 1	37,1

Tabla 30. Principales características de la probeta Cilíndrica 1. Fuente: Elaboración propia.



Figura 75. Fotografía de la probeta Cilíndrica 1 antes de la rotura. Fuente: Elaboración propia.

PROBETA CILÍNDRICA 2

Las principales características de esta probeta son las que aparecen en la Tabla 31.

f_{ck} (N/mm ²)	Diámetro Perforación (mm)	Altura probeta (mm)	Altura Micropilote (mm)	Hat	Código	Carga pico de rotura (kN)
25	75,5	148	90,3	NO	Cilíndrica 2	28,3

Tabla 31. Principales características de la probeta Cilíndrica 2. Fuente: Elaboración propia.



Figura 76. Fotografías de la probeta Cilíndrica 2 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.

PROBETA CILÍNDRICA 7

Las principales características de esta probeta son las que aparecen en la Tabla 32.

f_{ck} (N/mm ²)	Diámetro Perforación (mm)	Altura probeta (mm)	Altura Micropilote (mm)	Hat	Código	Carga pico de rotura (kN)
25	75,5	119	98,5	NO	Cilíndrica 7	39,0

Tabla 32. Principales características de la probeta Cilíndrica 7. Fuente: Elaboración propia.

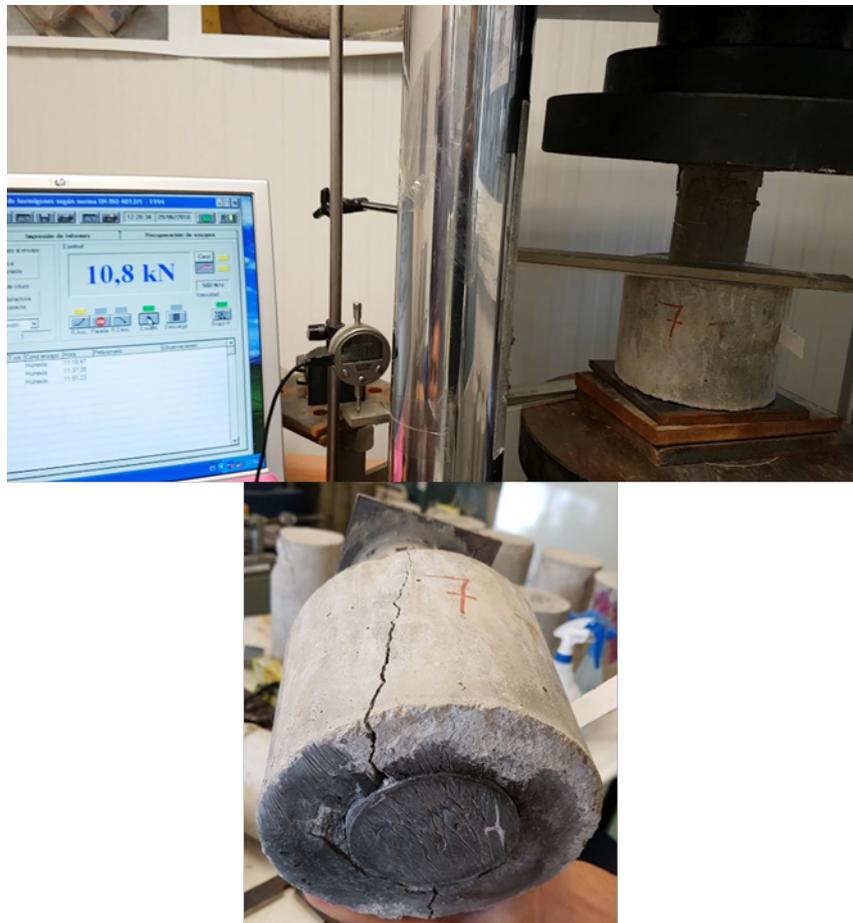


Figura 77. Fotografía de la probeta Cilíndrica 7 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.

PROBETA CILÍNDRICA 8

Las principales características de esta probeta son las que aparecen en la Tabla 33.

f_{ck} (N/mm ²)	Diámetro Perforación (mm)	Altura probeta (mm)	Altura Micropilote (mm)	Hat	Código	Carga pico de rotura (kN)
25	75,5	175	98,9	NO	Cilíndrica 8	61,80

Tabla 33. Principales características de la probeta Cilíndrica 8. Fuente: Elaboración propia.



Figura 78. Fotografías de la probeta Cilíndrica 8 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 3. Resultados de los ensayos para conocer la resistencia de la conexión del nuevo sistema con sombrero.

S1 (17,5/160/235/AN/A)

Las principales características de esta probeta son las que aparecen en la Tabla 34.

f_{ck} (N/mm ²)	Diámetro Perforación (mm)	Altura Probeta (mm)	Altura Micropilote (mm)	Altura Hat (mm)	Hat	Diámetro Hat (mm)	Armado Hat	Código	Carga pico de rotura (kN)
17,5	160	500	100	300	SI	235	NO	S1	361

Tabla 34. Principales características de la probeta S1. Fuente: Elaboración propia.



Figura 79. Fotografías de la probeta S1 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.

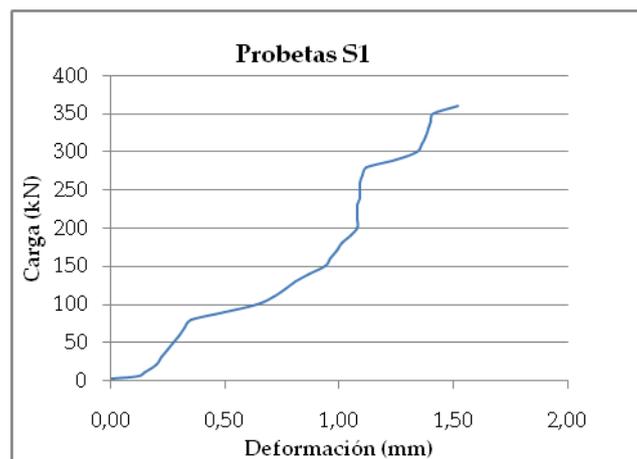


Figura 80. Gráfica de tensión deformación de probeta S1. Fuente: Elaboración propia.

S2 (17,5/160/235/AN/B)

Las principales características de esta probeta son las que aparecen en la Tabla 35.

f_{ck} (N/mm ²)	Diámetro Perforación (mm)	Altura Probeta (mm)	Altura Micropilote (mm)	Altura Hat (mm)	Hat	Diámetro Hat (mm)	Armado Hat	Código	Carga pico de rotura (kN)
17,5	160	500	100	300	SI	235	NO	S2	390

Tabla 35. Principales características de la probeta S2. Fuente: Elaboración propia.



Figura 81. Fotografías de la probeta S2 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.

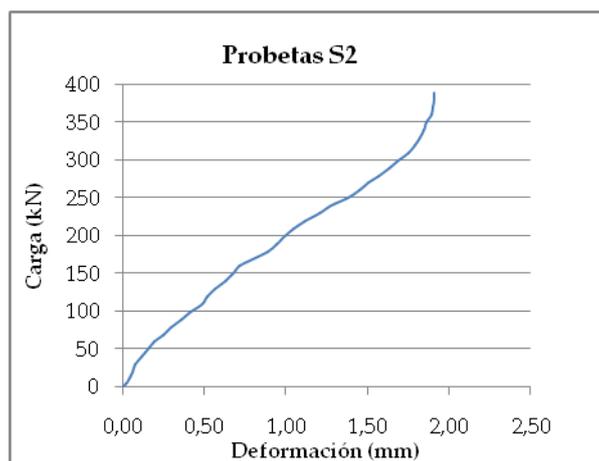


Figura 82. Gráfica de tensión deformación de probeta S2. Fuente: Elaboración propia.

S3 (17,5/160/321/AN/A)

Las principales características de esta probeta son las que aparecen en la Tabla 36.

f_{ck} (N/mm ²)	Diámetro Perforación (mm)	Altura Probeta (mm)	Altura Micropilote (mm)	Altura Hat (mm)	Hat	Diámetro Hat (mm)	Armado Hat	Código	Carga pico de rotura (kN)
17,5	160	500	100	300	SI	321	NO	S3	433

Tabla 36. Principales características de la probeta S3. Fuente: Elaboración propia.

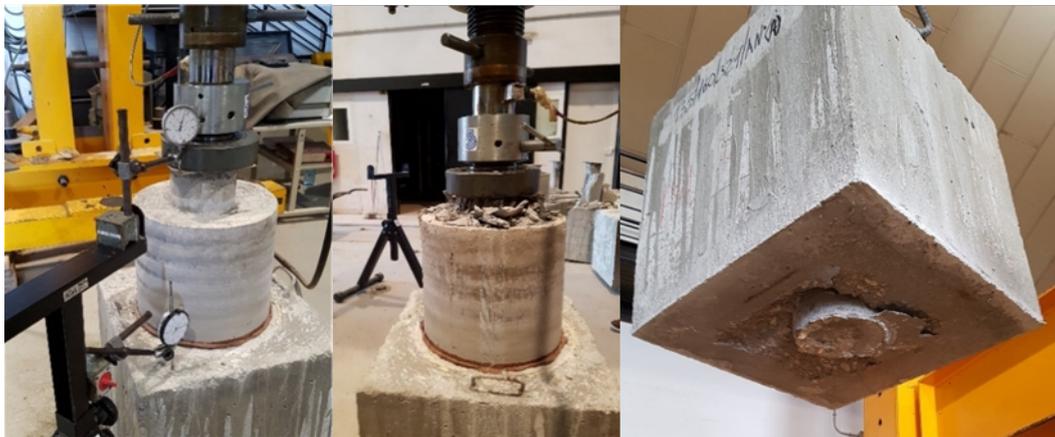


Figura 83. Fotografías de la probeta S3 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.

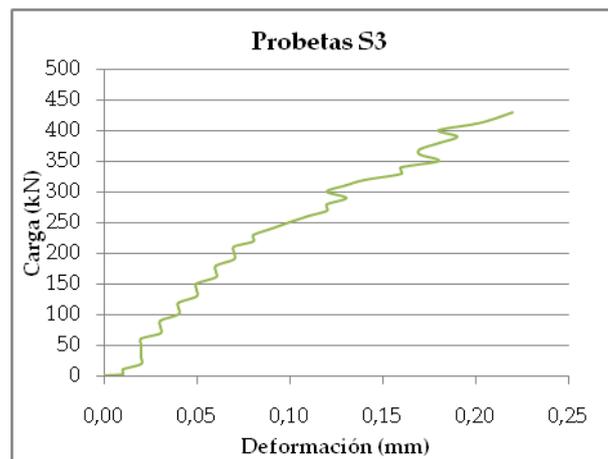


Figura 84. Gráfica de tensión deformación de probeta S3. Fuente: Elaboración propia.

S4 (17,5/160/321/AN/B)

Las principales características de esta probeta son las que aparecen en la Tabla 37.

f_{ck} (N/mm ²)	Diámetro Perforación (mm)	Altura Probeta (mm)	Altura Micropilote (mm)	Altura Hat (mm)	Hat	Diámetro Hat (mm)	Armado Hat	Código	Carga pico de rotura (kN)
17,5	160	500	100	300	SI	321	NO	S4	543

Tabla 37. Principales características de la probeta S4. Fuente: Elaboración propia.



Figura 85. Fotografías de la probeta S4 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.

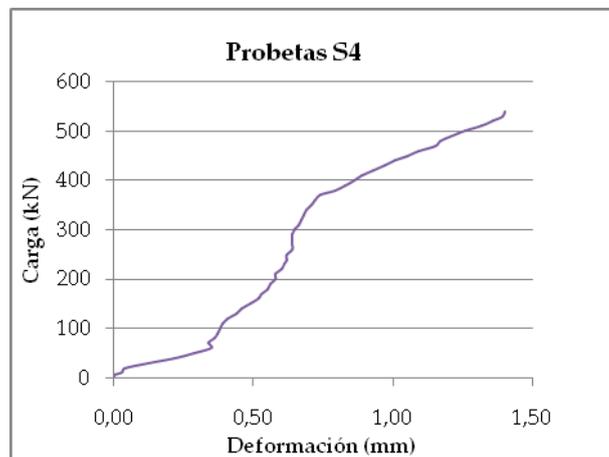


Figura 86. Gráfica de tensión deformación de probeta S4. Fuente: Elaboración propia.

S5 (17,5/200/285/AN/A)

Las principales características de esta probeta son las que aparecen en la Tabla 38.

f_{ck} (N/mm ²)	Diámetro Perforación (mm)	Altura Probeta (mm)	Altura Micropilote (mm)	Altura Hat (mm)	Hat	Diámetro Hat (mm)	Armado Hat	Código	Carga pico de rotura (kN)
17,5	200	500	100	300	SI	285	NO	S5	608

Tabla 38. Principales características de la probeta S5. Fuente: Elaboración propia.



Figura 87. Fotografías de la probeta S5 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.

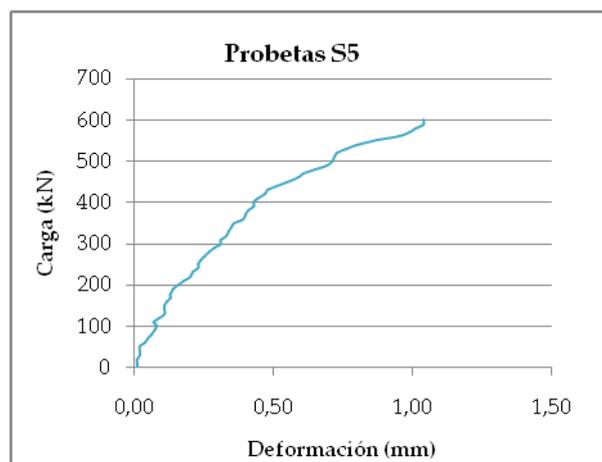


Figura 88. Gráfica de tensión deformación de probeta S5. Fuente: Elaboración propia.

S6 (17,5/200/285/AN/B)

Las principales características de esta probeta son las que aparecen en la Tabla 39.

f_{ck} (N/mm ²)	Diámetro Perforación (mm)	Altura Probeta (mm)	Altura Micropilote (mm)	Altura Hat (mm)	Hat	Diámetro Hat (mm)	Armado Hat	Código	Carga pico de rotura (kN)
17,5	200	500	100	300	SI	285	NO	S6	650

Tabla 39. Principales características de la probeta S6. Fuente: Elaboración propia.

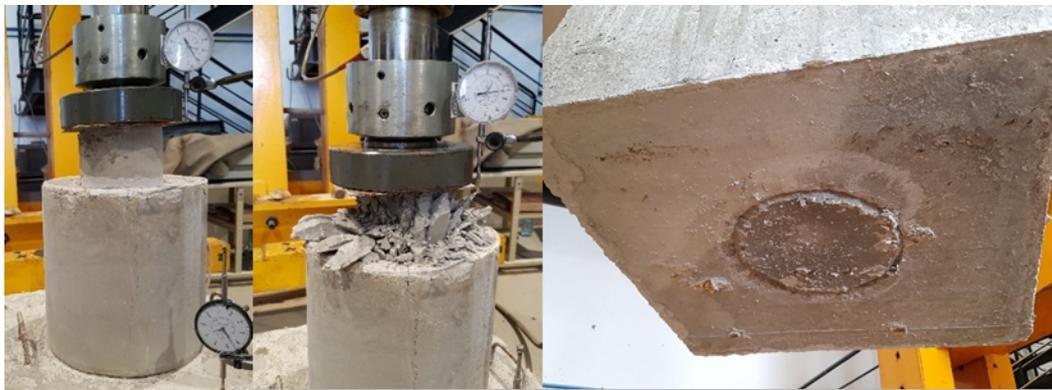


Figura 89. Fotografías de la probeta S6 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.

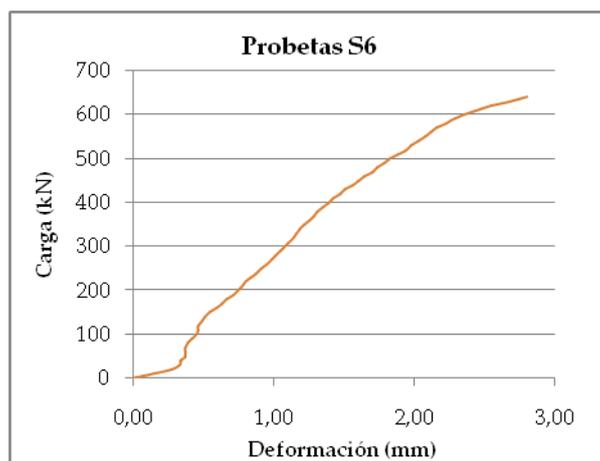


Figura 90. Gráfica de tensión deformación de probeta S6. Fuente: Elaboración propia.

S7 (17,5/200/362/AN/A)

Las principales características de esta probeta son las que aparecen en la Tabla 40.

f_{ck} (N/mm ²)	Diámetro Perforación (mm)	Altura Probeta (mm)	Altura Micropilote (mm)	Altura Hat (mm)	Hat	Diámetro Hat (mm)	Armado Hat	Código	Carga pico de rotura (kN)
17,5	200	500	100	300	SI	362	NO	S7	677

Tabla 40. Principales características de la probeta S7. Fuente: Elaboración propia.



Figura 91. Fotografías de la probeta S7 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.

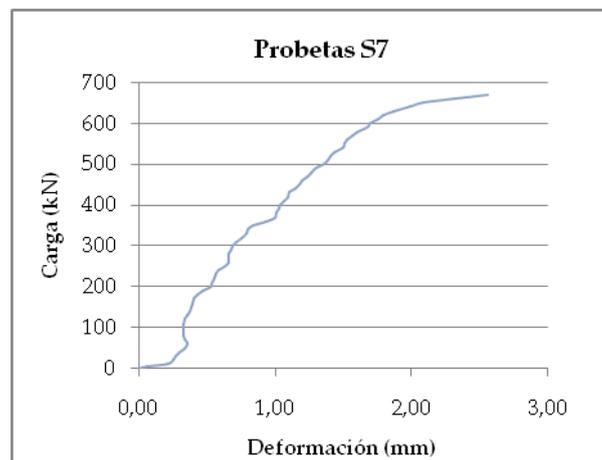


Figura 92. Gráfica de tensión deformación de probeta S7. Fuente: Elaboración propia.

S8 (30/200/362/AN/B)

Las principales características de esta probeta son las que aparecen en la Tabla 41.

f_{ck} (N/mm ²)	Diámetro Perforación (mm)	Altura Probeta (mm)	Altura Micropilote (mm)	Altura Hat (mm)	Hat	Diámetro Hat (mm)	Armado Hat	Código	Carga pico de rotura (kN)
30	200	500	100	300	SI	362	NO	S8	671

Tabla 41. Principales características de la probeta S8. Fuente: Elaboración propia.



Figura 93. Fotografías de la probeta S8 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.

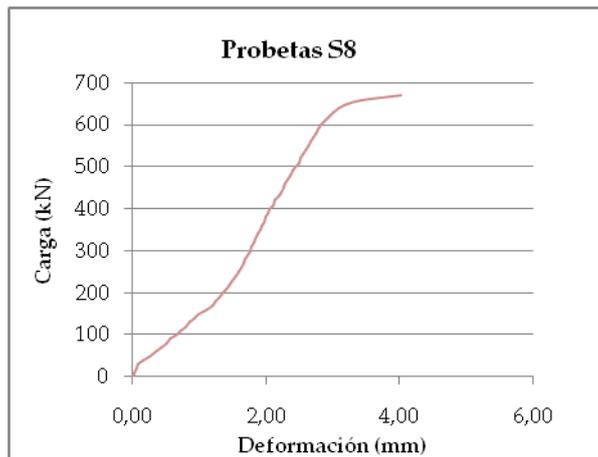


Figura 94. Gráfica de tensión deformación de probeta S8. Fuente: Elaboración propia.

S9 (30/160/235/AN/A)

Las principales características de esta probeta son las que aparecen en la Tabla 42.

f_{ck} (N/mm ²)	Diámetro Perforación (mm)	Altura Probeta (mm)	Altura Micropilote (mm)	Altura Hat (mm)	Hat	Diámetro Hat (mm)	Armado Hat	Código	Carga pico de rotura (kN)
30	160	500	100	300	SI	235	NO	S9	446

Tabla 42. Principales características de la probeta S9. Fuente: Elaboración propia.



Figura 95. Fotografías de la probeta S9 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.

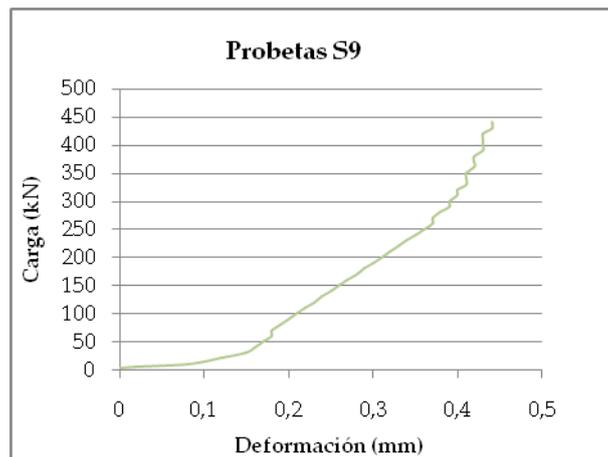


Figura 96. Gráfica de tensión deformación de probeta S9. Fuente: Elaboración propia.

S10 (30/160/235/AN/B)

Las principales características de esta probeta son las que aparecen en la Tabla 43.

f_{ck} (N/mm ²)	Diámetro Perforación (mm)	Altura Probeta (mm)	Altura Micropilote (mm)	Altura Hat (mm)	Hat	Diámetro Hat (mm)	Armado Hat	Código	Carga pico de rotura (kN)
30	160	500	100	300	SI	235	NO	S10	511

Tabla 43. Principales características de la probeta S10. Fuente: Elaboración propia.



Figura 97. Fotografías de la probeta S10 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.

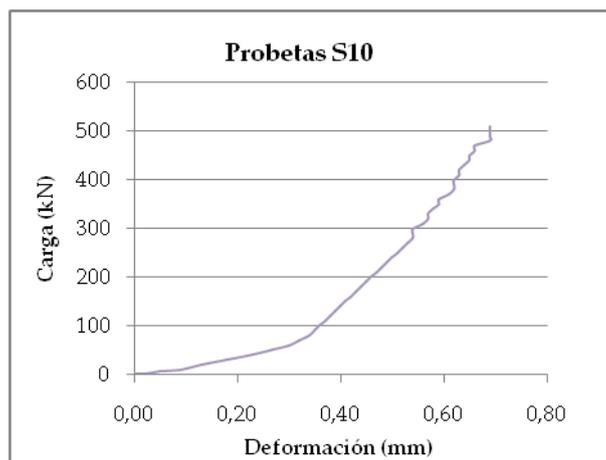


Figura 98. Gráfica de tensión deformación de probeta S10. Fuente: Elaboración propia.

S11 (30/160/321/AN/A)

Las principales características de esta probeta son las que aparecen en la Tabla 44.

f_{ck} (N/mm ²)	Diámetro Perforación (mm)	Altura Probeta (mm)	Altura Micropilote (mm)	Altura Hat (mm)	Hat	Diámetro Hat (mm)	Armado Hat	Código	Carga pico de rotura (kN)
30	160	500	100	300	SI	321	NO	S11	584

Tabla 44. Fotografías características de la probeta S11. Fuente: Elaboración propia.



Figura 99. Fotografías de la probeta S11 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.

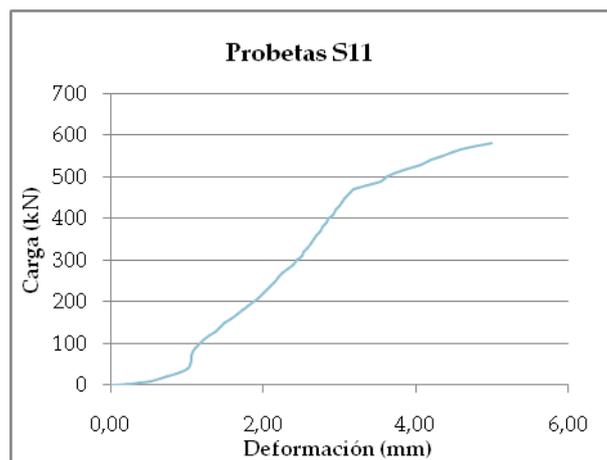


Figura 100. Gráfica de tensión deformación de probeta S11. Fuente: Elaboración propia.

S12 (30/160/321/AN/B)

Las principales características de esta probeta son las que aparecen en la Tabla 45.

f_{ck} (N/mm ²)	Diámetro Perforación (mm)	Altura Probeta (mm)	Altura Micropilote (mm)	Altura Hat (mm)	Hat	Diámetro Hat (mm)	Armado Hat	Código	Carga pico de rotura (kN)
30	160	500	100	300	SI	321	NO	S12	595

Tabla 45. Principales características de la probeta S12. Fuente: Elaboración propia.

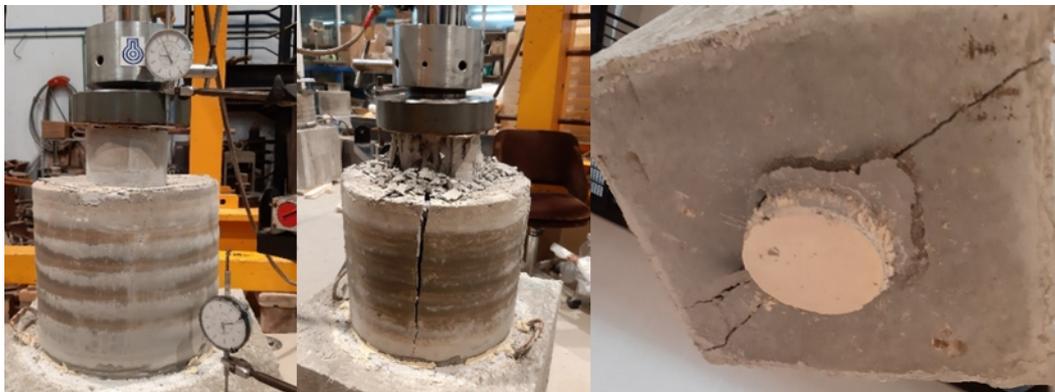


Figura 101. Fotografías de la probeta S12 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.

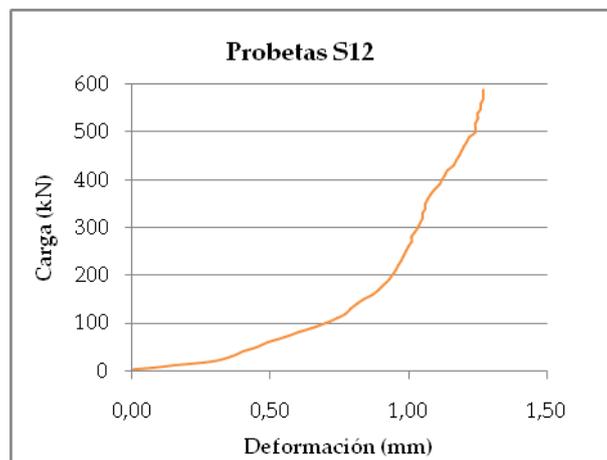


Figura 102. Gráfica de tensión deformación de probeta S12. Fuente: Elaboración propia.

S13 (30/200/285/AN/A)

Las principales características de esta probeta son las que aparecen en la Tabla 46.

f_{ck} (N/mm ²)	Diámetro Perforación (mm)	Altura Probeta (mm)	Altura Micropilote (mm)	Altura Hat (mm)	Hat	Diámetro Hat (mm)	Armado Hat	Código	Carga pico de rotura (kN)
30	200	500	100	300	SI	285	NO	S13	615

Tabla 46. Principales características de la probeta S13. Fuente: Elaboración propia.



Figura 103. Fotografías de la probeta S13 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.

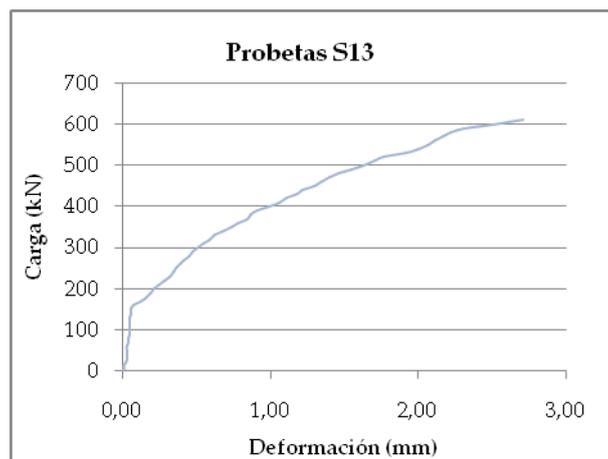


Figura 104. Gráfica de tensión deformación de probeta S13. Fuente: Elaboración propia.

S14 (30/200/285/AN/B)

Las principales características de esta probeta son las que aparecen en la Tabla 47.

f_{ck} (N/mm ²)	Diámetro Perforación (mm)	Altura Probeta (mm)	Altura Micropilote (mm)	Altura Hat (mm)	Hat	Diámetro Hat (mm)	Armado Hat	Código	Carga pico de rotura (kN)
30	200	500	100	300	SI	285	NO	S14	485

Tabla 47. Principales características de la probeta S14. Fuente: Elaboración propia.



Figura 105. Fotografías de la probeta S14 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.

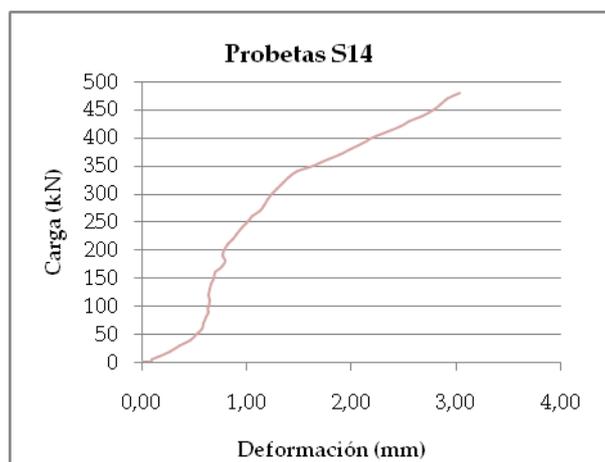


Figura 106. Gráfica de tensión deformación de probeta S14. Fuente: Elaboración propia.

S15 (30/200/362/AN/A)

Las principales características de esta probeta son las que aparecen en la Tabla 48.

f_{ck} (N/mm ²)	Diámetro Perforación (mm)	Altura Probeta (mm)	Altura Micropilote (mm)	Altura Hat (mm)	Hat	Diámetro Hat (mm)	Armado Hat	Código	Carga pico de rotura (kN)
30	200	500	100	300	SI	362	NO	S15	552

Tabla 48. Principales características de la probeta S15. Fuente: Elaboración propia.



Figura 107. Fotografías de la probeta S15 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.

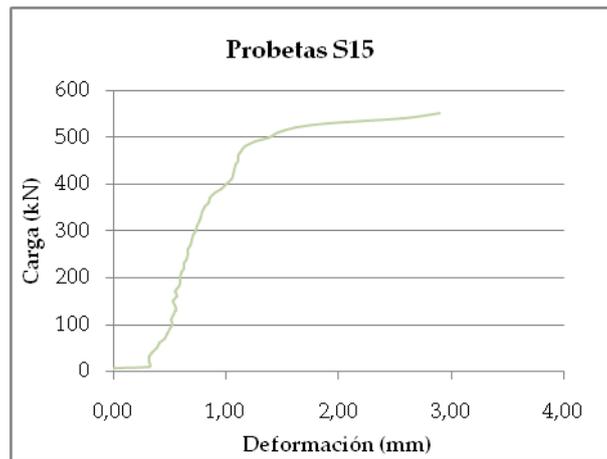


Figura 108. Gráfica de tensión deformación de probeta S15. Fuente: Elaboración propia.

S16 (30/200/362/AN/B)

Las principales características de esta probeta son las que aparecen en la Tabla 49.

f_{ck} (N/mm ²)	Diámetro Perforación (mm)	Altura Probeta (mm)	Altura Micropilote (mm)	Altura Hat (mm)	Hat	Diámetro Hat (mm)	Armado Hat	Código	Carga pico de rotura (kN)
30	200	500	100	300	SI	362	NO	S16	590

Tabla 49. Principales características de la probeta 16. Fuente: Elaboración propia.



Figura 109. Fotografías de la probeta S16 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.

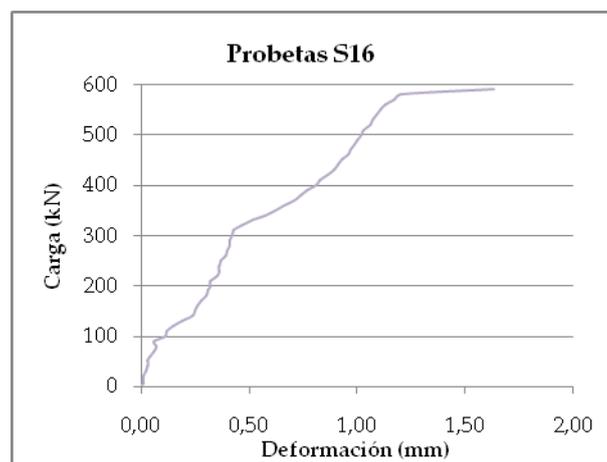


Figura 110. Gráfica de tensión deformación de probeta S16. Fuente: Elaboración propia.

SA1 (17,5/160/235/AS/A)

Las principales características de esta probeta son las que aparecen en la Tabla 50.

f_{ck} (N/mm ²)	Diámetro Perforación (mm)	Altura Probeta (mm)	Altura Micropilote (mm)	Altura Hat (mm)	Hat	Diámetro Hat (mm)	Armado Hat	Código	Carga pico de rotura (kN)
17,5	160	500	100	300	SI	235	SI	SA1	303

Tabla 50. Principales características de la probeta SA1. Fuente: Elaboración propia.



Figura 111. Fotografías de la probeta SA1 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.

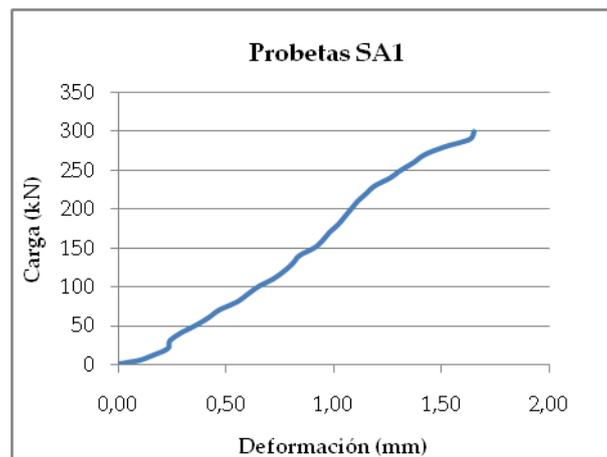


Figura 112. Gráfica de tensión deformación de probeta SA1. Fuente: Elaboración propia.

SA2 (17,5/160/235/AS/B)

Las principales características de esta probeta son las que aparecen en la Tabla 51.

f_{ck} (N/mm ²)	Diámetro Perforación (mm)	Altura Probeta (mm)	Altura Micropilote (mm)	Altura Hat (mm)	Hat	Diámetro Hat (mm)	Armado Hat	Código	Carga pico de rotura (kN)
17,5	160	500	100	300	SI	235	SI	SA2	600

Tabla 51. Principales características de la probeta SA2. Fuente: Elaboración propia.



Figura 113. Fotografías de la probeta SA2 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.

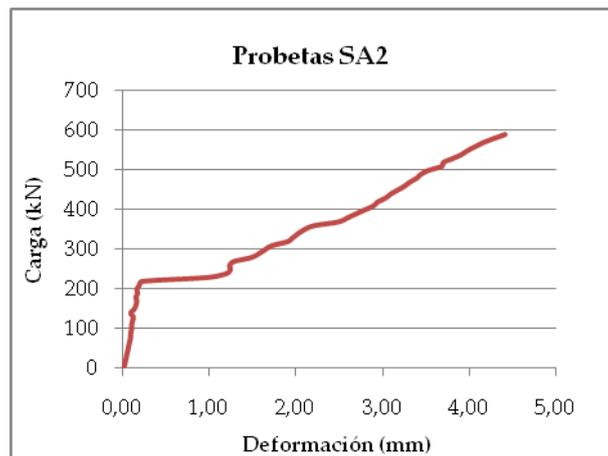


Figura 114. Gráfica de tensión deformación de probeta SA2. Fuente: Elaboración propia.

SA3 (17,5/160/321/AS/A)

Las principales características de esta probeta son las que aparecen en la Tabla 52.

f_{ck} (N/mm ²)	Diámetro Perforación (mm)	Altura Probeta (mm)	Altura Micropilote (mm)	Altura Hat (mm)	Hat	Diámetro Hat (mm)	Armado Hat	Código	Carga pico de rotura (kN)
17,5	160	500	100	300	SI	321	SI	SA3	400

Tabla 52. Principales características de la probeta SA3. Fuente: Elaboración propia.



Figura 115. Fotografías de la probeta SA3 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.

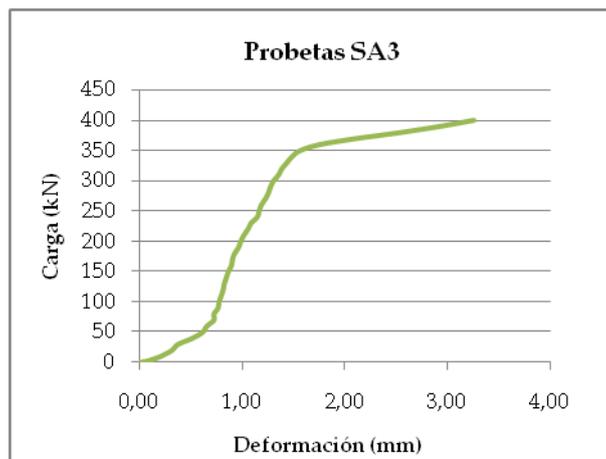


Figura 116. Gráfica de tensión deformación de probeta SA3. Fuente: Elaboración propia.

SA4 (17,5/160/321/AS/B)

Las principales características de esta probeta son las que aparecen en la Tabla 53.

f_{ck} (N/mm ²)	Diámetro Perforación (mm)	Altura Probeta (mm)	Altura Micropilote (mm)	Altura Hat (mm)	Hat	Diámetro Hat (mm)	Armado Hat	Código	Carga pico de rotura (kN)
17,5	160	500	100	300	SI	321	SI	SA4	600

Tabla 53. Principales características de la probeta SA4. Fuente: Elaboración propia.



Figura 117. Fotografías de la probeta SA4 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.

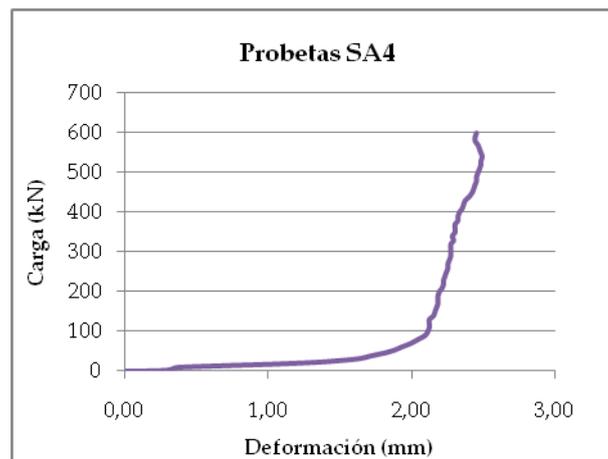


Figura 118. Gráfica de tensión deformación de probeta SA4. Fuente: Elaboración propia.

SA5 17,5/200/285/AS/A

Las principales características de esta probeta son las que aparecen en la Tabla 54.

f_{ck} (N/mm ²)	Diámetro Perforación (mm)	Altura Probeta (mm)	Altura Micropilote (mm)	Altura Hat (mm)	Hat	Diámetro Hat (mm)	Armado Hat	Código	Carga pico de rotura (kN)
17,5	200	500	100	300	SI	285	SI	SA5	590

Tabla 54. Principales características de la probeta SA5. Fuente: Elaboración propia.



Figura 119. Fotografías de la probeta SA5 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.

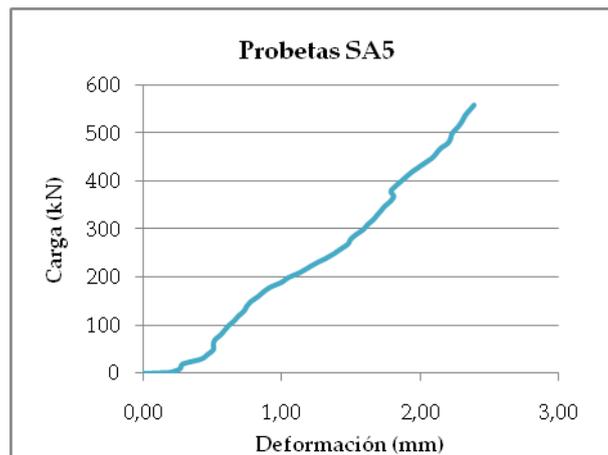


Figura 120. Gráfica de tensión deformación de probeta SA5. Fuente: Elaboración propia.

SA6 (17,5200/285/AS/B)

Las principales características de esta probeta son las que aparecen en la Tabla 55.

f_{ck} (N/mm ²)	Diámetro Perforación (mm)	Altura Probeta (mm)	Altura Micropilote (mm)	Altura Hat (mm)	Hat	Diámetro Hat (mm)	Armado Hat	Código	Carga pico de rotura (kN)
17.5	200	500	100	300	SI	285	SI	SA6	560

Tabla 55. Principales características de la probeta SA6. Fuente: Elaboración propia.

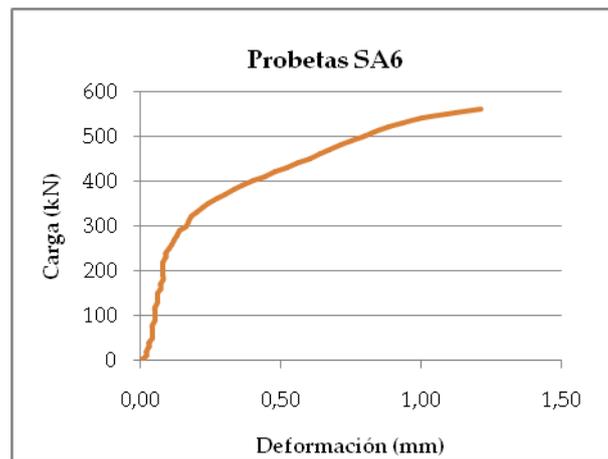


Figura 121. Gráfica de tensión deformación de probeta SA6. Fuente: Elaboración propia.

SA7 (17,5/200/362/AS/A)

Las principales características de esta probeta son las que aparecen en la Tabla 56.

f_{ck} (N/mm ²)	Diámetro Perforación (mm)	Altura Probeta (mm)	Altura Micropilote (mm)	Altura Hat (mm)	Hat	Diámetro Hat (mm)	Armado Hat	Código	Carga pico de rotura (kN)
17,5	200	500	100	300	SI	362	SI	SA7	640

Tabla 56. Principales características de la probeta SA7. Fuente: Elaboración propia.



Figura 122. Fotografías de la probeta SA7 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.

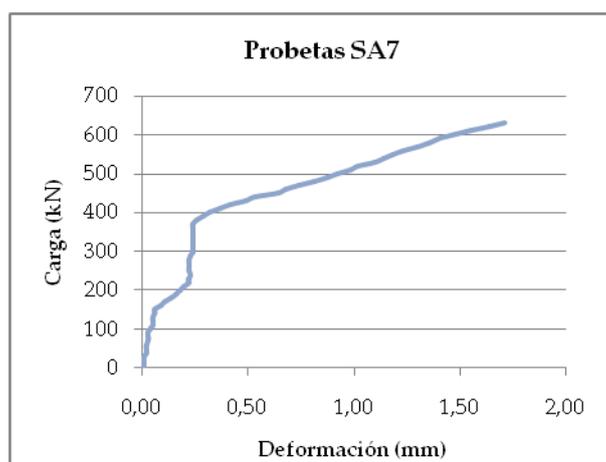


Figura 123. Gráfica de tensión deformación de probeta SA7. Fuente: Elaboración propia.

SA8 (17,5/200/362/AS/B)

Las principales características de esta probeta son las que aparecen en la Tabla 57.

f_{ck} (N/mm ²)	Diámetro Perforación (mm)	Altura Probeta (mm)	Altura Micropilote (mm)	Altura Hat (mm)	Hat	Diámetro Hat (mm)	Armado Hat	Código	Carga pico de rotura (kN)
17,5	200	500	100	300	SI	362	SI	SA8	520

Tabla 57. Principales características de la probeta SA8. Fuente: Elaboración propia.



Figura 124. Fotografías de la probeta SA8 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.

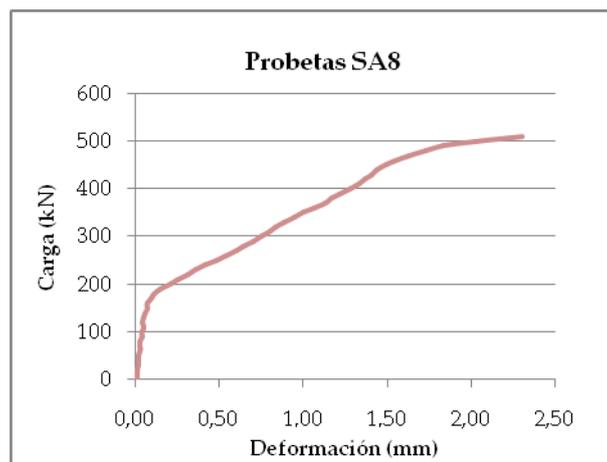


Figura 125. Gráfica de tensión deformación de probeta SA8. Fuente: Elaboración propia.

SA9 (30/160/235/AS/A)

Las principales características de esta probeta son las que aparecen en la Tabla 58.

f_{ck} (N/mm ²)	Diámetro Perforación (mm)	Altura Probeta (mm)	Altura Micropilote (mm)	Altura Hat (mm)	Hat	Diámetro Hat (mm)	Armado Hat	Código	Carga pico de rotura (kN)
30	160	500	100	300	SI	235	SI	AS9	425

Tabla 58. Principales características de la probeta SA9. Fuente: Elaboración propia.

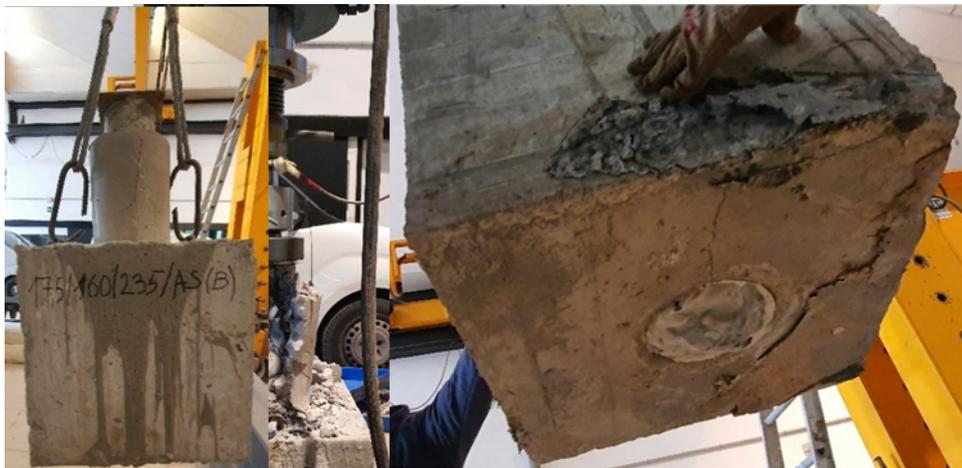


Figura 126. Fotografías de la probeta SA9 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.

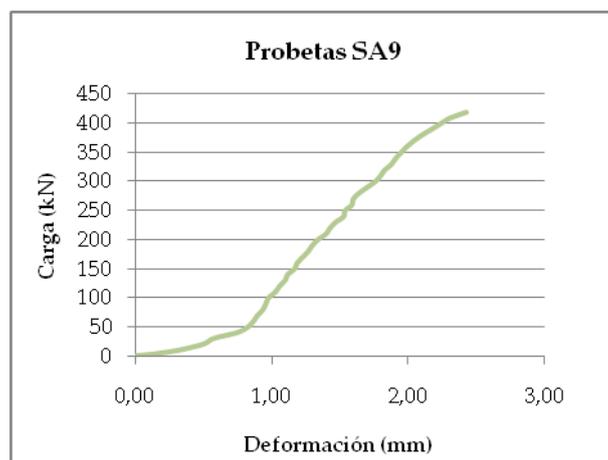


Figura 127. Gráfica de tensión deformación de probeta SA9. Fuente: Elaboración propia.

SA10 (30/160/235/AS/B)

Las principales características de esta probeta son las que aparecen en la Tabla 59.

f_{ck} (N/mm ²)	Diámetro Perforación (mm)	Altura Probeta (mm)	Altura Micropilote (mm)	Altura Hat (mm)	Hat	Diámetro Hat (mm)	Armado Hat	Código	Carga pico de rotura (kN)
30	160	500	100	300	SI	235	SI	AS10	450

Tabla 59. Principales características de la probeta SA10. Fuente: Elaboración propia.

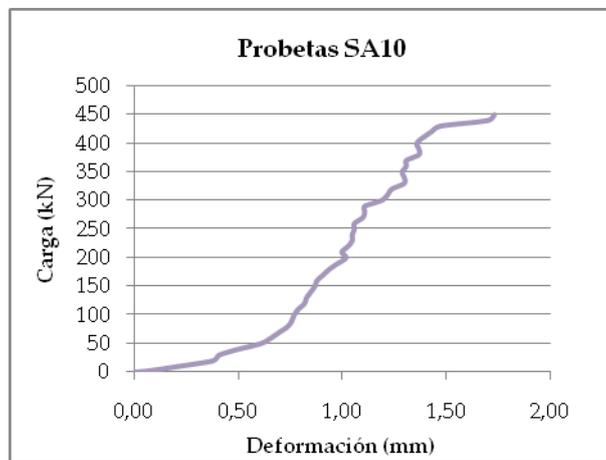


Figura 128. Gráfica de tensión deformación de probeta SA10. Fuente: Elaboración propia.

AS11 (30/160/321/AS/A)

Las principales características de esta probeta son las que aparecen en la Tabla 60.

f_{ck} (N/mm ²)	Diámetro Perforación (mm)	Altura Probeta (mm)	Altura Micropilote (mm)	Altura Hat (mm)	Hat	Diámetro Hat (mm)	Armado Hat	Código	Carga pico de rotura (kN)
30	160	500	100	300	SI	321	SI	AS11	620

Tabla 60. Principales características de la probeta AS11. Fuente: Elaboración propia.



Figura 129. Fotografías de la probeta SA11 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.

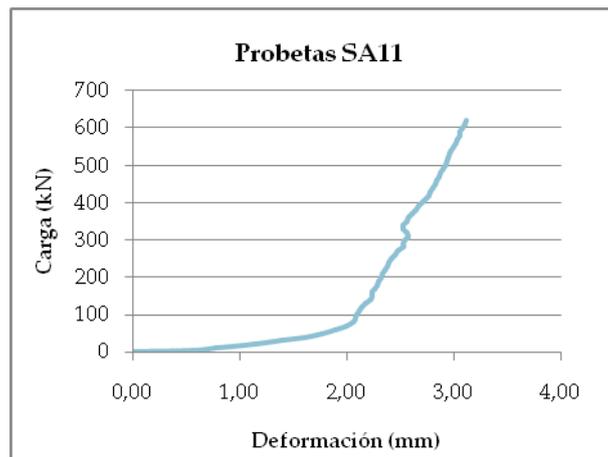


Figura 130. Gráfica de tensión deformación de probeta AS11. Fuente: Elaboración propia.

AS12 (30/160/321/AS/B)

Las principales características de esta probeta son las que aparecen en la Tabla 61.

f_{ck} (N/mm ²)	Diámetro Perforación (mm)	Altura Probeta (mm)	Altura Micropilote (mm)	Altura Hat (mm)	Hat	Diámetro Hat (mm)	Armado Hat	Código	Carga pico de rotura (kN)
17,5	160	500	100	300	SI	321	SI	AS12	570

Tabla 61. Principales características de la probeta AS12. Fuente: Elaboración propia.



Figura 131. Fotografías de la probeta SA12 antes de la rotura. Fuente: Elaboración propia.

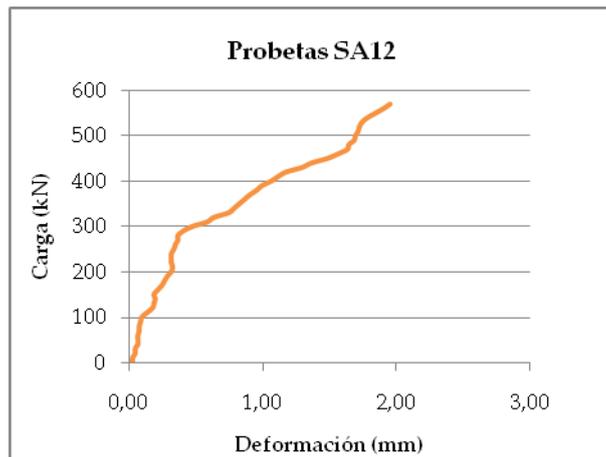


Figura 132. Gráfica de tensión deformación de probeta AS12. Fuente: Elaboración propia.

AS13 (30/200/285/AS/A)

Las principales características de esta probeta son las que aparecen en la Tabla 62.

f_{ck} (N/mm ²)	Diámetro Perforación (mm)	Altura Probeta (mm)	Altura Micropilote (mm)	Altura Hat (mm)	Hat	Diámetro Hat (mm)	Armado Hat	Código	Carga pico de rotura (kN)
30	200	500	100	300	SI	285	SI	AS13	430

Tabla 62. Principales características de la probeta AS13. Fuente: Elaboración propia.



Figura 133. Fotografías de la probeta SA13 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.

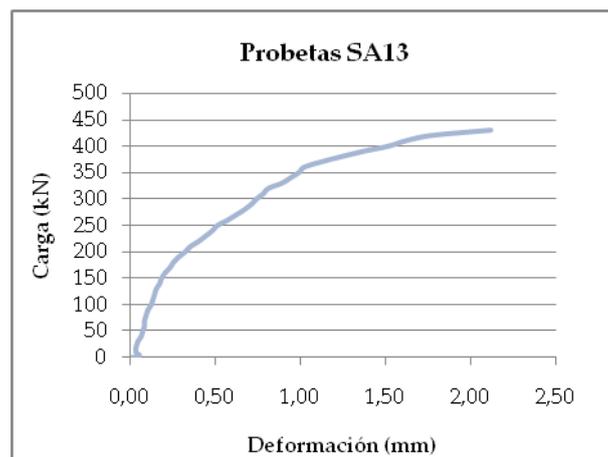


Figura 134. Gráfica de tensión deformación de probeta AS13. Fuente: Elaboración propia.

AS14 (30/200/285/AS/B)

Las principales características de esta probeta son las que aparecen en la Tabla 63.

f_{ck} (N/mm ²)	Diámetro Perforación (mm)	Altura Probeta (mm)	Altura Micropilote (mm)	Altura Hat (mm)	Hat	Diámetro Hat (mm)	Armado Hat	Código	Carga pico de rotura (kN)
30	200	500	100	300	SI	285	SI	AS14	560

Tabla 63. Principales características de la probeta AS14. Fuente: Elaboración propia.



Figura 135. Fotografías de la probeta SA14 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.

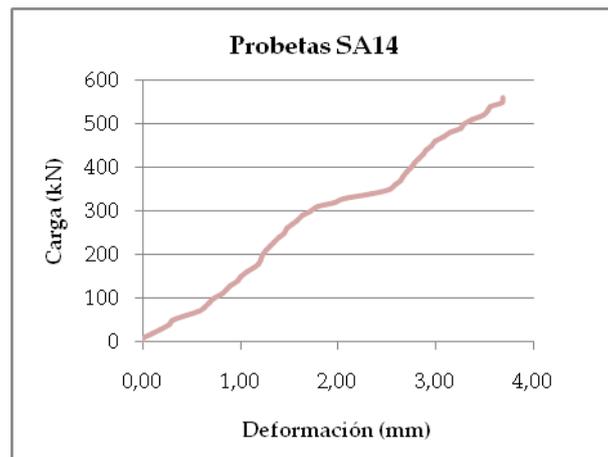


Figura 136. Gráfica de tensión deformación de probeta AS14. Fuente: Elaboración propia.

AS15 (30/200/362/AS/A)

Las principales características de esta probeta son las que aparecen en la Tabla 64.

f_{ck} (N/mm ²)	Diámetro Perforación (mm)	Altura Probeta (mm)	Altura Micropilote (mm)	Altura Hat (mm)	Hat	Diámetro Hat (mm)	Armado Hat	Código	Carga pico de rotura (kN)
30	200	500	100	300	SI	362	SI	AS15	510

Tabla 64. Principales características de la probeta AS15. Fuente: Elaboración propia.



Figura 137. Fotografías de la probeta SA15 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.

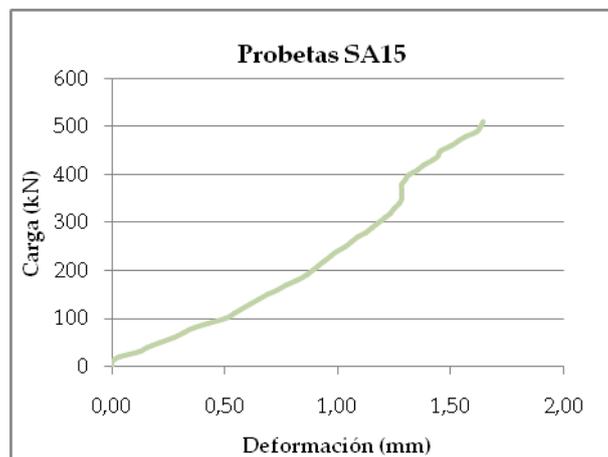


Figura 138. Gráfica de tensión deformación de probeta AS15. Fuente: Elaboración propia.

AS16 (30/200/362/AS/B)

Las principales características de esta probeta son las que aparecen en la Tabla 65.

f_{ck} (N/mm ²)	Diámetro Perforación (mm)	Altura Probeta (mm)	Altura Micropilote (mm)	Altura Hat (mm)	Hat	Diámetro Hat (mm)	Armado Hat	Código	Carga pico de rotura (kN)
30	200	500	100	300	SI	362	SI	AS16	530

Tabla 65. Principales características de la probeta AS16. Fuente: Elaboración propia.



Figura 139. Fotografías de la probeta SA16 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.

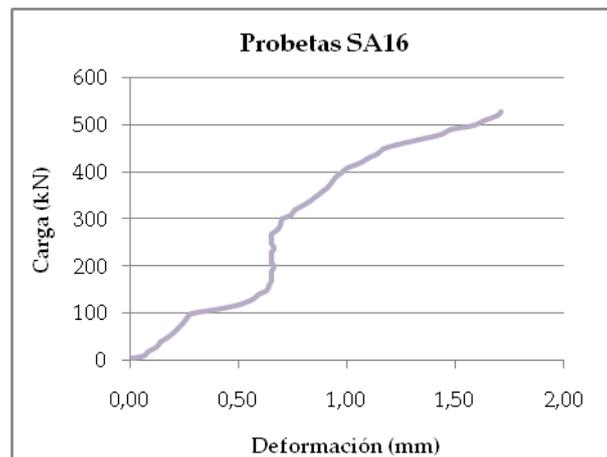


Figura 140. Gráfica de tensión deformación de probeta AS16. Fuente: Elaboración propia.

PROBETA CILÍNDRICA 3

Las principales características de esta probeta son las que aparecen en la Tabla 66.

f_{ck} (N/mm ²)	Diámetro Perforación (mm)	Altura Probeta (mm)	Altura Micropilote (mm)	Altura Hat (mm)	Hat	Diámetro Hat (mm)	Código	Carga pico de rotura (kN)
25	75,5	148,8	95,5	53,6	SI	84	Cilíndrica 3	55,9

Tabla 66. Principales características de la probeta Cilíndrica 3. Fuente: Elaboración propia.



Figura 141. Fotografías de la probeta Cilíndrica 3 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.

PROBETA CILÍNDRICA 4

Las principales características de esta probeta son las que aparecen en la Tabla 67.

f_{ck} (N/mm ²)	Diámetro Perforación (mm)	Altura Probeta (mm)	Altura Micropilote (mm)	Altura Hat (mm)	Hat	Diámetro Hat (mm)	Código	Carga pico de rotura (kN)
25	75,5	149,7	94,6	55,4	SI	84	Cilíndrica 4	74,2

Tabla 67. Principales características de la probeta Cilíndrica 4. Fuente: Elaboración propia.



Figura 142. Fotografías de la probeta Cilíndrica 4 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.

PROBETA CILÍNDRICA 5

Las principales características de esta probeta son las que aparecen en la Tabla 68.

f_{ck} (N/mm ²)	Diámetro Perforación (mm)	Altura Probeta (mm)	Altura Micropilote (mm)	Altura Hat (mm)	Hat	Diámetro Hat (mm)	Código	Carga pico de rotura (kN)
25	75,5	150,3	93,1	54,7	SI	104	Cilíndrica 5	144,0

Tabla 68. Principales características de la probeta Cilíndrica 5. Fuente: Elaboración propia.



Figura 143. Fotografías de la probeta Cilíndrica 5 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.

PROBETA CILÍNDRICA 6

Las principales características de esta probeta son las que aparecen en la Tabla 69.

f_{ck} (N/mm ²)	Diámetro Perforación (mm)	Altura Probeta (mm)	Altura Micropilote (mm)	Altura Hat (mm)	Hat	Diámetro Hat (mm)	Código	Carga pico de rotura (kN)
25	75,5	149,5	97,6	50,9	SI	104	Cilíndrica 6	81,4

Tabla 69. Principales características de la probeta Cilíndrica 6. Fuente: Elaboración propia.

Antes de la realización del ensayo, se podía apreciar que la zona del micropilote tenía una fisura que podía influir en el resultado de la prueba. De hecho, si comparamos el resultado obtenido con el de la probeta similar, se obtiene una resistencia de la unión muy inferior.



Figura 144. Fotografías de la probeta Cilíndrica 6 antes y después de la rotura. Fuente: Elaboración propia.