

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de
Ingeniería Civil



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

CONTRIBUCIÓN AL ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO
DE PILARES DE HORMIGÓN ARMADO REPARADOS
MEDIANTE MORTEROS PREDOSIFICADOS
SOMETIDOS A COMPRESIÓN CENTRADA

TESIS DOCTORAL

AUTORA:

Ana Irene Ortega Palanco

DIRECTORES DE LA TESIS:

Dr. Pedro A. Calderón García

Dr. Teresa Pellicer Armiñana

Octubre 2015

*A mi marido Rubén y a mi hija
A mis padres, Jorge y Ana
A mi hermano Jorge*

AGRADECIMIENTOS

Todo camino tiene un recorrido que hacer, con pruebas que hay que ir superando para avanzar. Afortunadamente, yo he recorrido el “camino de mi tesis” muy bien acompañada, por eso hoy y desde aquí os dedico estas palabras de mi más profundo y sincero agradecimiento a todas y cada una de las personas que me habéis apoyado y acompañado en este crecimiento personal.

Quiero empezar por mis directores de la tesis doctoral, Pedro Calderón y a Teresa Pellicer, porque con ellos comienza esta andadura, por ser mis directores evidentemente, porque sin ellos no podría haber empezado. Gracias por todo el tiempo que me habéis dedicado y la ayuda prestada para el desarrollo de esta investigación. Hemos pasado momentos de grandes dificultades sin decaer ni un solo momento y caminando con pie firme y confianza.

Muchísimas gracias a la empresa colaboradora, HADES CONSTRUCCIONES Y CREACIONES 2003 S.L., sin su ilusión y dedicación por esta investigación no hubiese sido un hecho.

También agradecer a los Técnicos del Laboratorio del Departamento de Ingeniería de la Construcción su gran ayuda, con especial mención para Lino José Martínez Todolí. Al igual quiero agradecer a José Luis Bonet y a Javier Pereiro Barceló por su valiosa colaboración. Quedo muy agradecida a todos.

Y finalmente, como broche de oro, mi mayor agradecimiento a las personas más queridas, a mi marido Rubén por su cariño, comprensión y ayuda durante todo este tiempo, gran fortuna de tenerte a mi lado. A mi hija, que incluso siendo tan pequeñita, una personita de dos años y poco, ha sabido estar a mi lado para que yo pudiera realizar esta tesis doctoral, eres mi corazón. Y qué decir de mis padres, no tengo palabras o más bien, no hay suficientes palabras para poder agradecerse. Y a mi hermano que siempre ha estado silenciosamente dándome su apoyo y su cariño. A ti Mari Carmen, que aunque ya no estás con nosotros, gracias por tu fuerza. Todos vosotros me habéis apoyado y animado a seguir adelante superando todos los obstáculos que se han presentado. Hoy ya es realidad.

Gracias, muchas gracias, muy agradecida.

RESUMEN

En los últimos años ha crecido de manera significativa la importancia del mantenimiento y rehabilitación de estructuras existentes. Esto viene acompañado de un descenso muy importante en las inversiones en la construcción de obra nueva, después de un periodo de crecimiento en el número de edificios construidos. Estos hechos han motivado que, actualmente, exista un gran parque de edificaciones con necesidad de ser reparado o reforzado.

Dentro de un edificio, los pilares son los elementos cuyo fallo puede provocar un colapso completo de la estructura. En el caso de los pilares de hormigón armado, se puede intervenir bien mediante un refuerzo o una reparación, cuyo fin será incrementar o mantener su resistencia, respectivamente. De hecho, la reparación de daños de diverso alcance y magnitud en la parte externa de un pilar mediante morteros de reparación es una operación muy habitual en obras de rehabilitación. Incluso existen normas europeas que prescriben las características de los morteros a utilizar.

Pese a ello, no se dispone de referencias que estudien la efectividad de una reparación en pilares de hormigón armado, lo que da lugar a una gran incertidumbre en el grado de seguridad que se alcanza en el elemento reparado. Esta falta de resultados experimentales, junto con la importancia de este tipo de actuaciones es la que ha motivado esta investigación, en la que se ha estudiado la efectividad de la reparación, mediante morteros predosificados, de pilares sometidos a compresión centrada. Se ha determinado la influencia de las distintas variables geométricas, mecánicas y constructivas que afectan a la reparación en la resistencia a compresión del pilar reparado. Para ello se ha realizado un estudio experimental en laboratorio, en el que se han ensayado los tres casos de reparación más frecuentes en la práctica: reparación integral a cuatro caras, reparación integral a una cara y reparación por parcheo, con las variables planteadas en esta investigación, clase de mortero (Clases R3 y R4) y utilización o no de puente de unión.

El objetivo final de esta investigación será determinar la eficacia de la reparación en función de las condiciones en las que se ha realizado y obtener una serie de reglas básicas de diseño y ejecución para la reparación.

Los resultados son analizados y comparados con los pilares patrón, sección intacta sin reparación. De los resultados de la investigación realizada se desprende que, las reparaciones realizadas con mortero Clase R3 presentan unos excelentes resultados, mientras que el mortero Clase R4, para los pilares ensayados, únicamente restituye de forma parcial la capacidad portante. Para el caso de la reparación a 4 caras, si se emplea un mortero Clase R4 la capacidad

portante del pilar reparado tan sólo alcanza un 64% de la original. Para el caso de reparación de las 4 caras con mortero Clase R3, el empleo de un puente de unión no tiene una influencia significativa en la recuperación de la capacidad portante. No así si se emplea un mortero Clase R4, donde el empleo de un puente de unión mejora significativamente el resultado. La Reparación por Parcheo prácticamente restaura la capacidad portante del elemento estructural para ambos morteros (R3 y R4). En este caso la utilización del puente de unión solo tiene influencia significativa en la reparación mediante mortero Clase R4, presentando una mejoría de un 9% más que si no se utiliza el puente de unión. En la Reparación Integral a 1 Cara con mortero Clase R3 se restituye un 97% de la capacidad portante perdida mientras que con mortero Clase R4 tan solo se llega a un 66%, y sin influencia de la utilización o no del puente de unión.

Estos resultados resaltan la importancia de la elección del sistema, método y materiales de la reparación. Estos deben ser compatibles con los materiales y el estado de la estructura original.

RESUM

En els últims anys ha crescut de manera significativa la importància del manteniment i rehabilitació d'estructures existents. Açò ve acompanyat d'un descens molt important en les inversions en la construcció d'obra nova, després d'un període de creixement en el nombre d'edificis construïts. Estos fets han motivat que, actualment, existisca un gran parc d'edificacions amb necessitat de ser reparat o reforçat.

Dins d'un edifici, els pilars són els elements la fallada dels quals pot provocar un col·lapse complet de l'estructura. En el cas dels pilars de formigó armat, es pot intervindre bé per mitjà d'un reforç o una reparació, el fi de la qual serà incrementar o mantindre la seua resistència, respectivament. De fet, la reparació de danys de divers abast i magnitud en la part externa d'un pilar per mitjà de morters de reparació és una operació molt habitual en obres de rehabilitació. Inclús hi ha normes europees que prescriuen les característiques dels morters a utilitzar.

A pesar d'això, no es disposa de referències que estudien l'efectivitat d'una reparació en pilars de formigó armat, la qual cosa dóna lloc a una gran incertesa en el grau de seguretat que s'aconsegueix en l'element reparat. Esta falta de resultats experimentals, junt amb la importància d'este tipus d'actuacions és la que ha motivat aquesta investigació, en la que s'ha estudiat l'efectivitat de la reparació, per mitjà de morters predosificats, de pilars sotmesos a compressió centrada. S'ha determinat la influència de les distintes variables geomètriques, mecàniques i constructives que afecten la reparació en la resistència a compressió del pilar reparat. Per a això s'ha realitzat un estudi experimental en laboratori, en el que s'han assajat els tres casos de reparació més freqüents en la pràctica: reparació integral a quatre cares, reparació integral a una cara i reparació per parcheo, amb les variables plantejades en esta investigació, classe de morter (Classes R3 i R4) i utilització o no de pont d'unió.

L'objectiu final d'esta investigació serà determinar l'eficàcia de la reparació en funció de les condicions en què s'ha realitzat i obtindre una sèrie de regles bàsiques de disseny i execució per a la reparació.

Els resultats són analitzats i comparats amb els pilars patró, secció intacta sense reparació. Dels resultats de la investigació realitzada es desprèn que, les reparacions realitzades amb morter Classe R3 presenten uns excel·lents resultats, mentres que el morter Classe R4, per als pilars assajats, únicament restitueix de forma parcial la capacitat portant. Per al cas de la reparació a 4 cares, si s'empra un morter Classe R4 la capacitat portant del pilar reparat tan sols aconseguix un 64% de l'original. Per al cas de reparació de les 4 cares amb morter Classe R3, l'ocupació d'un pont d'unió no té una influència significativa en la recuperació de la capacitat portant. No així si s'empra un morter Classe R4, on l'ocupació d'un pont d'unió millora significativament el resultat. La Reparació per Parcheo pràcticament restaura la capacitat portant de l'element estructural per a ambdós morters (R3 i R4). En este cas la utilització del pont d'unió només té influència significativa en la reparació per mitjà de morter Classe R4, presentant una millora d'un 9% més que si no s'utilitza el pont d'unió. En la

Reparació Integral a 1 Cara amb morter Classe R3 es restitueix un 97% de la capacitat portant perduda mentres que amb morter Classe R4 tan sols s'arriba a un 66%, i sense influència de la utilització o no del pont d'unió.

Estos resultats ressalten la importància de l'elecció del sistema, mètode i materials de la reparació. Aquestos han de ser compatibles amb els materials i l'estat de l'estructura original.

SUMMARY

The importance of the maintenance and rehabilitation of existing structures has grown significantly in recent years. This accompanied by a very important decrease in the investments in the new construction, again after a period of growth in the number of constructed buildings. These facts have motivated that, currently, there is a large park of buildings need to be repaired and strengthened.

The columns are the elements which failure may cause a complete collapse of the structure. In the case of reinforced concrete columns, it is possible to intervene well by means of a strengthening or a repair, whose goal will be to increase or to maintain its resistance, respectively. In fact, the repair of damages of different scope and magnitude on the outside of a column by means of repair mortars is an operation very usual in rehabilitation works. There are even European standards that prescribe the characteristics of the mortars to be used.

Despite this, there are no references to study the effectiveness of a repair in reinforced concrete columns, which gives rise to a large uncertainty in the level of security that is reached in the repaired element. This lack of experimental results, together with the importance of this type of the action is that has motivated this investigation, which has studied the effectiveness of repair, using pre-bagged concrete repair mortars, of columns subjected to axially loaded. It has been determined the influence of the different geometric, mechanical and construction variables that they affect to the repair in the compressive strength of the column repaired. In order to do so, an experimental study has been realized in laboratory, in which the three most frequent cases of repair have been tested: complete repair of 4 sides, complete repair of one side and patch repair, with the variables raised in this investigation, kind of mortar (Class R3 and R4) and use or not of bonding primer.

The final aim of this investigation will be to determine the efficacy of the repair according to the conditions in which it has been realized and to obtain a series of basic rules of design and execution of the repair.

The results are analyzed and compared with the columns pattern, undamaged section without repair. The results of the investigation carried out indicates that repairs carried out with mortar Class R3 presented excellent results, while mortar Class R4, for the tested columns, only restores partially load-carrying capacity. In the case of the repair to 4 sides, if used a mortar Class R4 the load-carrying capacity on the column repaired only reached 64% of the original. In the case of the repair to 4 sides with mortar Class R3, the use of bonding primer does not have significant influence on the recovery of the load-carrying capacity. Not this way if there uses a mortar Class R4, where the use of a bonding primer improves significantly the result. Patch repair restores practically the load-carrying capacity of the structural element for both mortars (R3 and R4). In this case the use of bonding primer only has significant influence in the repair using mortar Class R4, showing an improvement of 9% more than if bonding primer is not used. In the complete repair of one side whit mortar Class R3 restores 97% of the load-carrying capacity loss while with mortar Class R4 only reaches to 66%, and without influence of the use or not of bonding primer.

These results highlight the importance of the choice of the system, method and materials of the repair. These must be compatible with the materials and the state of the original structure.

ÍNDICE

Capítulo 1. Introducción y Objetivos	13
1.1. Introducción	13
1.2. Objetivos	16
1.3. Estructura de la tesis	16
Capítulo 2. Estado del Conocimiento	19
2.1. Introducción	19
2.2. Grados o alcance de la reparación en pilares de hormigón armados	24
2.2.1. Introducción	24
2.2.2. Reparación por parcheo	26
2.2.2.1. Shambira y Nounu (2000)	26
2.2.2.2. Sharif et al. (2006)	28
2.2.2.3. Aurrekoetchea (2009)	30
2.2.3. Reparación Integral a 1 cara	32
2.2.3.1. Pellegrino et al. (2009)	32
2.2.4. Reparación Integral a 4 caras	34
2.2.4.1. da Porto et al. (2012)	34
2.2.4.2. Otros casos de estudio	36
2.3. Conclusiones	37
Capítulo 3. Programa Experimental	41
3.1. Descripción metodológica	41
3.2. Características del elemento a ensayar	49
3.3. Justificación de las variables a utilizar	52
3.4. Ensayos	53
3.4.1. Tipos de probetas	63
3.4.2. Instrumentación	65
Capítulo 4. Resultados de los Ensayos Experimentales	73
4.1. Pilares Patrón-Sección Original, PP	73
4.2. Pilares con daño y reparación a cuatro caras	76
4.2.1. Pilares Patrón Daño 4 Caras	77
4.2.2. PR4C R3 con puente de unión	78
4.2.3. PR4C R3 sin puente de unión	81
4.2.4. PR4C R4 con puente de unión	84
4.2.5. PR4C R4 sin puente de unión	87
4.3. Pilares con daño y reparación en una cara completa	90
4.3.1. Pilares con daño a una cara	90
4.3.2. PR1C R3 con puente de unión	93
4.3.3. PR1C R3 sin puente de unión	99
4.3.4. PR1C R4 con puente de unión	104
4.3.5. PR1C R4 sin puente de unión	109
4.4. Pilares con daño y reparación por parcheo	114
4.4.1. Pilares con daño Parcheo	114

4.4.2. PRP R3 con puente de unión	117
4.4.3. PRP R3 sin puente de unión	122
4.4.4. PRP R4 con puente de unión	127
4.4.5. PRP R4 sin puente de unión	131
4.5. Valores de Eficiencia de la Reparación	136
Capítulo 5. Análisis de Resultados	139
5.1. Introducción	139
5.2. Análisis del comportamiento de la rotura de los pilares	139
5.3. Conclusiones del análisis de los resultados	172
Capítulo 6. Conclusiones y Futuras líneas de investigación	175
6.1. Conclusiones	175
6.2. Futuras líneas de investigación	177
Capítulo 7. Referencias Bibliográficas	179
Anejo 1. Propiedades de los materiales empleados	193
Anejo 2. Esquema de acrónimos utilizados	197
Anejo 3. Índice de figuras y tablas	199

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. Introducción

En los últimos años se ha producido un crecimiento muy significativo en el número de intervenciones sobre estructuras, tanto de edificación como de obra civil. Dentro del sector de la construcción actual, la reparación de elementos estructurales de hormigón cobra gran importancia, sobre todo teniendo en cuenta la actual coyuntura económica, donde la inversión en obra nueva se ha reducido, y se precisa mantener y rehabilitar las estructuras ya construidas.

Debido a los procesos de deterioro que sufren las estructuras de hormigón, es necesario realizar trabajos de reparación o incluso de refuerzo en los casos más graves. Un elemento estructural que precisa una atención particular son los pilares de hormigón en edificación. Esto es debido al papel que cumplen dentro de la estructura, donde un fallo de cualquier pilar puede provocar el colapso completo del edificio.

Los daños que afectan al hormigón armado, como son los procesos de corrosión, los agentes medioambientales, las acciones mecánicas, etc., han sido y son estudiadas, aportando mucha información para proceder a un sistema de reparación. Gracias a todos estos conocimientos se desarrolló la UNE-EN 1504 (2009), Normativa Europea, que marca las directrices para ejecutar los trabajos de reparación.

Dicha Normativa define los principios que se deben cumplir y que métodos utilizar para llevar a cabo este fin, la reparación y protección de las estructuras de hormigón armado. Dentro del ámbito de la reparación de estructuras de hormigón, las técnicas y métodos empleados no vienen avalados por guías técnicas de reparación, ni por estudios-investigaciones relacionados con la temática. Esta falta de referencias provoca una gran incertidumbre a la hora de evaluar cómo se comportan y contribuyen las distintas formas-técnicas de reparar las estructuras de hormigón.

Se ha estudiado e investigado acerca de los materiales que se utilizan a día de hoy en el campo de la reparación de estructuras, sobre sus propiedades mecánicas, sus características, y las ventajas que aportan. Al igual que los propios fabricantes de materiales han evolucionado y desarrollado mejores productos, mejorando en sí las propiedades mecánicas y ajustándose a la Normativa Europea (UNE-EN 1504). Sin embargo, hasta la fecha no se han realizado estudios relevantes que traten sobre la "Efectividad de la Reparación". En definitiva, poco o nada se conoce sobre qué grado de contribución aporta la reparación al conjunto del elemento estructural.

Vagamente se habla de la necesidad real o no de descargar la estructura para su reparación. En este sentido, no hay bases científicas sobre qué técnicas de reparación (grado o alcance de la reparación) se deben emplear.

En cuanto a las directrices de cómo actuar ante un proceso de reparación vienen marcadas por la UNE-EN 1504-9, identificadas en las siguientes fases a llevar a cabo:

1. Evaluación del estado de la estructura.
2. Identificación de las causas del deterioro.
3. Definición de los objetivos de protección y reparación.
4. Selección del principio o principios más adecuados para la protección y la reparación.

5. Selección de los métodos.
6. Definición de las propiedades de los productos y de los sistemas.
7. Especificación de las condiciones de mantenimiento posteriores a la protección y a la reparación.

Esta normativa es de obligado cumplimiento, por lo tanto, uno de los pasos más importantes para que una reparación tenga éxito ya está establecido, el cual es la identificación de las causas del deterioro. Pero se sigue dando el caso de que no se cumple esta parte de la Normativa, especialmente para los proyectos pequeños, donde se limitan a tan solo una inspección visual, la cual no aporta datos suficientes y fiables para desarrollar un proceso de reparación adecuado.

De entre los distintos elementos estructurales que pueden ser objeto de una reparación, son los pilares los que con más frecuencia la requieren y son, a su vez, los más importantes. El presente estudio, que busca establecer la efectividad de diversas formas de reparación en pilares, se concentra en pilares sometidos a compresión centrada, aunque algunas de sus conclusiones podrían ser extrapoladas -bajo ciertas condiciones- a pilares sometidos a compresión levemente excéntrica.

Generalmente, al reparar un pilar, el alcance de la reparación puede ser muy variable, entre un parcheo reducido y una reparación integral de las cuatro caras. Podemos distinguir tres grados principales de reparación:

- 1) Reparación integral a cuatro caras.
- 2) Reparación integral a una cara.
- 3) Reparación por parcheo (reparación de una zona localizada).

Un factor importante que afecta a la buena práctica de la reparación es el coste que supone llevarla a cabo. Por lo que siempre se tiende a minimizar la zona a reparar. De ahí, que la mayoría de los trabajos de reparación se decanten por la “Reparación por parcheo” y sea la técnica más extendida a día de hoy.

No hay investigaciones que se centren exclusivamente en el estudio de la efectividad de la reparación, por esta razón se pretende focalizar en ella esta investigación cuyo título es “Contribución al estudio del comportamiento de pilares de hormigón armado reparados mediante morteros predosificados sometidos a compresión centrada”. En ella se examina exhaustivamente el comportamiento de los pilares de hormigón armado sometidos a compresión centrada, reparados mediante morteros, analizando los diferentes grados o alcances de reparación que se ejecutan en las obras, tanto en edificación como en obra civil, evaluando el grado de contribución de cada una de ellas. Esto se llevará a cabo mediante los ensayos a compresión de pilares reparados con los tres grados de reparación descritos, empleando, para cada uno de ellos, las combinaciones de materiales habituales en la práctica. Con los resultados obtenidos se realizará la comparación de las mismas obteniendo así los porcentajes de efectividad de cada una con respecto a los pilares patrón (pilares originales sin ningún daño ni reparación).

Las lagunas existentes en el conocimiento y el factor económico a la hora de abordar un problema de reparación, comprometen el éxito de la misma, teniendo muchas veces que reparar lo ya reparado.

Según los datos estadísticos publicados en los informes anuales de la construcción por el SEOPAN (ver Fig. 1). La gráfica de abajo no muestra que el sector de la construcción sufra un descenso, ya que sólo indica el reparto de volumen total de la construcción entre distintas actividades. Lo que sí se observa es que la Rehabilitación y el Mantenimiento suponen un porcentaje cada vez mayor respecto al conjunto de actividades de la Construcción.

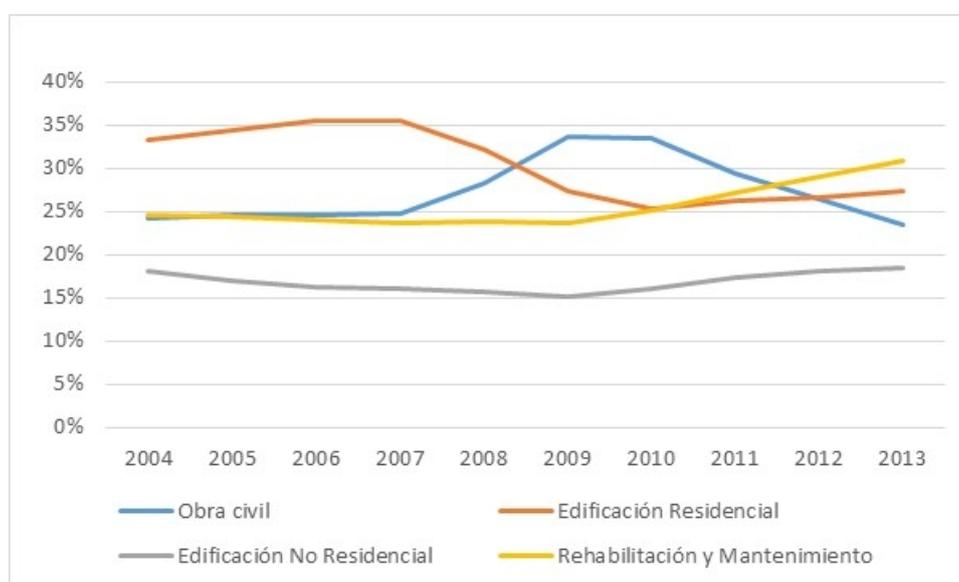


Figura 1 – Gráfico de los porcentajes de participación de la producción interna de construcción por subsectores, según datos obtenidos de los informes económicos anuales, desde el 2004 hasta el 2013 realizados por SEOPAN.

Estos datos no reflejan toda la realidad de los trabajos de reparación, ya que solo hablan de la rehabilitación integral de edificaciones. Sin embargo, los trabajos de reparación abarcan todos los ámbitos, tanto obra nueva de edificación como obra civil, y obra ya existente donde se ejecuta la reparación propiamente dicha: “restauración del hormigón original de un elemento de la estructura a la forma y función especificada originalmente”. Difícilmente se podrá valorar ya que gran número de las reformas de vivienda usada se llevan a cabo sin requerir visado facultativo ni licencia. Por lo tanto, se puede aseverar que el porcentaje relativo a la reparación es bastante mayor, adquiriendo importancia, cada vez más relevante en el sector de la construcción.

Una vez introducida la definición de reparación, es importante realzar este concepto, porque de ahí viene la necesidad de conocer de manera exacta cuando se realiza una reparación, si esta le devuelve o no su estado original, para seguir soportando las cargas con el mismo coeficiente de seguridad para el cual fue diseñado, o por el contrario, esto no sucede y lo que se realiza con esta reparación es una “simple protección de la zona reparada” y su capacidad resistente se ve minorada por esa pérdida de sección.

1.2. Objetivos

El objetivo general de esta tesis es estudiar la efectividad de la reparación mediante morteros predosificados de pilares sometidos a compresión centrada. Se pretende determinar la influencia de las distintas variables geométricas, mecánicas y constructivas que afectan a la reparación en la resistencia a compresión del pilar reparado.

De esta forma, se persigue obtener una serie de reglas básicas de diseño de la reparación.

Para poder cumplir con el objetivo general de esta tesis se han propuesto los siguientes objetivos específicos:

- a. Definición del marco teórico y estado del arte.
- b. Diseño de los ensayos a realizar en laboratorio sobre muestras de pilares a una escala reducida.
- c. Elaboración y ejecución de un plan de ensayos que permita observar la influencia de las distintas variables que concurren en la reparación.
- d. Análisis de los resultados determinando la efectividad de las distintas técnicas-modos de reparación estudiadas.

1.3. Estructura de la tesis

La presente tesis doctoral está formada por 7 capítulos, incluyendo la introducción, las conclusiones finales y las referencias bibliográficas.

En el capítulo 2, se muestra el estado del conocimiento relacionado con la reparación de estructuras de hormigón armado y en especial la reparación de pilares de hormigón armado reparados mediante morteros predosificados sometidos a compresión centrada. Se presta especial atención a los temas que tratan las técnicas-modos de reparación expuestas anteriormente.

En el capítulo 3, se presenta el programa experimental. En el inicio se describe la metodología utilizada durante los ensayos, se exponen las características del elemento a ensayar. Se justifican las variables utilizadas en el programa experimental y finalmente cada uno de los ensayos con su correspondiente instrumentación.

En el capítulo 4, se reúnen los principales resultados del programa experimental. Se cumpliría así el objetivo específico desarrollado en el apartado (c).

En el capítulo 5, se realiza un análisis de los resultados experimentales comparando entre si los distintos grados o alcances de reparación, de acuerdo al objetivo específico (d).

En el capítulo 6, se recogen las conclusiones finales, obtenidas a partir de la experiencia adquirida en el desarrollo de esta investigación. Además, se presenta una propuesta

para la elaboración de una guía de diseño para la reparación de pilares de hormigón armado (objetivo específico (e)).

Por último, en el capítulo 7, se muestran las fuentes bibliográficas citadas a lo largo de esta tesis doctoral.

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO

2.1. Introducción

En esta última década ha aumentado considerablemente la importancia relativa de los trabajos de reparación en relación al total de los trabajos de construcción. Estos trabajos de reparación, tanto en obra nueva como en obra existente, son debidos a diversas causas, las cuales no son objeto de estudio de esta investigación.

De acuerdo al análisis del parque español de edificios realizado por la comisión de Infraestructuras y Urbanismo de la CEOE (Confederación española de organizaciones empresariales), se refleja la necesidad casi inmediata de realizar actuaciones de rehabilitación en un porcentaje significativo, del orden del 10%, de los edificios e inmuebles construidos (ver figura 2). Si estas cifras se extrapolan al resto de países la importancia que adquiere el campo de la rehabilitación es relevante.

Estado de conservación	Edificios	Inmuebles
Ruinoso	55.187	95.845
Malo	171.588	303.963
Deficiente	736.551	1.515.996
Bueno	8.767.673	23.933.534
Total	9.730.999	25.849.338

Figura 2 – Censo de Población y Viviendas 2011, según datos obtenidos del informe de septiembre de 2014, de la comisión de infraestructuras y urbanismo de la CEOE (2014).

El presente capítulo revisa y analiza la documentación relativa a “Reparación de Estructuras de Hormigón”, y más específicamente se analizará la documentación relativa al tema de investigación que se lleva a cabo.

Existe una literatura abundante con respecto a los “procesos de reparación”, definiendo paso a paso cómo abordar el problema. Un gran avance en este sentido ha sido la nueva normativa europea, UNE-EN 1504, ya que hasta su aparición, el año 2009, solo existían guías para la consulta, dejando así a la buena práctica de los técnicos la calidad de la reparación.

Pero se observa grandes vacíos y lagunas técnicas y científicas en cuanto a la hora de definir qué grado o alcance de reparación ejecutar. No existe en la literatura ningún estudio en el cual se valore y cuantifique el grado de contribución que aporta cada grado o alcance de reparación al elemento estructural, comparándolas entre sí. De este modo, se deja la elección de la técnica a emplear al libre albedrío del proyectista, el cual se guía por un aspecto más económico que de efectividad de la reparación de la estructura.

El primer paso y más importante para realizar un proyecto de reparación es la inspección de la estructura, para detectar las posibles causas del deterioro, y poder actuar en consecuencia y desde la raíz del problema, buscando siempre la efectividad de los trabajos de reparación.

En esta búsqueda de la efectividad entran varias consideraciones que hay que tener muy en cuenta, como son la evaluación del estado de la estructura, el estudio y diagnóstico de las causas del daño de la misma, la selección de los materiales de reparación a utilizar según sus propiedades y características, siendo lo más fundamental es definir el grado o alcance de la reparación a ejecutar – reparación integral (a una cara o a cuatro caras) o reparación por parcheo.

Las fases de una reparación están muy bien definidas, tanto en las guías de diseño como en la UNE-EN 1504:

- 1º. Saneado de las superficies.
- 2º. Limpieza de las superficies.
- 3º. Colocación de la capa de unión entre hormigón viejo y material de reparación.
- 4º. Colocación del material de reparación.
- 5º. Protección de las superficies de hormigón y material de reparación.

Las características y propiedades de los diferentes materiales de reparación existentes en el mercado han sido muy estudiadas, por lo que hay abundantes investigaciones y referencias bibliográficas. Esto es muy práctico a la hora de seleccionar un tipo u otro de mortero de reparación según el objetivo que se quiera alcanzar para la reparación y protección de las estructuras de hormigón armado.

Aún con todo esto se produce el fallo prematuro de las reparaciones, dentro de los cinco primeros años. Los datos presentados por Tilly y Jacobs (2007) en su estudio “Concrete repairs: Performance in service and current practice” muestran el nivel de fallo de las reparaciones, obteniendo un dato alarmante: el 50% de las estructuras inspeccionadas han fallado o muestran evidencias de fallo (25% y 25% respectivamente).

En la siguiente figura (ver Fig. 3) se observa como la mayoría de los fallos de la reparación se producen en los primeros 10 años, y un 20% de los fallos están comprendidos entre los 5 primeros años de realizada la reparación.

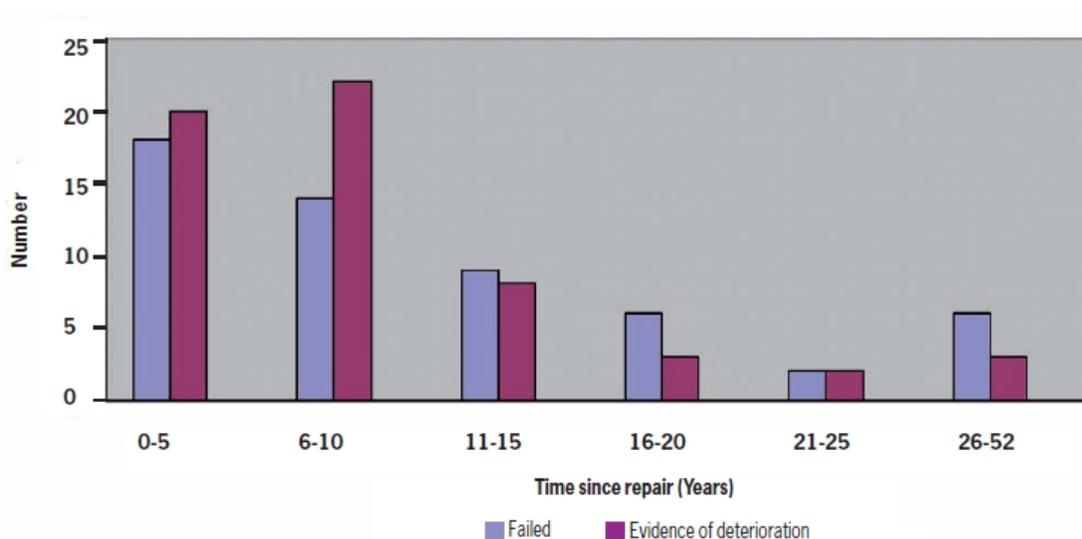


Figura 3 – Rendimientos en relación a la edad de las reparaciones, Tilly y Jacobs (2007)

Según investigaciones realizadas sobre los modos de fallo de la intervención de la reparación (Matthews y Molridge, 2008), se sugiere una serie de causas de fallo, principalmente debidas a:

- a) Diagnóstico erróneo de la causa del daño o deterioro inicial (16%).
- b) Diseño inapropiado de los trabajos de intervención (38%).
- c) Especificación o elección inapropiada de los materiales (15%).
- d) Mano de obra pobre, poco especializada (19%).
- e) Otros factores (12%).

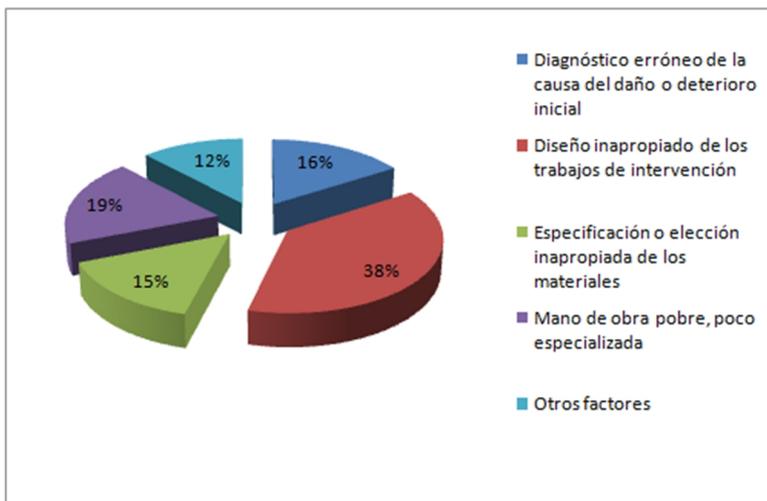


Figura 4 – Causas del fallo de la reparación (Matthews y Morlidge, 2008)

Dentro del punto de diseño inapropiado de los trabajos de intervención, al cual se le asocia el porcentaje más elevado de fallo, se podría incluir la no definición del grado o alcance de la reparación que se debe ejecutar (integral o parcheo), no solo la definición del sistema a emplear (capa de unión; tipo de mortero de reparación; protección de las superficies).

En este sentido es importante recalcar el objetivo principal de la reparación estructural, en el cual se pretende que el material de reparación contribuya con el resto del elemento estructural a soportar las cargas que actúan sobre él, restableciendo la capacidad portante original.

Por lo tanto, el éxito, la durabilidad, de la reparación será la combinación del grado de contribución y la compatibilidad del material de reparación con el elemento a reparar.

La compatibilidad entre los distintos materiales – mortero de reparación y hormigón del elemento estructural - está definida bajo una serie de propiedades fundamentales que debe de cumplir el material de reparación:

Propiedad	Relación entre el Material de Reparación (R) y el substrato de Hormigón (H)
Resistencia a compresión, tracción y flexión	$R \geq H$
Módulo de Elasticidad	$R \sim H$
Coefficiente de Poisson	Depende del módulo y tipo de material de reparación
Coefficiente de expansión térmica	$R \sim H$
Adherencia a tracción y a cortante	$R \geq H$
Retracción	$R \leq H$
Capacidad de deformación unitaria	$R \geq H$
Coefficiente de fluencia (para reparaciones a compresión)	$R < H$
Coefficiente de fluencia (para reparaciones a tracción)	$R > H$
Fatiga	$R > H$

Tabla 1 – Requerimientos generales de los Materiales de Reparación para la Compatibilidad (Emberson y Mays, 1990)

Estas propiedades establecen el punto de partida para la selección del material de reparación, tomándose siempre como un requerimiento mínimo, nunca por debajo de lo indicado, ya que dependiendo de las condiciones a las que esté expuesto el elemento estructural se seleccionará el tipo de material más adecuado para resistir tanto las cargas como el ambiente agresivo al que esté expuesto.

El entendimiento y conocimiento en profundidad de las propiedades de ambos materiales, material de reparación y hormigón existente, conducirán a la compatibilidad y durabilidad de la reparación. La compatibilidad siempre se asocia con la capacidad para soportar las cargas, ignorando los demás aspectos relevantes implicados.

Según Emmons (1993) define la *Compatibilidad* como: “un equilibrio de las propiedades físicas, químicas y electroquímicas y dimensiones entre el material de reparación y el substrato existente, que garantizará que el material de reparación resistirá todas las tensiones inducidas por los cambios volumétricos y por los efectos químicos y electroquímicos sin señales de daño ni deterioro durante el período de tiempo designado”.

Hay que entender y conocer los diferentes tipos de materiales de reparación que se encuentran en el mercado, para poder seleccionar el adecuado para cada caso de reparación, ya que dependiendo de la causa del daño y de la necesidad de reparación, el producto adecuado podrá ser uno u otro.

No existe, por tanto, el material de reparación ideal, sino que hay diferentes tipos de materiales para diferentes trabajos reparación.

Se pueden categorizar los materiales de reparación según su composición en tres grupos (UNE-EN 1504-1:2005):

- 1) Materiales a base de resinas.
- 2) Materiales cementosos mejorados con polímeros.
- 3) Materiales cementosos.

Cada uno de estos materiales posee unas propiedades características propias, que difieren entre sí.

Los tres requerimientos principales para la reparación estructural serán la resistencia a compresión, flexión y tracción; la deformación por retracción (durante el fraguado); y el módulo de elasticidad. La mayoría de los materiales de reparación cumplen con estos requerimientos, y en muchos casos lo sobrepasan con creces.

En términos generales, los materiales de reparación con excesiva rigidez (módulo de elasticidad alto) se deberían evitar, ya que podrían atraer hacia ellos una carga excesiva produciendo el fallo de la reparación.

La transmisión de carga en el conjunto del elemento – hormigón y material de reparación – debe ser lo más uniforme posible para que se produzca la contribución de un material con el otro. Esta propiedad se ve influida directamente por el módulo de elasticidad. Varios estudios realizados por otros autores explican detalladamente este hecho. Aquí se exponen los tres casos que se dan (Emberson y Mays, 1990):

- a) Para el caso de un Módulo de Elasticidad inferior al del hormigón, la mayor parte de la carga se transmite a través del hormigón, siendo el efecto del coeficiente de Poisson mínimo. Se produce una concentración de tensiones en el hormigón adyacente a las esquinas interiores del parcheo (reparación por parcheo) las cuales indican la fisuración de la zona, y por lo tanto, el fallo de la reparación.
- b) Para el caso de un Módulo de Elasticidad similar al del hormigón, la transmisión de carga a través de la reparación es casi uniforme. Solo hay una pequeña variación de tensión en la zona reparada.
- c) Para el caso de un Módulo de Elasticidad superior al del hormigón, la mayor parte de la carga es dirigida a través de la reparación, sometiéndola a tensiones que implican una mayor necesidad de adherencia.

Hassan (2000) recomienda una diferencia de un 30% entre los módulos de los distintos materiales (el módulo de elasticidad del mortero debe ser un 30% mayor que el del hormigón). Esto se justifica de manera que no se produce una discontinuidad de deformación en la interface, por lo tanto, la distribución de la carga es uniforme en el conjunto.

Una vez bien comprendida la importancia de los requerimientos de los materiales de reparación, debemos tener presente que hay otro factor importante que influye en la compatibilidad dimensional, y esta es, el tamaño, la forma y el espesor del área que debe ser reparada.

Llegados a este punto, se debe profundizar, por lo tanto, en otra consideración a tener en cuenta para la efectividad de la reparación, el grado o alcance de la reparación.

Se trata ahora de ir conduciendo la investigación hacia la definición del grado de contribución del material de reparación con el resto del elemento estructural.

2.2. Grados o alcance de la reparación en pilares de hormigón armado

2.2.1. Introducción

Diversos autores han estudiado sobre la reparación de estructuras de hormigón, aunque sin entrar a estudiar la eficacia de la misma. La gran mayoría de publicaciones tratan de los procesos de reparación en general, citando las causas del deterioro de las estructuras de hormigón y su reparación, las propiedades mecánicas de los materiales de reparación existentes en el mercado, las fases propias del proceso de reparación, la influencia de la adherencia en la reparación, etc. (ver Figs. 5 y 6).

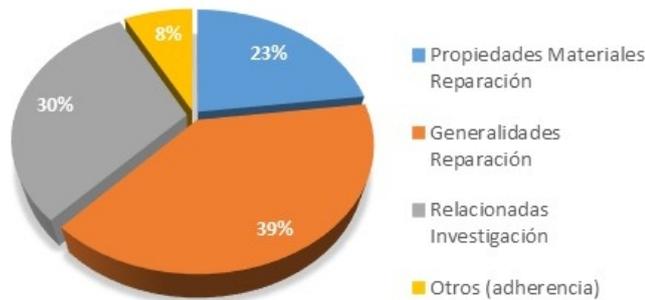


Figura 5 – Porcentajes de las publicaciones consultadas entre los años 1989-2015, según datos de Elsevier, Ei Village, Web of Science, IEEE Xplore y Science Direct.

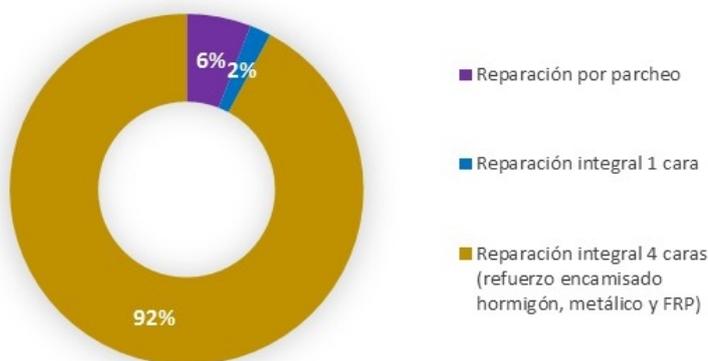


Figura 6 – Porcentajes de artículo específicos consultados relativos a la investigación en cuestión.

Antes de entrar en detalle en el estado del arte de cada grado o alcance de la reparación, conviene hacer un inciso sobre la bibliografía consultada sobre el caso de la reparación integral a cuatro caras.

Los artículos examinados en esta investigación, referentes a la reparación integral a cuatro caras, no son realmente reparaciones, sino “Refuerzos” por confinamiento del hormigón armado, en donde se produce el incremento de la resistencia uniaxial por la introducción de un confinamiento lateral que producen un estado triaxial de tensiones. Mediante el encamisado se restringen las deformaciones horizontales de las secciones transversales produciendo, por lo tanto, un estado triaxial de tensiones, lo que aumenta la resistencia a compresión axial del pilar.

En general los estudios del refuerzo-reparación de pilares mediante el confinamiento se dedican al estudio del incremento de resistencia a compresión y ductilidad. Un 20% de estos estudios están centrados principalmente en su comportamiento frente al sismo, (ver p.e., Sadone (2012), Raphaëlle et al (2012), Kakaletsis (2011), Kim (2010), Al-Salloum (2011), Li (2011), Yaqub (2012), Alsayed (2010), ElSouri (2011), Sasmal, S (2011).

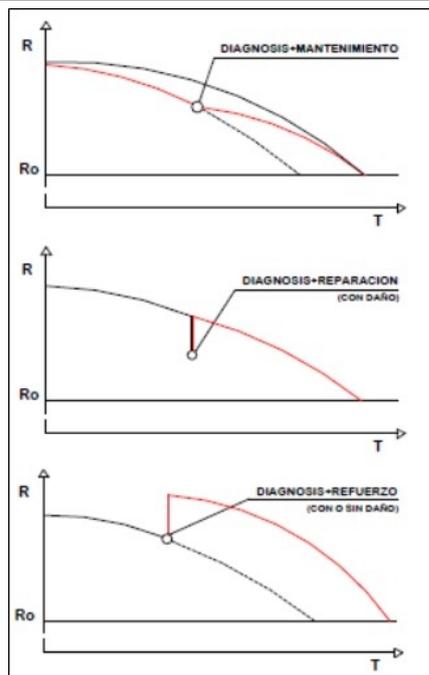
Las investigaciones realizadas se refieren exclusivamente al hecho del refuerzo, donde se busca una mayor capacidad resistente del pilar, aplicando un recrecido estructural de hormigón, o un refuerzo metálico (empresillado metálico, confinamiento mediante tubo de acero, utilización de una malla de ferrocemento, etc.) o bien un confinamiento mediante materiales compuestos (CFRP, GFRP, etc.). Dentro de estos diferentes sistemas de refuerzo, el que mayores investigaciones presenta es el que corresponde al refuerzo mediante materiales compuestos, seguidos del refuerzo metálico y por último el encamisado con hormigón o morteros de reparación.

La desventaja que presenta el refuerzo mediante recrecido estructural era que al aumentar la sección original del pilar, esto provoca una pérdida de espacio en el local y el tiempo de espera hasta que el hormigón alcanza su resistencia característica, llevó a promocionar las otras técnicas de refuerzo.

Llegados a este punto es oportuno hacer la diferenciación y una breve explicación entre “Reparación” y “Refuerzo”. Esta se define tal cual viene dada por el C.E.B. (Comité Euro-Internacional del Hormigón, 1983):

- 1) *Reparación*: consiste en restituir los niveles originales de seguridad de la estructura, cuando éstos se han reducido considerablemente por alguna causa. Consecuentemente, implica la existencia previa de daño de cierta entidad.
- 2) *Refuerzo*: se denomina así a la operación de incrementar la capacidad resistente de la estructura por encima de los niveles para los que fue originalmente diseñada y ejecutada. No implica necesariamente la existencia de daño.

Dependiendo de la naturaleza y del alcance del problema o del deterioro, se pueden realizar una o varias de las siguientes intervenciones:



- 1) Se detecta una disminución de la capacidad (durabilidad, resistencia, etc.) y se realiza un diagnóstico en el cual se evalúa la necesidad de realizar solamente un mantenimiento de la estructura para inhibir o desacelerar el proceso de deterioro.
- 2) Se produce una caída drástica de la capacidad, procediendo, por lo tanto, a un diagnóstico de la estructura donde se considera necesario la realización de trabajos de reparación para restaurar la capacidad original.
- 3) En un momento determinado de la vida de la estructura se necesita incrementar la capacidad de la estructura, por consiguiente, se realiza un diagnóstico para determinar el tipo de refuerzo necesario a ejecutar.

Figura 7 – Tipos de intervención posibles en un diagrama de pérdida de resistencia frente al tiempo, C.E.B. 1983.

Un elevado porcentaje de las intervenciones realizadas en pilares plantean su refuerzo, ya sea por la propia necesidad de aumentar la capacidad resistente del elemento estructural o porque el alcance del daño así lo requiere.

Esta magnitud de intervenciones de refuerzo es lo que fomenta que las investigaciones se centren en el aspecto de refuerzo y que sea menor el número de investigaciones que estudian la reparación, o sea, la restitución del estado original.

2.2.2. Reparación por parcheo

En cuanto al parcheo con morteros de reparación, destacan los trabajos de Shambira y Nounu (2000), Sharif et al. (2006) y Aurrekoetxea (2009).

2.2.2.1. Shambira y Nounu (2000)

En su estudio experimental analizan el efecto de las deformaciones dependientes del tiempo (tales como la retracción y la fluencia) de los materiales de reparación del hormigón, en la capacidad del parcheo para contribuir al funcionamiento estructural de pilares cortos de hormigón armado.

Utilizan dos tipos distintos de morteros de reparación, comparando su comportamiento entre sí. Ambos morteros de reparación son comerciales, uno es un mortero polimérico y el otro es un mortero cementoso modificado con polímeros.

Todas las reparaciones se realizan con los pilares descargados. Y se ensayan a compresión axial desde la carga cero.

Para el estudio se ensayaron catorce pilares de las dimensiones y geometrías que se muestran en la siguiente figura (ver Fig. 8).

En la tabla 2 se detalla el programa experimental, las abreviaciones PM y PMM, corresponden respectivamente, uno al mortero polimérico y el otro al mortero cementoso modificado con polímeros.

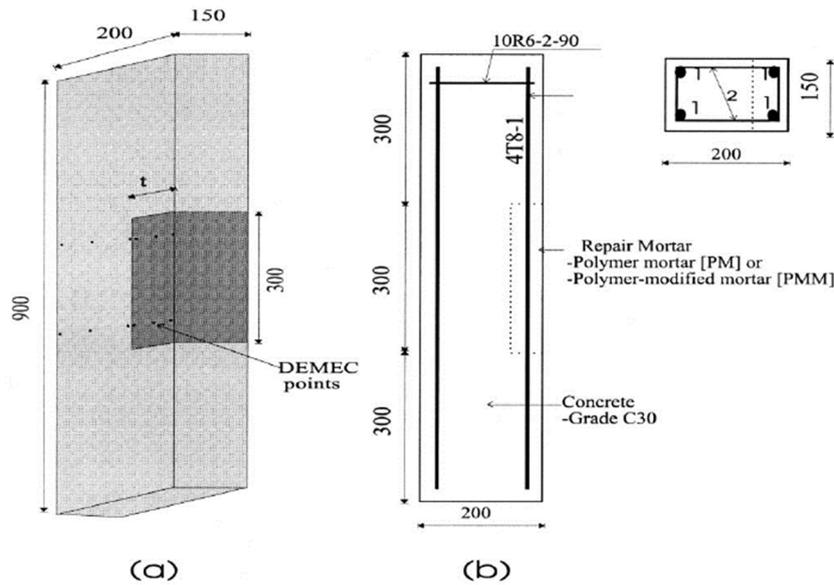


Figura 8 – Geometría de las columnas, Shambira y Nounu (2000)

	Dependent variables measured			Independent variables	
	Before repair Instantaneous elastic strain response	After repair Shrinkage strain	Shrinkage + Creep strain	Repair material	Cavity depth, <i>t</i>
PM1	✓	—	✓	PM	50
PM2	✓	—	✓	PM	75
PM3	✓	—	✓	PM	100
PM4	—	✓	—	PM	50
PM5	—	✓	—	PM	75
PM6	—	✓	—	PM	100
PM7	✓	—	✓	N/A	0
PMM1	—	—	✓	PMM	50
PMM2	—	—	✓	PMM	75
PMM3	—	—	✓	PMM	100
PMM4	—	✓	—	PMM	50
PMM5	—	✓	—	PMM	75
PMM6	—	✓	—	PMM	100
PMM7	—	—	✓	N/A	0

Tabla 2 – Programa experimental, Shambira y Nounu (2000)

Cuatro de los catorce pilares fueron puestos en carga antes de ser reparados para simular la elasticidad instantánea y después de la reparación se metieron en carga para comparar la respuesta elástica y observar el comportamiento dependiente del tiempo en un período de seis semanas.

La instrumentación se realizó mediante puntos DEMEC para representar todas las medidas de deformación longitudinal.

Como conclusiones obtuvieron, que el hueco del parcheo (pérdida de sección localizada en una cara del pilar) provoca una flexión en el pilar para la que no estaba diseñado a soportar. Después de la reparación, los dos morteros de reparación utilizados contribuyen, a corto plazo, a soportar la carga en el pilar. Esta contribución es mayor para el mortero de reparación con mayor módulo de elasticidad.

Otra de las conclusiones obtenida es que el mortero modificado con polímeros presenta mayor retracción que el mortero polimérico. Debido a estas mayores deformaciones dependientes del tiempo, del material de reparación con respecto al hormigón, la capacidad de soportar la carga del material de reparación se reduce tanto que su función estructural se pierde completamente en pocas semanas después de la reparación.

En cambio, la contribución del mortero polimérico si se mantuvo durante toda la duración del estudio.

Y para finalizar exponen que la flexión inducida por la retracción incrementa con el espesor de la reparación. Por lo tanto, el espesor de la reparación influye en la contribución de la transmisión de la fuerza de retracción desde el material de reparación hacia el hormigón.

2.2.2.2. Sharif et al. (2006)

Estudio experimental para evaluar la efectividad estructural de la reparación por parcheo en pilares cargados axialmente.

Se comparan los resultados utilizando dos clases de material de reparación, uno de bajo módulo de elasticidad y otro de alto módulo de elasticidad.

También estudian la influencia de la reparación para el pilar en estado de carga y en el estado descargado.

El programa experimental consistía en catorce pilares de hormigón armado con la geometría que se muestra en la siguiente figura (ver Fig. 9). El parcheo (reparación) se realizó en dos caras opuestas del pilar.

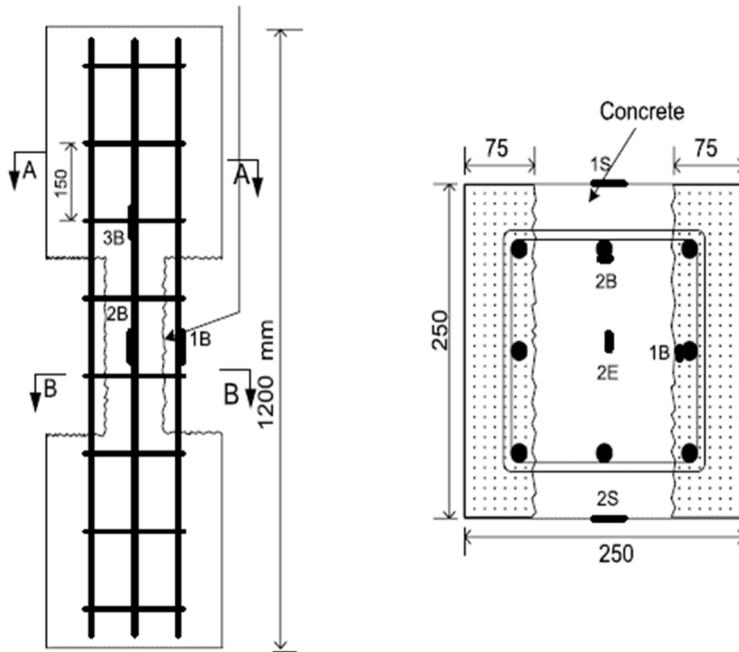


Figura 9 – Geometría de los pilares y de la reparación de los mismos, Sharif et al. (2006).

Los ensayos de rotura de los pilares se realizaron a velocidad de carga constante. La instrumentación se realizó mediante galgas extensométricas colocadas en las armaduras, embebidas en el hormigón y en la superficie del mismo, y para la zona de reparación igual que para el hormigón (embebidas y en la superficie).

Tras la campaña de ensayos concluyeron que:

- 1) La pérdida de sección de hormigón provoca un incremento de tensiones en el núcleo del pilar de hormigón y en las armaduras. En este estado, la capacidad de soportar las cargas se reduce sustancialmente y puede llevar al fallo del pilar si éste es sometido a altas cargas temporales. En los ensayos se muestra como se produce este fallo.
- 2) Para los pilares reparados en estado descargado, se demuestra la efectividad de la transmisión de cargas y la contribución de la reparación una vez entrado en carga el pilar. Esta transmisión de carga entre el parcheo, el núcleo de hormigón y las armaduras dependen del módulo de elasticidad y de las áreas que intervienen en la zona de reparación. Para un módulo de elasticidad similar (hormigón – material de reparación), las tensiones en el hormigón y en el parcheo son casi iguales, mientras que para un bajo módulo de elasticidad del material de reparación, las tensiones son sustancialmente menores en el material de reparación que en el hormigón.
- 3) Para los pilares reparados en estado de carga se observa que hasta que no se aplica una carga adicional, la reparación no contribuye en la transmisión de cargas. Para un material de bajo módulo de elasticidad del material de reparación, solo una pequeña parte de la carga adicional es compartida por el parcheo. Y esto provoca mayores tensiones en el núcleo del pilar. Si se usa un material de reparación con un

módulo de elasticidad similar al del hormigón, la carga adicional se comparte equitativamente entre el núcleo del pilar y el parcheo.

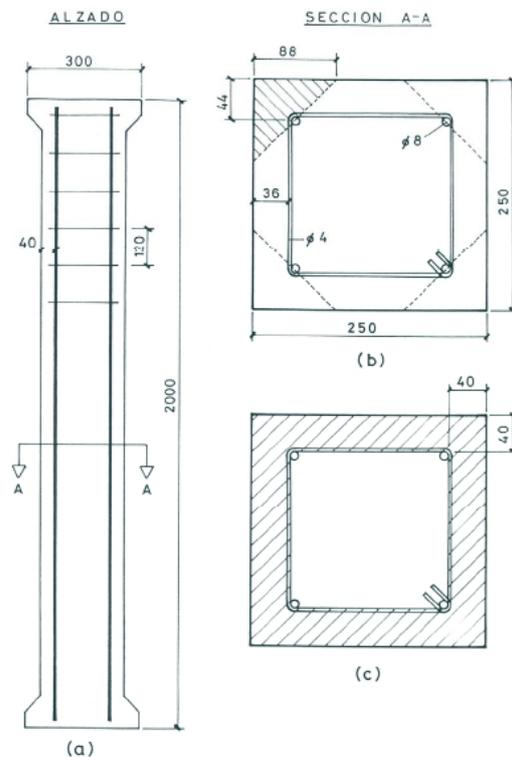
- 4) Para que el parcheo sea efectivo estructuralmente, se recomienda descargar totalmente el pilar y después proceder a la reparación. Si esto resulta difícil o es inviable económicamente, se recomienda al menos descargarlo parcialmente.
- 5) La contribución de la reparación a soportar las cargas para las reparaciones en estado descargado y para el estado cargado, presentaban una mejoría del 50% y 60% del total de la carga, respectivamente.

2.2.2.3. Aurrekoetchea (2009)

Estudio experimental en el cual se analiza la eficacia de la reparación de pilares de hormigón armado por la pérdida del recubrimiento, utilizando dos tipos de morteros y comparándolos entre sí.

La campaña de ensayos consistía en pilares reparados con pérdida de recubrimiento en dos esquinas, cuatro esquinas y en todo el recubrimiento de la parte central/base del pilar. Para la reparación y el estudio se han utilizado dos tipos de morteros, uno fluido para realizar la reparación mediante vertido y el otro un mortero tixotrópico para aplicación manual mediante llana.

Los pilares ensayados presentan una tipología como se muestra en la siguiente figura.



Nota: unidades en mm.

Figura 10 – Geometría de los pilares ensayados, Aurrekoetchea (2009).

El plan de ensayos consistía en una serie de 24 pilares, en las que se presentan los distintos daños que se pretendían estudiar, pilares dañados solo en dos esquinas de una cara del pilar, pilares dañados en las cuatro esquinas del pilar y por último, pilares con el daño en todo el recubrimiento. La longitud del daño para los tres casos expuestos era de 90 cm localizada en la parte central del pilar.

Los pilares fueron ensayados a compresión centrada.

La instrumentación utilizada fueron extensómetros colocados en las armaduras y en la superficie del hormigón y del material de reparación.

De los datos experimentales obtenidos, observaron que para el caso de la reparación, con mortero aplicado mediante vertido, de los pilares con una pérdida de sección de dos esquinas y una pérdida de resistencia del 11%, se recupera el 8% de la capacidad resistente. Para el caso de las cuatro esquinas con una pérdida del 23% de la resistencia, la reparación mediante el mortero aplicado por vertido se recupera el 22% y con el mortero aplicado mediante llana se recupera el 11%. Para los pilares con una pérdida total del recubrimiento y con una pérdida del 43% de la resistencia, se llega a recuperar el 40% de la capacidad resistente.

Se concluye para el mortero fluido (colocado por vertido) la eficacia es mayor que con respecto al mortero aplicado manualmente mediante llana.

También se observa que se produce una excentricidad en el pilar dañado en dos esquinas, debido a las mayores deformaciones que se presentan en esas zonas.

Se puede ver un retraso en la deformación de las zonas reparadas con respecto al hormigón del pilar, y esto es debido al deslizamiento relativo entre los distintos materiales por la diferencia de rigidez de los mismos. Con esto se hace notar la necesidad de utilizar materiales con módulo de elasticidad similar.

En la tabla 3 a y b, se muestran los valores de las resistencias a compresión de los pilares para los distintos grados de reparación que se ejecutaron.

SERIE	CARGA DE ROTURA EN KN EN PILARES					
	Referencia	Sin cuatro esquinas	Rep. Cuatro esquinas mortero esp. colable	Rep. Cuatro esquinas mortero esp. llana	Sin dos esquinas	Rep. Dos esquinas mortero esp. colable
2	1.170,28	870,85	1.150,64	1.079,1	998,47	1.072,105
3	1.047,56	784,95	1.023,016	882,9	915,028	1.018,11
5	993,57	811,95	1.008,3	882,9	939,57	1.025,48
MEDIAS	1.070,47	822,58	1.060,65	948,3	951,02	1.038,57
% sobre refer.	100	76,8	99,0	88,6	88,8	97,0

Tabla 3 a- Valores de las resistencias a compresión de los pilares ensayados, Aurrekoetchea (2009)

SERIE	CARGA DE ROTURA EN KN EN PILARES		
	Referencia	Sin recubrimiento	Reparado el recubrimiento
4	1.023,016	603,32	1.010,74
	1.030,05	573,88	978,84
MEDIAS	1.026,54	588,6	994,8
% sobre referencia	100,00	57,3	96,9

Tabla 3 b- Valores de las resistencias a compresión de los pilares ensayados, Aurrekoetchea (2009)

2.2.3. Reparación Integral a 1 cara

En cuanto a la reparación integral a 1 cara en pilares, se encuentra solo el estudio de Pellegrino et al. (2009).

2.2.3.1. Pellegrino et al. (2009)

El principal objetivo de este estudio es la compatibilidad y eficiencia de las intervenciones de rehabilitación de pilares de hormigón armado mediante morteros cementosos modificados con polímeros. Los ensayos se realizan para diferentes espesores de reparación, el cual incluye o no las armaduras longitudinales en una de las caras del pilar, de esta manera se podrán verificar la influencia del espesor de la reparación. El material de reparación utilizado presenta similares propiedades mecánicas que el hormigón de los pilares.

El programa experimental consistía en seis pilares con la geometría y características que se presentan en la siguiente figura (ver Fig. 11). Los espesores de reparación fueron dos, uno de 50 mm que incluía la armadura longitudinal y el otro de 15 mm que no incluía la armadura longitudinal.

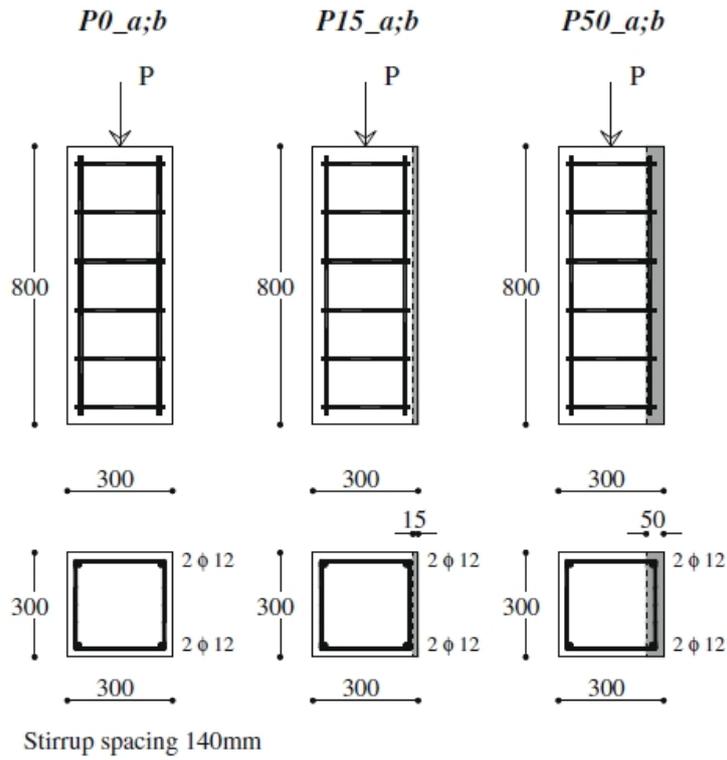


Figura 11 – Geometría y características de los pilares ensayados, Pellegrino et al. (2009).

La instrumentación se realizó mediante seis transductores de presión colocados tal y como se indican en la figura siguiente.

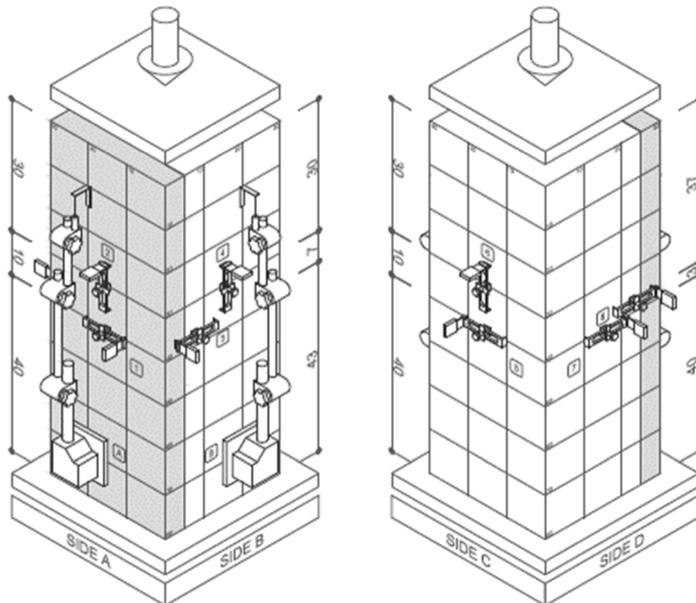


Figura 12 – Instrumentación de los pilares ensayados, Pellegrino et al. (2009).

Como conclusión principal se obtiene que la reparación con un espesor que incluye la armadura longitudinal muestra buenas propiedades, un comportamiento estable, transmisión de cargas y plastificación del material antes del fallo, mientras que para un espesor fino de reparación, el cual no incluye la armadura longitudinal, no muestra un comportamiento adecuado debido a que se produce un despegue prematuro.

Los resultados demuestran que con la reparación integral a una cara, no restablecen completamente la capacidad de carga, es decir, una vez dañado el elemento y reparado el nivel de carga que podrá soportar el elemento será inferior al nivel de carga original, estimado aproximadamente un 9% menor.

La efectividad de la reparación, en este caso, queda demostrada que va en función del espesor de la reparación. Para espesores donde solo se realiza el recubrimiento de las armaduras, pero sin envolverlas, se produce el despegue prematuro del material de reparación para un nivel de carga del 33% menor que la carga última original.

Para el caso de un espesor de reparación en el que se incluye el armado, el comportamiento del pilar era mejor, soportando un 90% de la carga última. En este caso el despegue solo se produce en las esquinas del pilar, y el material de reparación continúa contribuyendo a soportar la carga conjuntamente con el resto del elemento estructural.

2.2.4. Reparación integral a cuatro caras

En cuanto a la reparación integral a cuatro caras, propiamente dicho, el único estudio que se haya es el de da Porto et al. (2012).

2.2.4.1. da Porto et al. (2012)

Este estudio experimental trata la reparación de pilares de hormigón armado en sus cuatro caras y sometidos a carga axial. Para evaluar la eficiencia de la reparación utilizan tres tipos de morteros cementosos modificados con polímeros. Analizando así el comportamiento de las reparaciones con la variación de las propiedades mecánicas del material de reparación, como son el módulo de elasticidad y la resistencia a compresión, el espesor de reparación es el mismo para todas e incluye la armadura longitudinal.

El programa experimental consistió en la fabricación de ocho pilares, de los cuales seis fueron reparados con los distintos materiales de reparación, y los otros dos fueron usados como pilares patrón, uno para el estado no dañado y el otro para el estado dañado sin reparar. La geometría de estos pilares se muestra en la siguiente figura (ver Fig. 13), al igual que las propiedades principales de los materiales usados se presentan en la siguiente tabla (ver tabla 4).

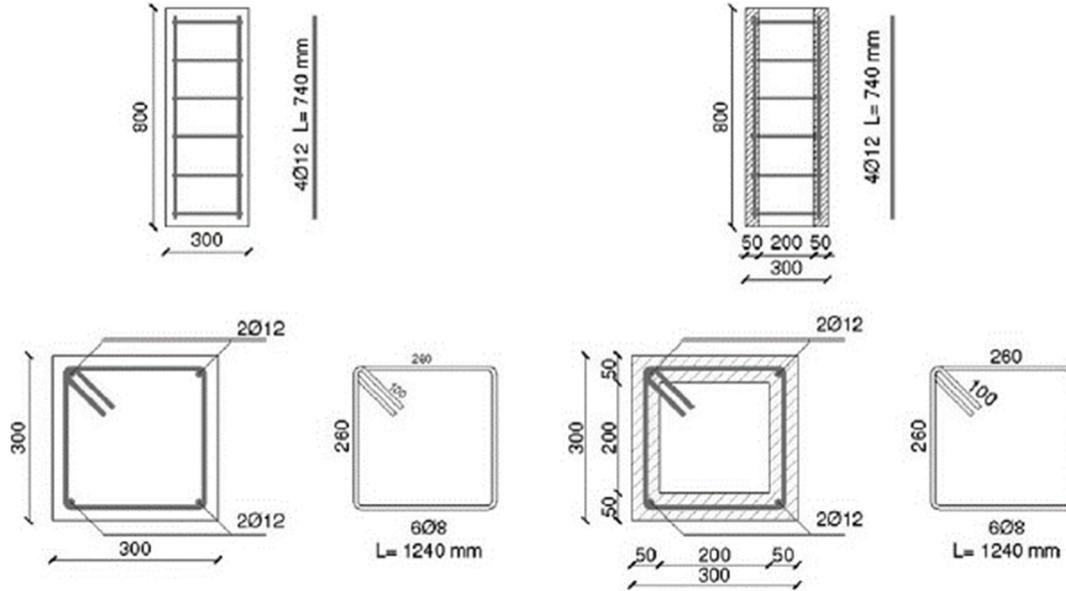


Figura 13 – Geometría de los pilares ensayados, da Porto et al. (2012).

Property	Concrete C42/50	Mortar type a	Mortar type b	Mortar type ab
Mean tensile strength (N/mm ²) [15]	3.35	3.96	4.78	4.52
Mean flexural strength (N/mm ²) [16,17]	-	6.79	8.20	7.76
Mean cubic compressive strength (N/mm ²) [16,17]	50.83	60.92 (+20%)	44.40 (-12%)	55.15 (+9%)
Mean elastic modulus (N/mm ²) [18]	31,350	29,210 (-7%)	25,540 (-19%)	28,180 (-10%)
Granulometry (mm) [19]	-	-	0.00-4.00	-
Water content (l/kg)	-	-	0.17	-
Degradability to sulfates [20]	-	-	Absent	-
Density (kN/m ³) [21]	-	-	20.00	-
Diffusion resistance of CO ₂ [22]	-	-	$\mu > 190$	-
Diffusion resistance of vapor	-	-	$\mu > 60$	-
pH	-	-	>12	-

Tabla 4 – Propiedades mecánicas, físicas y químicas de los materiales, da Porto et al. (2012).

La instrumentación se llevó a cabo mediante transductores de presión colocados en las superficies del pilar, y las armaduras se instrumentaron mediante galgas extensométricas, tal y como se muestran en la figura siguiente.



Figura 14 – Instrumentación de las armaduras, da Porto et al. (2012).

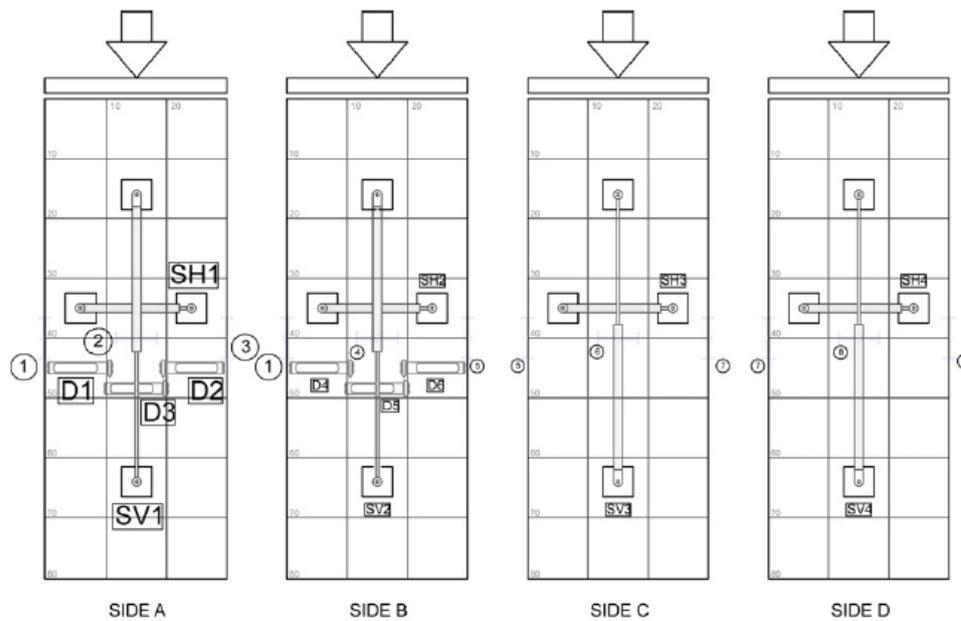


Figura 15 – Instrumentación de las superficies del pilar, da Porto et al. (2012).

La conclusión principal a la que llegaron los autores en este estudio es que los pilares reparados no restituyen el 100% de la capacidad de carga original.

La comparación de las reparaciones con los tres tipos de materiales de reparación, muestra que el mortero con el módulo de elasticidad similar al hormigón y la resistencia a compresión mayor que la del hormigón, presenta mejor comportamiento frente a los otros dos tipos de morteros usados. En la siguiente tabla se pueden observar los porcentajes de restitución de la capacidad portante con respecto al espécimen de control.

Results of axial tests.

Column	Stress at ultimate load (N/mm ²)	Ratio repaired column/control column
P0_1	25.55	–
P0_2	28.49	–
P50_a1	25.55	0.95
P50_a2	25.18	0.93
P50_b1	23.15	0.86
P50_b2	22.97	0.85
P50_ab1	23.36	0.86
P50_ab2	23.38	0.86

Tabla 5, resultados de los ensayos a compresión, da Porto et al. (2012).

2.2.4.2. Otros casos de estudio

Como se ha detallado en la introducción de este capítulo, vemos que el porcentaje de literatura con respecto a la reparación integral a cuatro caras representa un porcentaje

del 92%, pero más bien son casos de “refuerzos” por confinamiento. Desde este enfoque de refuerzo del pilar se encuentran autores relevantes como son Ramírez (1975 y 1977); Bett (1988); Rodríguez y Park (1994); Ersoy et ál. (1993); Fukuyama (2000); y Navarrete (2003), que centran sus investigaciones en el refuerzo de pilares mediante el recrecido de hormigón, aplicando la carga a compresión simple, compresión compuesta, compresión simple más carga cíclica cortante y compresión simple más carga cíclica lateral.

En estudios más recientes como Julio (2003) se hace una revisión del refuerzo mediante el recrecido de hormigón, recordando las diferentes características que se presentan. Otra investigación interesante, es la que presenta Ong et al. (2004) donde estudia la predicción de la relación carga-deformación bajo carga axial, en dos situaciones de confinamiento, una para toda la longitud del pilar, y otra solo en alguna zona del pilar. Y en 2006 Vandoros y Dritsos, presentan el estudio del efecto de la precarga del pilar antes del refuerzo y como esta situación afecta en la mejora de la resistencia y de la capacidad de deformación, pero como disminuye la rigidez inicial.

2.3. Conclusiones

A día de hoy la literatura científica y técnica recoge muchas investigaciones sobre pilares, pero enfocadas en su mayoría al refuerzo con materiales compuestos, ya que las ventajas que presentan son elevadas con respecto a los otros sistemas de refuerzo existentes, dejando en el olvido el refuerzo mediante recrecido de hormigón o mortero de reparación.

Con todo esto es fácil de entender la escasa o casi inexistente documentación que existe en referencia a la “Reparación integral a cuatro caras” de pilares, es decir, reconstruir o restituir íntegramente el pilar en sus cuatro caras hasta su sección original, sin incremento alguno de armadura o sección geométrica.

En la siguiente figura se observa para las investigaciones de refuerzo de pilares, que el número de artículos publicados de FRP (materiales compuestos) es el mayor con respecto al resto de métodos de refuerzo.

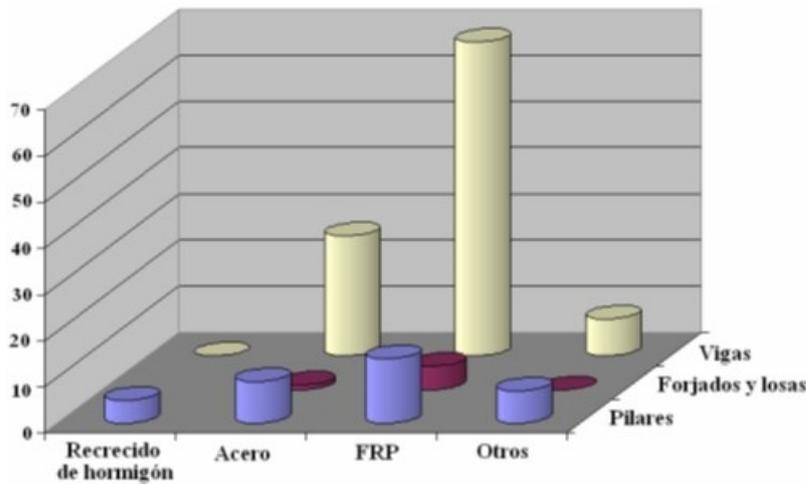


Figura 16 – Número de artículos publicados en función del tipo estructural y método de refuerzo (Giménez, 2007).

Los estudios de refuerzo mediante recrecido con hormigón se basan en el aumento de la resistencia a compresión, en el estudio de la rigidez y la ductilidad del pilar, principalmente. Este sistema presenta una gran compatibilidad entre los distintos materiales que entran en contacto, el hormigón antiguo y el mortero de reparación o el hormigón nuevo, ambos de la misma naturaleza y propiedades mecánicas que el hormigón original. Otra ventaja que presenta es la amplia superficie de contacto que facilita y posibilita la transferencia de cargas. Frente a la acción del fuego presenta un buen comportamiento, siendo este aspecto importante a la hora de elegir el sistema a utilizar para el refuerzo.

Pero frente a otras situaciones como el sismo, que es una de las variables más estudiadas en todas las investigaciones consultadas, este tipo de refuerzo presenta un gran inconveniente que es su rigidez que se ve incrementada, alterando la distribución de esfuerzos en el conjunto de la estructura, haciéndola menos adecuada para absorber el esfuerzo a cortante.

Dada las escasas y casi inexistentes referencias de estudios e investigaciones sobre el grado de contribución que aportan las reparaciones al pilar, para cada grado o alcance de reparación (reparación integral a cuatro caras, reparación integral a una cara y reparación por parcheo), se palpa la necesidad de una guía donde se clarifiquen y definan las ideas planteadas anteriormente. Es decir, conocer cómo es el comportamiento del conjunto (núcleo de hormigón + material de reparación); y cómo se realiza la transmisión de fuerzas/cargas en el conjunto del elemento estructural.

Considerando los tres grados de reparación descritos con anterioridad, parece necesario realizar también un estudio comparativo entre las mismas. De esta se podrían establecer unos puntos o pautas de partida para la selección y ejecución de las distintas técnicas de reparación estructural, definiendo que técnica es más efectiva dependiendo del grado de compromiso estructural del elemento a reparar.

A modo de resumen de las investigaciones recopiladas en este capítulo se realzan los datos más relevantes para los tres grados de reparación:

Reparación Por Parcheo

Shambira y Nounu (2000) Las reparaciones a corto plazo, para ambos tipos de mortero de reparación, contribuyeron a soportar las cargas. Pero a largo plazo la contribución del mortero modificado con polímero se redujeron sustancialmente, mientras que el mortero polimérico si continuó soportando la carga.

Sharif et al. (2006) Los resultados indicaron que la reparación por parcheo era efectivamente estructural cuando los pilares eran reparados en estado descargado. Mientras que para el estado cargado, solamente era efectiva la reparación cuando se aplicaba una carga adicional.

La contribución de la reparación a soportar las cargas para las reparaciones, en estado descargado y para el estado cargado, presentaban una mejora del 50% y 60% del total de la carga, respectivamente.

Aurrekoetchea (2009) La reparación mediante la aplicación del mortero por vertido resultó ser más eficaz que la aplicación mediante llana, para los tres casos de reparación.

- Pilares con pérdidas de sección en dos esquinas y reparados mediante mortero por vertido: se recuperó el 8% de la capacidad resistente.
- Pilares con pérdidas de sección en las cuatro esquinas: para la reparación con mortero por vertido se recuperó un 22% de la resistencia, y para la reparación con mortero aplicado con llana se recuperó un 11% de la capacidad resistente.
- Pilares con pérdida total del recubrimiento: se recuperó el 40% de la capacidad resistente.

Reparación Integral a 1 Cara

Pellegrino et al. (2009) La efectividad de la reparación va en función del espesor de la reparación. Para espesores donde solo se restablece el recubrimiento de las armaduras pero sin envolverlas, se produce una pérdida de la resistencia del 33% con respecto a la carga última original.

Para el caso de un espesor de reparación en el que se incluye la armadura, se produce una pérdida de la resistencia del 10% con respecto a la carga última original.

Reparación Integral a 4 Caras

da Porto et al. (2012)

Los pilares reparados no restituyen el 100% de la capacidad de carga original.

Las reparaciones que mejor comportamiento presentaron fueron las realizadas con un mortero con módulo de elasticidad similar al hormigón y la resistencia a compresión mayor que la del hormigón.

- Pilares reparados con mortero tipo a: presentaron un porcentaje medio de restitución de la capacidad portante con respecto al espécimen de control del 94%.
- Pilares reparados con mortero tipo b: presentaron un porcentaje medio de restitución de la capacidad portante con respecto al espécimen de control del 85'5%.
- Pilares reparados con mortero tipo ab: presentaron un porcentaje medio de restitución de la capacidad portante con respecto al espécimen de control del 86%.

CAPÍTULO 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Tras observar la falta de información, las grandes lagunas que existen, y principalmente, lo ineficaz que en ocasiones resulta la reparación efectuada, se plantea la necesidad de este proyecto de investigación “Contribución al estudio del comportamiento de pilares de hormigón armado reparados mediante morteros predosificados sometidos a compresión centrada”.

En este capítulo se presenta el programa de investigación experimental. En él se describen tanto los ensayos de caracterización de los materiales que se utilizan como los ensayos que se realizaron a los pilares de hormigón armado y reparados mediante morteros de reparación a escala reducida.

Se comenzará con la descripción metodológica del programa experimental diseñado, planteando los objetivos, las condiciones y variables que se han establecido.

Seguidamente se detallarán las características geométricas y de los materiales empleados en la investigación.

Se expondrá la justificación de las variables introducidas para analizar y comparar el comportamiento de las distintas reparaciones realizadas en los pilares:

- 1) Tipos de morteros de reparación (R3 y R4 de acuerdo con la UNE-EN 1504-3:2006).
- 2) Utilización o no del puente de unión entre el hormigón original y el material de reparación.

Una vez expuestas las variables se pasará a describir la campaña de ensayos realizados. En este apartado se explica el pórtico de ensayos utilizado y la instrumentación usada en la campaña de ensayos.

Los equipos y sistemas de adquisición de datos utilizados fueron facilitados por el Laboratorio del Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH) de la Universitat Politècnica de València.

3.1. Descripción metodológica

El objeto de este proyecto es definir el modo o técnica correcta de reparación, comparando los distintos modos o técnicas enunciados anteriormente, estudiando el comportamiento del conjunto y la contribución de la reparación al elemento de hormigón. Así poder estudiar la efectividad de la reparación mediante morteros de reparación predosificados de pilares sometidos a compresión centrada. Se pretende determinar la influencia de las distintas variables geométricas, mecánicas y constructivas que afectan a la reparación en la resistencia a compresión de los pilares. De esta forma, se persigue obtener una serie de reglas básicas de diseño de la reparación.

A la hora de plantear el programa experimental surgieron una serie de condicionantes:

- 1) La geometría de los pilares debía presentar un correcto comportamiento para que el flujo de tensiones se transmitiera de forma que la rotura se presentará en la zona central de los pilares.
- 2) Se optó por una altura de pilar reducida para poder adaptarnos a las condiciones del laboratorio.

El abanico de variables que pueden intervenir en una reparación es bastante amplio: espesor de la reparación, localización y geometría de la zona a reparar, características mecánicas, físicas y químicas de los materiales de reparación y del hormigón original (módulo de elasticidad, resistencia a compresión, retracción, coeficiente de expansión térmica, adherencia a tracción y a cortante, etc.), aplicación de los materiales de reparación (manual mediante llana, proyectado o vertido), reparación en estado de carga o estado descargado, etc.

Ante la imposibilidad de plantear una serie de ensayos donde estudiar todas las combinaciones de las variables existentes, se decidieron analizar una serie de variables y el resto son fijadas para la simplificación de la investigación. Las variables objeto de estudio son:

- 1) Grado o alcance de la reparación: integral a cuatro caras, integral a una cara y reparación por parcheo.
- 2) Utilización de puente de unión o no entre el hormigón original y el mortero de reparación.
- 3) Clase de mortero: Clase R4 y Clase R3 de acuerdo a la clasificación de la UNE-EN 1504-3:2006.

Los valores que se establecen como fijos son:

- 1) La geometría del pilar de sección cuadrada de 20x20 cm y una longitud de 136 cm.
- 2) La resistencia del hormigón $f_c \approx 15 - 17$ MPa.
- 3) Los pilares no son sometidos a un estado de carga previa ni antes ni durante la reparación de los mismos.
- 4) El espesor de la reparación será para los tres tipos de reparación el mismo, entre 30 - 60 mm. En todos los casos el mortero de reparación recubre (embebe) todo el perímetro de la armadura.

Para encontrar el diseño adecuado para los pilares se hicieron unos ensayos previos y poder comprobar cómo se comportaba el pilar hasta llegar a la rotura. En esta fase se realizaron tres pilares con la geometría y armado que se muestra en la siguiente figura.

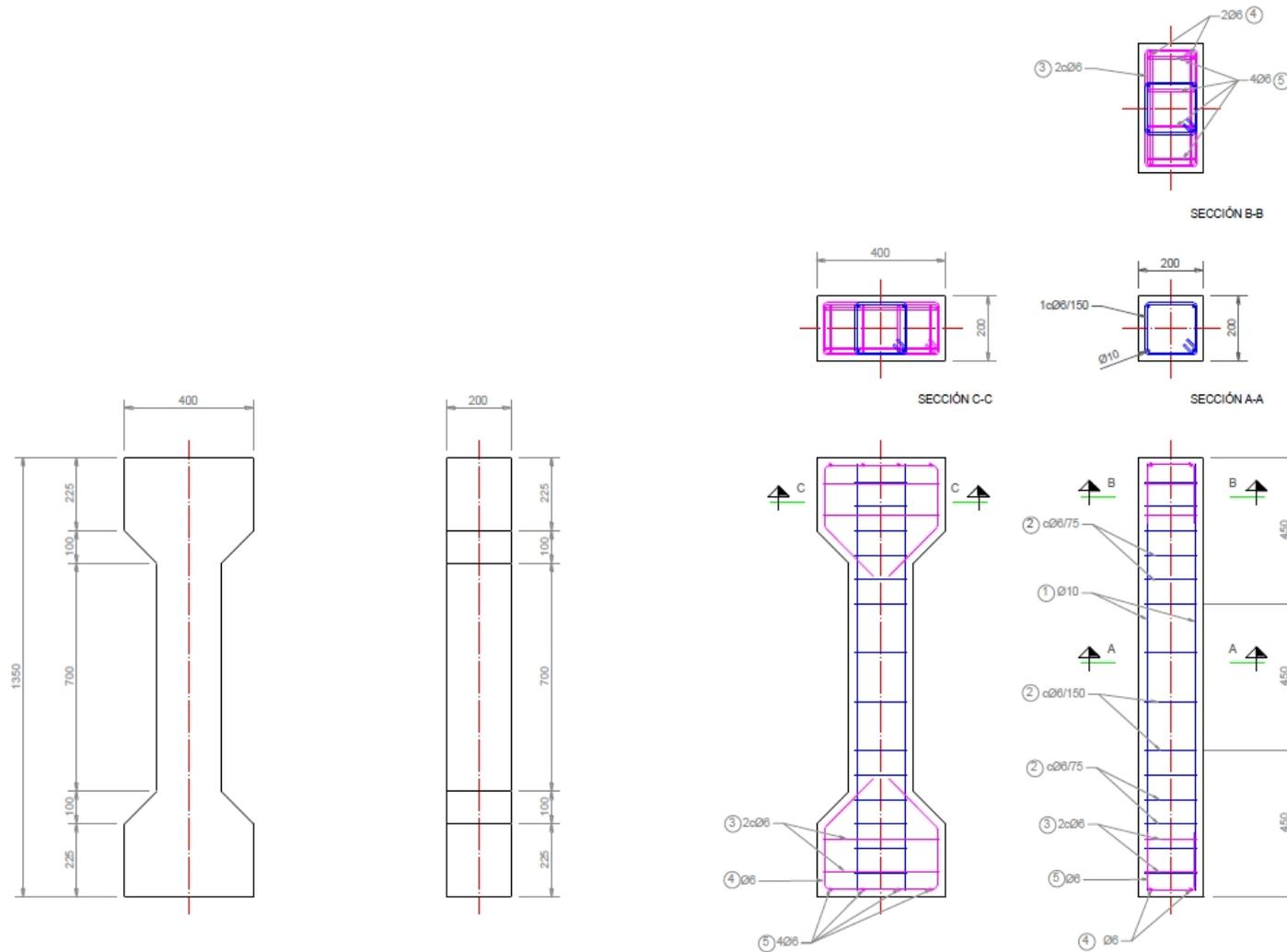


Figura 17 – Detalles de la geometría y armado de los pilares previos.

Los ensayos de rotura se realizaron a los 19 días del hormigonado puesto que eran simplemente para analizar la forma de rotura de los pilares, no era necesario esperar los 28 días de secado del hormigón.

Tras finalizar los ensayos, se observa como el fallo de los pilares comienza en las cabezas, tanto en la base como en el capitel, y éste se extiende hacia la zona central del pilar (ver Fig. 18). Otro dato a tener en cuenta es la chapa de reparto se hunde en la cabeza del pilar de hormigón debido a que no la cubre en su totalidad, provocando mayores tensiones localizadas en esas zonas (ver Fig. 19).



Figura – 18 Fotografías fallo cabezas pilares (cara delantera).

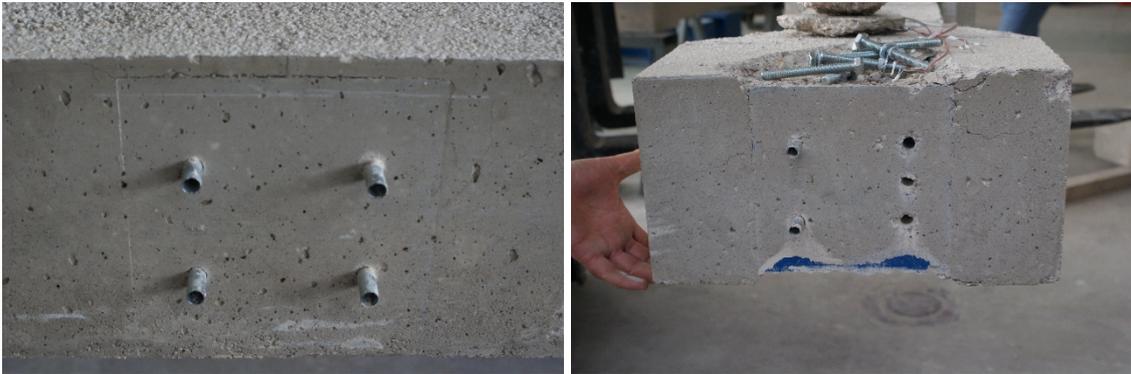


Figura – 19 Fotografías hundimiento placa de reparto.

Para descartar que el fallo prematuro de las cabezas fuera provocado por la placa de reparto, se añadió otra placa de mayor tamaño (ver Fig. 20), de manera que cubriera toda la cabeza del pilar, y encima de esta nueva chapa colocar las placas de apoyo del pórtico, y de esta forma se ensayó otro de los tres pilares de esta primera fase de pruebas.



Figura 20 – Fotografía del detalle de las placas de reparto.

Como se observa en las siguientes figuras (ver Fig. 21), el fallo prematuro se sigue produciendo en las cabezas del pilar, por lo que se deduce al estudiar en detalle el armado de las cabezas de los pilares, que este era insuficiente para que el flujo de cargas se produjera correctamente en todo el pilar.



Figura 21 – Fotografías rotura del pilar previo.

Tras ensayar dos de los tres pilares previstos, se decide rehacer el armado de las cabezas de los pilares para evitar este comportamiento de rotura.

Para la segunda fase de ensayos previos se hormigonaron cuatro pilares con la geometría y armado que se muestra en la siguiente figura.

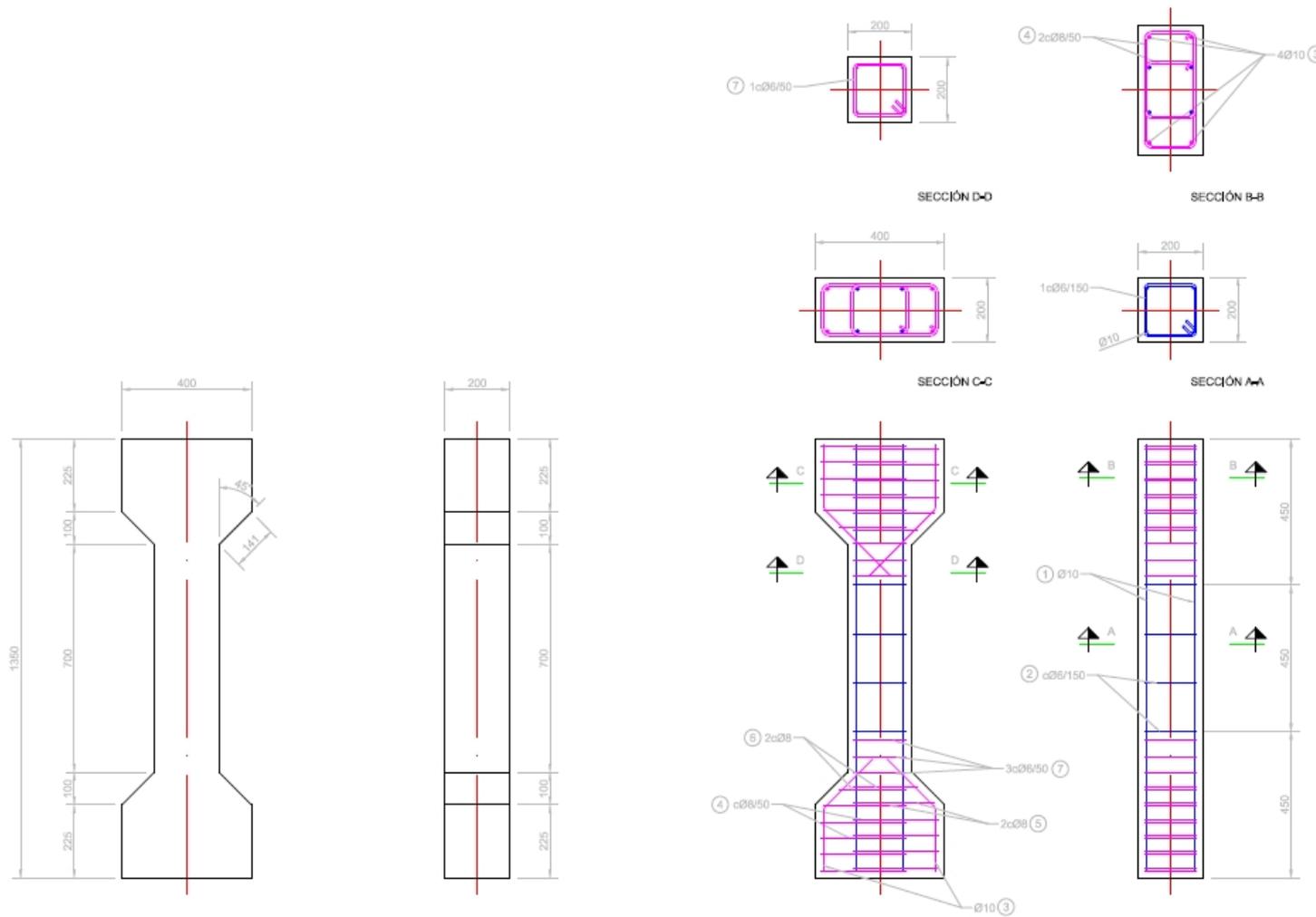


Figura 22 – Detalles de la geometría y armado de los pilares previos, segunda fase.

En esta tanda de pruebas, además de aumentar la cuantía de armado de las cabezas a los cuatro pilares, a dos de ellos se hormigonaron con dos clases de hormigón, para las cabezas se utilizó mortero de altas resistencias y para la zona central del pilar se utilizó el hormigón con las resistencias características deseadas ($f_c \approx 15 - 17$ MPa). Los otros dos pilares se hormigonaron en su totalidad con el hormigón normal ($f_c \approx 15 - 17$ MPa).



Figura 23 – Detalles del hormigonado para los dos diseños de la segunda tanda de pruebas.

Al igual que la fase anterior, los ensayos de rotura se realizaron a los 15 días del hormigonado de los pilares.

Tras ensayar los cuatro pilares y analizar el comportamiento de rotura, se observa que ambos diseños son adecuados puesto que el fallo del pilar se produce en la zona central del pilar, como se puede ver en las siguientes figuras (ver Fig. 24 y 25). Por lo tanto, se opta por el diseño del pilar cuyo hormigonado se realiza en una sola tanda, es decir, todo el pilar hormigonado con el mismo hormigón, de esta manera se simplifica la fabricación de los pilares.



Figura 24 – Detalle rotura pilar hormigonado en una sola vez



Figura 25 – Detalle rotura pilar hormigonado en dos veces (cabeza y zona central).

3.2. Características del elemento a ensayar

Se pretende ensayar el comportamiento de las distintas reparaciones expuestas anteriormente en pilares con características de aproximadamente hace cuarenta o cincuenta años, puesto que son los que por su edad se encuentran en mayor necesidad de ser reparados. También se decidió simular estas características ya que son elementos estructurales con baja calidad del hormigón, entorno a los 10-15 MPa. Esta baja calidad del hormigón hace interesante su estudio debido a que los materiales de reparación que existen en el mercado presentan unas características mecánicas, físicas y químicas muy distintas a los hormigones de esas épocas, por lo tanto, es muy difícil estar cerca de los requerimientos para la compatibilidad entre el hormigón original y el material de reparación, de acuerdo a los estudios hechos por *Emberson y Mays (1990)*.

Los datos relativos a las características y propiedades de los hormigones y materiales de reparación utilizados para estos ensayos se recogen en el Anejo 1 del presente documento.

La fabricación de los pilares se realizaron en las instalaciones de la empresa colaboradora HADES CONSTRUCCIONES Y CREACIONES 2003 S.L.

La fabricación del hormigón de todos los pilares para los ensayos previos se realizó en una hormigonera eléctrica de la marca Umacon. Todos los pilares se hormigonaron con la misma amasada, tanto en la primera tandas de ensayos previos como en la segunda. La dosificación para un hormigón entorno a los 10-15 MPa fue facilitada por la empresa que suministró los materiales para la confección del hormigón (empresa fabricante de cementos).



Figura 26 – Fabricación del hormigón de los pilares para los ensayos previos.

Dosificación	H-150 B-20
Tipo de Cemento	CEM II/A-V 42.5 R
Cemento	220 Kg/m ³
Arena Triturada 0/4	792 Kg/m ³
Arena Lavada 0/4	343 Kg/m ³
Grava 4/11	206 Kg/m ³
Grava 11/22	688 Kg/m ³
Plastificante	1,2%
Agua	165 Kg/m ³
Fibras PP	2414 Kg/m ³

Tabla 6 – Dosificación del hormigón para los ensayos previos.

Para la armadura de los pilares se utilizó un acero B-500S con la cuantía y disposición que se muestra en la figura 22. La armadura longitudinal consistía en 4 barras de diámetro 10 mm y cercos de 6 mm de diámetro en la zona central del pilar, y en las cabezas de los pilares, los cercos eran de 8 y 10 mm de diámetro. Como se aprecia en la figura 22, las cabezas van fuertemente armadas ya que su misión es ser lo suficientemente resistentes para transmitir el axil suministrado por el gato hidráulico del pórtico de ensayos a la zona central del pilar, el cual es el tramo objeto de estudio.

Para la selección de las características geométricas del pilar a ensayar se optó por la mostrada en la figura 22. Las dimensiones de los pilares coinciden con las de la investigación desarrollada por D. José Luis Bonet Senach, lo que además de proporcionar especímenes válidos para los objetivos de la investigación, permitía compatibilizar el uso del pórtico de ensayos entre las dos investigaciones. Por lo tanto, se realizó una adaptación del diseño de los pilares del Proyecto llevado a cabo por el Dr. José Luis Bonet Senach perteneciente al Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH) de la Universitat Politècnica de València.

En la siguiente figura se puede ver con detalle la geometría y disposición y cuantía del armado de los pilares.

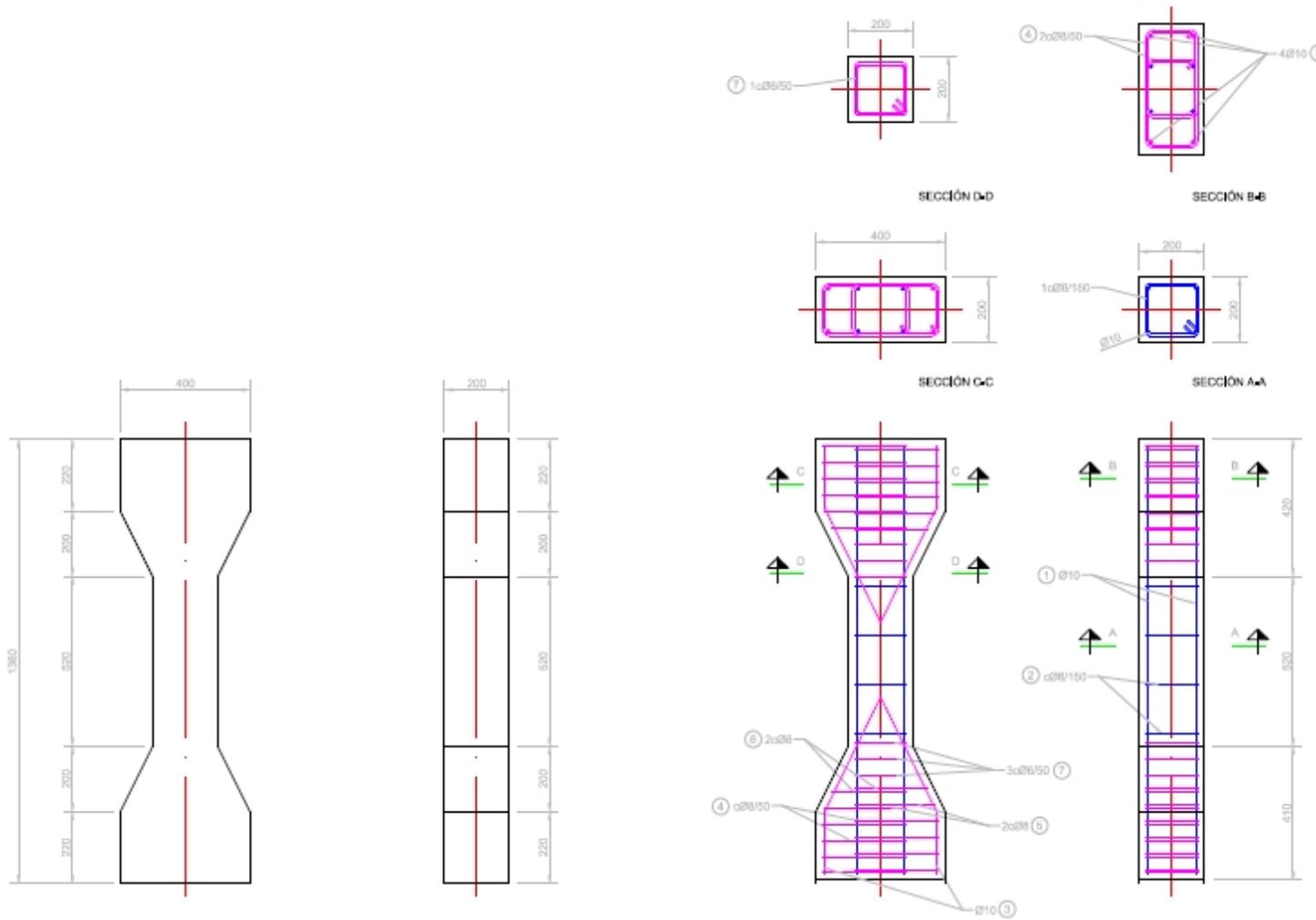


Figura 27 – Detalles de la geometría y armado de los pilares de ensayo.

3.3. Justificación de las variables a utilizar

El modo de reparación por parcheo es el más extendido en su uso, ya que el factor económico ejerce una gran influencia en la toma de decisión a la hora de reparar los daños. Generalmente estas reparaciones de pequeña envergadura no suelen ir acompañadas de un proceso, y por lo tanto, de un proyecto de reparación supervisado por un técnico, en el cual se evalúen el alcance de los daños y se plantee qué modo o técnica de reparación es la adecuada. Es frecuente en estos casos, encontrar al cabo de los pocos años, entre los cinco primeros años, el fallo de la reparación por parcheo.

En este estudio se pretende hallar la efectividad de la reparación en el elemento estructural. Para ello se plantea comparar entre sí los grados o alcances de la reparación, y evaluar qué grado de contribución presenta cada una al pilar.

Se reparan una serie de pilares mediante reparación por parcheo, otra mediante reparación integral a una cara y una última serie mediante reparación integral a cuatro caras.

Otra variable interesante de estudio y que genera bastante controversia, es la utilización o no de puente de unión para mejorar la adherencia entre los distintos materiales, mortero de reparación y hormigón original.

La adherencia es uno de los factores fundamentales para que una reparación sea efectiva, ya que es parte responsable en la transmisión de las tensiones entre los distintos materiales.

Hay diversas maneras de mejorar la adherencia entre los materiales que están en contacto, puede ser mediante una adherencia mecánica o una adherencia química. Conviene en este momento recordar en qué consiste cada tipo de adherencia:

- Adherencia mecánica: se requiere cierto grado de porosidad superficial, ya que la unión se produce por la penetración del material de reparación en los poros del sustrato, creando los puntos de anclaje.
- Adherencia química: se produce una reacción química entre el sustrato y el material de reparación.
- Adherencia mecano-química: se dan los dos tipos de adherencia anteriores al mismo tiempo.

Con esta variable se pretende estudiar la influencia de la colocación o no del puente de unión. En este caso se presentarán dos tipos de adherencia:

- Adherencia mecánica: cuando no se utilice ningún puente de unión entre el mortero de reparación y el hormigón original.
- Adherencia mecano-química: cuando se utilice el puente de unión entre el mortero de reparación y el hormigón original.

Para las tres series de reparaciones se usará esta variable, se han fabricado probetas en las que se ha utilizado el puente de unión y otras que no, y serán comparadas entre sí para analizar y concluir la necesidad o no del uso del puente de unión para mejorar la adherencia.

La última variable que se planteó es la utilización de la clase de mortero según la define la UNE-EN 1504-3:2006, clase R3 y clase R4.

Los dos tipos de mortero se usan para reparaciones estructurales, y su diferenciación radica en sus características mecánicas, químicas y físicas.

Muchas de las investigaciones realizadas en torno a las propiedades y requerimientos de los materiales de reparación, tratan esta variable.

En esta investigación se pretende definir qué clase de mortero es más adecuado dependiendo qué modo o técnica de reparación se realice, ya que en cuando se realizan trabajos, con proyectos o no de reparación, se desconocen las características mecánicas, físicas y químicas del hormigón original, y por consiguiente, no se puede elegir el material de reparación en función a los requerimientos expuestos por varios autores entre los que destaca *Emberson y Mays (1990)*.

3.4. Ensayos

Una vez fijado las características de los pilares y definidas las variables que iban a actuar, se diseñan las distintas series de probetas a ensayar según las variables establecidas.

	Parqueo	Rep. Inte. 1 Cara	Rep. Inte. 4 Caras	Patrón Sin Daño
Patrón sin daño				3
Patrón daño	3	3	3	
Mortero R3 sin puente de unión	3	3	3	--
Mortero R3 con puente de unión	3	3	3	--
Mortero R4 sin puente de unión	3	3	3	--
Mortero R4 con puente de unión	3	3	3	--

Tabla 7 - Esquema de las variables.

En total se ensayaron 48 pilares, de los cuales 12 fueron pilares testigos. De estos pilares testigos, 3 de ellos no presentaban daño, es decir, tenían la sección intacta, los otros 9 pilares testigos se dividieron en tres grupos de 3 pilares para simular cada tipo de daño para la respectiva reparación.

Para simular los daños en los pilares se utilizaron placas de porexpan de espesor 5 cm, y en ellos se introducía la armadura para que en el hormigonado de los pilares se quedara el hueco para la posterior reparación (ver figuras 28, 29, 30 y 31)



Figura 28 - Detalle elaboración daño pilares daño en las 4 caras.



Figura 29 - Pilar daño en las 4 caras, encofrado.



Figura 30 - Pilar daño en 1 cara, encofrado.



Figura 31 - Pilar daño parcheo, encofrado.

La fabricación de los pilares se realizó con hormigón de central mediante dos cubas de 3 m³ cada una, cuya dosificación se solicitó para un hormigón H-150 B-12, utilizando en central un cemento tipo CEMEX CEM II/A-V 42.5-R, árido calizo triturado y aditivo CX ISOPLAST 6 CEMEX 0,97%.

El relleno de los encofrados se realizó manualmente y compactado mediante vibrador de agujas eléctrico.



Figura 32 - Relleno de los encofrados.

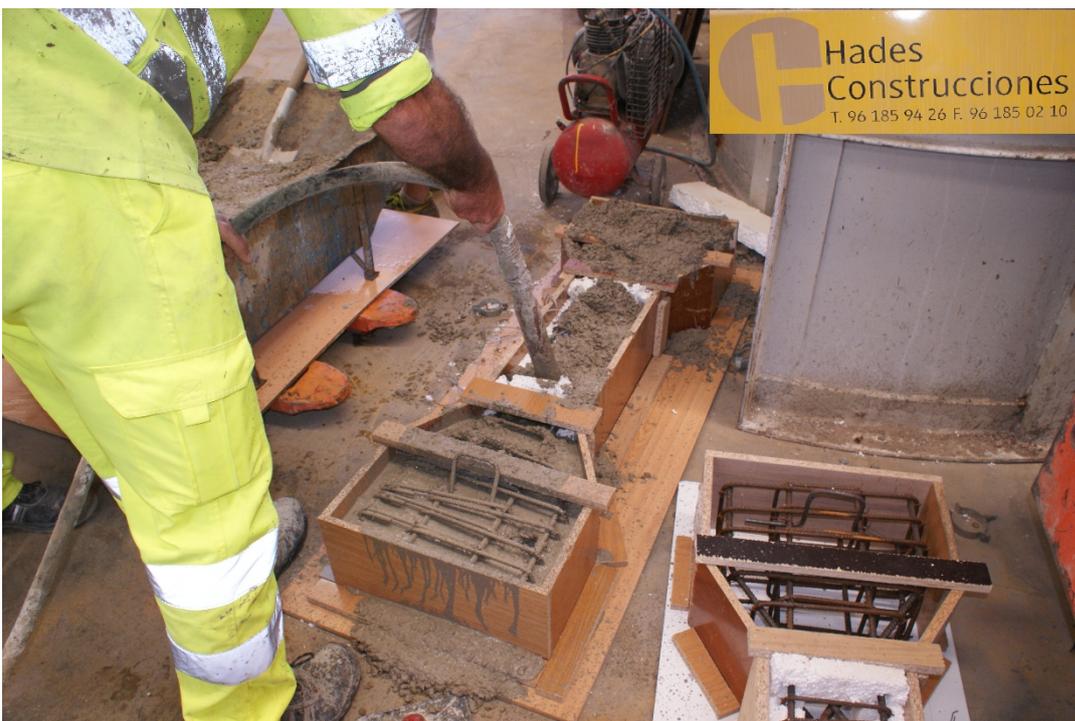


Figura 33 - Vibrado del hormigón.



Figura 34 - Detalle del pilar dañado 4 caras hormigonado.



Figura 35 - Hormigonado pilar parcheo.

La preparación de las superficies se realizó mediante cepillado manual y a continuación se limpiaron con agua a alta presión para eliminar totalmente cualquier resto de porexpan, con el cual se simularon los daños de los pilares.

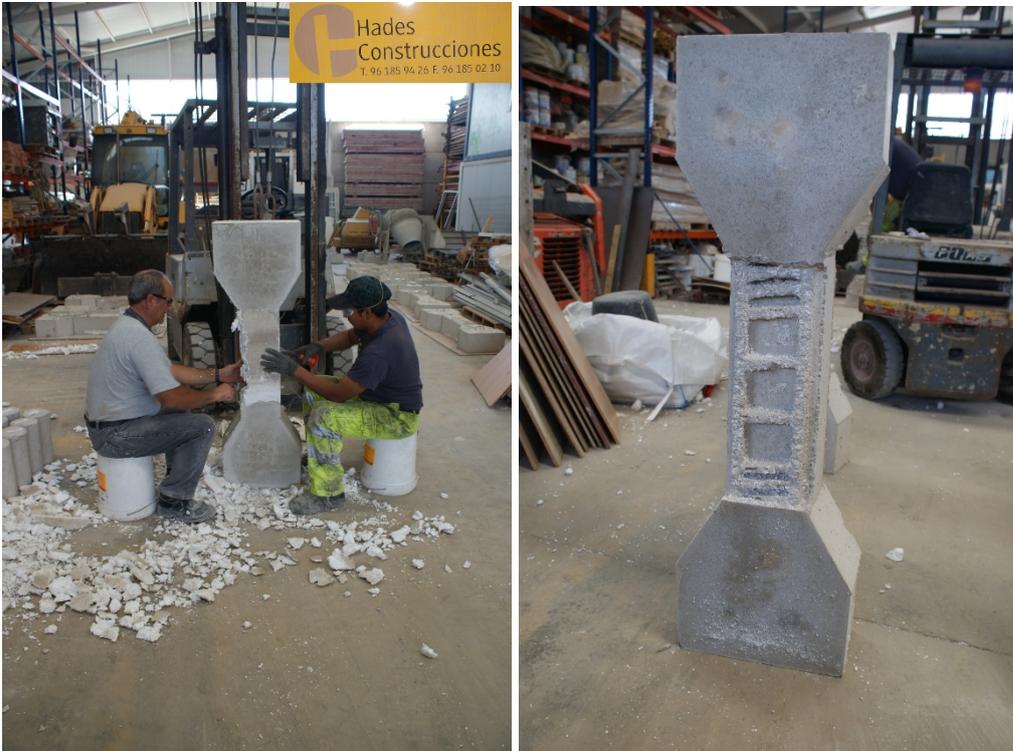


Figura 36 - Eliminación del corcho y cepillado manual mediante púas metálicas.



Figura 37 - Limpieza de las superficies mediante chorro de agua a alta presión.



Figura 38 - Detalle del pilar daño 4 caras.



Figura 39 - Detalle del pilar daño 1 cara.



Figura 40 - Detalle pilar daño parcheo.

Las reparaciones de los pilares se realizaron a los 59 días de edad del hormigón. El procedimiento fue el que se describe a continuación:

- La temperatura ambiente en el momento de aplicación estuvo entre los 28° y los 34°.
- La aplicación de los morteros se realizó a mano mediante espátula y llana.
- Para los pilares que no llevaban puente de unión, se humedecieron las superficies y a continuación se colocó una primera capa de mortero de reparación con un espesor de aproximadamente dos centímetros de manera que se rellenaran todos los pequeños huecos (ver figuras 41, 42, 43 y 44), se dejaba que tirara un poco el mortero de reparación y luego encofrar el pilar a dos caras para sacar las aristas. De esta manera, el rellenar previamente un pequeño espesor evitaba el desprendimiento del resto de capa a colocar. Una vez el mortero estaba un poco duro, se terminaba de colocar el resto del espesor (ver figura 45 y 46). Para el caso de los pilares de cuatro caras, se esperó un par de horas mínimo para desencofrar las dos caras, y ya así terminar las otras dos caras.
- Para los pilares que llevaban puente de unión, se pintaron todas las superficies con el producto correspondiente, la aplicación se realizó mediante brocha, y fresco sobre fresco se aplicó el mortero de reparación, con una primera capa de un espesor aproximado de dos centímetros (ver figuras 47 y 48). Se procedió exactamente igual que en el caso anteriormente explicado.



Figuras 41 y 42 - Humedecimiento de las superficies y relleno con una primera capa.



Figuras 43 y 44 - Relleno primera capa pilar a cuatro caras y parcheo.



Figuras 45 y 46 - Encofrado a dos caras, relleno del resto del espesor.



Figuras 47 y 48 - Aplicación del puente de unión y colocación de la primera capa de mortero de reparación.

- Una vez estaban los pilares reparados y el mortero había endurecido lo suficiente se fratasan las superficies para dejar un mejor acabado (ver figuras 49 y 50).



Figuras 49 y 50 - Fratasado de las superficies.

- Las superficies reparadas se estuvieron regando, para aportarles humedad, durante los tres primeros días.

3.4.1. Tipos de probetas

A modo de resumen y para poder identificar rápidamente cada probeta se presentan las siguientes tablas, en las cuales se referencian cada grupo de probetas con unas siglas. Y en otra tabla se enumeran las probetas por orden de hormigonado y tipo de reparación con las variables de estudio. (Ver tablas 8 y 9).

Tipo de probeta	Abreviatura
Pilar Patrón sin daño	PP
Pilar Patrón Daño Parcheo	PPDP
Pilar Patrón Daño 1 Cara	PPD1C
Pilar Patrón Daño 4 Caras	PPD4C
Pilar Reparado Parcheo	PRP
Pilar Reparado 1 Cara	PR1C
Pilar Reparado 4 Caras	PR4C

Tabla 8 - Nomenclatura de las probetas.

Tipo Patrón Pilar		Numeración por orden de hormigonado
PILAR PARCHEO	Mortero R3 sin puente unión	II 32 - II 35 - II 38
	Mortero R3 con puente unión	II 43 - II 44 - II 47
	Mortero R4 sin puente unión	II 45 - II 46 - II 48
	Mortero R4 con puente unión	II 39 - II 40 - II 42
	Patrón	II 34 - II 36 - II 37
PILAR REPARACIÓN 1 CARA	Mortero R3 sin puente unión	I 14 - II 29 - II 30
	Mortero R3 con puente unión	I 22 - II 27 - II 28
	Mortero R4 sin puente unión	I 18 - I 20 - I 24
	Mortero R4 con puente unión	I 19 - I 23 - II 26
	Patrón	I 8 - I 21 - II 25
PILAR REPARACIÓN 4 CARA	Mortero R3 sin puente unión	I 1 - I 17 - I 15
	Mortero R3 con puente unión	I 6 - I 5 - I 16
	Mortero R4 sin puente unión	I 11 - I 12 - I 13
	Mortero R4 con puente unión	I 2 - I 9 - I 10
	Patrón	I 3 - I 4 - I 7

Tabla 9 - Esquema tipo de probeta, variable de estudio y enumeración de las probetas según el orden de hormigonado.

Nota: La "I" hace referencia a la primera tongada de hormigonado, la "II" hace referencia a la segunda tongada de hormigonado.

3.4.2. Instrumentación

Se ha ensayado los pilares a rotura a compresión centrada, considerando como tal la que se produce en el estado original del pilar. Obviamente, al alterar una de sus caras y mantener la posición original de la carga, la compresión deja de ser centrada en la nueva geometría. Sin embargo lo es en la geometría original, que es que nos da la medida de la variación de la capacidad portante original. Los ensayos a escala se han llevado a cabo colocando los pilares en posición vertical en el pórtico donde la entrada de carga se ha realizado mediante un gato hidráulico situado el parte superior del pórtico, tal y como se puede observar en el siguiente esquema.

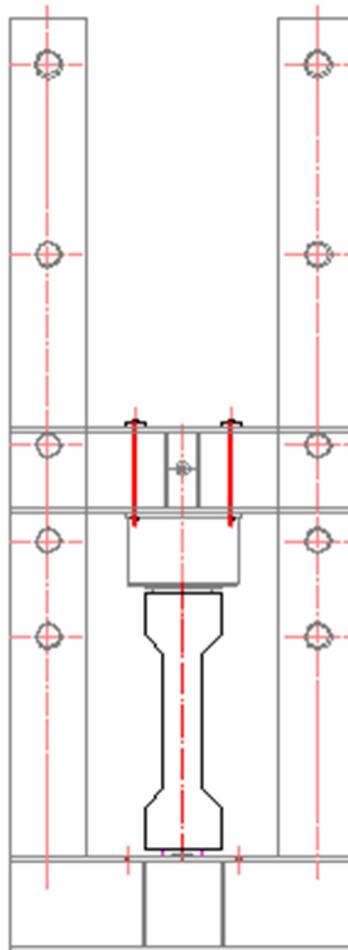


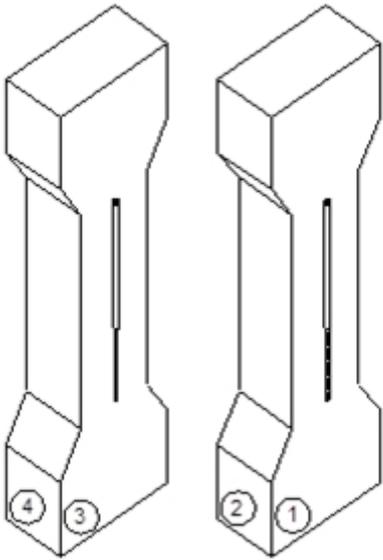
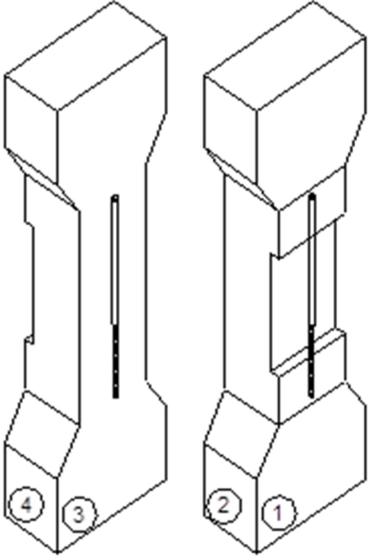
Figura 51 - Detalle del pórtico de ensayo.

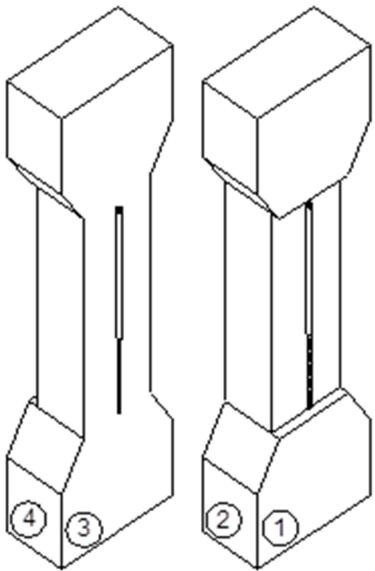
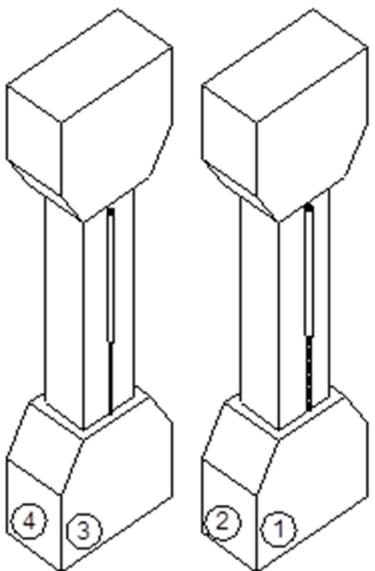


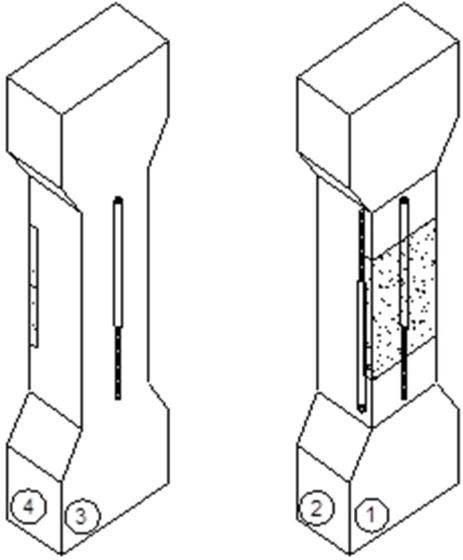
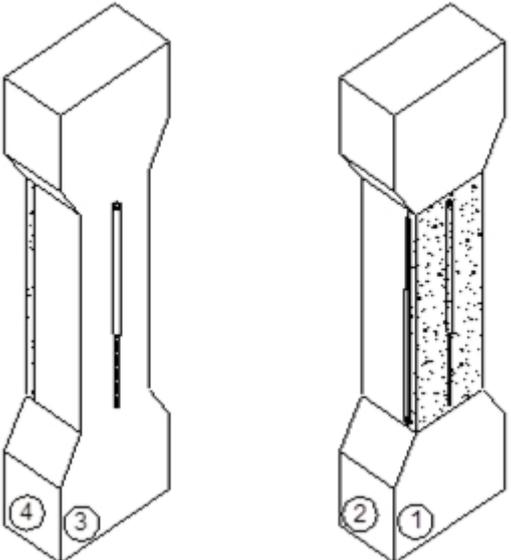
Figura 52. Fotografías del pórtico de ensayo.

Como se ha explicado con anterioridad el objetivo principal de esta investigación es comprobar el grado de contribución que aporta la reparación al elemento estructural, al pilar, para ello es necesario una instrumentación en los puntos clave de las reparaciones.

Los pilares serán instrumentados en todos los elementos que formen la probeta, es decir, barras de armaduras (las cuatro barras de la armadura longitudinal), 2 o 3 caras de hormigón y las zonas de mortero de reparación, los cuales consistirán en galgas extensométricas y captadores de desplazamiento. Los esquemas de la instrumentación serán como se muestran en las siguientes figuras (ver figura 53), y las armaduras de acero irán instrumentadas mediante galgas extensométricas.

 <p>PILARES PATRÓN – SECCIÓN ORIGINAL (PP)</p>	<p>4 Galgas y 2 captadores de desplazamientos distribuidos de la siguiente manera, 1 dispositivo/cara del pilar, colocados centrados y a mitad de la cara, en la delantera y en la trasera.</p>
 <p>PILARES PATRÓN – DAÑO PARCHEO (PPDP)</p>	<p>4 Galga y 2 captadores de desplazamiento distribuidas tal y como se indica en la figura.</p>

 <p>PILARES PATRÓN – DAÑO INTEGRAL 1 CARA (PPD1C)</p>	<p>4 Galgas y 2 captadores de desplazamiento distribuidas tal y como se indica en la figura.</p>
 <p>PILARES PATRÓN – DAÑO INTEGRAL 4 CARAS (PPD4C)</p>	<p>4 Galgas y 2 captadores de desplazamiento distribuidas tal y como se indica en la figura.</p>

 <p>PILARES REPARACIÓN POR PARCHEO (PRP)</p>	<p>4 Galgas y 3 captadores de desplazamiento distribuidas tal y como se indica en la figura.</p> <p>NOTA: 1 captador (zona reparación por parcheo) estará colocado en la interfase hormigón-mortero de reparación.</p>
 <p>PILARES REPARACIÓN INTEGRAL A 1 CARA (PR1C)</p>	<p>4 Galgas y 3 captadores de desplazamiento distribuidas tal y como se indica en la figura.</p> <p>NOTA: 1 captador (zona reparación por parcheo) estará colocado en la interfase hormigón-mortero de reparación.</p>

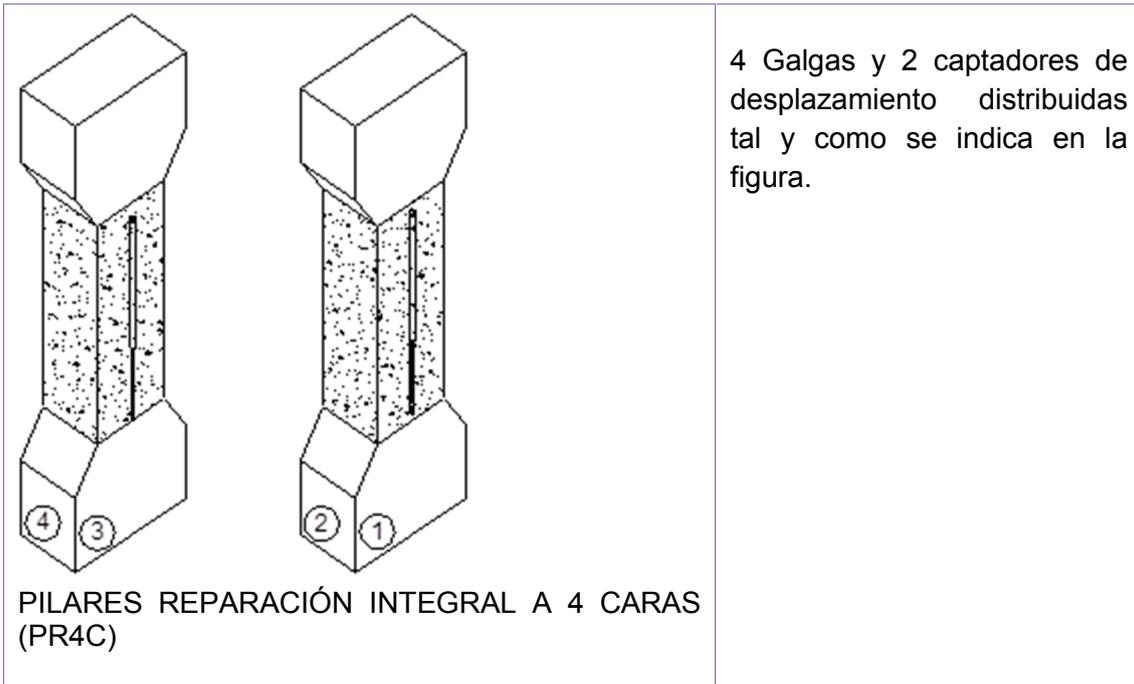


Figura 53 - Esquema de la instrumentación de los pilares.

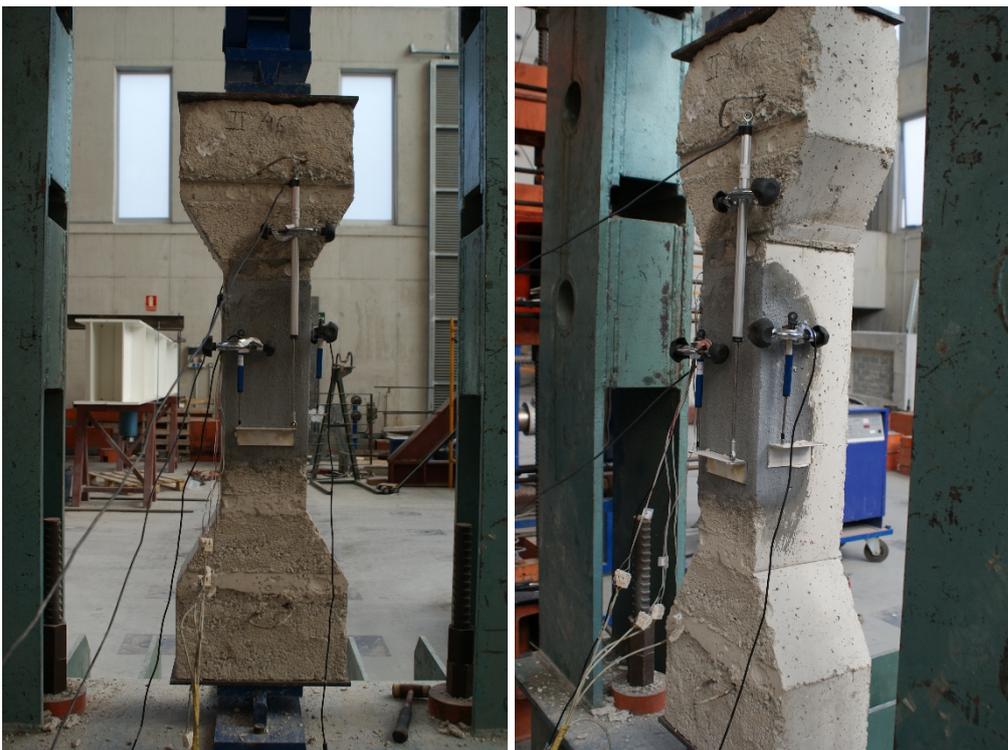


Figura 54- Colocación de la instrumentación en los pilares de parcheo, Cara C1 y C4 respectivamente.



Figura 55- Colocación de la instrumentación en los pilares de parcheo, Cara C3



Figura 56- Colocación de la instrumentación en los pilares a cuatro caras, Cara C1 y C3 respectivamente.



Figura 57- Colocación de la instrumentación en los pilares a 1 cara, Cara C1-C4 y C3 respectivamente.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS EXPERIMENTALES

El presente capítulo recoge los principales resultados del programa de ensayos realizado.

En primer lugar se muestran los datos correspondientes a los especímenes originales, Pilares Patrón sección original (PP). En esta sección (**sección 4.1**) se analiza, a partir de la documentación gráfica del ensayo, la forma y mecanismos básicos de la rotura. Asimismo se presentan sus correspondientes gráficas de Fuerza-deformación, tanto para cada soporte como el global (promedio de los pilares patrón sección original).

En la **sección 4.2**, se expondrá los datos correspondientes a los especímenes de cuatro caras, Pilares Patrón 4 Caras, tanto el patrón con daño como los reparados. Se detallan las gráficas Fuerza-deformación de la familia completa y con la descripción fotográfica del comportamiento de rotura.

En la **sección 4.3** y en la **sección 4.4**, se procede igual que en la sección anterior (sección 4.2). La sección 4.3 corresponde para la familia de los especímenes de 1 cara, Pilares Patrón 1 Cara. La sección 4.4 corresponde para la familia de los especímenes de Parcheo, Pilares Patrón Parcheo.

El estudio de las gráficas se realiza detallando para cada familia y tipo de reparación, las distintas gráficas de Fuerza-deformación. Y para comprender mejor el comportamiento de los tres grados de reparación estudiados, se comparan los resultados de los pilares reparados con los pilares patrón dañados y con los pilares patrón de estado original.

Por último, en la sección 4.5 se establecen los valores de Eficiencia de cada tipo de reparación a partir de los valores obtenidos experimentalmente, de manera que se pueda ir deduciendo el grado de contribución que aporta cada grado de reparación al elemento.

Las caras de los pilares se enumeran de 1 a 4, siendo la cara 1 (C1) la que se muestra a la prensa y la cara 3 (C3) su opuesta. En la figura 53 se detalla el esquema con la enumeración de las caras. Para el caso de los pilares con daño a 1 cara, la cara 3 es la que presenta el daño, mientras que para los pilares con daño por parcheo, la cara 1 es la que presenta el daño.

4.1. Pilares Patrón-Sección Original (PP)

Primeramente se realiza una descripción del comportamiento de rotura de los pilares, acompañada de fotografías de las roturas, donde se observa la forma en que se produce la rotura en los ensayos.

En las figuras 58 y 59 se pueden observar el patrón de fisuración de las cuatro caras de los pilares, de manera global.

Como se puede observar en la figura 58, la cara C1 presenta fisuras verticales a un lado de la cara, localizadas a mitad de altura, al igual que la cara C3 (cara opuesta), pero en este caso las fisuras tienen mayor abertura pasando a considerarse grietas.

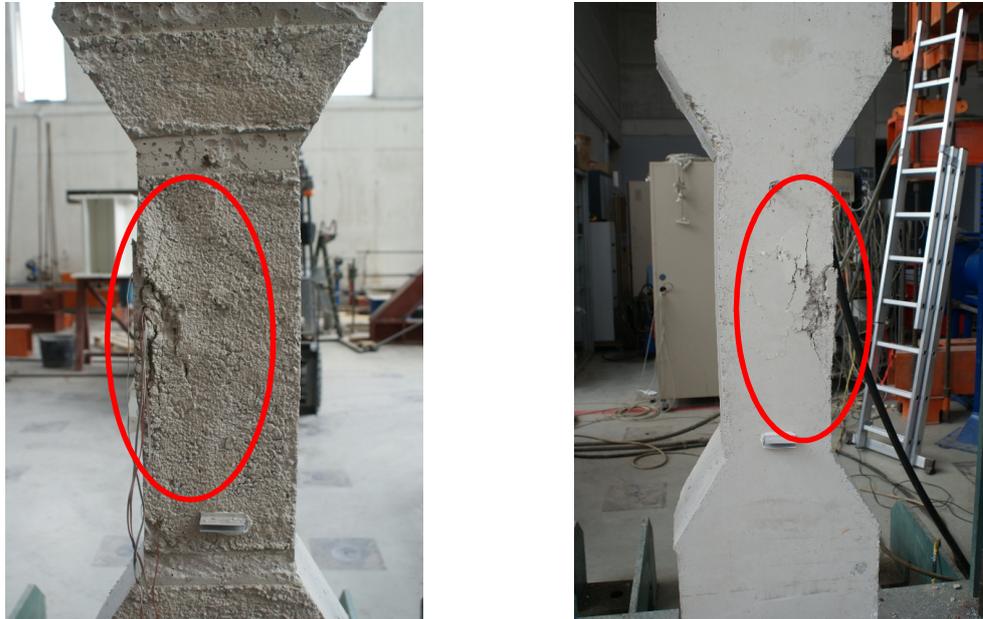


Figura 58 - Pilares PP tras el ensayo a compresión. Fisuración cara delantera (Cara C1) y trasera (Cara C3), respectivamente.

En una de las caras laterales las fisuras son horizontales y se encuentran localizadas a mitad de altura. Mientras que en la otra cara lateral la rotura está inclinada (coincidiendo con las esquinas dañadas Cara C1 y Cara C3).



Figura 59 - Pilares PP tras el ensayo a compresión. Fisuración cara laterales (Cara C2 y Cara C4).

En las siguientes figuras (figuras 55, 56 y 57), se muestran las curvas Fuerza-deformación, para cada pilar patrón ensayado, de las armaduras longitudinales, medidas mediante las galgas extensiométricas conectadas a ellas y del hormigón, medida mediante los LVDT's colocados en las caras 1 y 3.

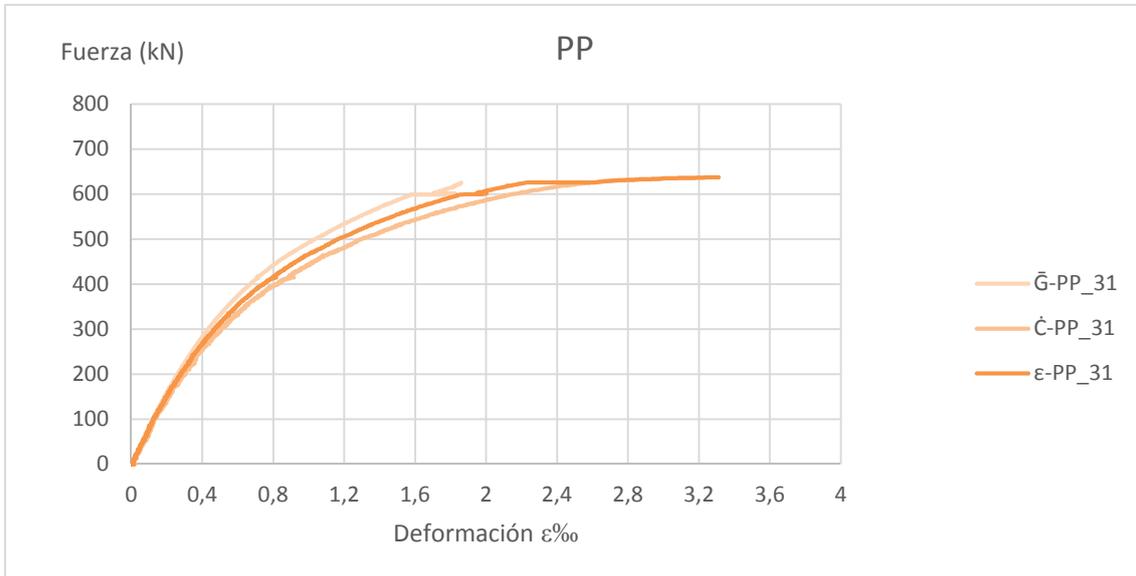


Figura 60. Gráfica Fuerza-deformación correspondientes al pilar PP31.
 \bar{G} representa las deformaciones en tanto por mil de las armaduras longitudinales.
 \bar{C} representa las deformaciones en tanto por mil de las caras del hormigón.
 ϵ representa las deformaciones medias (\bar{G} y \bar{C}) del pilar en tanto por mil.

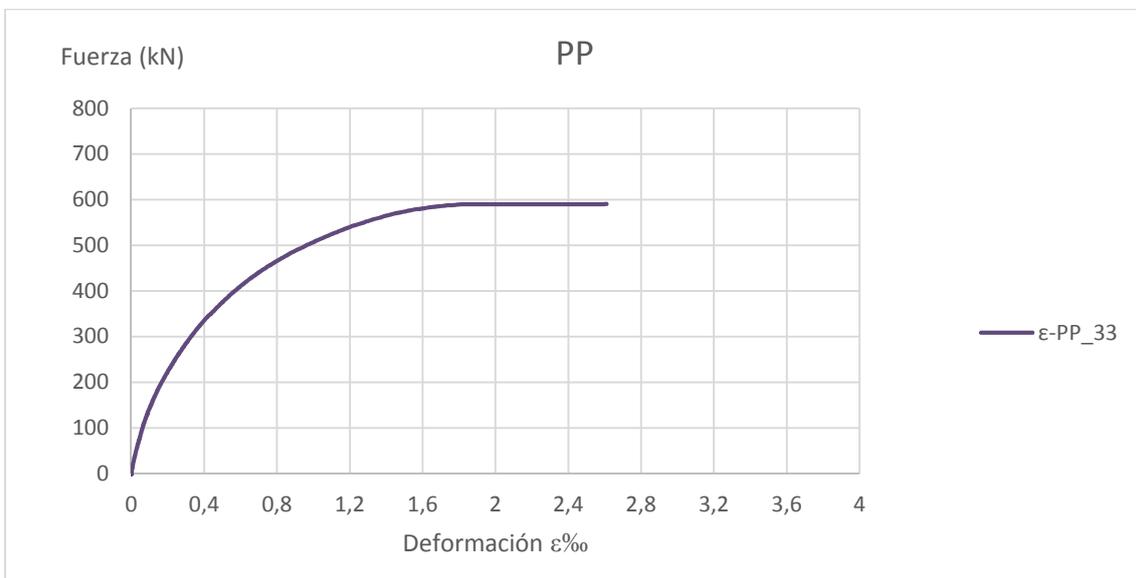


Figura 61 Gráfica Fuerza-deformación correspondiente al pilar PP33.
 ϵ representa las deformaciones medias (\bar{G} y \bar{C}) del pilar en tanto por mil.

Las deformaciones correspondientes al hormigón del Pilar 33, no se pudieron medir por problemas en la instrumentación durante el ensayo, por lo que se descartaron los valores tomados por los captadores de desplazamiento.

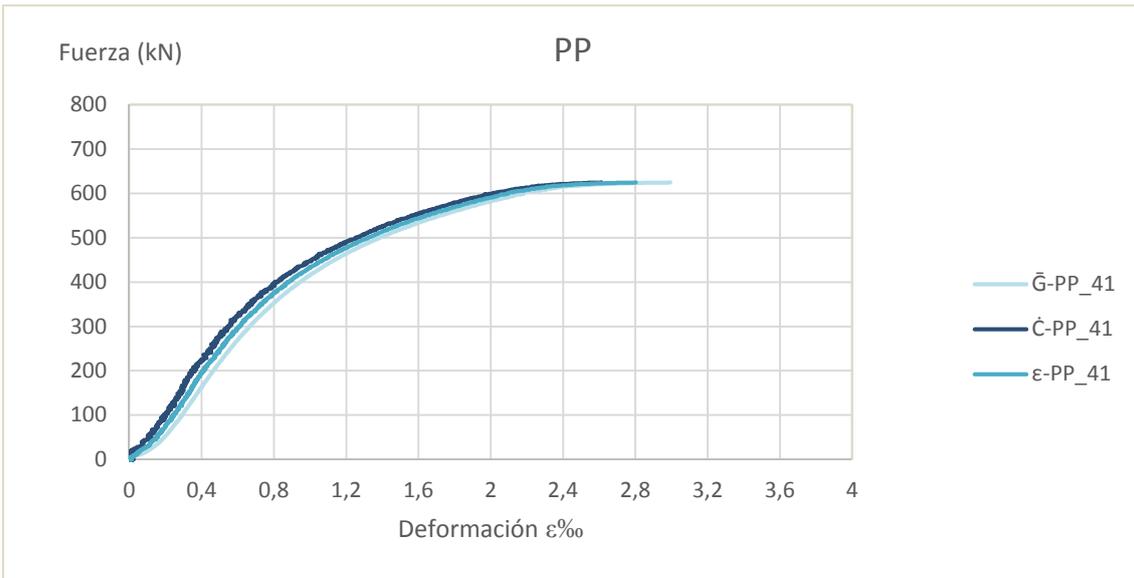


Figura 62. Gráfica Fuerza-deformación correspondiente al pilar PP41.
 \bar{G} representa las deformaciones en tanto por mil de las armaduras longitudinales.
 \bar{C} representa las deformaciones en tanto por mil de las caras del hormigón.
 ϵ representa las deformaciones medias (\bar{G} y \bar{C}) del pilar en tanto por mil.

En la siguiente figura se muestran las deformaciones medias para cada pilar patrón.

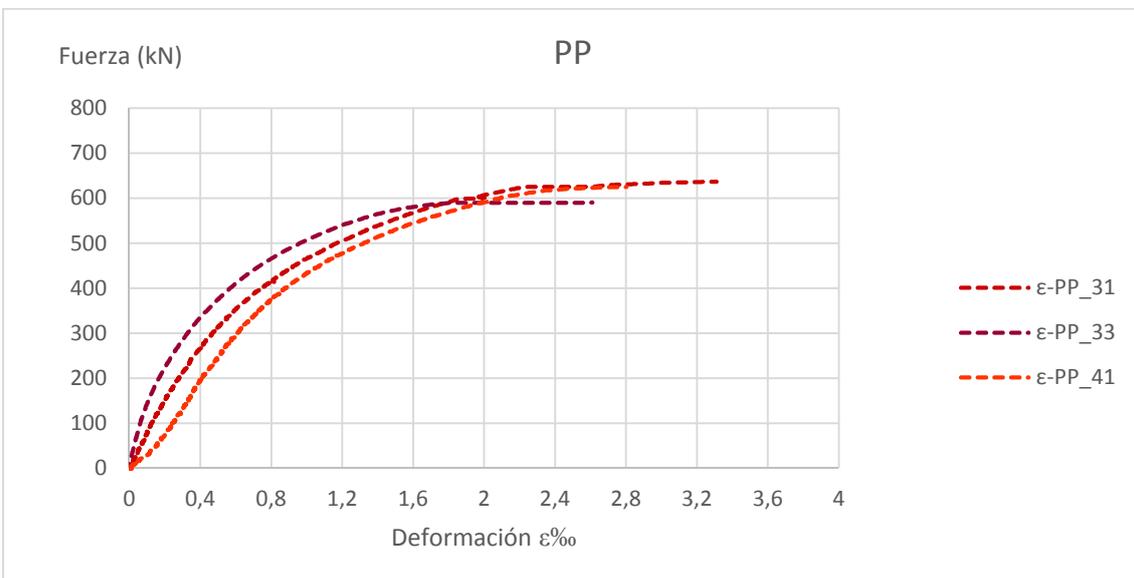


Figura 63. Gráfica Fuerza-deformación medias de los tres pilares patrón sin daño (PP31, PP33 y PP41).

4.2. Pilares con daño y reparación a cuatro caras

En este apartado se presenta el conjunto de pilares con daño y pilares reparados a cuatro caras con los distintos sistemas empleados. Los pilares reparados se dividen en cuatro subfamilias correspondientes a cada tipo de reparación:

- Pilares reparados con mortero Clase R3 con puente de unión.

- Pilares reparados con mortero Clase R3 sin puente de unión.
- Pilares reparados con mortero Clase R4 con puente de unión.
- Pilares reparados con mortero Clase R3 sin puente de unión.

4.2.1. Pilares Patrón Daño 4 Caras

El presente apartado recoge los resultados de los pilares patrón dañado, Pilar Patrón Daño 4 Caras (PPD4C). En la figura 64 se puede observar el patrón de fisuración de las cuatros caras de los pilares, de manera global.

La Cara C4 presenta fisuras verticales en la zona media-alta y también en una de las esquinas en toda la altura.

La Cara C3 presenta fisuras verticales en la zona de las armaduras longitudinales y a media altura de la cara.



Figura 64 - Pilar PPD4C tras la rotura. Caras C3 y C4 respectivamente.

Nota: La Cara C1 está hormigonada hasta ras de las armaduras, mientras que el resto de las caras tienen las armaduras vistas.

En la siguiente figura (figura 65), se muestran las curvas Fuerza-deformación para las armaduras longitudinales y el hormigón.

Para esta familia de pilares (Pilares Patrón daños 4 Caras) solo se pudieron obtener datos de un solo pilar. Uno de los tres pilares se rompió mientras se colocaba la instrumentación por un fallo en el gato hidráulico. Otro pilar fue descartado debido a que en el momento de desencofrarlo, una de las cabezas no presentaba la geometría correcta.

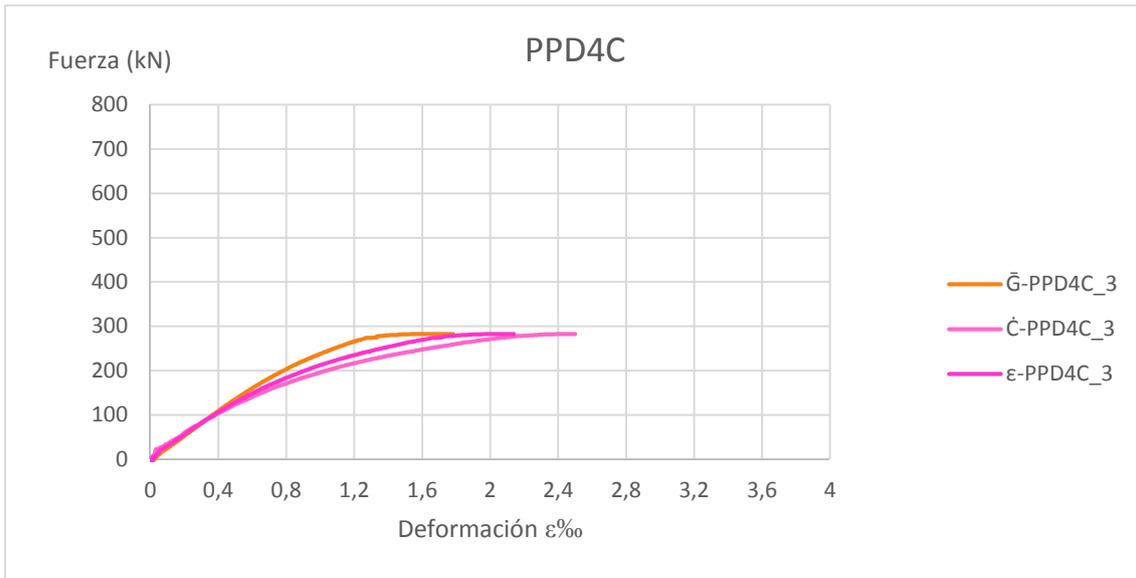


Figura 65 - Gráfica Fuerza-deformación del pilar PPD4C.
 \bar{G} representa las deformaciones en tanto por mil de las armaduras longitudinales.
 \bar{C} representa las deformaciones en tanto por mil de las caras del hormigón.
 ϵ representa las deformaciones medias (\bar{G} y \bar{C}) del pilar en tanto por mil.

En la siguiente gráfica se puede observar el comportamiento del Patrón Daño 4 Caras (PPD4C) frente al Patrón-sección original (PP).

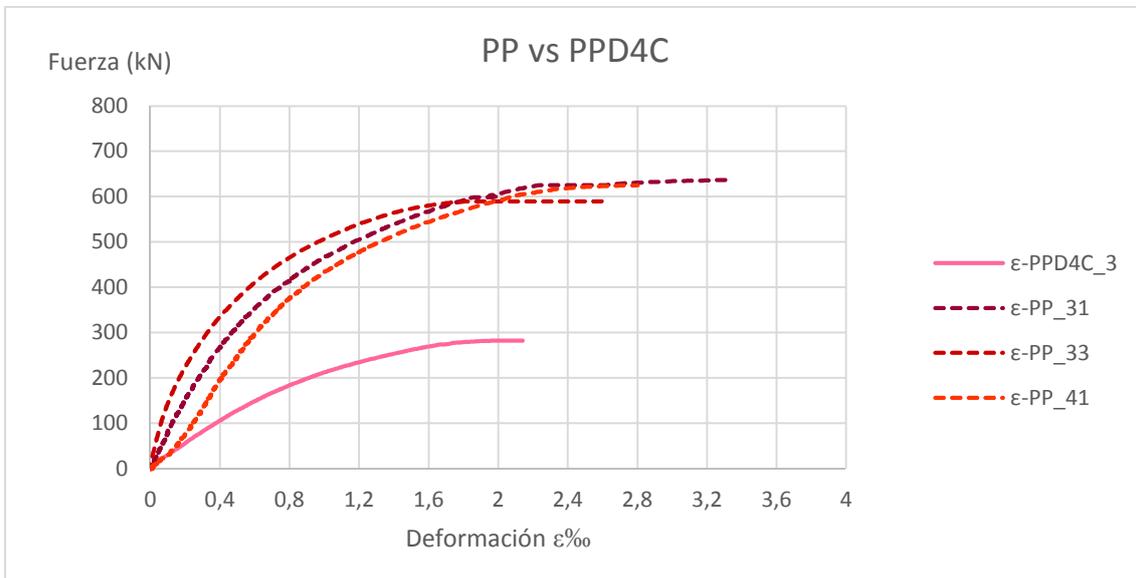


Figura 66 - Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares patrón sección original y daño 4 caras.

4.2.2. PR4C R3 con puente de unión

Se muestran a continuación los patrones de fisuración tras el ensayo. Las caras C1 y C3 presentan fisuras verticales localizadas en la zona de las armaduras longitudinales.

Las caras C2 y C4 presentan fisuras verticales localizadas en las juntas frías de la reparación.



Figura 67 - Pilar PR4C_R3+PU tras el ensayo a compresión. Fisuración cara C1.



Figura 68 - Pilar PR4C_R3+PU tras el ensayo a compresión. Fisuración caras laterales, caras C2 y C4 respectivamente.

En la figura 69 se puede observar cómo se desprende la capa de reparación de las caras C3 y C1 respectivamente. También se observa que la adherencia entre mortero de reparación y hormigón original es muy buena, se produce una rotura cohesiva en el seno del soporte.



Figura 69 - Pilar PR4C_R3+PU tras el ensayo. Detalle del desprendimiento de la capa de reparación tras el ensayo.

En la siguiente figura (figura 70), se muestran las curvas Fuerza-deformación para las armaduras longitudinales y el hormigón, de los pilares ensayados para esta familia.

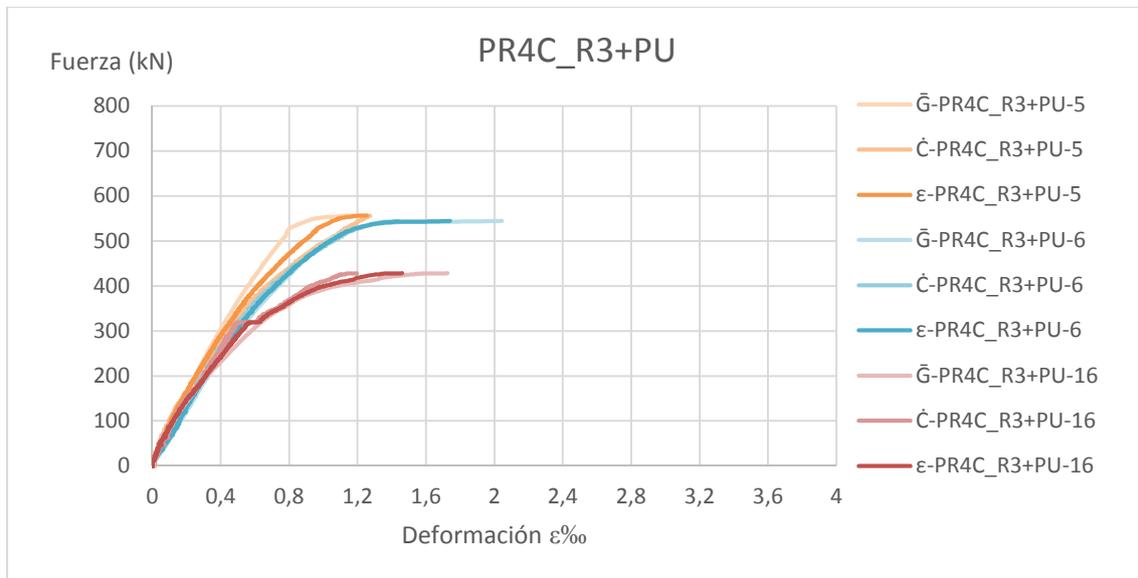


Figura 70. Gráfica Fuerza-deformación correspondiente a los pilares P5, P6 y P16.

\bar{G} representa las deformaciones en tanto por mil de las armaduras longitudinales.

\bar{C} representa las deformaciones en tanto por mil de las caras del hormigón.

ϵ representa las deformaciones medias (\bar{G} y \bar{C}) del pilar en tanto por mil.

La figura 71, muestra las deformaciones medias para cada uno de los tres pilares ensayados con este esquema de reparación.

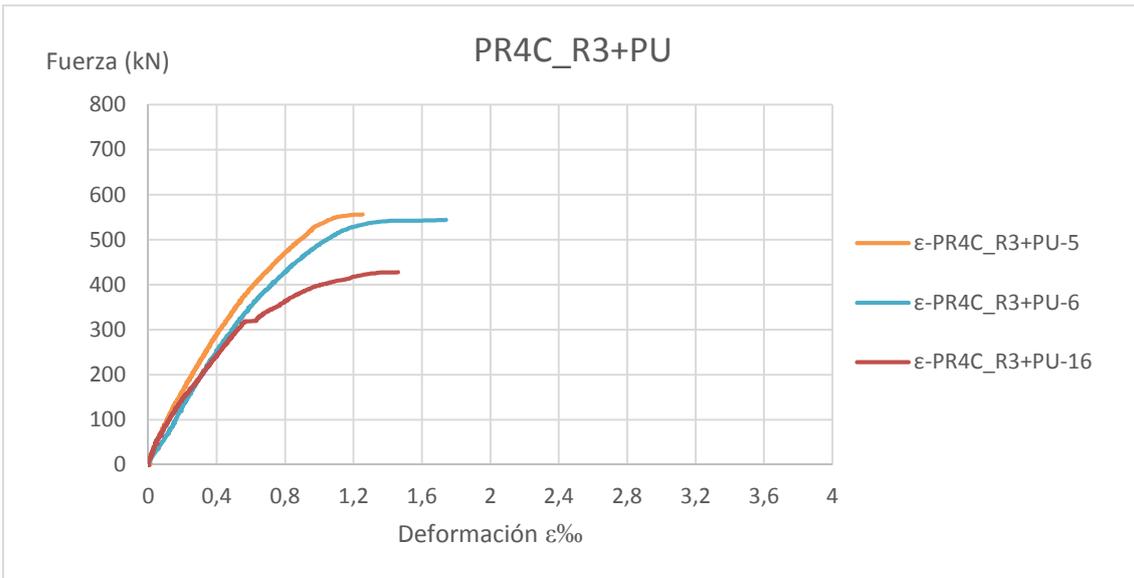


Figura 71. Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PR4C_R3+PU.

La figura 72, muestra las curvas fuerza-deformación de los Pilares Patrón (PP), de los Pilares Patrón Daño 4 Caras (PPD4C) y de los pilares reparados con mortero clase R3, utilizando puente de unión.

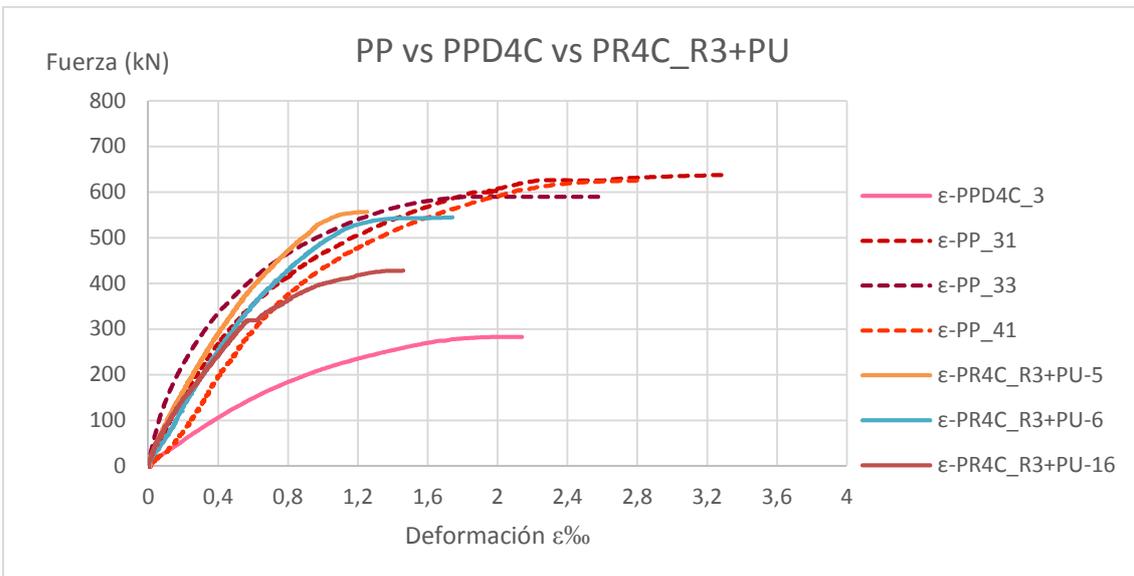


Figura 72. Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PP, PPD4C y PR4C_R3+PU.

4.2.3. PR4C R3 sin puente de unión

Las figuras 73 a 75 muestran el estado de los pilares tras el ensayo. En ellas se puede observar que la Cara C1 no presenta fisuras.

La Cara C3 presenta fisuras verticales en la zona de las armaduras longitudinales.

Las caras laterales C2 y C4 tienen fisuras verticales localizadas en las juntas frías de la reparación.



Figura 73 - Pilar PR4C_R3 tras el ensayo a compresión. Fisuración caras C1 y C3 respectivamente.



Figura 74 - Pilar PR4C_R3 tras el ensayo a compresión. Fisuración de las caras laterales, caras C2 y C4 respectivamente.

En la siguiente figura se puede observar que la rotura de la adherencia es cohesiva en el seno del mortero principalmente en las caras laterales, mientras que en las caras delantera y trasera (C1 y C3) sucede en el seno del soporte.



Figura 75 - Pilar PR4C_R3 tras el ensayo a compresión. Detalle del desprendimiento de la capa de reparación tras el ensayo.

En la siguiente figura, se muestran las curvas Fuerza-deformación para las armaduras longitudinales y el hormigón, de los pilares ensayados para esta familia.

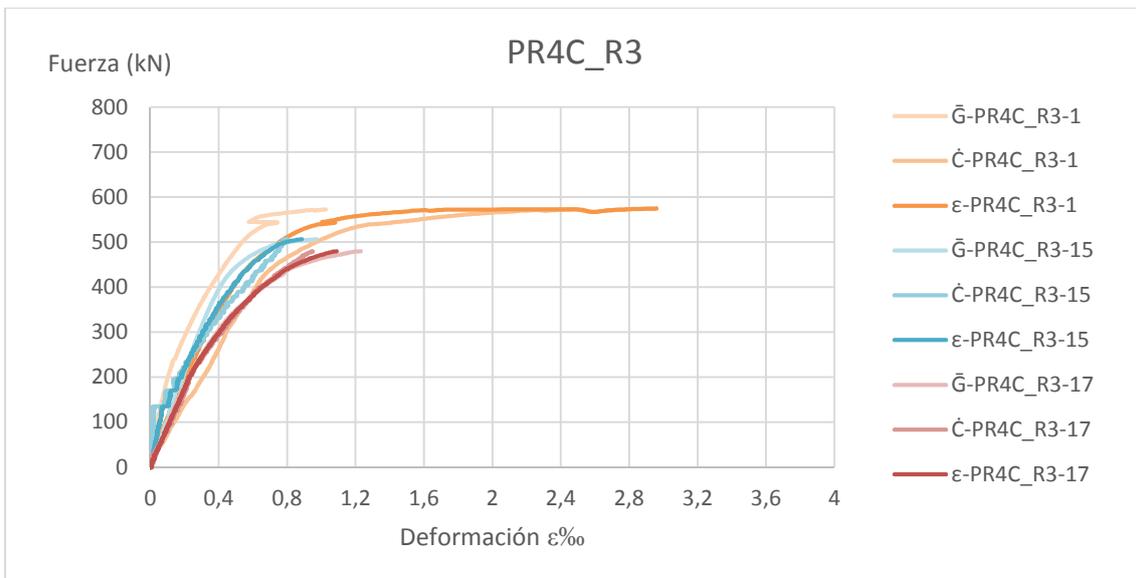


Figura 76. Gráfica Fuerza-deformación correspondiente a los pilares P1, P15 y P17. \bar{G} representa las deformaciones en tanto por mil de las armaduras longitudinales. \dot{C} representa las deformaciones en tanto por mil de las caras del hormigón. ϵ representa las deformaciones medias (\bar{G} y \dot{C}) del pilar en tanto por mil.

En la figura 77 se muestran las deformaciones medias para cada uno de los pilares reparados con este sistema.

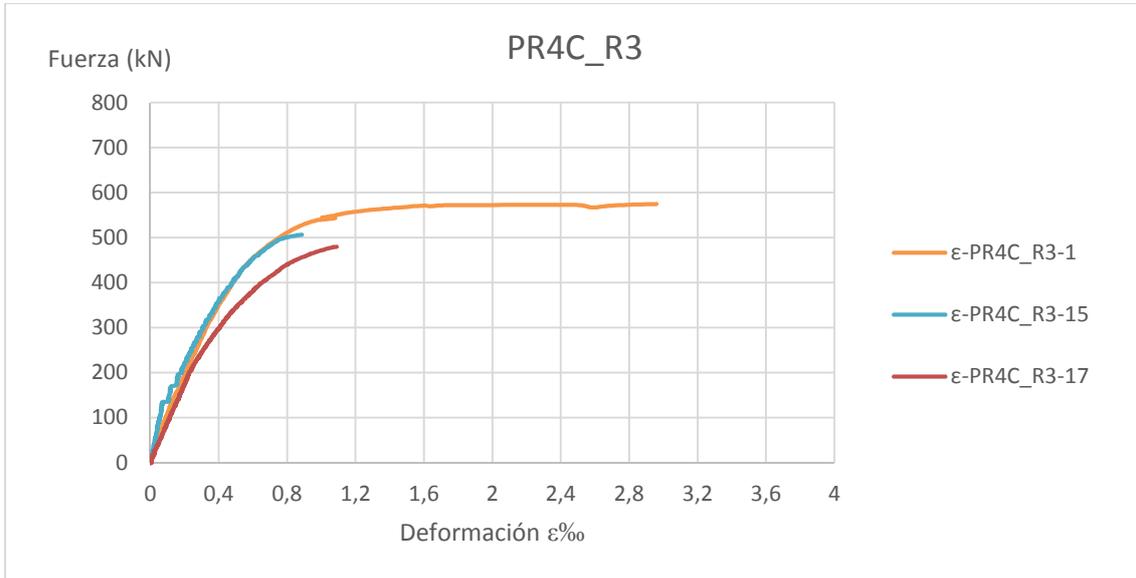


Figura 77. Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PR4C_R3.

La figura 78 muestra las gráficas fuerza-deformación de los pilares PR4C_R3 frente a los pilares patrones, PP y PPD4C.

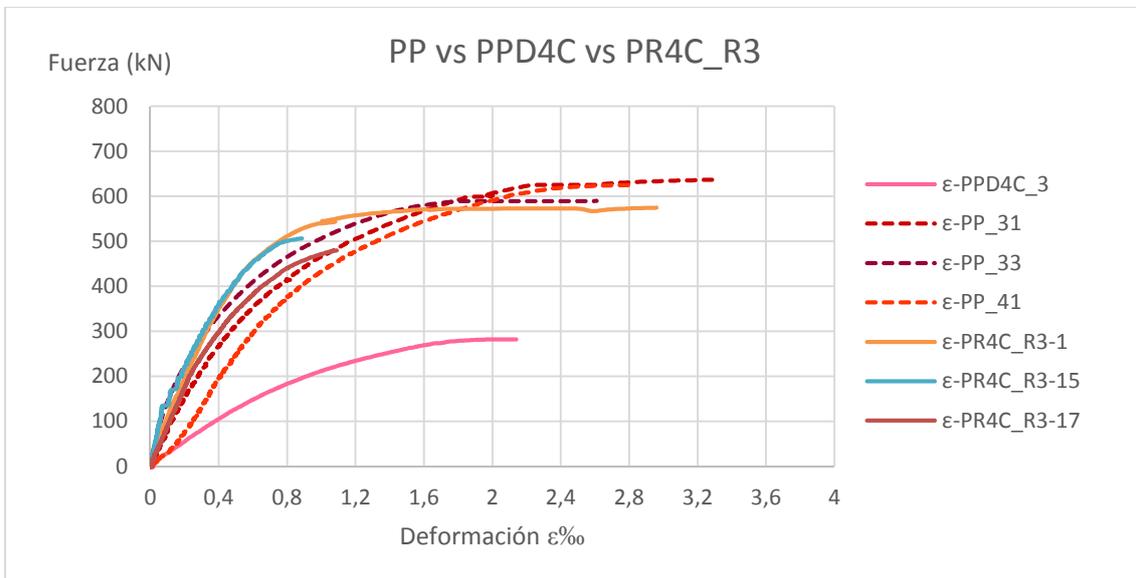


Figura 78. Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PP, PPD4C y PR4C_R3.

4.2.4. PR4C R4 con puente de unión

Las figuras 79 y 80 muestran el estado de los pilares tras el ensayo. En ellas se puede observar que las caras laterales C2 y C4 presentan fisuras/grietas verticales localizadas

en las juntas frías de la reparación, y alguna fisura horizontal donde están localizados los cercos, a mitad de altura.

Las caras C1 y C3 presentan fisuras verticales en la zona de las armaduras longitudinales.



Figura 79 - Pilares PR4C_R4+PU tras el ensayo a compresión. Fisuración caras C1 y C3 respectivamente.



Figura 80 - Pilares PR4C_R4+PU tras el ensayo a compresión. Fisuración caras C2 y C4 respectivamente.

En la figura 81 se observa que la rotura de la adherencia es cohesiva en el seno del mortero de reparación en las caras laterales, mientras que en las caras delantera y trasera (C1 y C3) sucede en el seno del soporte.



Figura 81 - Pilares PR4C_R4+PU tras el ensayo a compresión. Detalle del desprendimiento de la capa de reparación de las caras laterales tras el ensayo.

En la figura 82, se muestran las curvas Fuerza-deformación para las armaduras longitudinales y el hormigón, de los pilares ensayados para esta familia.

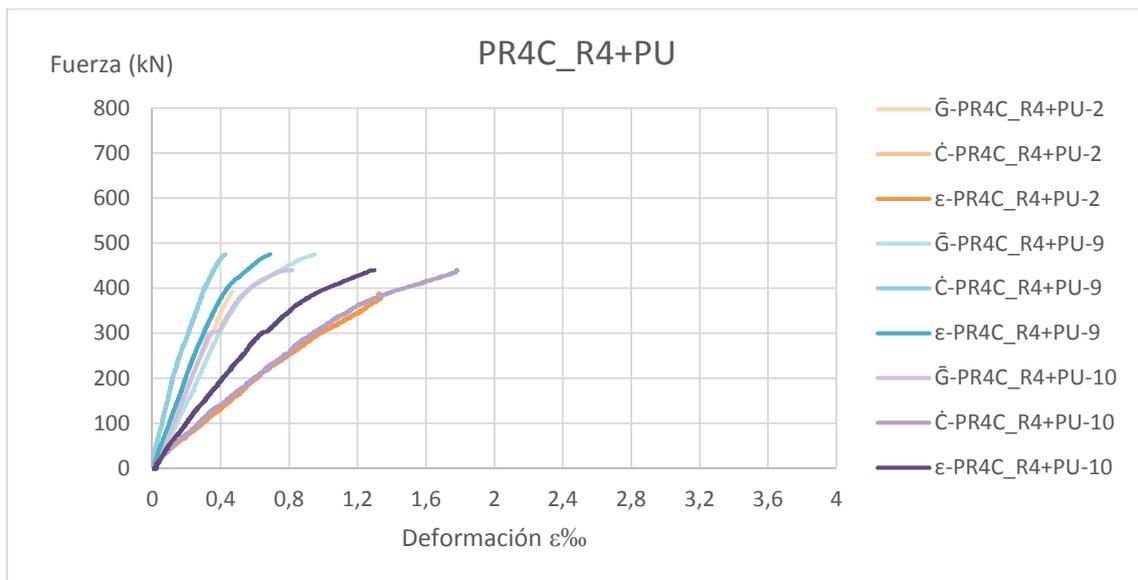


Figura 82. Gráfica Fuerza-deformación correspondiente a los pilares P2, P9 y P10. \bar{G} representa las deformaciones en tanto por mil de las armaduras longitudinales. \bar{C} representa las deformaciones en tanto por mil de las caras del hormigón. ε representa las deformaciones medias (\bar{G} y \bar{C}) del pilar en tanto por mil.

En la figura 83 se muestran las deformaciones medias para cada uno de los pilares reparados con este sistema (mortero R4 con puente de unión).

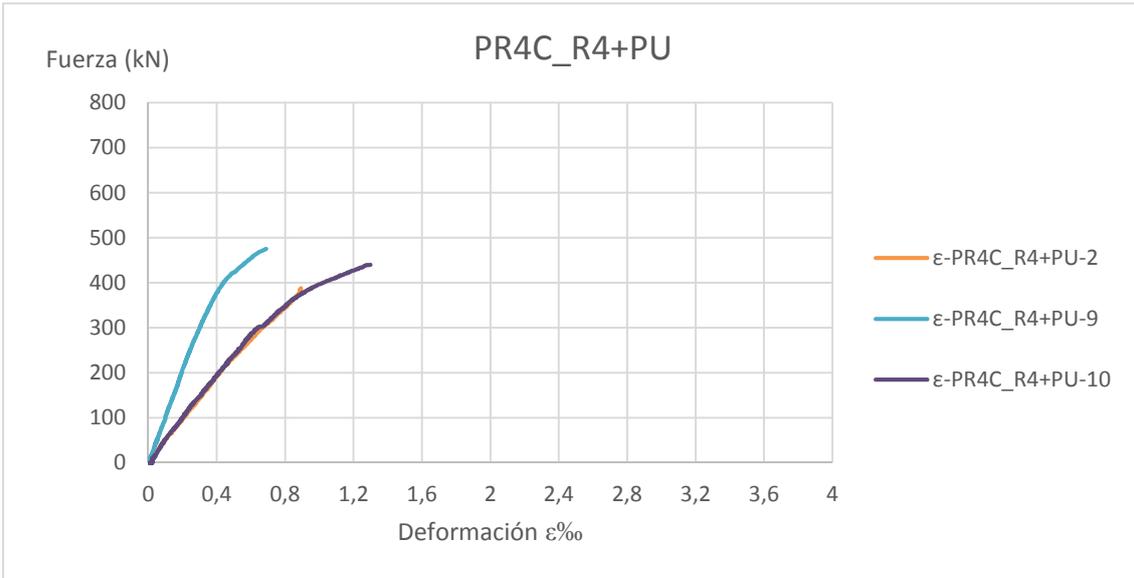


Figura 83. Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PR4C_R4+PU.

La figura 84 muestra las gráficas fuerza-deformación de los pilares PR4C_R4+PU frente a los pilares patrones, PP y PPD4C.

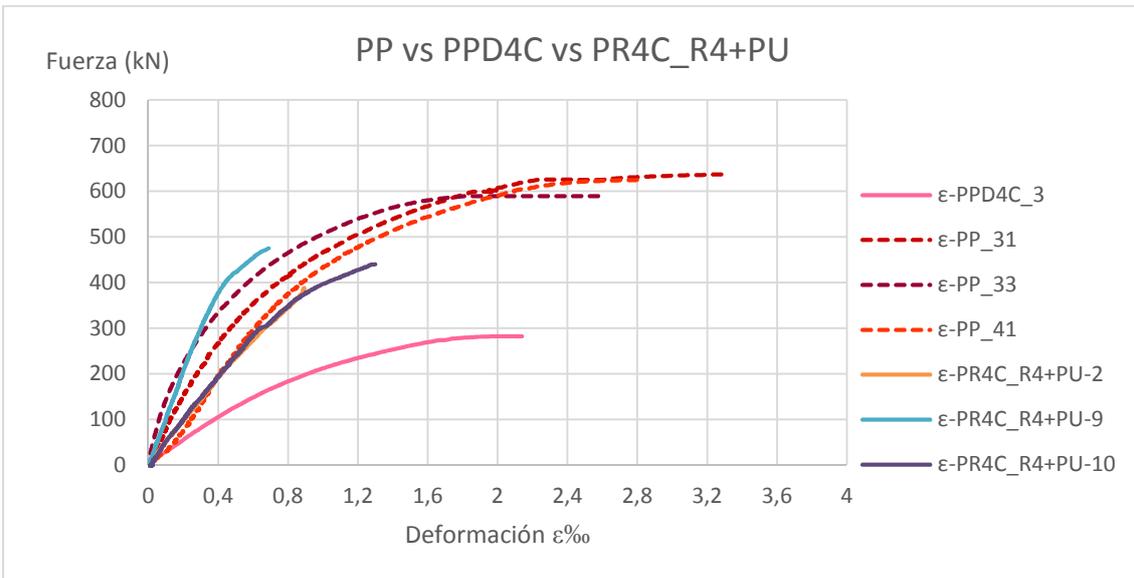


Figura 84. Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PP, PPD4C y PR4C_R4+PU.

4.2.5. PR4C R4 sin puente de unión

Las figuras 85 y 86 muestran el estado de los pilares tras el ensayo. En ellas se puede observar que las caras laterales C2 y C4 presentan fisuras/grietas verticales localizadas en las juntas frías de la reparación.

Las caras C1 y C3 presentan alguna fisura vertical en la zona de las armaduras longitudinales.



Figura 85 - Pilares PR4C_R4 tras el ensayo a compresión. Fisuración caras C1 y C3 respectivamente.

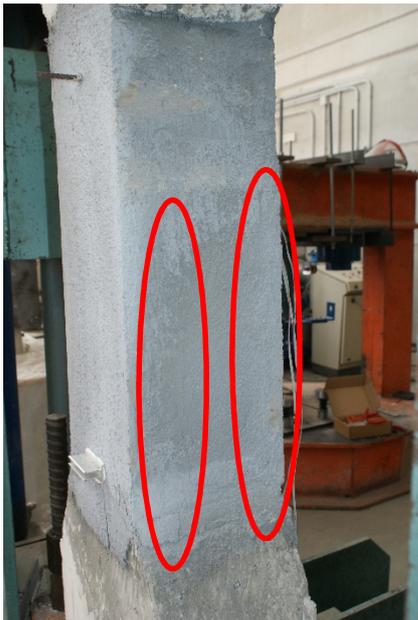


Figura 86 - Pilares PR4C_R4 tras el ensayo a compresión. Fisuración caras C2 y C4 respectivamente.

La figura 87 muestra las curvas Fuerza-deformación para las armaduras longitudinales y el hormigón, de los pilares ensayados para esta familia.



Figura 87. Gráfica Fuerza-deformación correspondiente a los pilares P11, P12 y P13.

\bar{G} representa las deformaciones en tanto por mil de las armaduras longitudinales.

\hat{C} representa las deformaciones en tanto por mil de las caras del hormigón.

ϵ representa las deformaciones medias (\bar{G} y \hat{C}) del pilar en tanto por mil.

La figura 88 muestra las deformaciones medias para cada uno de los pilares reparados mediante este sistema.

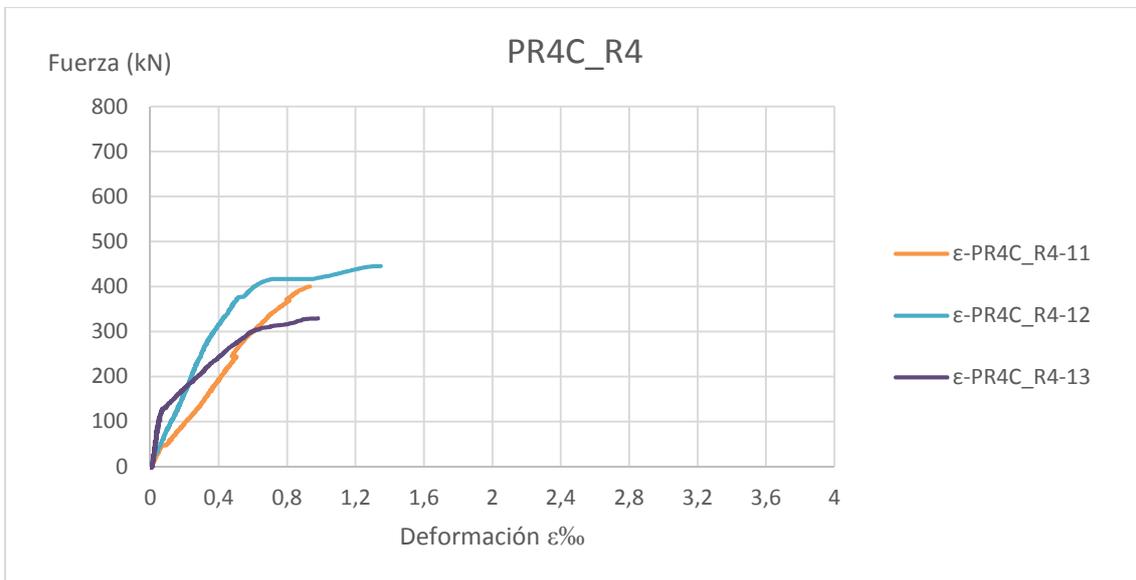


Figura 88. Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PR4C_R4.

La figura 89 muestra las gráficas fuerza-deformación de los pilares PR4C_R4 frente a los pilares patrones, PP y PPD4C.

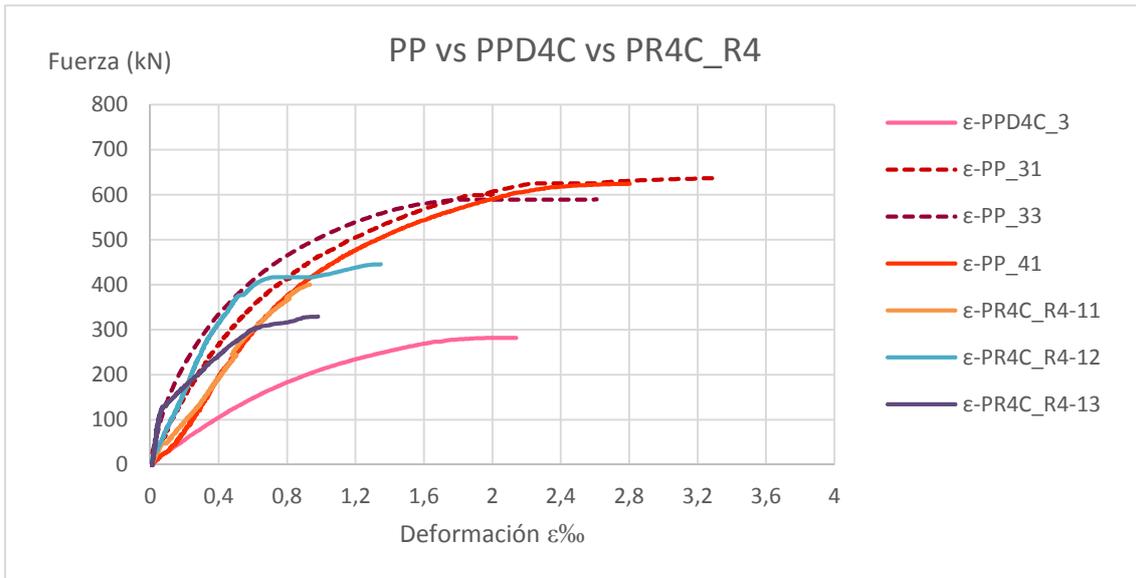


Figura 89. Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PP, PPD4C y PR4C_R4.

4.3. Pilares con daño y reparación en una cara completa

En este apartado se presenta el conjunto de pilares con daño y pilares reparados a una cara con los distintos sistemas empleados. Los pilares reparados se dividen en cuatro subfamilias correspondientes a cada tipo de reparación:

- Pilares reparados con mortero Clase R3 con puente de unión.
- Pilares reparados con mortero Clase R3 sin puente de unión.
- Pilares reparados con mortero Clase R4 con puente de unión.
- Pilares reparados con mortero Clase R3 sin puente de unión.

4.3.1. Pilares con daño a una cara

El presente apartado recoge los resultados de los pilares patrón dañado, Pilar Patrón Daño 1 Cara (PPD1C). En las figuras 90 y 91 se puede observar el patrón de fisuración de las cuatro caras de los pilares, de manera global.

La Cara C1 presenta una fina fisura horizontal a media altura, que se extiende a ambas caras laterales.

La Cara C3, cara dañada, no presenta fisuras, pero si se observa la deformación de pandeo de las armaduras longitudinales de esa cara.



Figura 90 - Pilares PPD1C tras el ensayo a compresión. Fisuración caras C1 y C3 respectivamente.



Figura 91 - Pilares PPD1C tras el ensayo a compresión. Fisuración caras C2 y C4 respectivamente.

Las figuras 92 y 93 muestran las curvas fuerza-deformación por una parte para la cara delantera, denominada Cara C1, y por otra parte, para la cara trasera, denominada Cara C3. Para estas familias de pilares la cara dañada es la cara C3. Se realizó este análisis por caras ya que al concentrarse el daño en una cara, la carga axial deja de estar centrada y nos encontramos ante un caso de compresión excéntrica. Por este motivo el comportamiento es asimétrico y las deformaciones de las caras C3 (la que concentra el daño) y la C1 (inalterada) tienen un comportamiento totalmente distinto.

El pilar P25 se descartó debido a un fallo en el hormigonado, lo cual provocó que las cabezas no tuvieran la geometría diseñada.

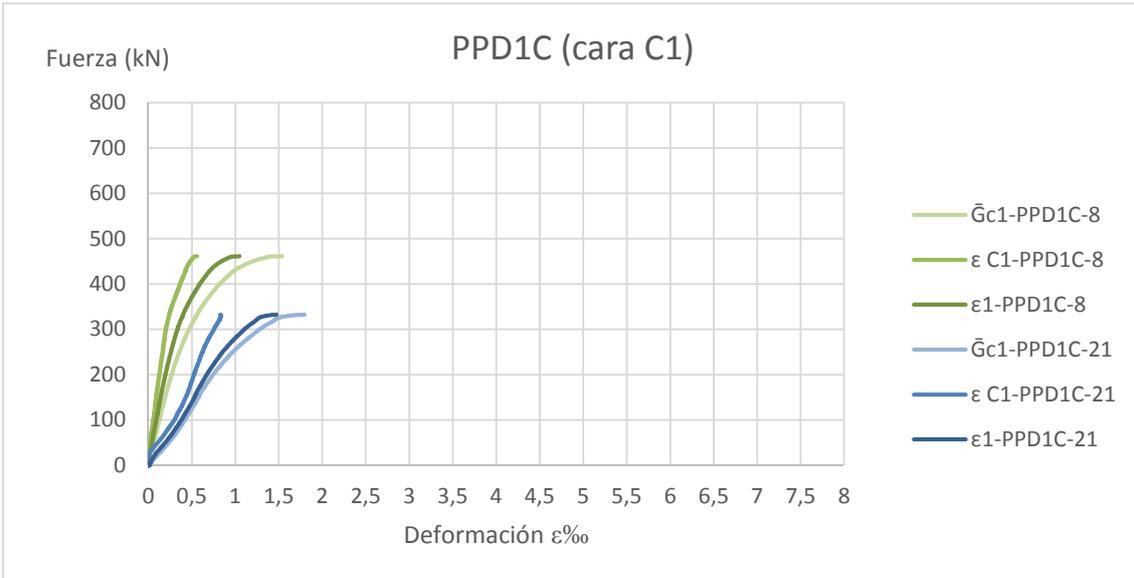


Figura 92. Gráfica Fuerza-deformación de la Cara C1 correspondiente a los pilares P8 y P21. \bar{G} representa las deformaciones en tanto por mil de las armaduras longitudinales. \bar{C} representa las deformaciones en tanto por mil de las caras del hormigón. ϵ representa las deformaciones medias (\bar{G} y \bar{C}) del pilar en tanto por mil.

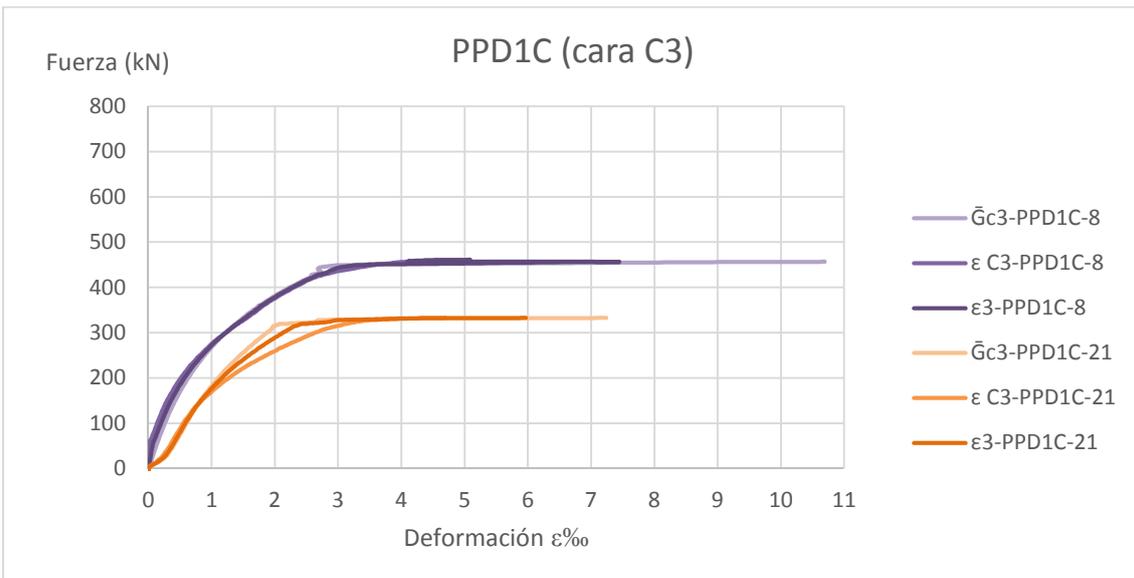


Figura 93. Gráfica Fuerza-deformación de la Cara C3 correspondiente a los pilares P8 y P21. \bar{G} representa las deformaciones en tanto por mil de las armaduras longitudinales. \bar{C} representa las deformaciones en tanto por mil de las caras del hormigón. ϵ representa las deformaciones medias (\bar{G} y \bar{C}) del pilar en tanto por mil.

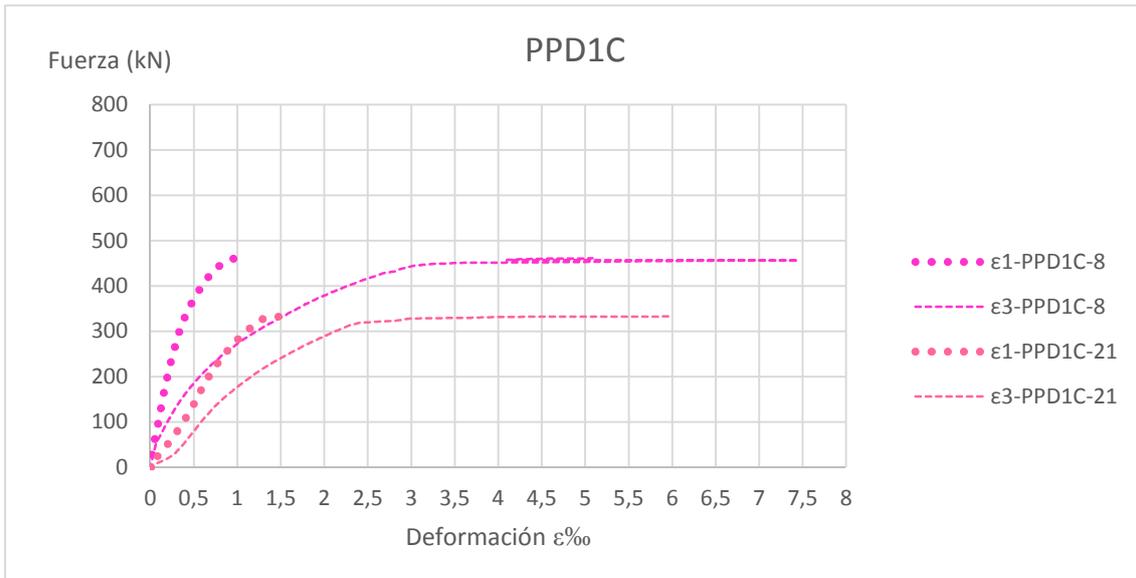


Figura 94. Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PPD1C. Deformaciones medias en las caras C1 (inalterada) y C3 (dañada) durante el ensayo.

En la siguiente gráfica se puede observar el comportamiento del Patrón Daño 1 Cara (PPD1C) frente al Patrón-sección original (PP).

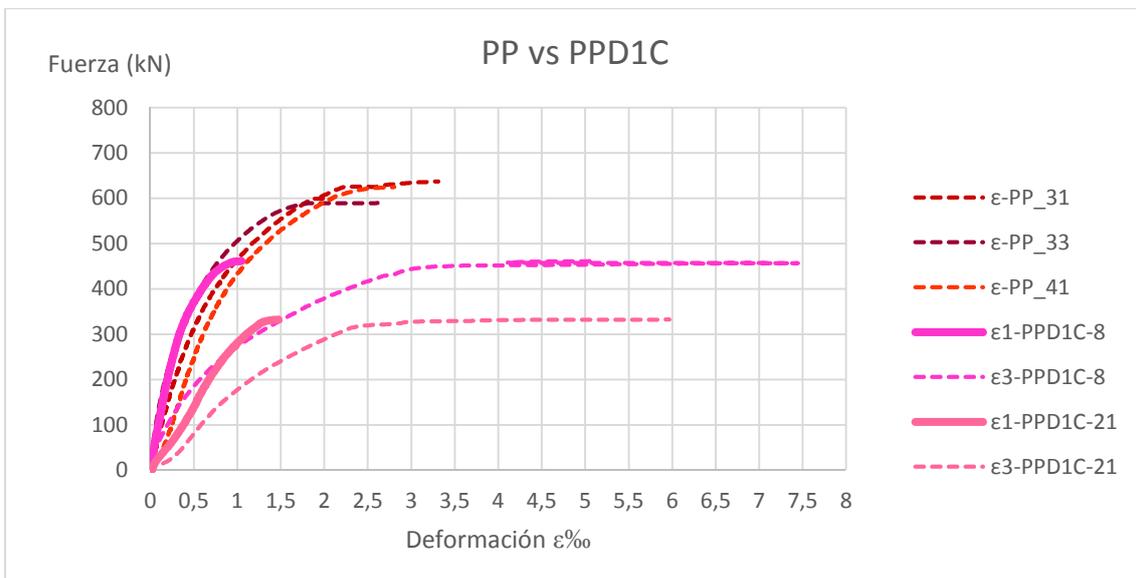


Figura 95- Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PP y PPD1C.

4.3.2. PR1C R3 con puente de unión

Las figuras 96 y 97 muestran el estado de los pilares tras el ensayo. En ellas se puede observar que la cara C1 (inalterada) presenta una ligera fisura horizontal a mitad de altura, que se extiende hacia ambas caras laterales.

La Cara C3 (dañada y reparada) presenta fisuras verticales localizadas a media-baja altura.



Figura 96 - Pilares PR1C_R3+PU tras el ensayo a compresión. Fisuración caras C1 y C3 respectivamente.

En las caras laterales C2 y C4, se observa como levemente se han extendido la fisura horizontal de la Cara C1. Además se observa cómo se marca la junta fría vertical entre el mortero de reparación y el hormigón original.

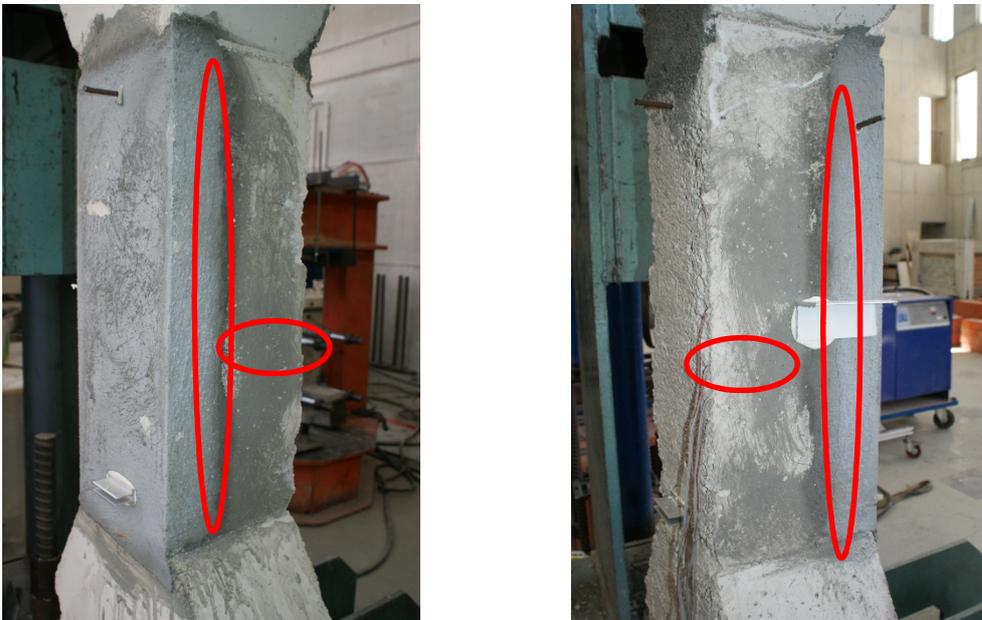


Figura 97 - Pilares PR1C_R3+PU tras el ensayo a compresión. Fisuración caras laterales C2 y C4 respectivamente.

En la siguiente figura se observa que la rotura de la adherencia es cohesiva principalmente en el seno del mortero de reparación.



Figura 98 - Pilares PR1C_R3+PU tras el ensayo a compresión. Detalle del desprendimiento de la capa de reparación tras el ensayo.

Las figuras 93 y 94 muestran las curvas fuerza-deformación por una parte para la cara delantera, Cara C1, y por otra parte, para la cara trasera, Cara C3.

Nota: la cara dañada es la cara C3.

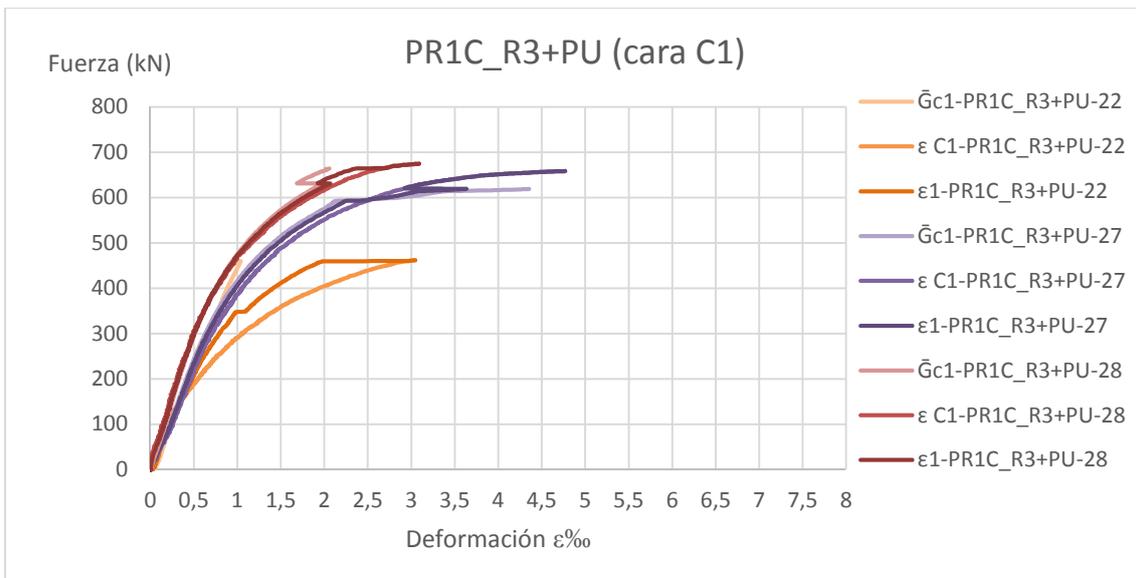


Figura 99. Gráfica Fuerza-deformación de la Cara C1 correspondiente a los pilares P22, P27 y P28.

\bar{G} representa las deformaciones en tanto por mil de las armaduras longitudinales.

\bar{C} representa las deformaciones en tanto por mil de las caras del hormigón.

ε representa las deformaciones medias (\bar{G} y \bar{C}) del pilar en tanto por mil.

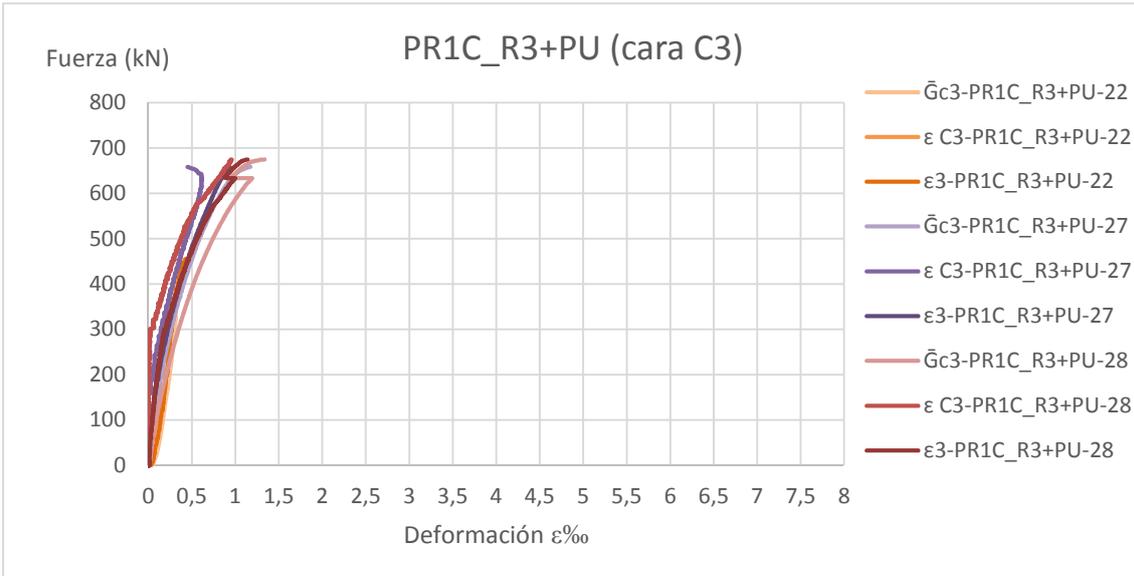


Figura 100. Gráfica Fuerza-deformación de la Cara C3 correspondiente a los pilares P22, P27 y P28. \bar{G} representa las deformaciones en tanto por mil de las armaduras longitudinales. \bar{C} representa las deformaciones en tanto por mil de las caras del hormigón. ϵ representa las deformaciones medias (\bar{G} y \bar{C}) del pilar en tanto por mil.

En la figura 101 se muestran las deformaciones medias para cada pilar patrón y ambas caras (C1 y C3).

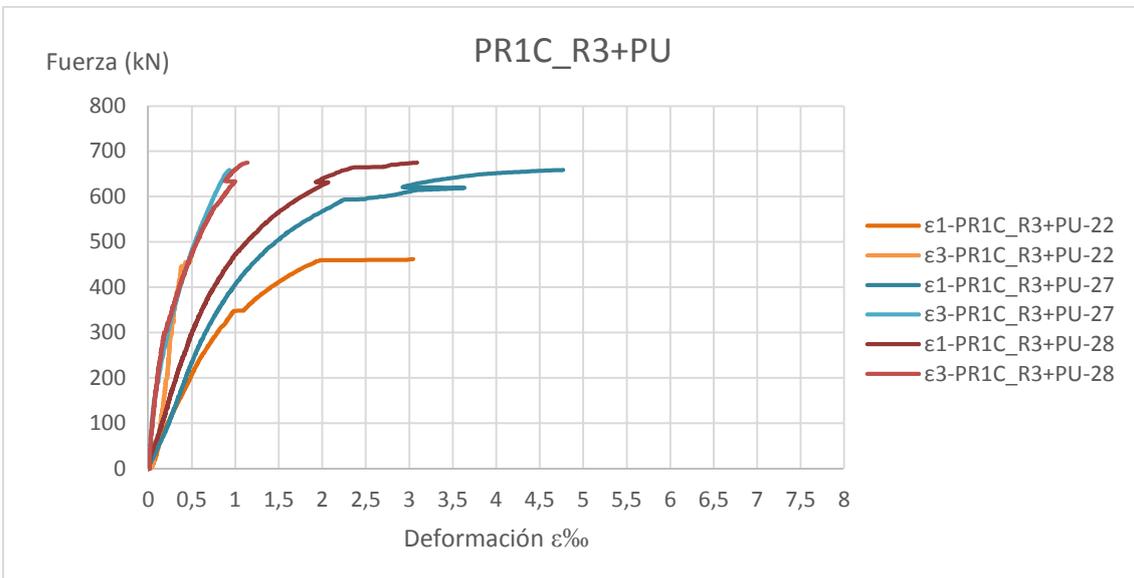


Figura 101. Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PR1C_R3+PU.

Las figuras 102 y 103 muestran las gráficas fuerza-deformación de los pilares PR1C_R3+PU frente a los pilares patrones dañados PPD1C, para las dos caras por separado.

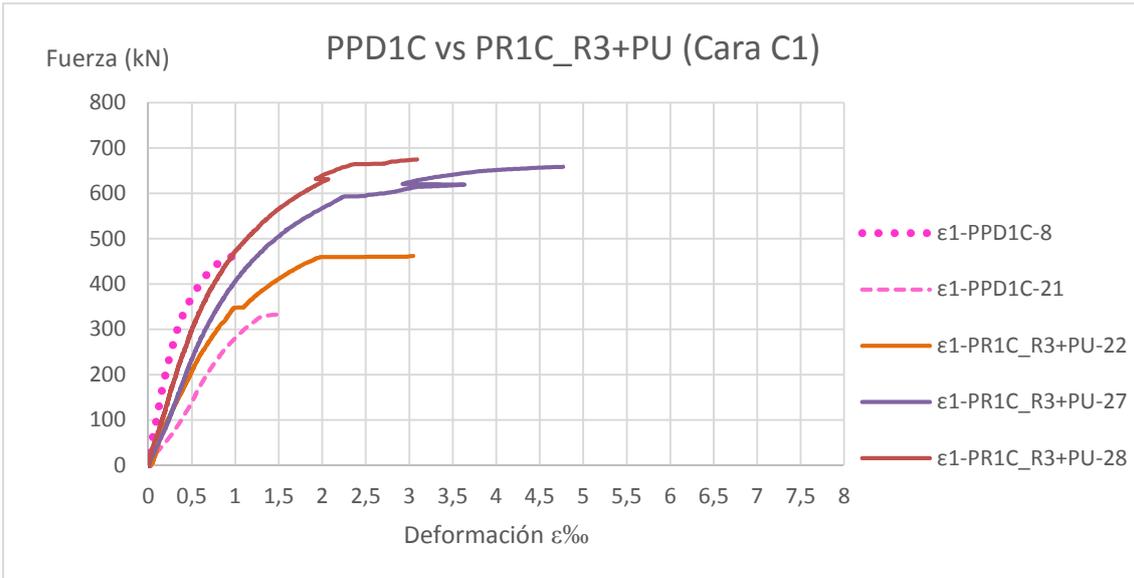


Figura 102. Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PPD1C y PR1C_R3+PU cara delantera C1.

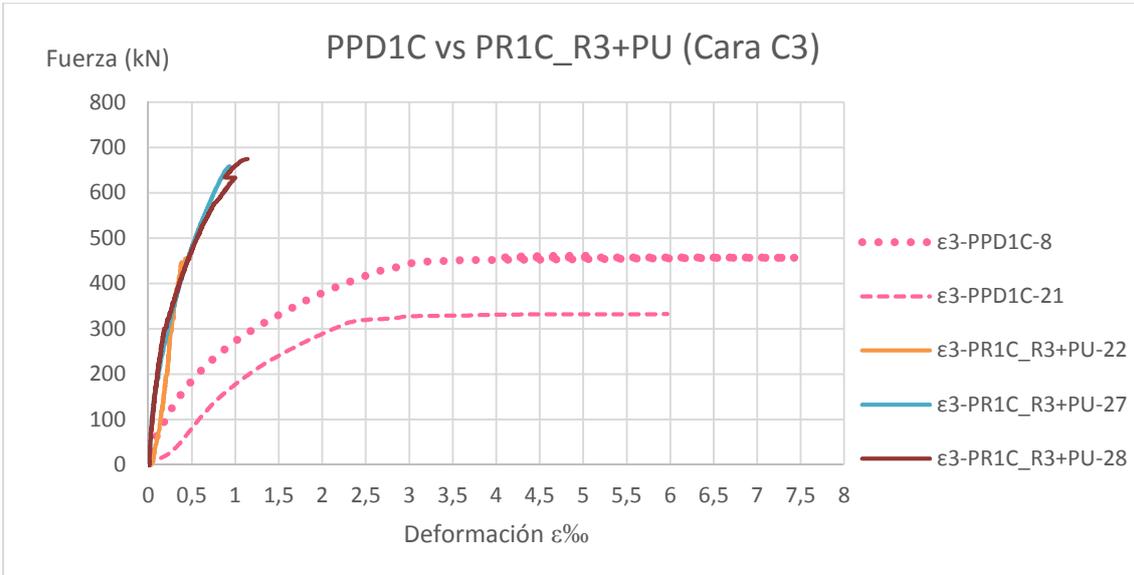


Figura 103. Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PPD1C y PR1C_R3+PU cara trasera C3.

En la siguiente figura (figura 104) podemos ver el comportamiento global de los pilares PR1C_R3+PU frente a los pilares patrón dañados a una cara, PPD1C.

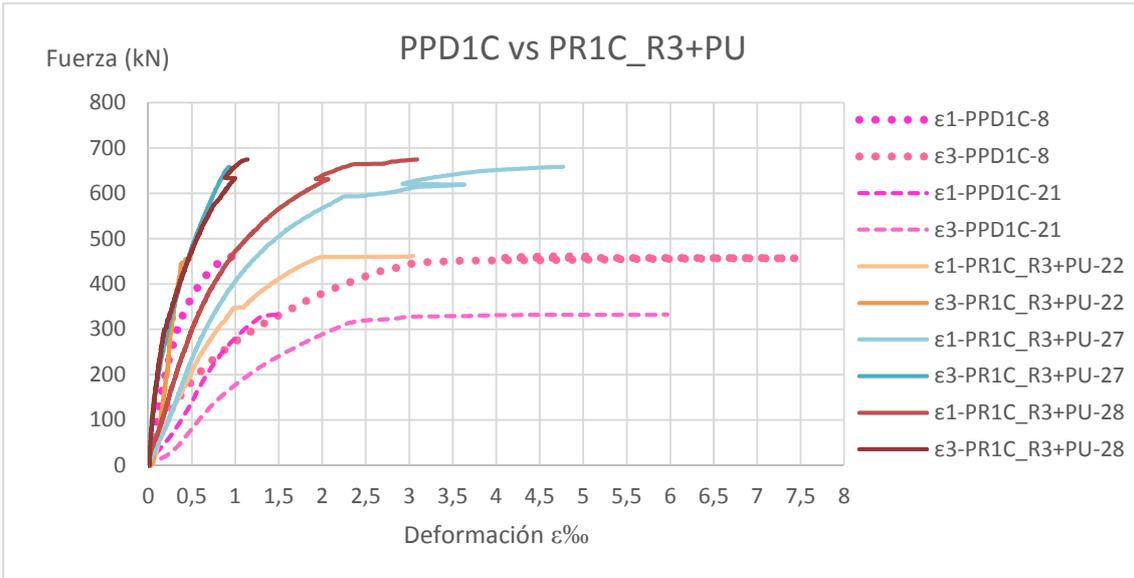


Figura 104. Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PPD1C y PR1C_R3+PU.

El comportamiento de la curva fuerza-deformación de los pilares PR1C_R3+PU frente a los dañados, PPD1C, y a los patrones sección original, PP, se puede observar en las figuras 105 y 106.

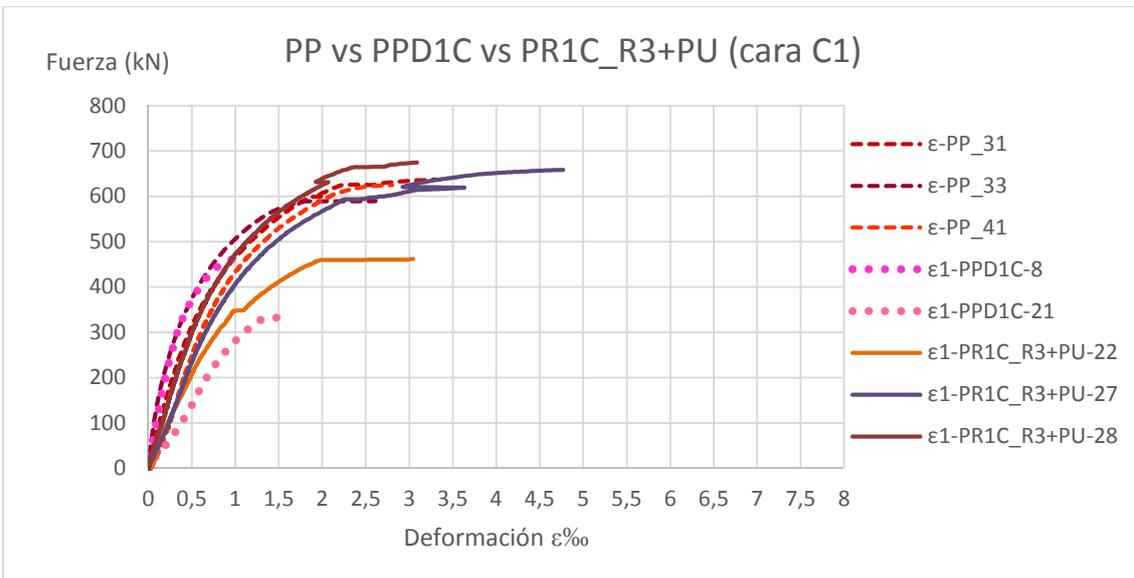


Figura 105. Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PP, PPD1C y PR1C_R3+PU cara delantera C1 (inalterada).

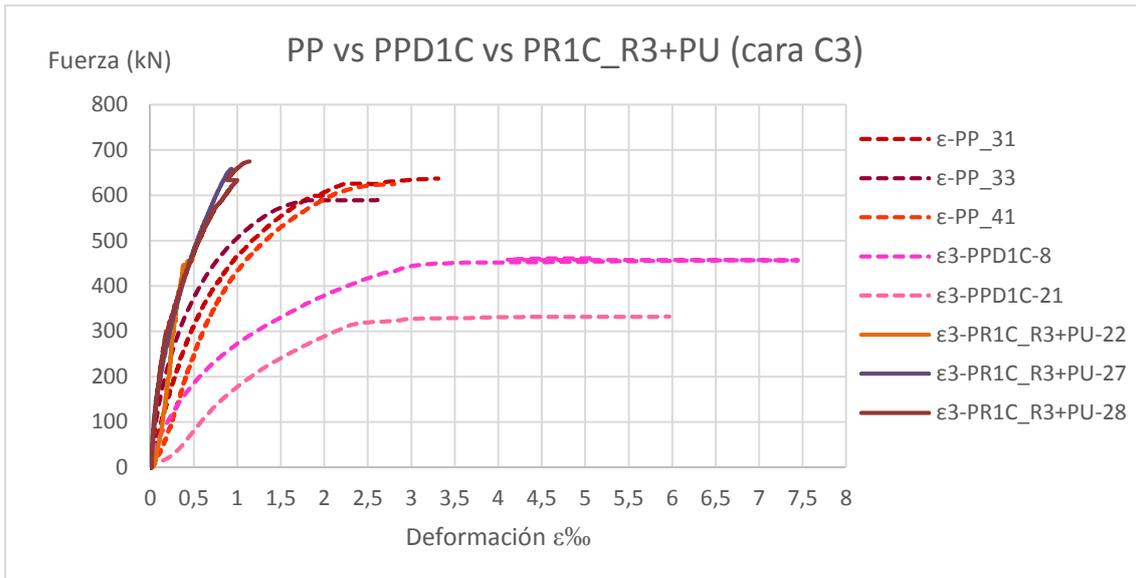


Figura 106. Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PP, PPD1C y PR1C_R3+PU cara trasera C3 (dañada y reparada).

4.3.3. PR1C R3 sin puente de unión

Las figuras 107 y 108 muestran el estado de los pilares tras el ensayo. En ellas se puede observar que la Cara C1 presenta una muy fina fisura horizontal a mitad de altura, que se extienden hacia las caras laterales, y una fisura vertical de poca longitud, a 1cm aproximadamente de la esquina con la Cara C2.

Se observa como un espesor de aproximadamente 1'5cm de capa de mortero de reparación se agrieta por los laterales.

La Cara C3 no presenta ninguna fisura.



Figura 107 - Pilares PR1C_R3 tras el ensayo a compresión. Fisuración caras C1 y C3 respectivamente.



Figura 108 - Pilares PR1C_R3 tras el ensayo a compresión. Fisuración caras laterales, C2 y C4 respectivamente.

En la figura 109 se observa que la rotura de la adherencia es cohesiva en el seno del mortero de reparación.



Figura 109 - Pilares PR1C_R3 tras el ensayo a compresión. Detalle del desprendimiento de la capa de reparación tras el ensayo.

Las figuras 110 y 111 muestran las curvas fuerza-deformación por una parte para la cara delantera, Cara C1, y por otra parte, para la cara trasera, Cara C3.

Nota: la cara dañada es la cara C3.

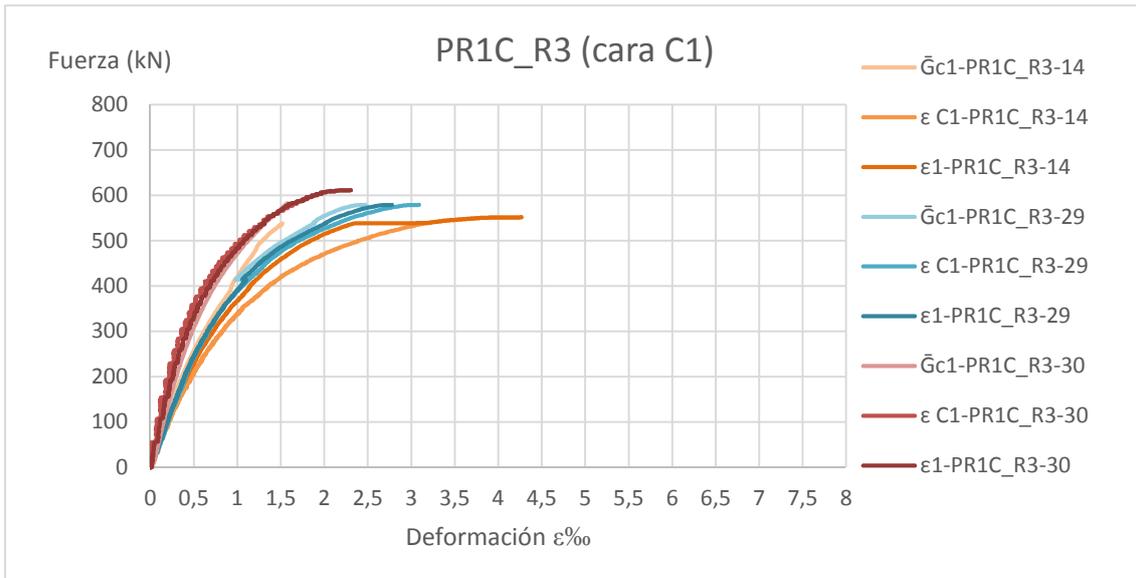


Figura 110. Gráfica Fuerza-deformación de la Cara C1 correspondiente a los pilares P14, P29 y P30. \bar{G} representa las deformaciones en tanto por mil de las armaduras longitudinales. \hat{C} representa las deformaciones en tanto por mil de las caras del hormigón. ϵ representa las deformaciones medias (\bar{G} y \hat{C}) del pilar en tanto por mil.

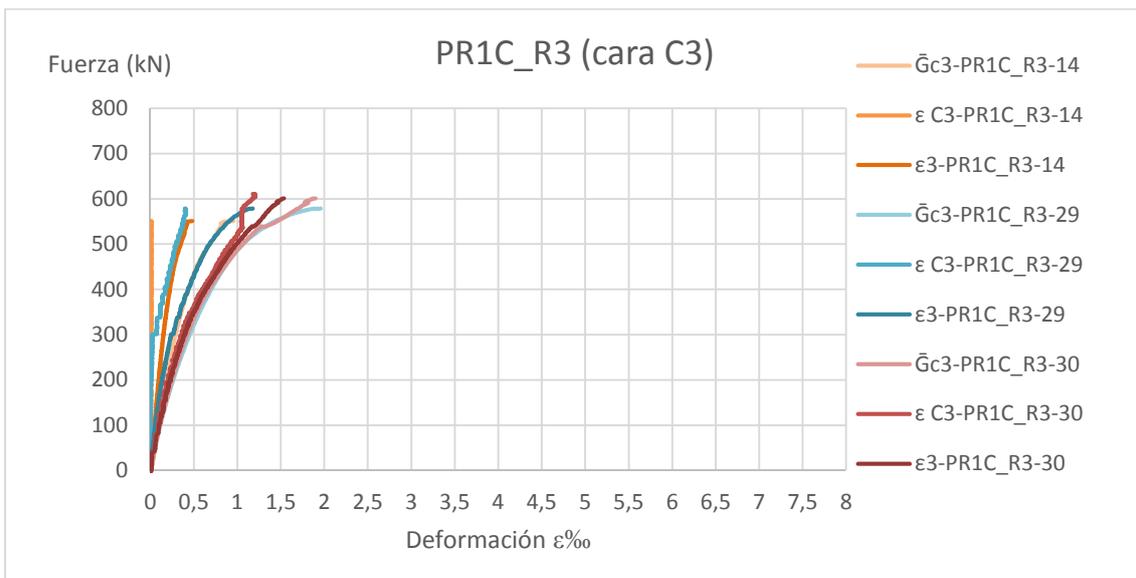


Figura 111. Gráfica Fuerza-deformación de la Cara C3 correspondiente a los pilares P14, P29 y P30. \bar{G} representa las deformaciones en tanto por mil de las armaduras longitudinales. \hat{C} representa las deformaciones en tanto por mil de las caras del hormigón. ϵ representa las deformaciones medias (\bar{G} y \hat{C}) del pilar en tanto por mil.

La figura 112 muestra las deformaciones medias en las caras C1 (intacta) y C3 (reparada) de cada uno de los pilares PR1C_R3.



Figura 112. Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PR1C_R3.

Las figuras 113 y 114 muestran las gráficas fuerza-deformación de los pilares PR1C_R3 frente a los pilares patrones dañados PPD1C, para las dos caras por separado.

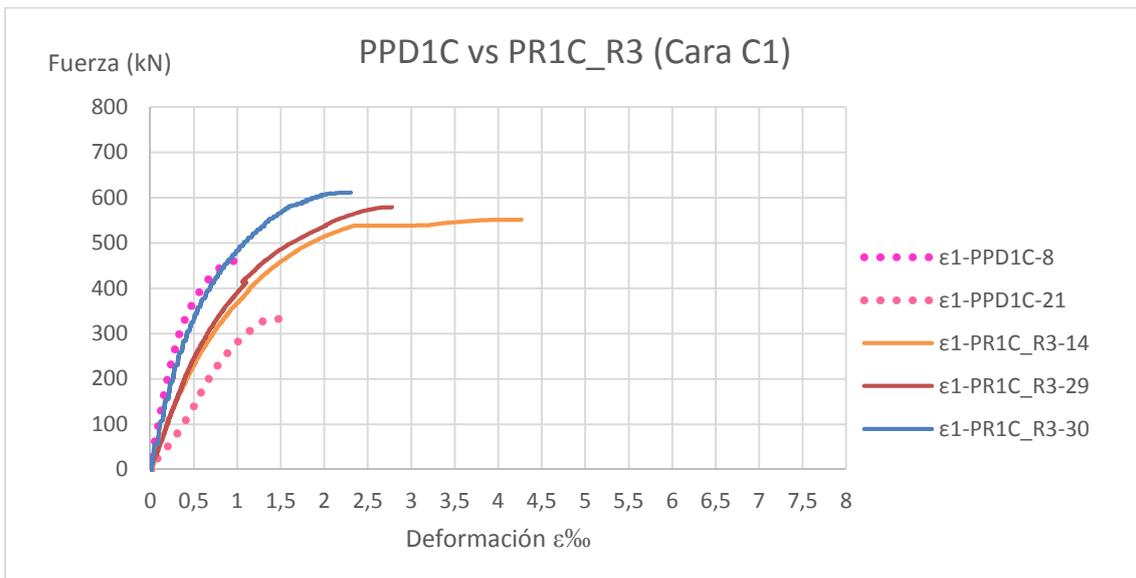


Figura 113. Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PPD1C y PR1C_R3 cara delantera C1.

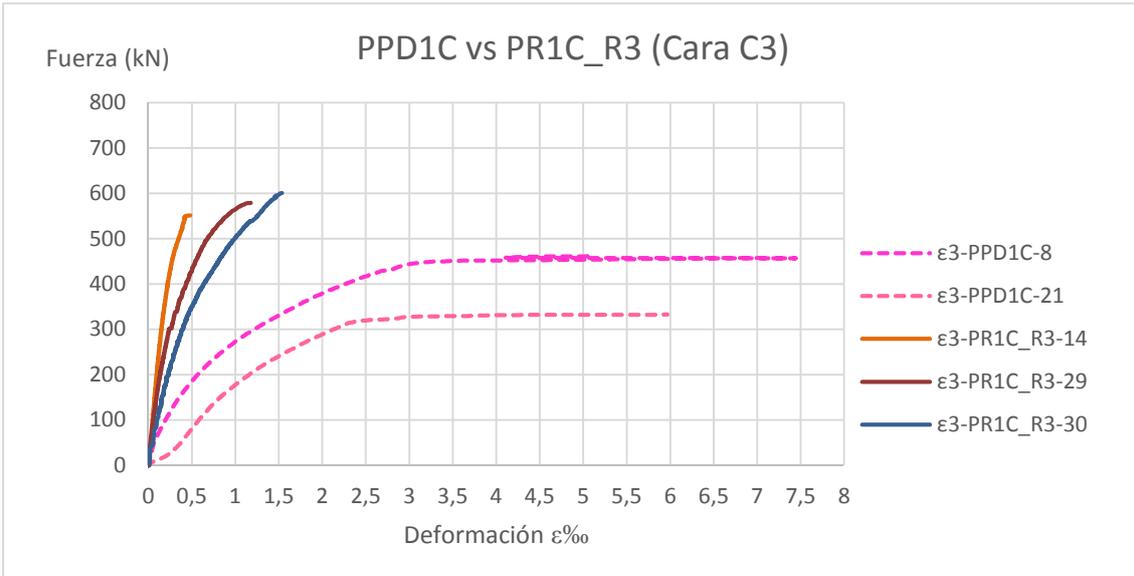


Figura 114. Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PPD1C y PR1C_R3 cara trasera C3.

El comportamiento de la curva fuerza-deformación de los pilares PR1C_R3 frente a los dañados, PPD1C, y a los patrones sección original, PP, se puede observar en las figuras 115 y 116.

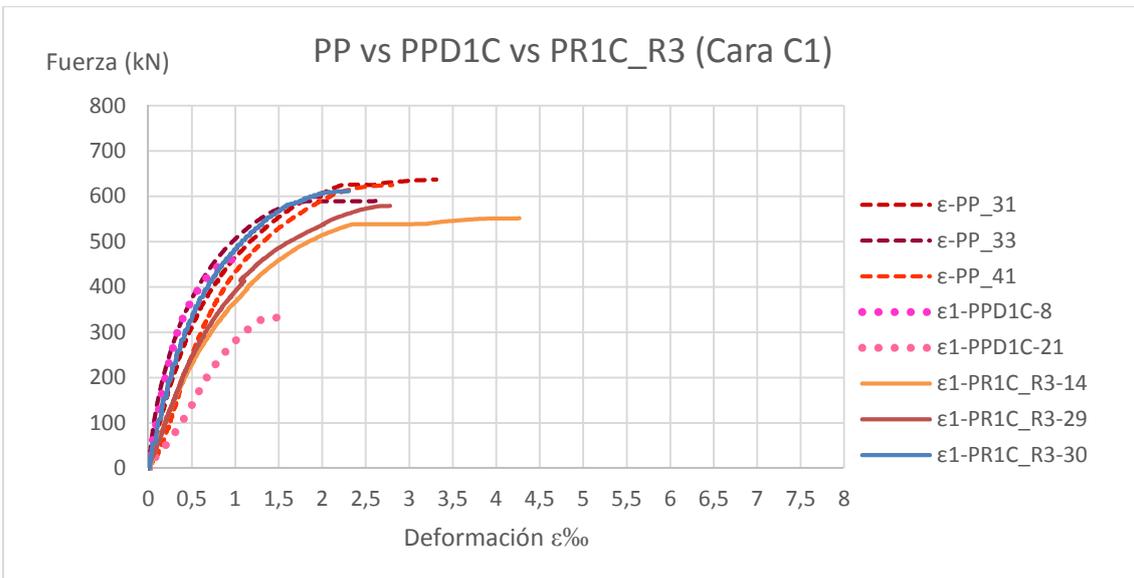


Figura 115. Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PP, PPD1C y PR1C_R3 cara delantera C1.

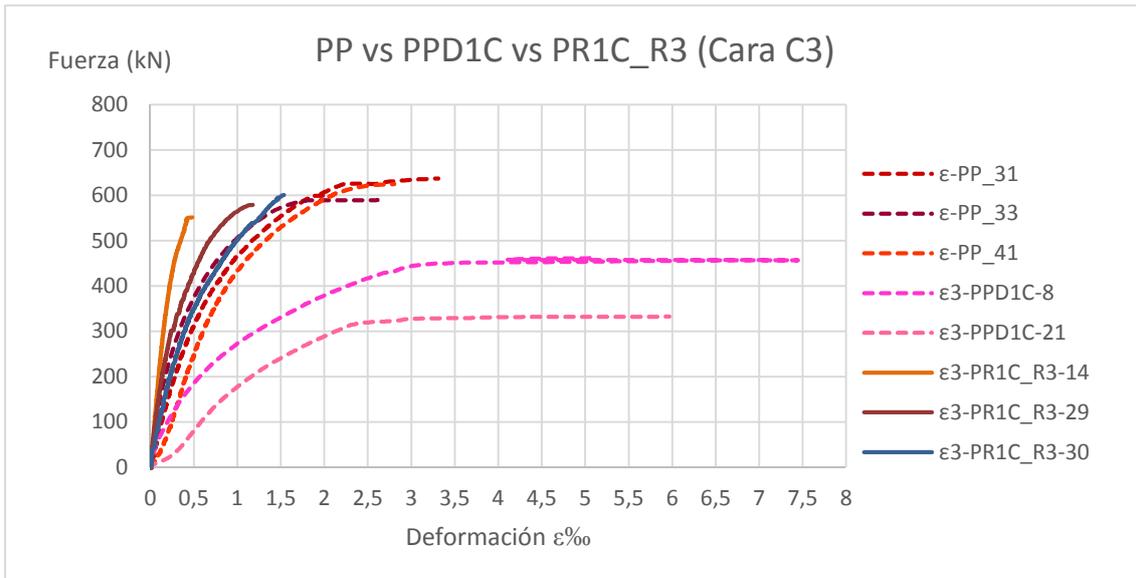


Figura 116. Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PP, PPD1C y PR1C_R3 cara trasera C3.

4.3.4. PR1C R4 con puente de unión

Las figuras de la 117 a la 119 muestran el estado de los pilares tras el ensayo. En ellas se puede observar que la cara C1 presenta una fisura horizontal muy fina a mitad de altura, que se extiende hacia las caras laterales.

La Cara C3 no presenta fisuras.

La Cara C4 presenta fisuras muy finas verticales y de pequeña longitud.

Por los laterales, se observa cómo se agrieta y se desprende una capa de reparación de un espesor de aproximadamente 1'5cm.



Figura 117 - Pilares PR1C_R4+PU tras el ensayo a compresión. Fisuración caras C1 y C3 respectivamente.



Figura 118 - Pilares PR1C_R4+PU tras el ensayo a compresión. Fisuración cara lateral C2.



Figura 119 - Pilares PR1C_R4+PU tras el ensayo a compresión. Fisuración cara lateral C4.

En la figura 120 se observa que la rotura de la adherencia es cohesiva principalmente en el seno del mortero de reparación.



Figura 120 - Pilares PR1C_R4+PU tras el ensayo a compresión. Detalle del desprendimiento de la capa de reparación tras el ensayo.

Las figuras 121 y 122 muestran las curvas fuerza-deformación por una parte para la cara delantera, Cara C1, y por otra parte, para la cara trasera, Cara C3.

El pilar P26 se descartó debido a un fallo en el hormigonado, lo cual provocó que las cabezas no tuvieran la geometría diseñada.

Nota: la cara dañada es la cara C3.

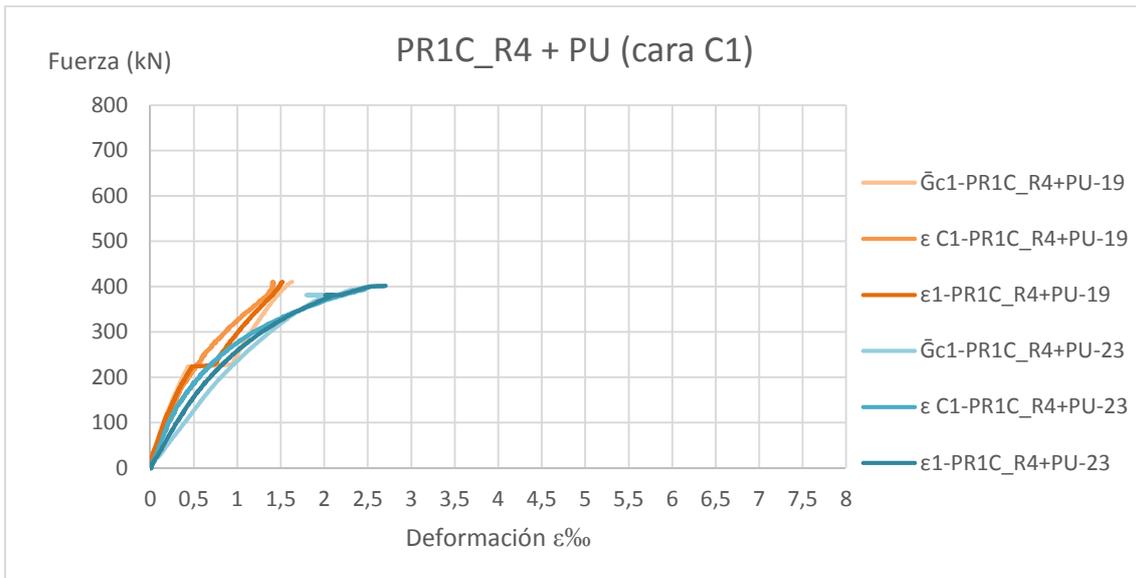


Figura 121. Gráfica Fuerza-deformación de la Cara C1 correspondiente a los pilares P19 y P23.

\bar{G} representa las deformaciones en tanto por mil de las armaduras longitudinales.

\hat{C} representa las deformaciones en tanto por mil de las caras del hormigón.

ϵ representa las deformaciones medias (\bar{G} y \hat{C}) del pilar en tanto por mil.

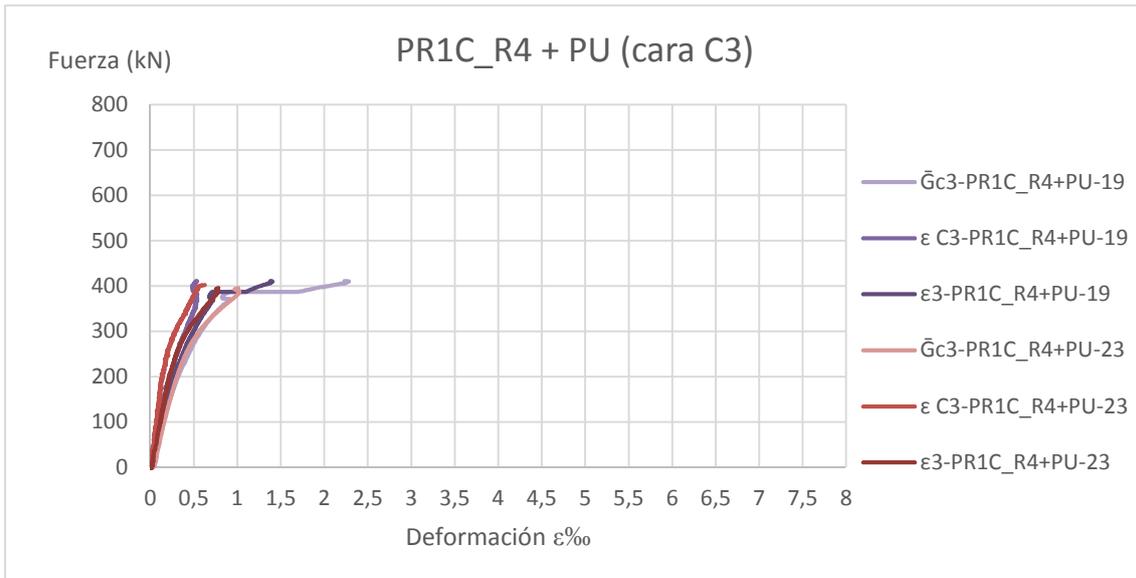


Figura 122. Gráfica Fuerza-deformación de la Cara C3 correspondiente a los pilares P19 y P23.

\bar{G} representa las deformaciones en tanto por mil de las armaduras longitudinales.

\bar{C} representa las deformaciones en tanto por mil de las caras del hormigón.

ϵ representa las deformaciones medias (\bar{G} y \bar{C}) del pilar en tanto por mil.

La figura 123 muestra las deformaciones medias de las caras C1 (intacta) y C3 (reparada) de cada uno de los pilares ensayados.

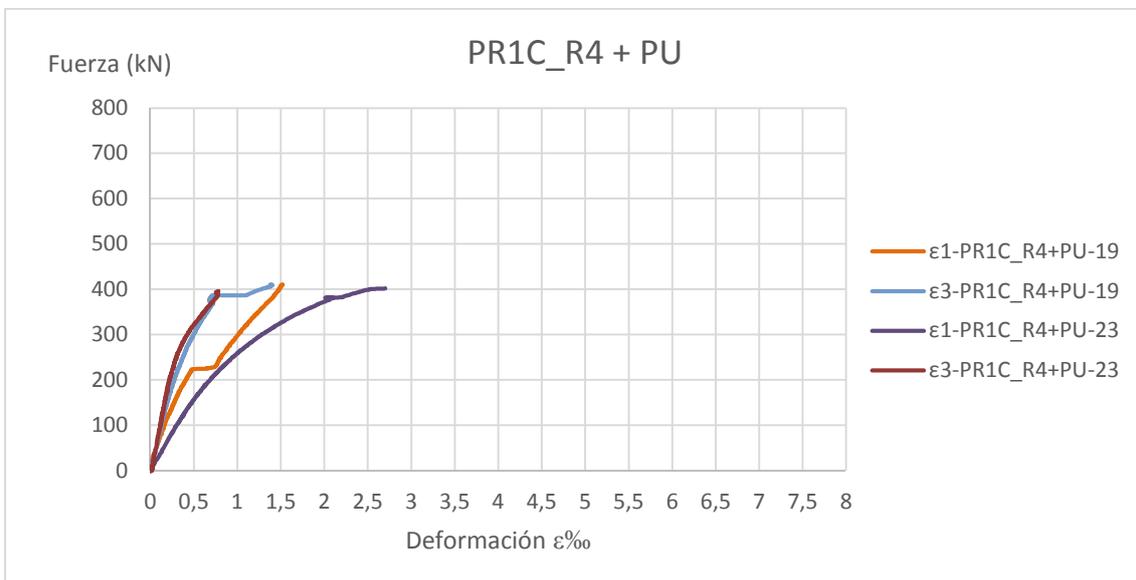


Figura 123. Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PR1C_R4+PU.

En las figuras 124 y 125 se muestran las gráficas fuerza-deformación de los pilares PR1C_R3 frente a los pilares patrones dañados PPD1C, para las dos caras por separado.

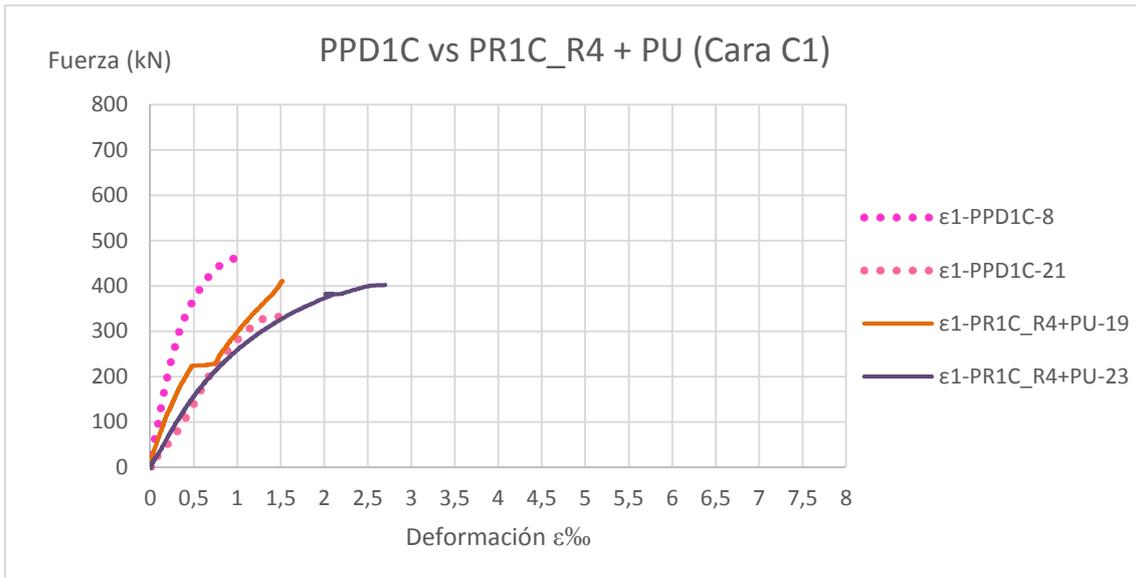


Figura 124. Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PPD1C y PR1C_R4+PU cara delantera C1.

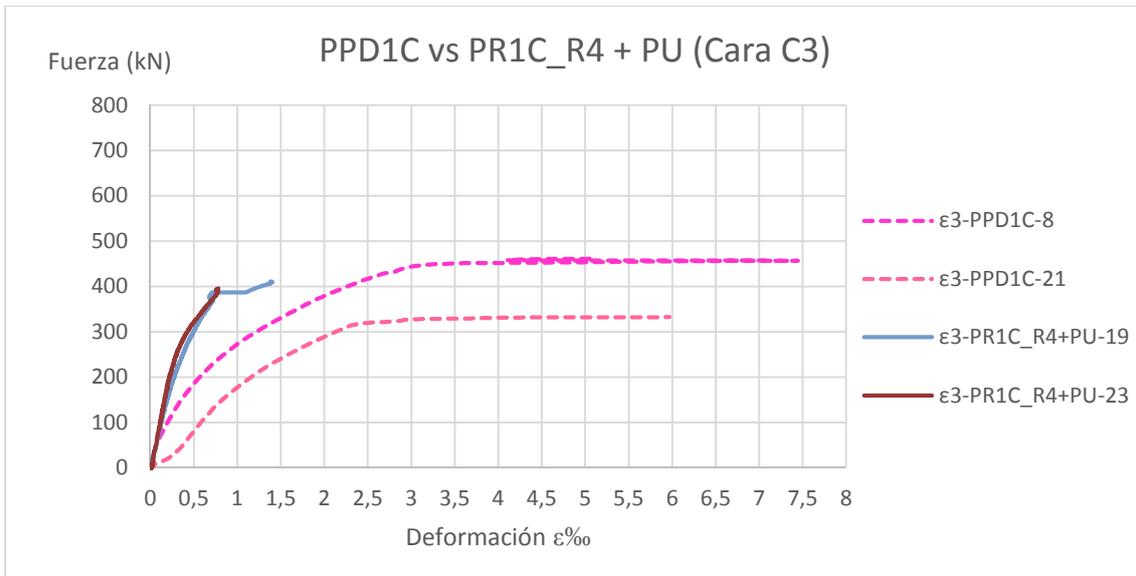


Figura 125. Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PPD1C y PR1C_R4+PU cara trasera C3.

El comportamiento de la curva fuerza-deformación de los pilares PR1C_R3 frente a los dañados, PPD1C, y a los patrones sección original, PP, se puede observar en las figuras 126 y 127.

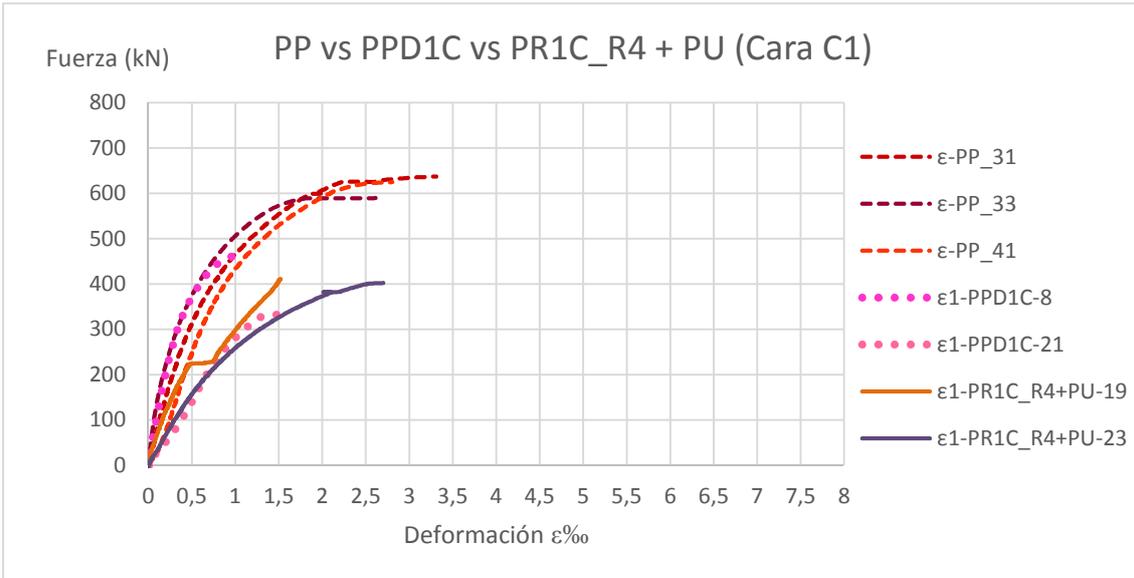


Figura 126. Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PP, PPD1C y PR1C_R4+PU cara delantera C1.

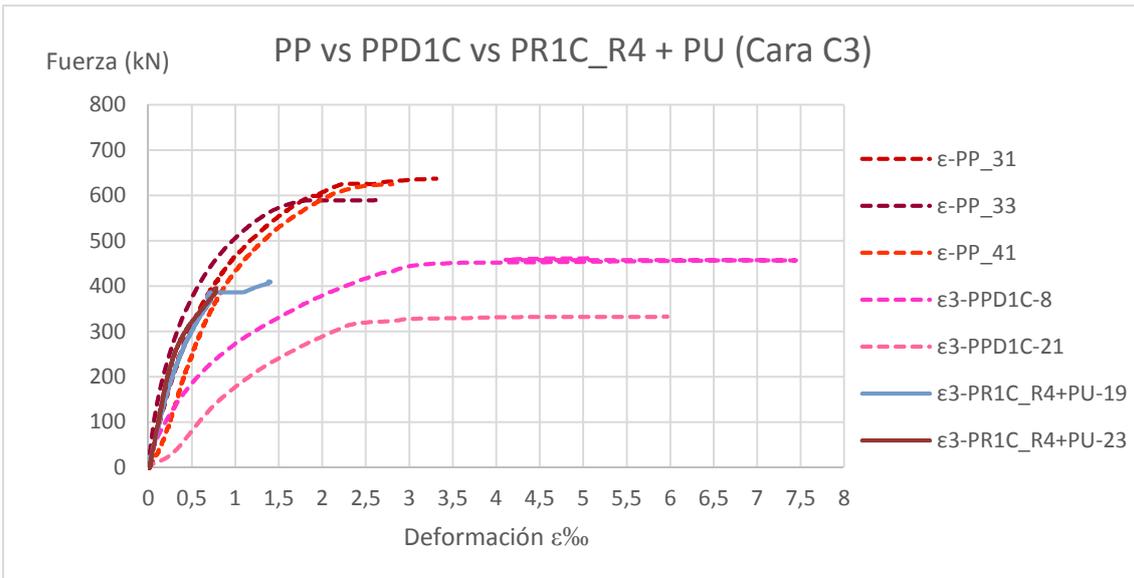


Figura 127. Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PP, PPD1C y PR1C_R4+PU cara trasera C3.

4.3.5. PR1C R4 sin puente de unión

Las figuras 128 y 129 muestran el estado de los pilares tras el ensayo. En ellas se puede observar que la Cara C1 presenta fisura horizontal que se transmite hacia las caras laterales y está ubicada a mitad de altura.

La Cara C3 presenta grietas verticales.

En las caras laterales se observa como la reparación se despega y se desprende parte de la capa de reparación.



Figura 128 - Pilares PR1C_R4 tras el ensayo a compresión. Fisuración caras C1 y C3 respectivamente.



Figura 129 - Pilares PR1C_R4 tras el ensayo a compresión. Fisuración caras C2 y C4 respectivamente.

Las figuras 130 y 131 muestran las curvas fuerza-deformación por una parte para la cara delantera, Cara C1, y por otra parte, para la cara trasera, Cara C3.

Nota: la cara dañada es la cara C3.

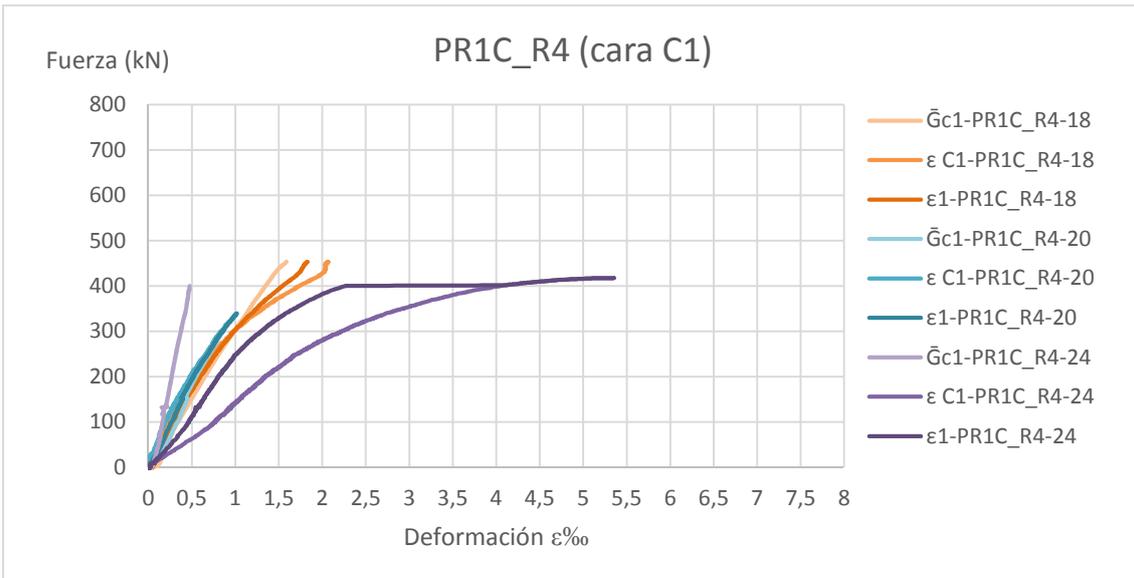


Figura 130. Gráfica Fuerza-deformación de la Cara C1 correspondiente a los pilares P18, P20 y P24. \bar{G} representa las deformaciones en tanto por mil de las armaduras longitudinales. \hat{C} representa las deformaciones en tanto por mil de las caras del hormigón. ϵ representa las deformaciones medias (\bar{G} y \hat{C}) del pilar en tanto por mil.

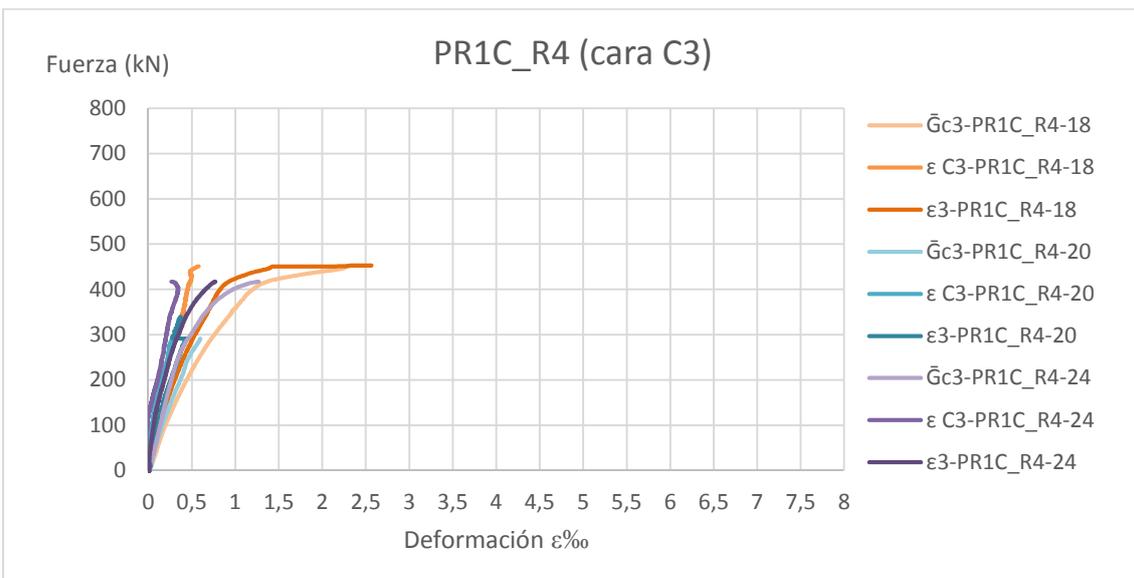


Figura 131. Gráfica Fuerza-deformación de la Cara C3 correspondiente a los pilares P18, P20 y P24. \bar{G} representa las deformaciones en tanto por mil de las armaduras longitudinales. \hat{C} representa las deformaciones en tanto por mil de las caras del hormigón. ϵ representa las deformaciones medias (\bar{G} y \hat{C}) del pilar en tanto por mil.

La figura 132 muestra las deformaciones medias para cada pilar patrón y ambas caras (C1 y C3).

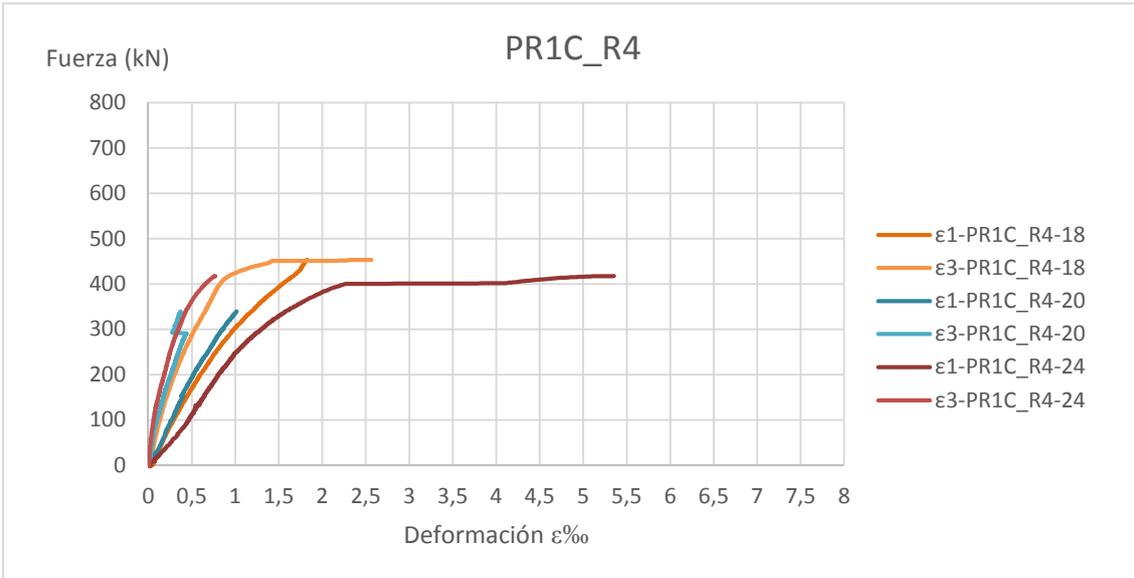


Figura 132. Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PR1C_R4.

Las figuras 133 y 134 muestran las gráficas fuerza-deformación de los pilares PR1C_R3 frente a los pilares patrones dañados PPD1C, para las dos caras por separado.

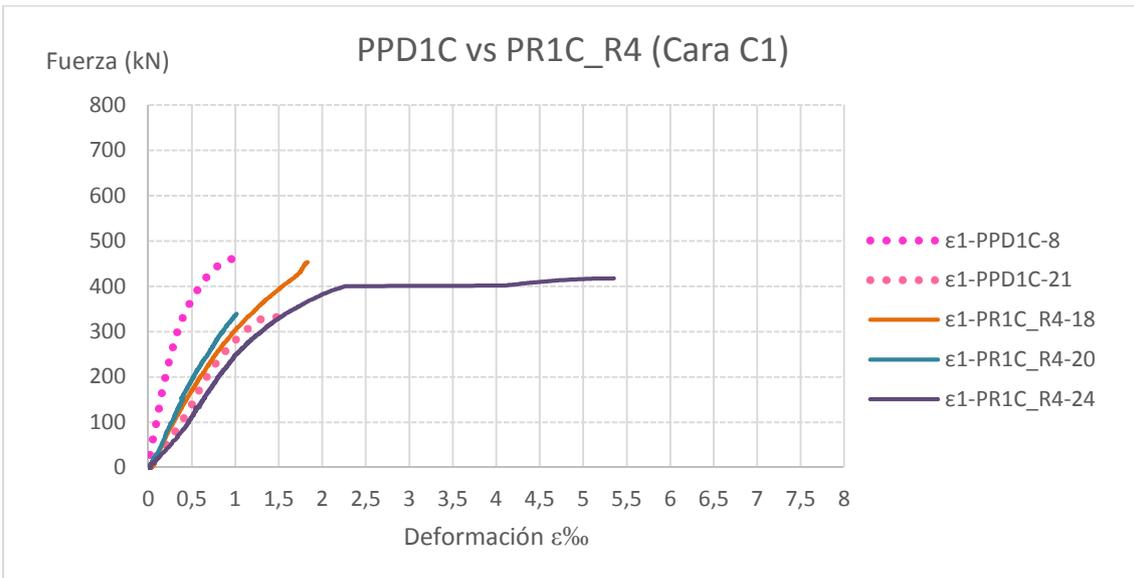


Figura 133. Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PPD1C y PR1C_R4 cara delantera C1.

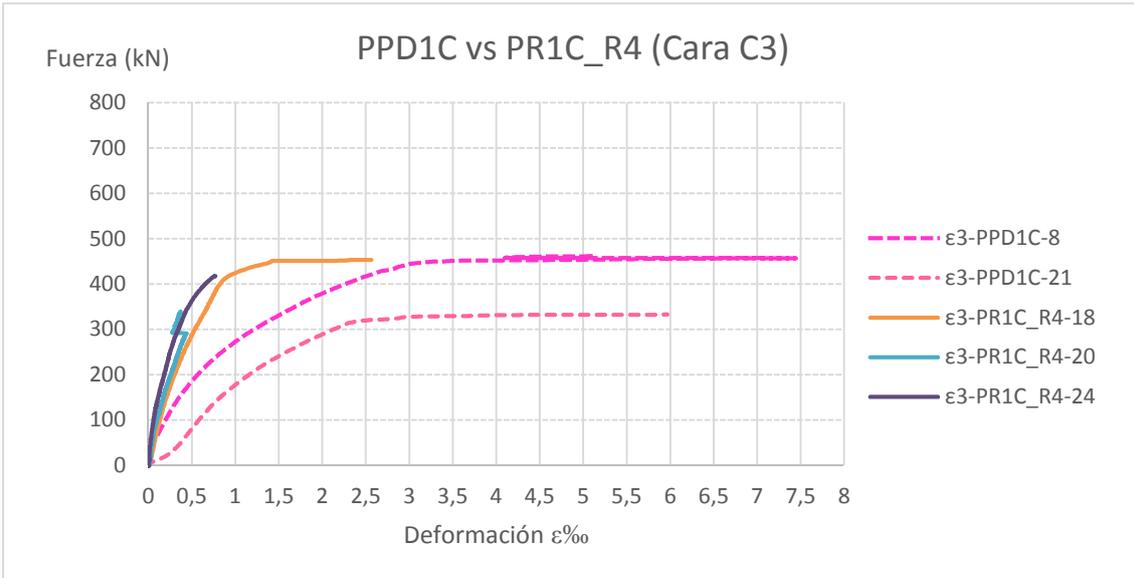


Figura 134. Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PPD1C y PR1C_R4 cara trasera C3.

El comportamiento de la curva fuerza-deformación de los pilares PR1C_R3 frente a los dañados, PPD1C, y a los patrones sección original, PP, se puede observar en las figuras 135 y 136.

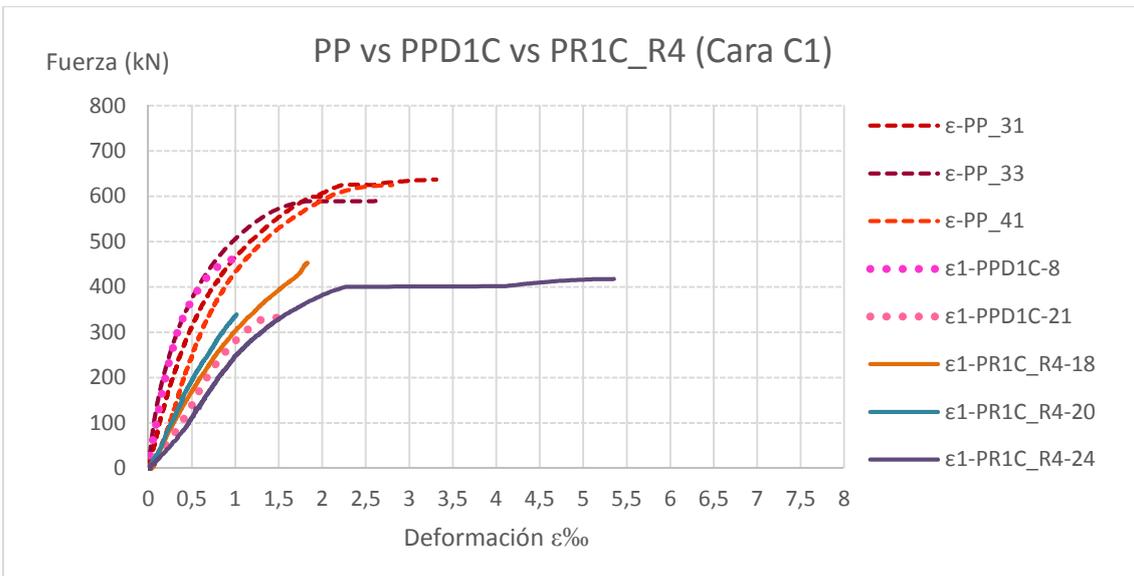


Figura 135. Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PP, PPD1C y PR1C_R4 cara delantera C1.

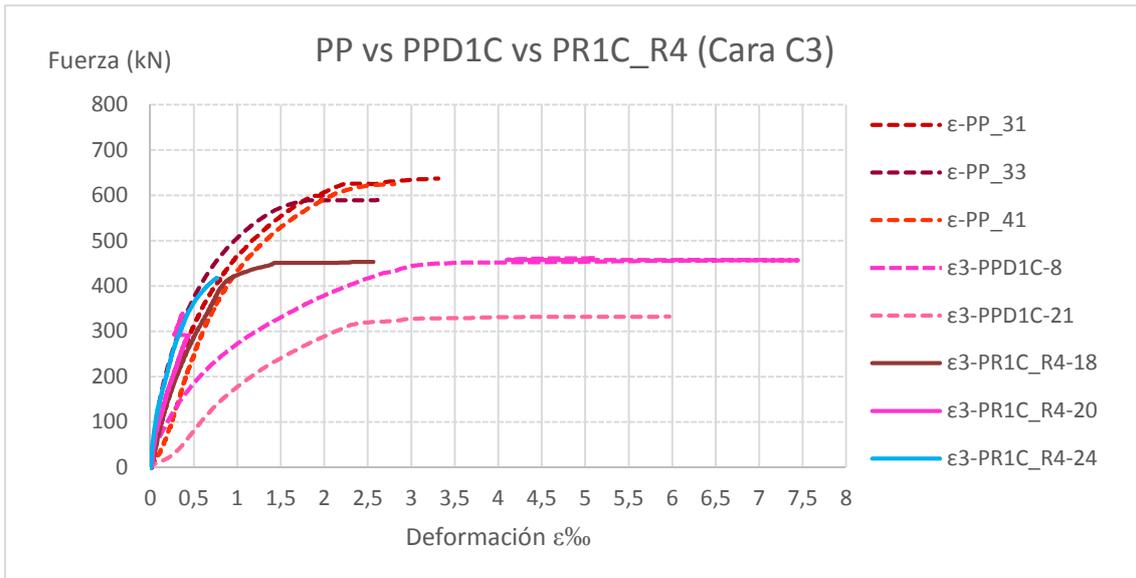


Figura 136. Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PP, PPD1C y PR1C_R4 cara trasera C3.

4.4. Pilares con daño y reparación por parcheo

En este apartado se presenta el conjunto de pilares con daño y pilares reparados por Parcheo con los distintos sistemas empleados. Los pilares reparados se dividen en cuatro subfamilias correspondientes a cada tipo de reparación:

- Pilares reparados con mortero Clase R3 con puente de unión.
- Pilares reparados con mortero Clase R3 sin puente de unión.
- Pilares reparados con mortero Clase R4 con puente de unión.
- Pilares reparados con mortero Clase R3 sin puente de unión.

4.4.1. Pilares con daño Parcheo

El presente apartado recoge los resultados de los pilares patrón dañado, Pilar Patrón Daño Parcheo (PPDP). En las figuras 137 y 138 se puede observar el patrón de fisuración de las cuatro caras de los pilares, de manera global.

La Cara C3, cara opuesta al daño, se observa una fina fisura horizontal, situada a mitad de altura, que se extiende hacia las caras laterales, y ya en las caras laterales se inclina hacia abajo ligeramente.

La cara dañada, Cara C1, no presenta fisuración, pero sí que las armaduras que están prácticamente al descubierto, están deformadas.



Figura 137 - Pilares PPDP tras el ensayo a compresión. Fisuración caras C1 y C3 respectivamente.



Figura 138 - Pilares PPDP tras el ensayo a compresión. Fisuración caras laterales C2 y C4 respectivamente.

Las figuras 139 y 140 muestran las curvas fuerza-deformación por una parte para la cara delantera, Cara C1, y por otra parte, para la cara trasera, Cara C3.

Nota: la cara dañada es la cara C1.

Al igual que en el caso de los pilares con daño y reparados a una cara se analizaron las caras por separado, aquí también se realiza separadamente, ya que al concentrarse el daño en una cara, la carga axial deja de estar centrada y se está ante un caso de compresión excéntrica. Por este motivo el comportamiento es asimétrico y las deformaciones de las caras C1 (la que concentra el daño) y la C3 (inalterada) tienen un comportamiento totalmente distinto.

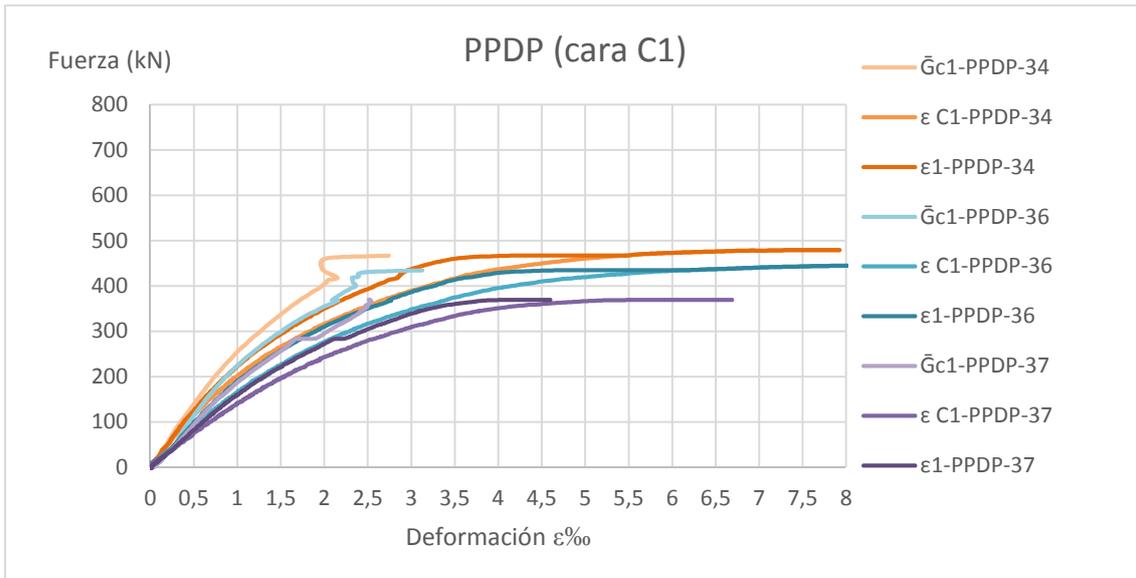


Figura 139. Gráfica Fuerza-deformación de la Cara C1 correspondiente a los pilares P34, P36 y P37. \bar{G} representa las deformaciones en tanto por mil de las armaduras longitudinales. \bar{C} representa las deformaciones en tanto por mil de las caras del hormigón. ϵ representa las deformaciones medias (\bar{G} y \bar{C}) del pilar en tanto por mil.

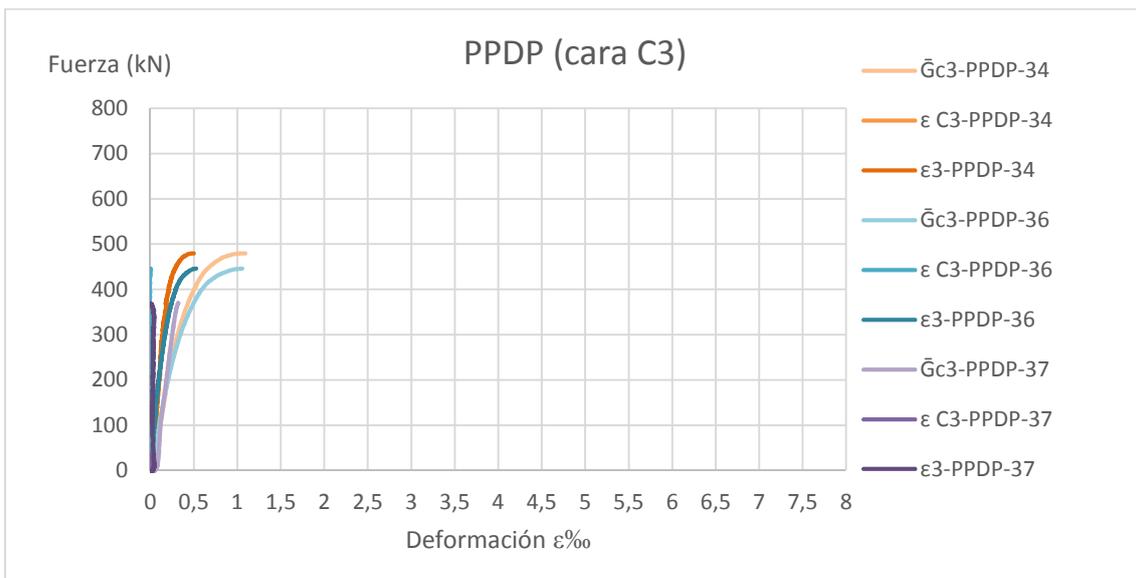


Figura 140. Gráfica Fuerza-deformación de la Cara C3 correspondiente a los pilares P34, P36 y P37. \bar{G} representa las deformaciones en tanto por mil de las armaduras longitudinales. \bar{C} representa las deformaciones en tanto por mil de las caras del hormigón. ϵ representa las deformaciones medias (\bar{G} y \bar{C}) del pilar en tanto por mil.

En la figura 141 se muestran las deformaciones medias en las caras C1 (reparada) y C3 (intacta) para cada uno de los pilares dañado de parcheo ensayados.

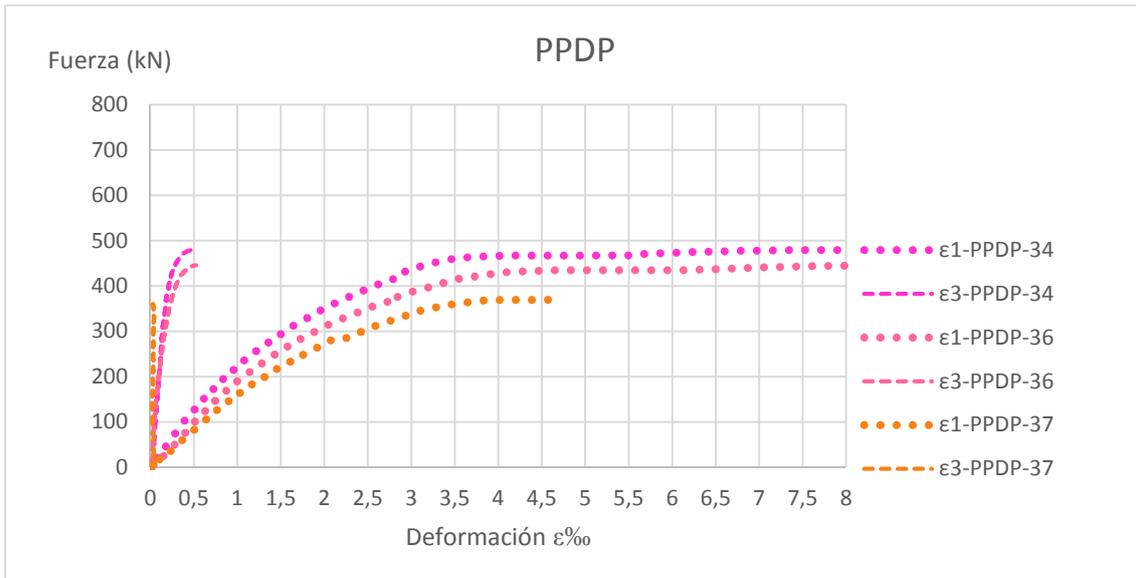


Figura 141. Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PPDP.

En la siguiente gráfica se puede observar el comportamiento del Patrón Daño Parcheo (PPDP) frente al Patrón-sección original (PP).

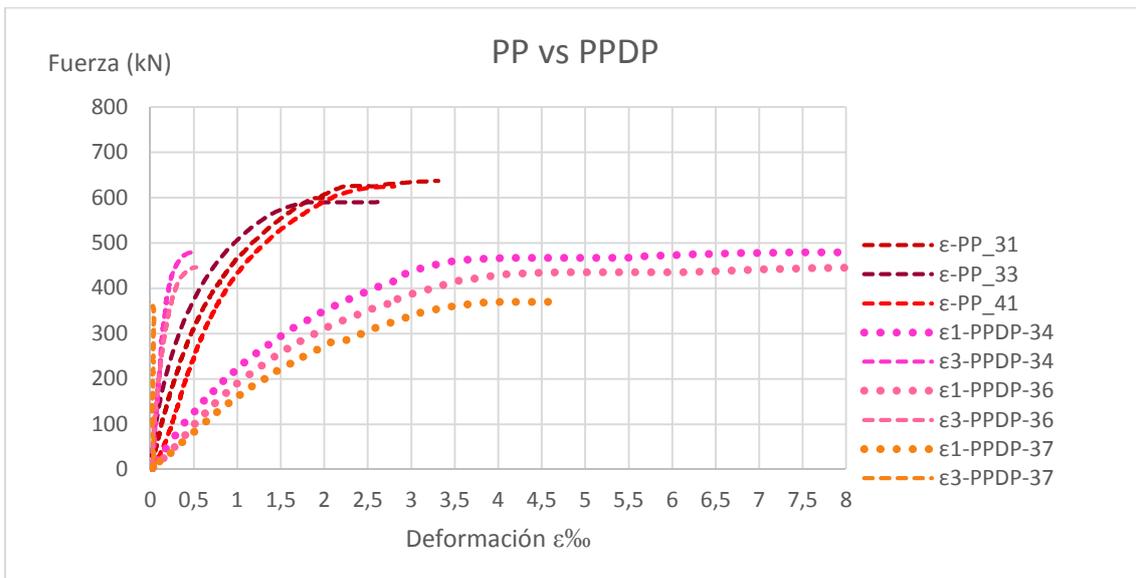


Figura 142 - Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PP y PPDP.

4.4.2. PRP R3 con puente de unión

Las figuras 143 y 144 muestran el estado de los pilares tras el ensayo. En ellas se puede observar que la cara reparada, Cara C1, presenta fisura/grieta vertical a unos 5cm de la esquina con la Cara C2.

La cara opuesta a la reparada, Cara C3, presenta una muy fina fisura horizontal a mitad de altura, pero casi imperceptible.

Las caras laterales solo muestran el despegue de la reparación.

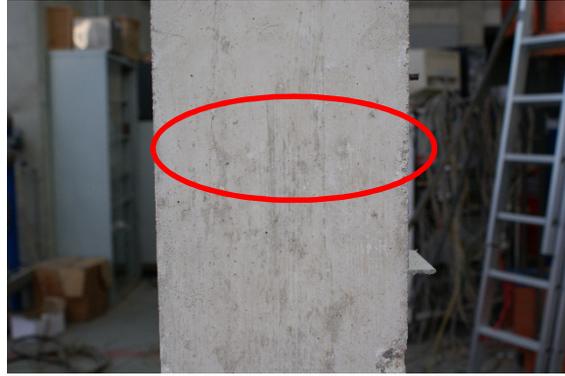


Figura 143- Pilares PRP_R3+PU tras el ensayo a compresión. Fisuración caras C1 y C3 respectivamente.



Figura 144 - Pilares PRP_R3+PU tras el ensayo a compresión. Fisuración caras laterales C2 y C4 respectivamente.

Las figuras 145 y 146 muestran las curvas fuerza-deformación por una parte para la cara delantera, Cara C1 (reparada), y por otra parte, para la cara trasera, Cara C3 (intacta).

Las deformaciones medidas por el captador Ci, hace referencia a las deformaciones medidas en la interfase mortero-hormigón de la cara C1.

El pilar P44 se descartó debido a un fallo en el hormigonado, lo cual provocó que las cabezas no tuvieran perpendicularidad.

Nota: la cara dañada es la cara C1.

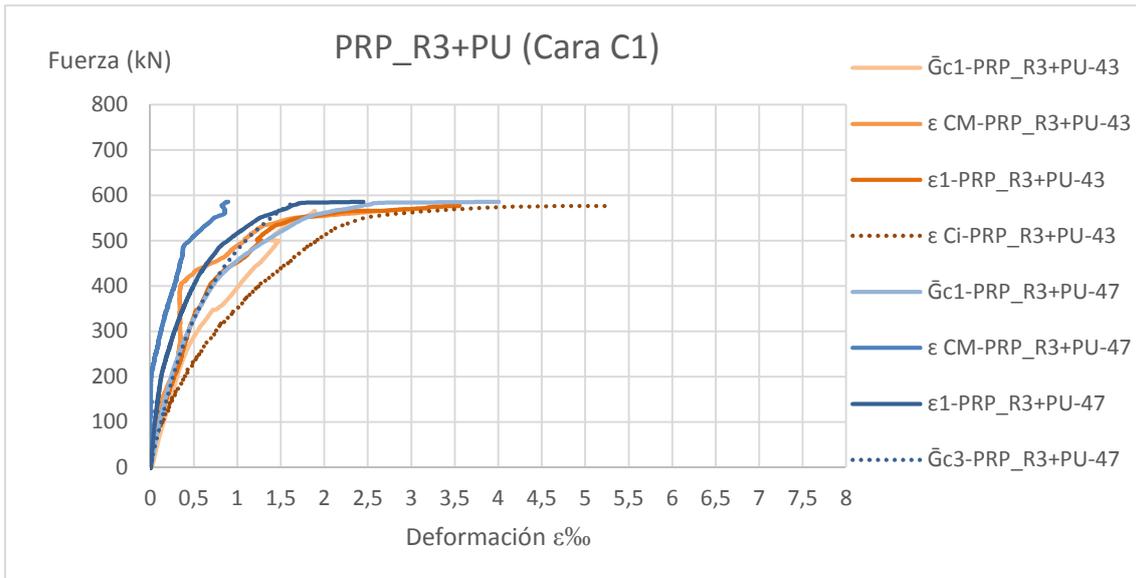


Figura 145 - Gráfica Fuerza-deformación de la cara C1 correspondiente a los pilares P43, P44 y P47.

\bar{G} representa las deformaciones en tanto por mil de las armaduras longitudinales.

\bar{C} representa las deformaciones en tanto por mil de las caras del hormigón.

ϵ representa las deformaciones medias (\bar{G} y \bar{C}) del pilar en tanto por mil.

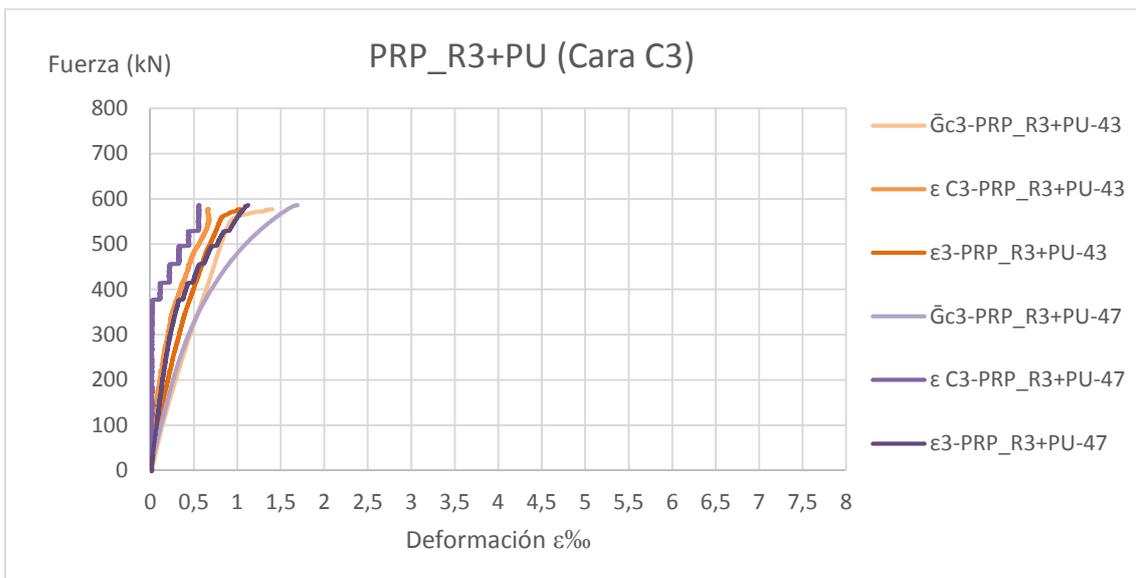


Figura 146 - Gráfica Fuerza-deformación de la cara C3 correspondiente a los pilares P43, P44 y P47.

\bar{G} representa las deformaciones en tanto por mil de las armaduras longitudinales.

\bar{C} representa las deformaciones en tanto por mil de las caras del hormigón.

ϵ representa las deformaciones medias (\bar{G} y \bar{C}) del pilar en tanto por mil.

En la figura 147 se muestran las deformaciones medias en las caras C1 (reparada) y C3 (intacta) en cada uno de los pilares PRP_R3+PU ensayados.

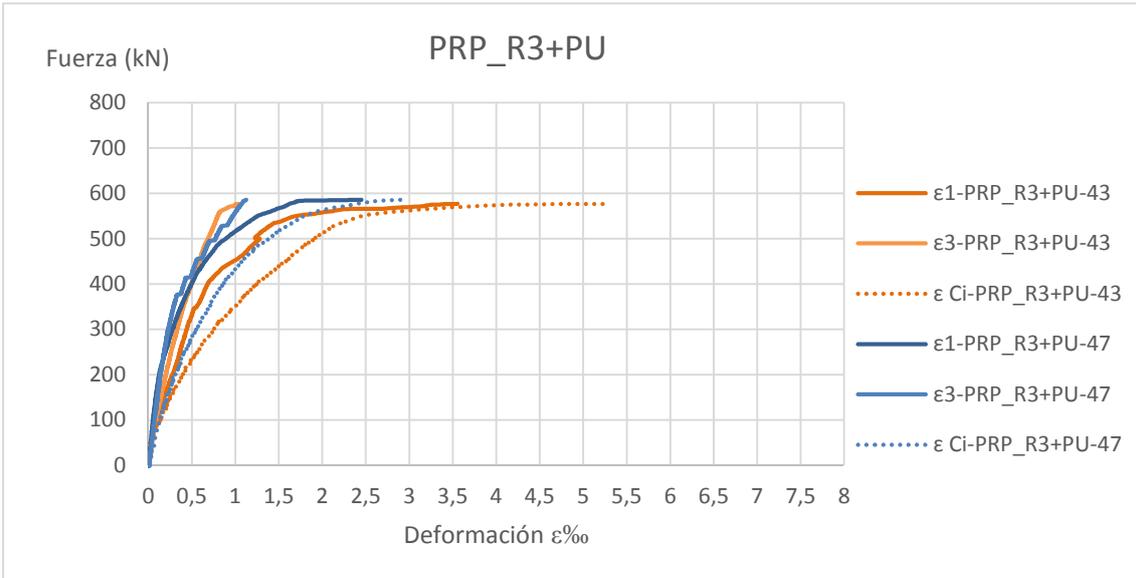


Figura 147 - Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PRP_R3+PU, en las caras C1 (dañada y reparada) y C3 (inalterada).

En las figuras 148 y 149 se muestran las gráficas fuerza-deformación de los pilares PRP_R3+PU frente a los pilares patrones dañados PPDP, para las dos caras por separado.

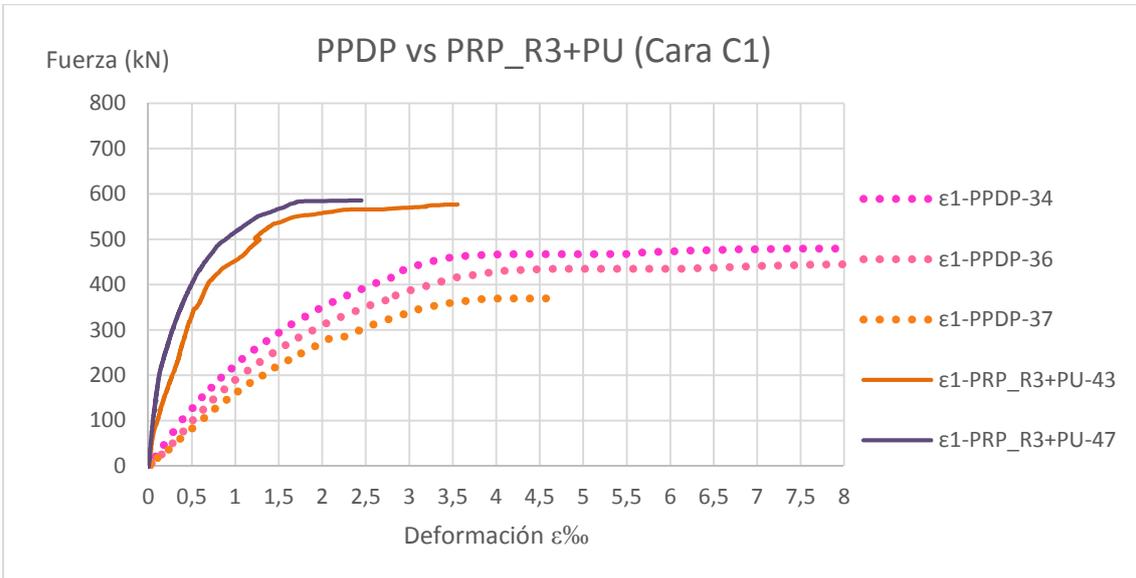


Figura 148 - Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PPDP y PRP_R3+PU cara delantera C1.

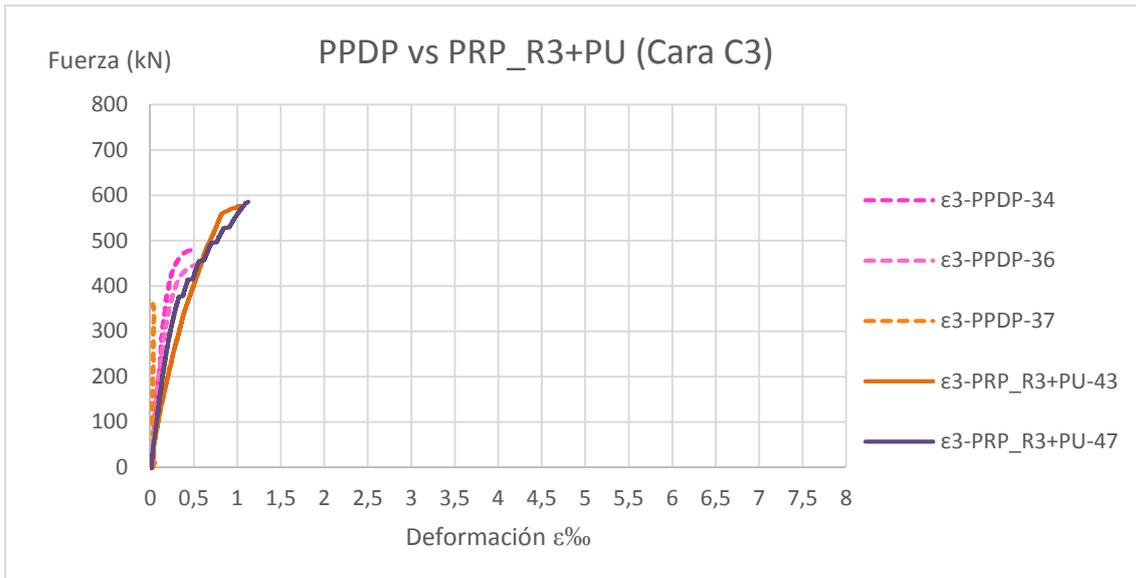


Figura 149- Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PPDP y PRP_R3+PU cara trasera C3.

En la figura 150 podemos ver el comportamiento global de los pilares PRP_R3+PU frente a los pilares patrón dañados parcheo, PPDP.

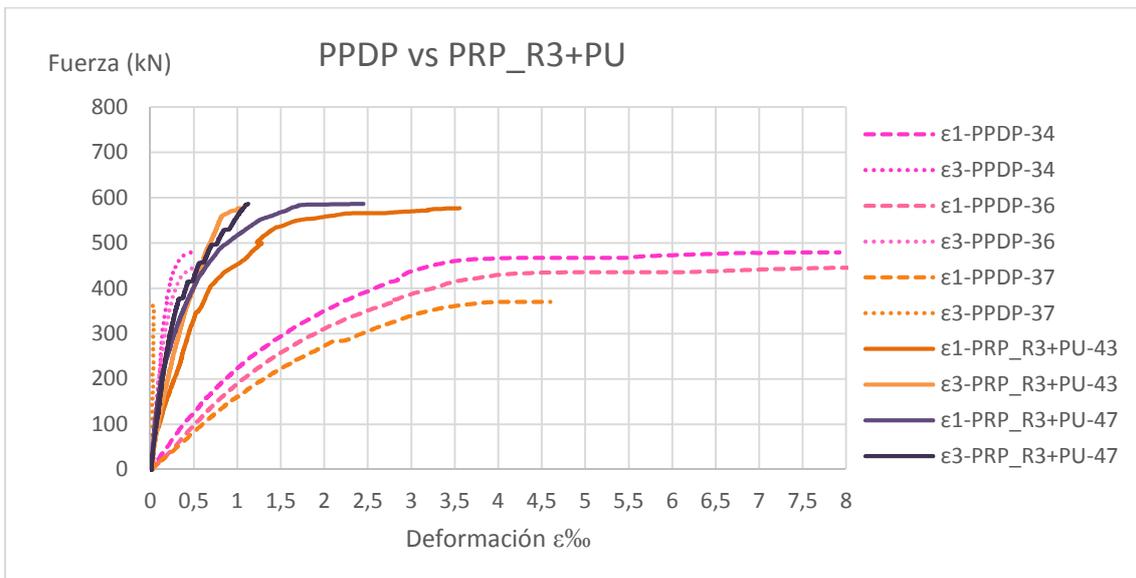


Figura 150 - Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PPDP y PRP_R3+PU

El comportamiento de la curva fuerza-deformación de los pilares PRP_R3+PU frente a los dañados, PPDP, y a los patrones sección original, PP, se puede observar en las figuras 151 y 152.

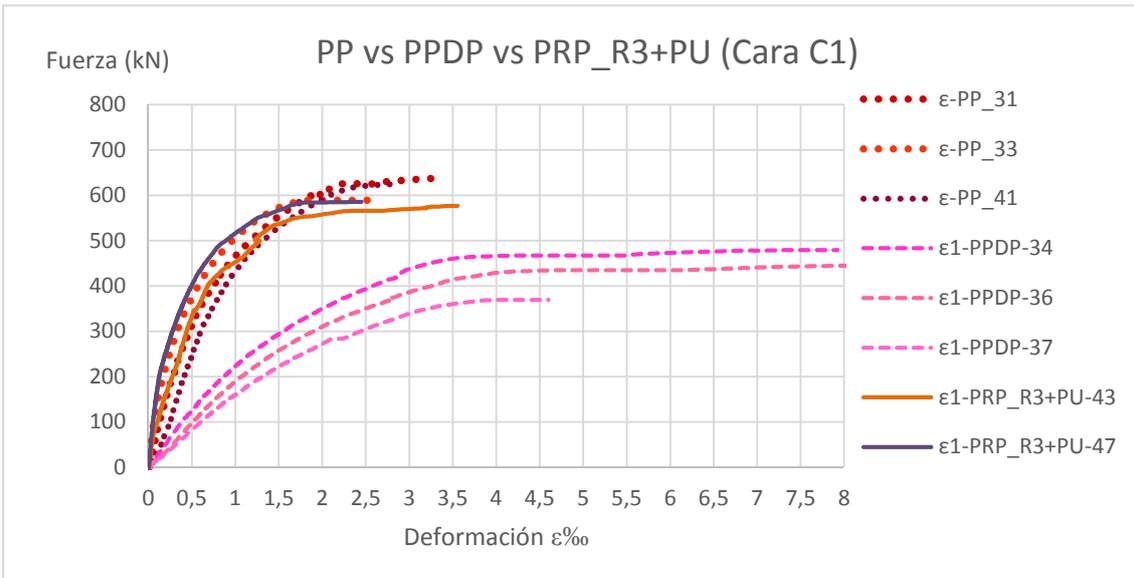


Figura 151 - Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PP, PPDP y PRP_R3+PU cara delantera C1.

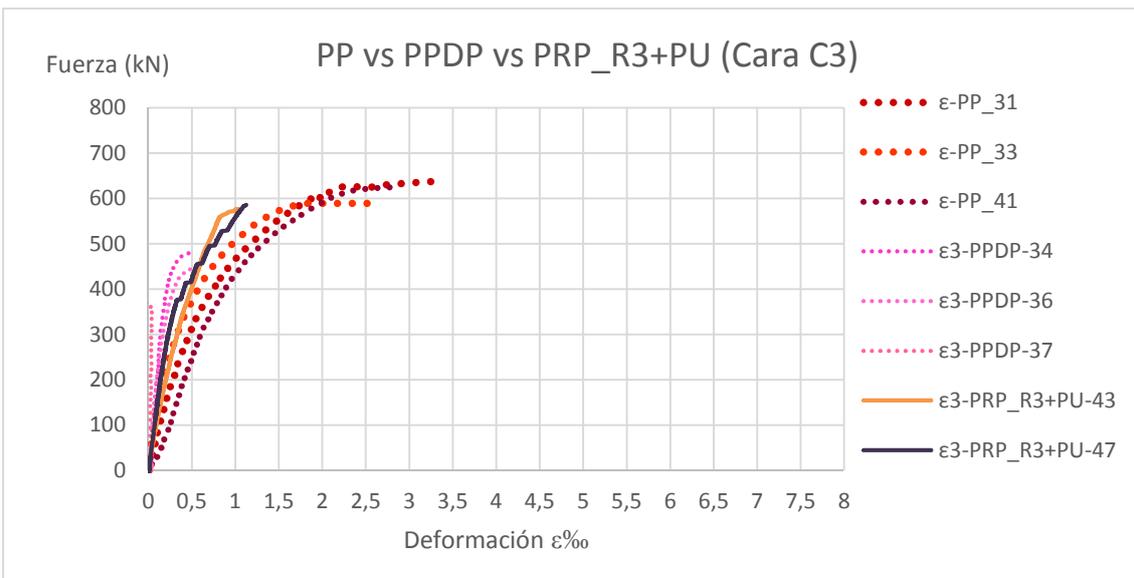


Figura 152 - Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PP, PPDP y PRP_R3+PU cara trasera C3.

4.4.3. PRP R3 sin puente de unión

Las figuras 153 y 154 muestran el estado de los pilares tras el ensayo. En ellas se puede observar que la zona reparada presenta fisuras verticales localizadas cercanas a la mitad de la cara.

La cara opuesta a la reparación, Cara C3, presenta una muy fina fisura horizontal a mitad de altura, pero casi imperceptible.

Las caras laterales muestran fisuras verticales, dentro del espesor de reparación, y la propia del despegue de la capa de reparación.



Figura 153 - Pilares PRP_R3 tras el ensayo a compresión. Fisuración caras C1 y C3 respectivamente.



Figura 154 - Pilares PRP_R3 tras el ensayo a compresión. Fisuración caras laterales, C2 y C4 respectivamente.

Las figuras 155 y 156 muestran las curvas fuerza-deformación por una parte para la cara delantera, Cara C1 (reparada), y por otra parte, para la cara trasera, Cara C3 (intacta).

Las deformaciones medidas por el captador Ci, hace referencia a las deformaciones medidas en la interfase mortero-hormigón de la cara C1.

Nota: la cara dañada es la cara C1.

Las deformaciones de la interfase para el pilar P38 no se pudieron medir por un fallo del captador de desplazamiento.

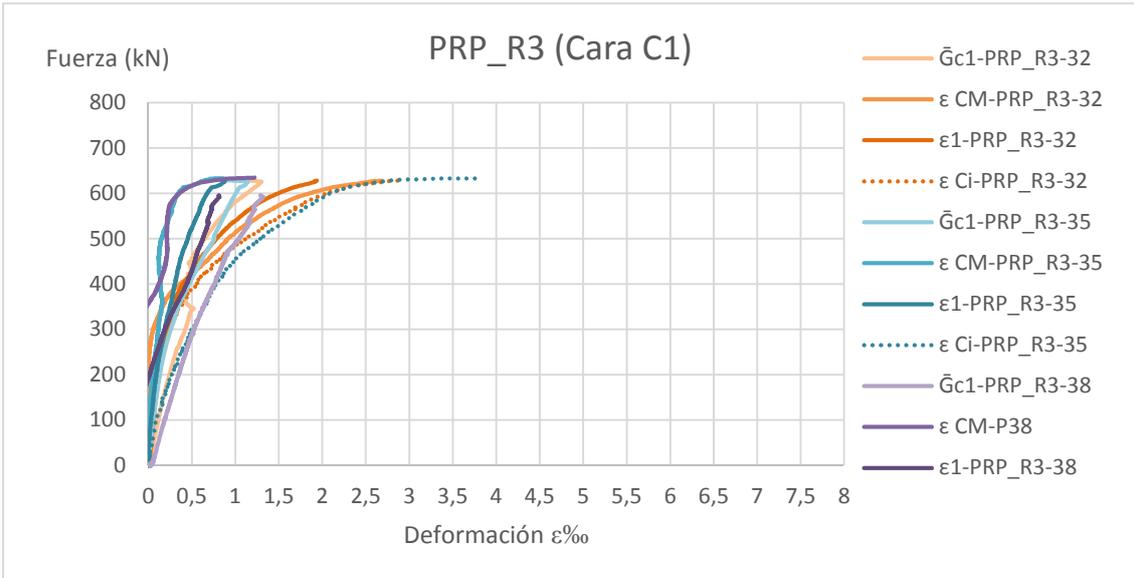


Figura 155 - Gráfica Fuerza-deformación de la Cara C1 correspondiente a los pilares P32, P35 y P38. \tilde{G} representa las deformaciones en tanto por mil de las armaduras longitudinales. \hat{C} representa las deformaciones en tanto por mil de las caras del hormigón. ϵ representa las deformaciones medias (\tilde{G} y \hat{C}) del pilar en tanto por mil.

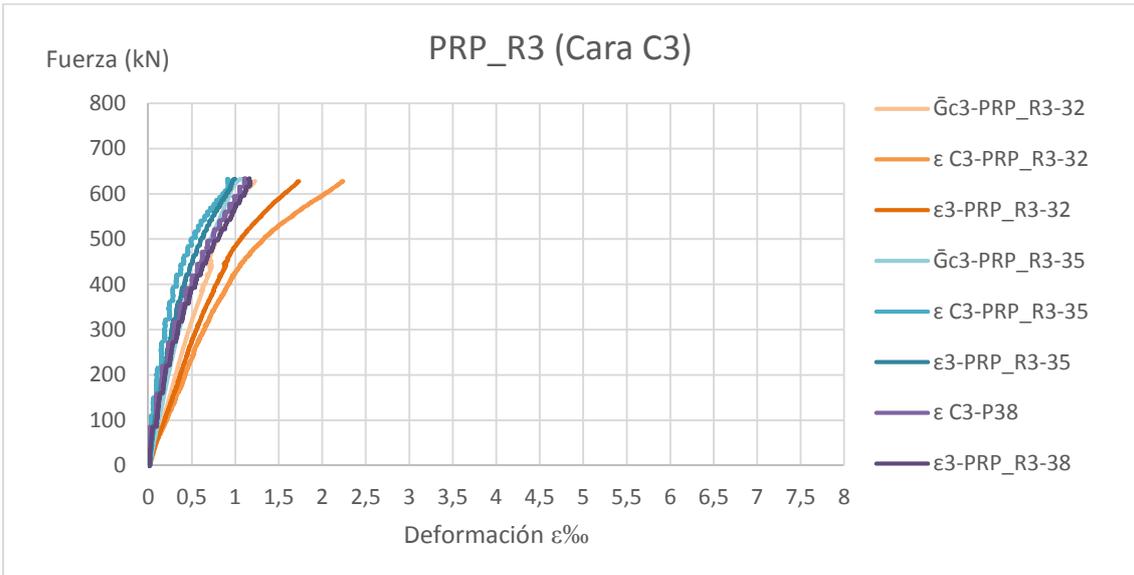


Figura 156 - Gráfica Fuerza-deformación de la Cara C3 correspondiente a los pilares P32, P35 y P38. \tilde{G} representa las deformaciones en tanto por mil de las armaduras longitudinales. \hat{C} representa las deformaciones en tanto por mil de las caras del hormigón. ϵ representa las deformaciones medias (\tilde{G} y \hat{C}) del pilar en tanto por mil.

En la figura 157 se muestran las deformaciones medias para cada pilar patrón y ambas caras (C1 y C3).

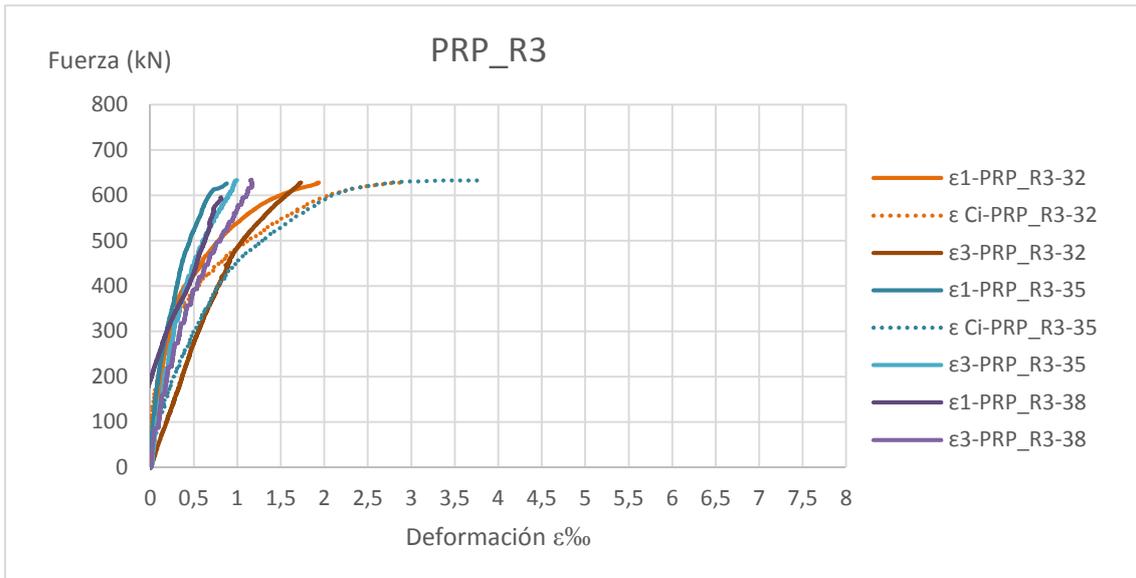


Figura 157 - Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PRP_R3.

En las figuras 158 y 159 se muestran las gráficas fuerza-deformación de los pilares PRP_R3 frente a los pilares patrones dañados PPDP, para las dos caras por separado.

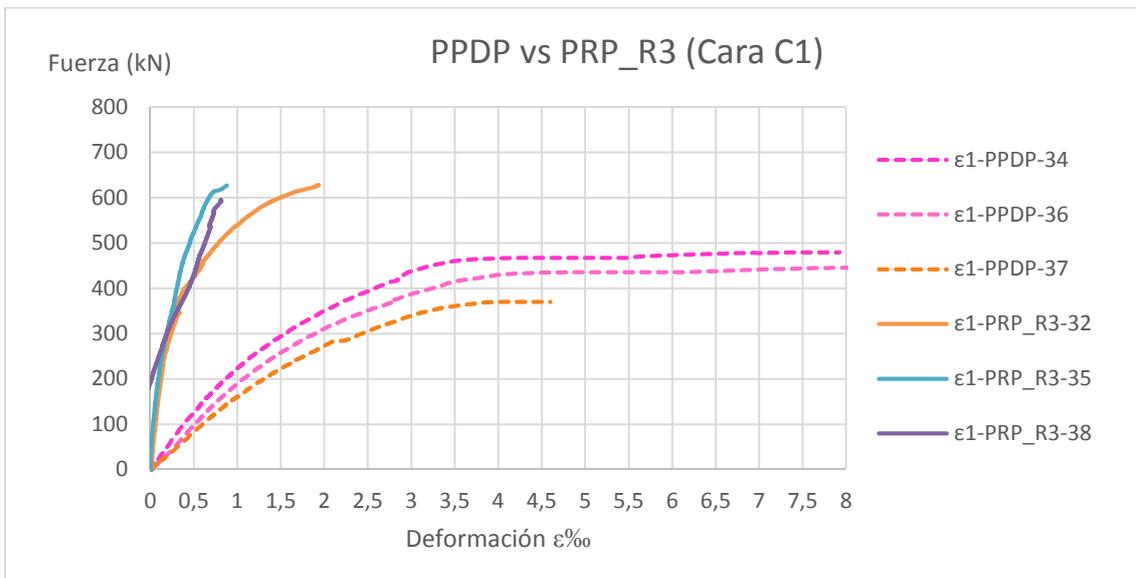


Figura 158 - Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PPDP y PRP_R3 cara delantera C1.

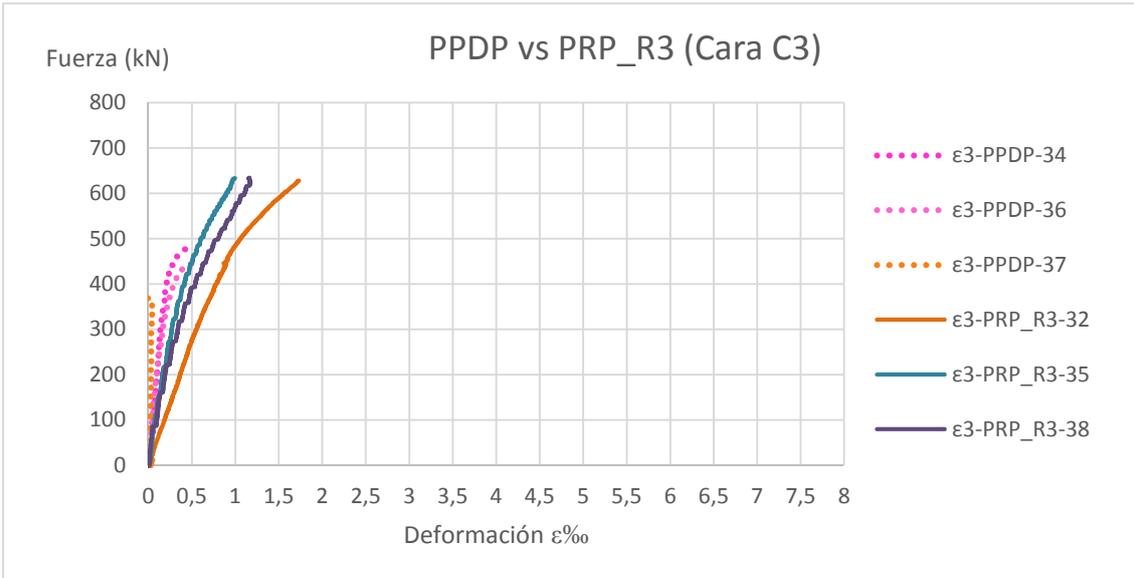


Figura 159 - Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PPDP y PRP_R3 cara trasera C3.

El comportamiento de la curva fuerza-deformación de los pilares PRP_R3 frente a los dañados, PPDP, y a los patrones sección original, PP, se puede observar en las figuras 160 y 161.

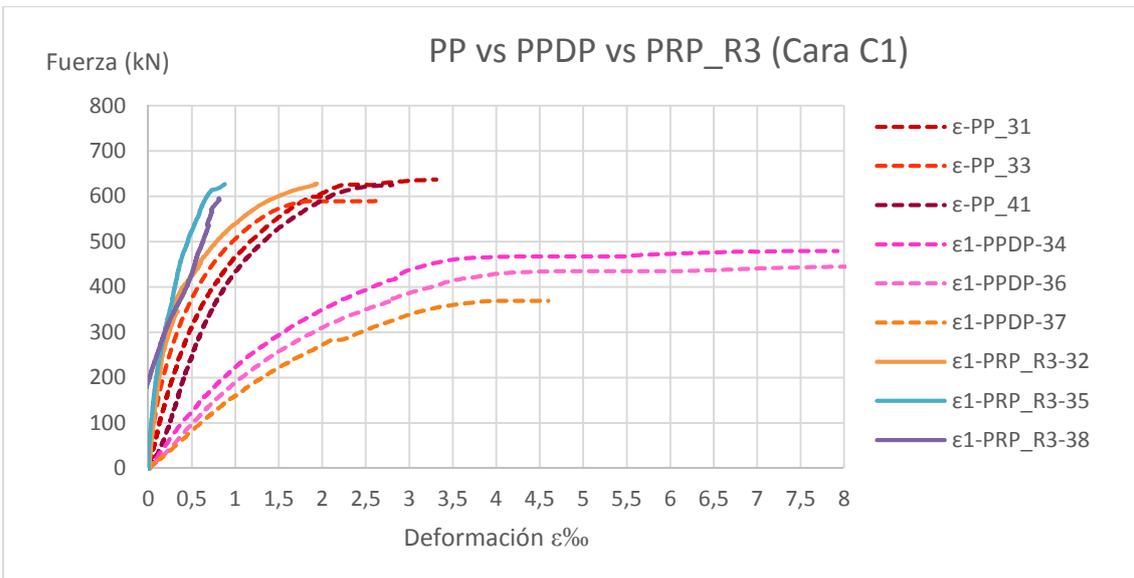


Figura 160 - Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PP, PPDP y PRP_R3 cara delantera C1.

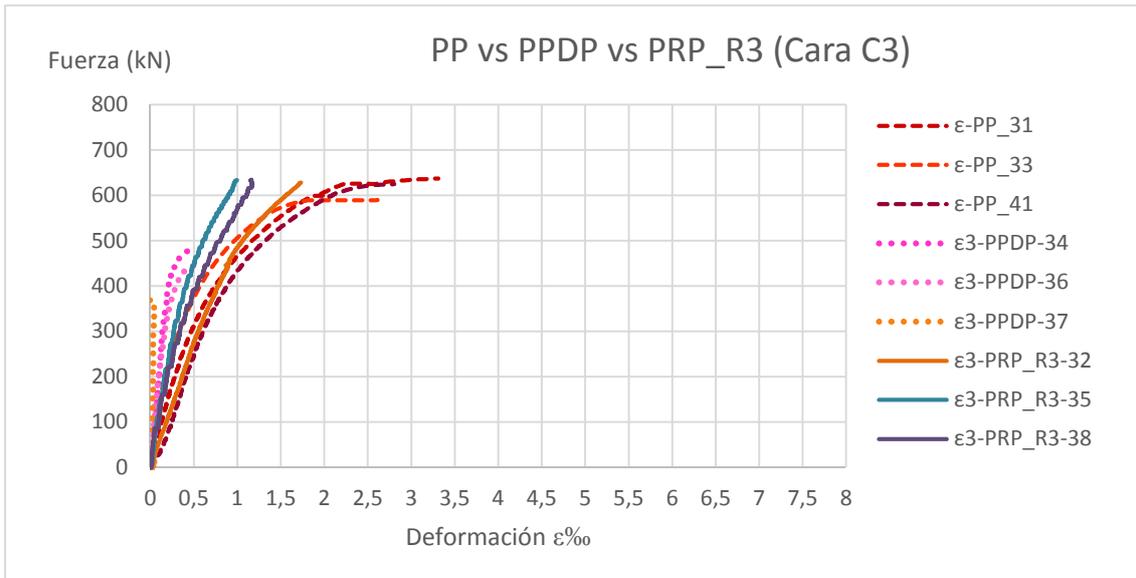


Figura 161 - Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PP, PPDP y PRP_R3 cara trasera C3.

4.4.4. PRP R4 con puente de unión

Las figuras 162 y 163 muestran el estado de los pilares tras el ensayo. En ellas se puede observar que la zona reparada presenta grietas verticales a ambos lados.

Las caras laterales tienen las fisuras verticales marcando la junta fría de la reparación con el hormigón.

La cara opuesta a la reparación, Cara C3, no presenta ninguna fisura.



Figura 162 - Pilares PRP_R4+PU tras el ensayo a compresión. Fisuración caras C1 y C3 respectivamente.



Figura 163 - Pilares PRP_R4+PU tras el ensayo a compresión. Fisuración caras laterales C2 y C4 respectivamente.

Las figuras 164 y 165 muestran las curvas fuerza-deformación por una parte para la cara delantera, Cara C1 (reparada), y por otra parte, para la cara trasera, Cara C3 (intacta).

Las deformaciones medidas por el captador Ci, hace referencia a las deformaciones medidas en la interfase mortero-hormigón de la cara C1.

Nota: la cara dañada es la cara C1.

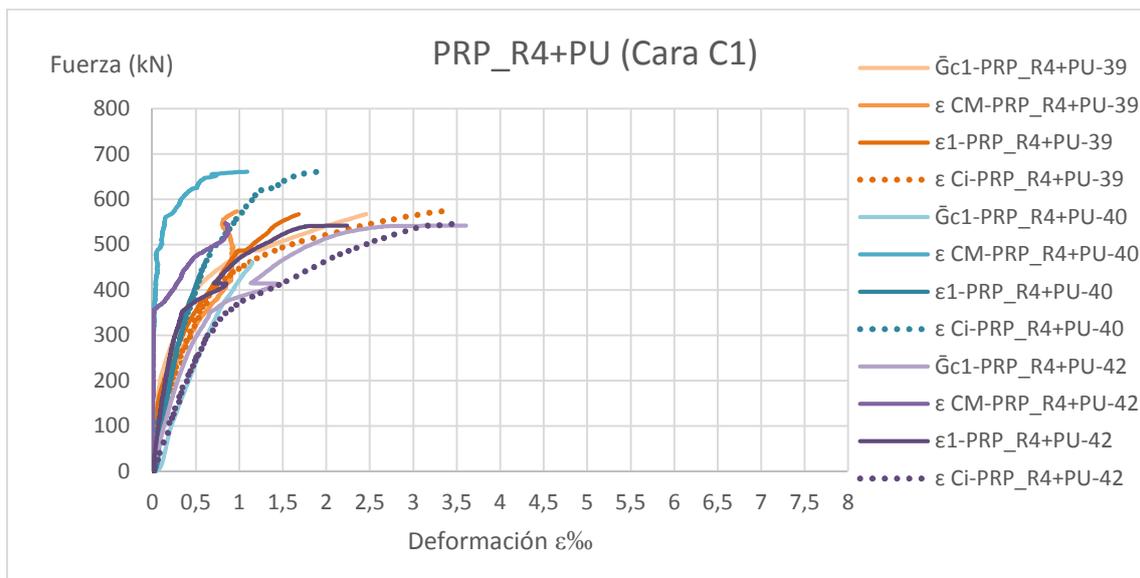


Figura 164 - Gráficas fuerza-deformación de la Cara C1 correspondiente a los pilares P39, P40 y P42.

\bar{G}_c representa las deformaciones en tanto por mil de las armaduras longitudinales.

\bar{C} representa las deformaciones en tanto por mil de las caras del hormigón.

$\bar{\epsilon}$ representa las deformaciones medias (\bar{G} y \bar{C}) del pilar en tanto por mil.

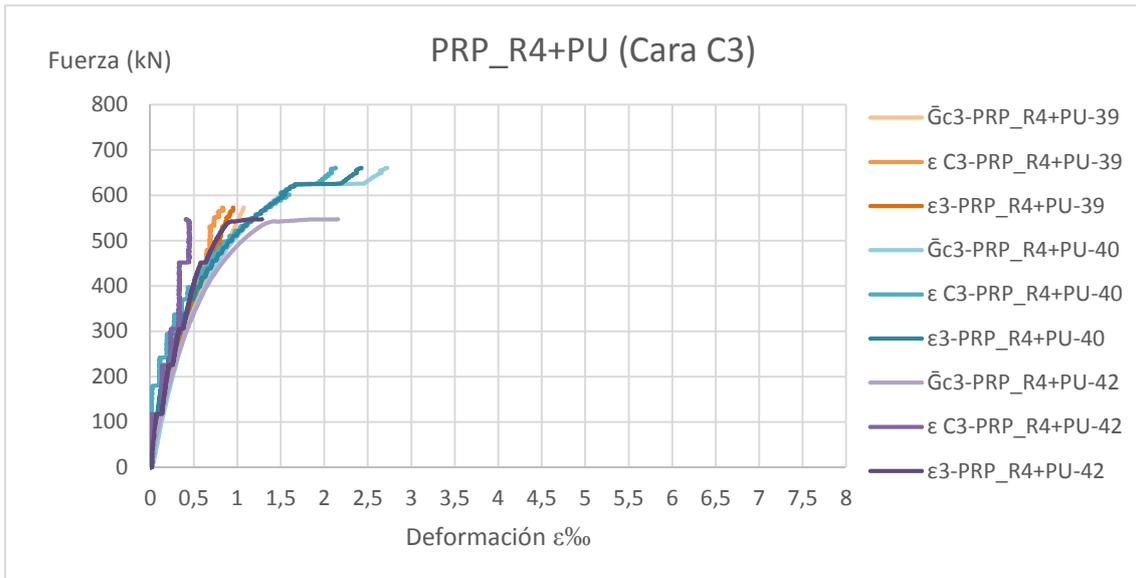


Figura 165 - Gráficas fuerza-deformación de la Cara C3 correspondiente a los pilares P39, P40 y P42. \bar{G} representa las deformaciones en tanto por mil de las armaduras longitudinales. \bar{C} representa las deformaciones en tanto por mil de las caras del hormigón. ϵ representa las deformaciones medias (\bar{G} y \bar{C}) del pilar en tanto por mil.

En la figura 166 se muestran las deformaciones medias para cada pilar patrón y ambas caras (C1 y C3).

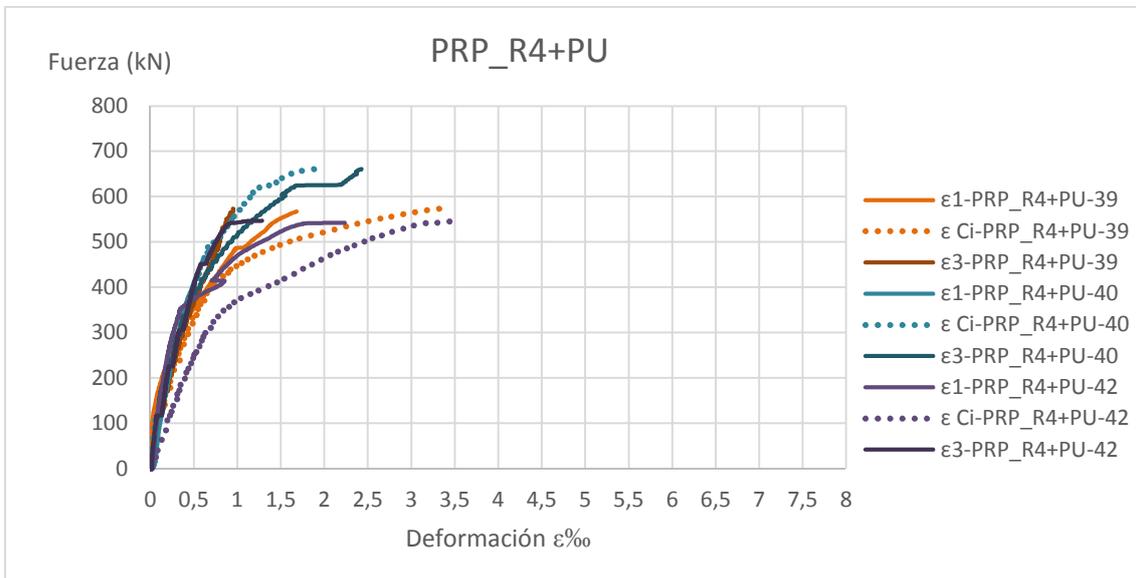


Figura 166 - Gráficas fuerza-deformación medias de los pilares PRP_R4+PU.

En las siguientes figuras se muestran las gráficas fuerza-deformación de los pilares PRP_R4+PU frente a los pilares patrones dañados PPDP, para las dos caras por separado.

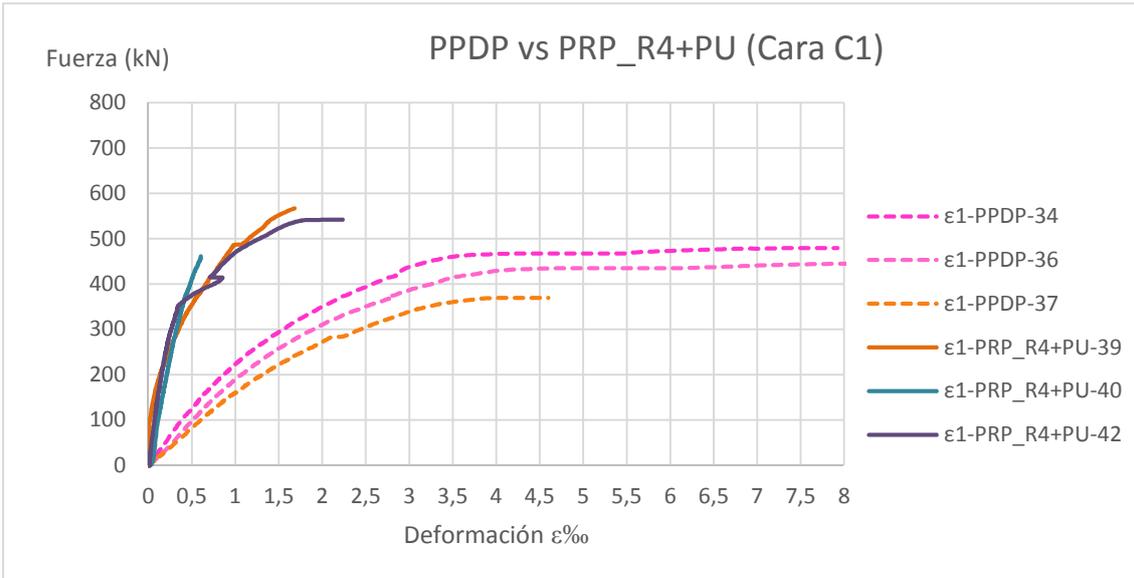


Figura 167 - Gráficas fuerza-deformación medias de los pilares PPDP y PRP_R4+PU cara delantera C1.

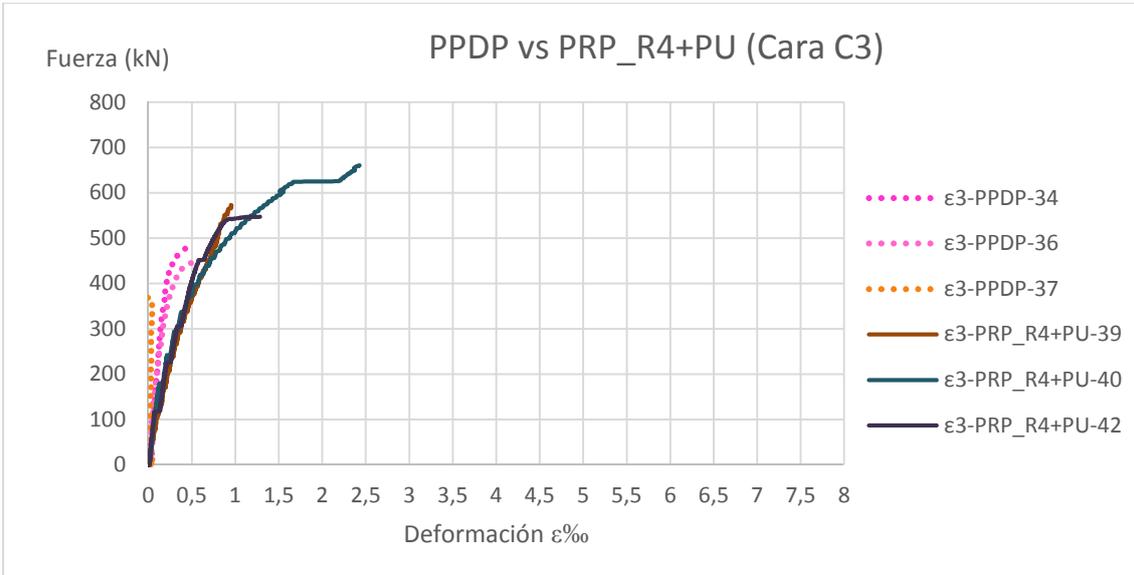


Figura 168 - Gráficas fuerza-deformación medias de los pilares PPDP y PRP_R4+PU cara trasera C3.

El comportamiento de la curva fuerza-deformación de los pilares PRP_R4+PU frente a los dañados, PPDP, y a los patrones sección original, PP, se puede observar en las figuras 169 y 170.

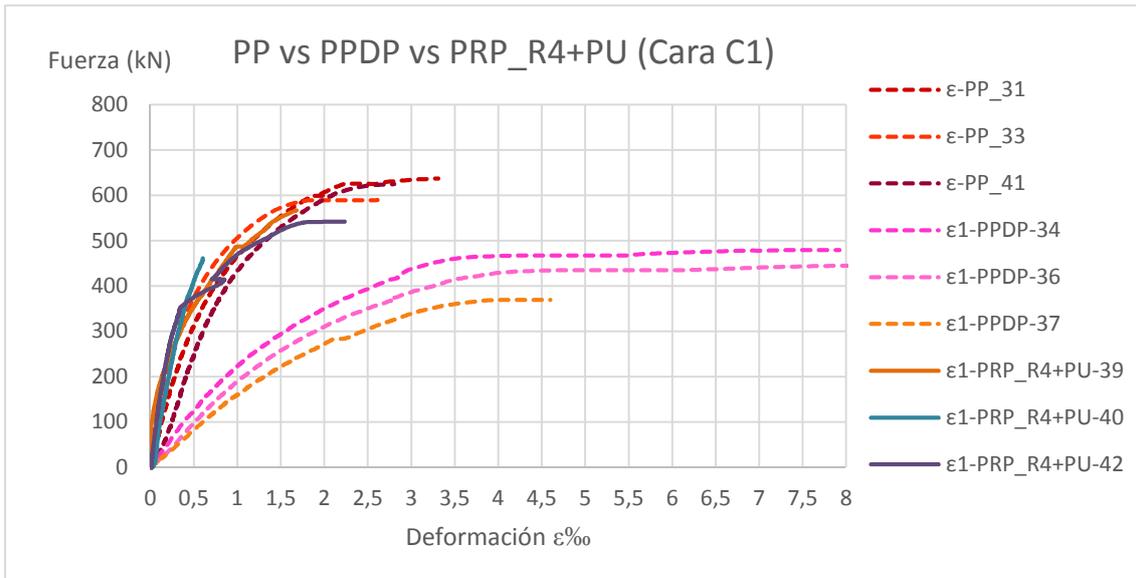


Figura 169 - Gráficas fuerza-deformación medias de los pilares PP, PPDP y PRP_R4+PU cara delantera C1.

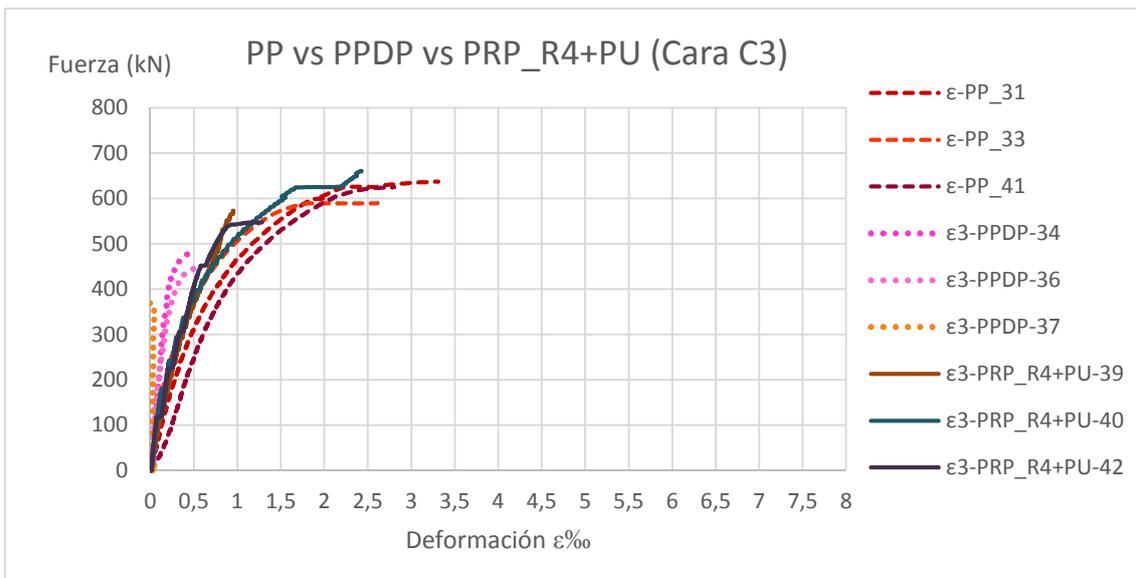


Figura 170 - Gráficas fuerza-deformación medias de los pilares PP, PPDP y PRP_R4+PU cara trasera C3.

4.4.5. PRP R4 sin puente de unión

Las figuras 171 y 172 muestran el estado de los pilares tras el ensayo. En ellas se puede observar que la zona reparada queda desprendida.

La cara opuesta a la reparada, Cara C3, muestra una fisura horizontal a mitad de altura, que se extiende a ambas caras laterales, que éstas llegan hasta la reparación con una inclinación aproximada de 20°.



Figura 171 - Pilares PRP_R4 tras el ensayo a compresión. Fisuración caras C1 y C3 respectivamente.



Figura 172 - Pilares PRP_R4 tras el ensayo a compresión. Fisuración caras laterales C2 y C4 respectivamente.

De la siguiente figura se puede ver que la rotura de la adherencia es cohesiva en el seno del mortero de reparación. Y también se observa la deformación de las armaduras longitudinales en la zona reparada.



Figura 173 - Pilares PRP_R4 tras el ensayo a compresión. Detalle del desprendimiento de la capa de reparación tras el ensayo.

Las figuras 174 y 175 muestran las curvas fuerza-deformación por una parte para la cara delantera, Cara C1, y por otra parte, para la cara trasera, Cara C3. Las deformaciones medidas por el captador Ci, hace referencia a las deformaciones medidas en la interfase mortero-hormigón de la cara C1.

Nota: la cara dañada es la cara C1.

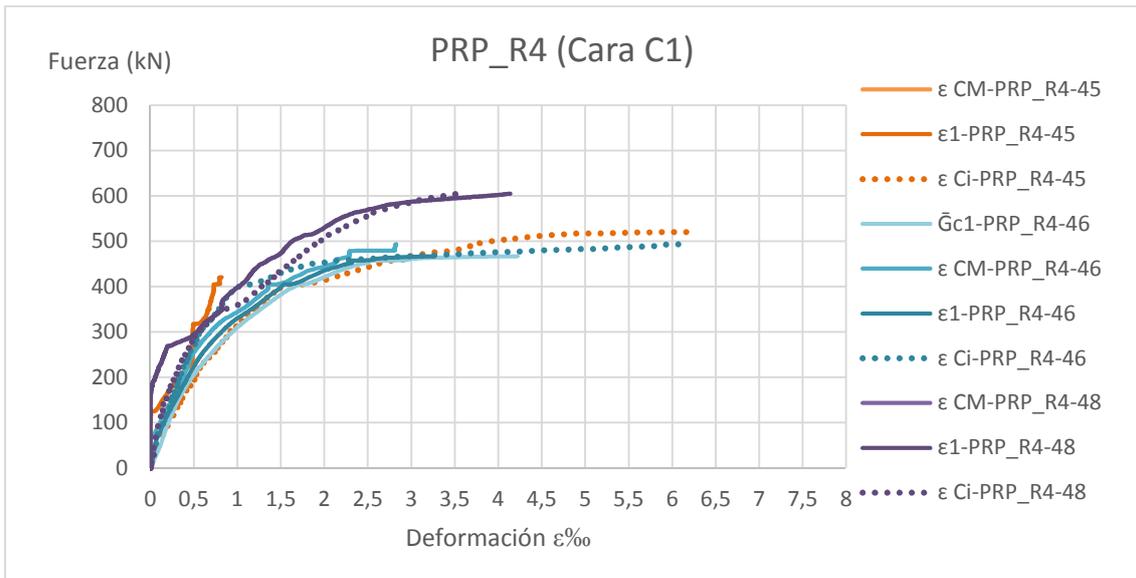


Figura 174 - Gráficas fuerza-deformación de la Cara C1 correspondiente a los pilares P45, P46 y P48. \bar{G} representa las deformaciones en tanto por mil de las armaduras longitudinales. \hat{C} representa las deformaciones en tanto por mil de las caras del hormigón. ε representa las deformaciones medias (\bar{G} y \hat{C}) del pilar en tanto por mil.

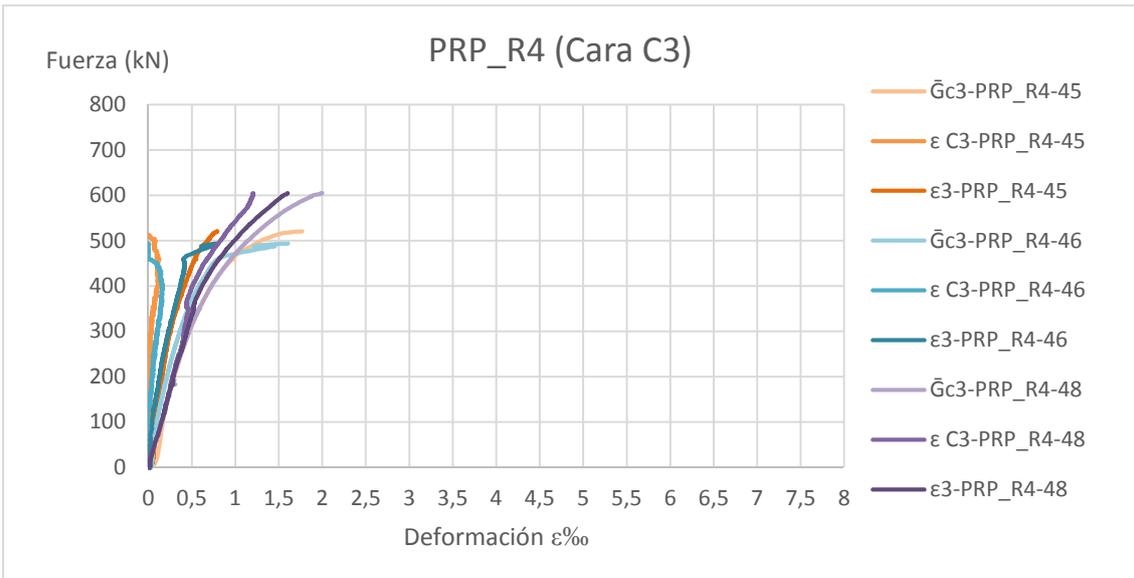


Figura 175 - Gráficas fuerza-deformación de la Cara C3 correspondiente a los pilares P45, P46 y P48. \bar{G} representa las deformaciones en tanto por mil de las armaduras longitudinales. \bar{C} representa las deformaciones en tanto por mil de las caras del hormigón. ϵ representa las deformaciones medias (\bar{G} y \bar{C}) del pilar en tanto por mil.

En la figura 176 se muestran las deformaciones medias para cada pilar patrón y ambas caras (C1 y C3).

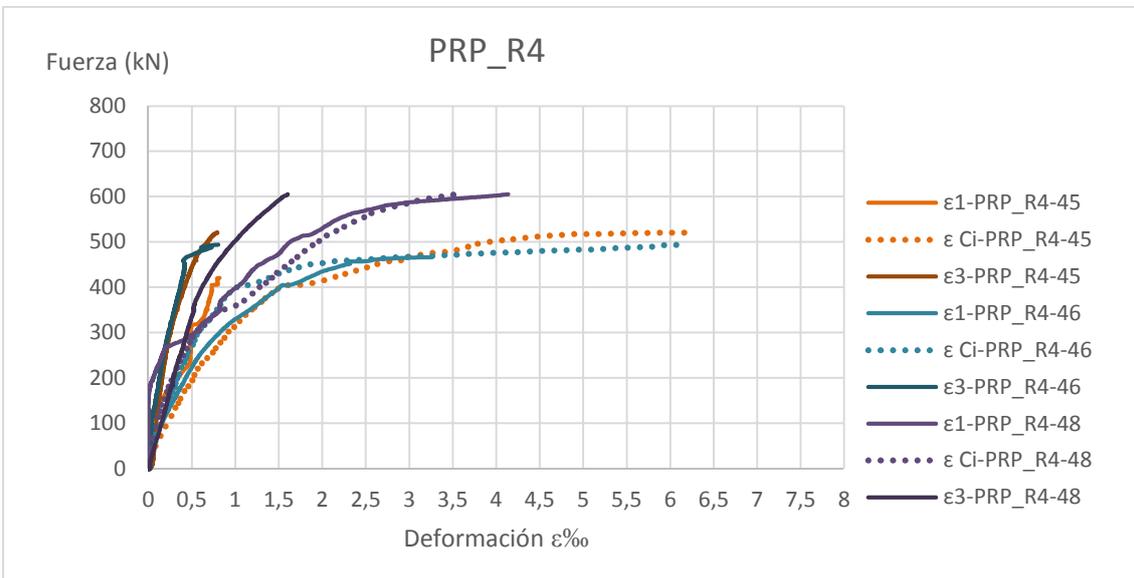


Figura 176 - Gráficas fuerza-deformación medias de los pilares PRP_R4.

En las figuras 177 y 178 se muestran las gráficas fuerza-deformación de los pilares PRP_R4 frente a los pilares patrones dañados PPDP, para las dos caras por separado.

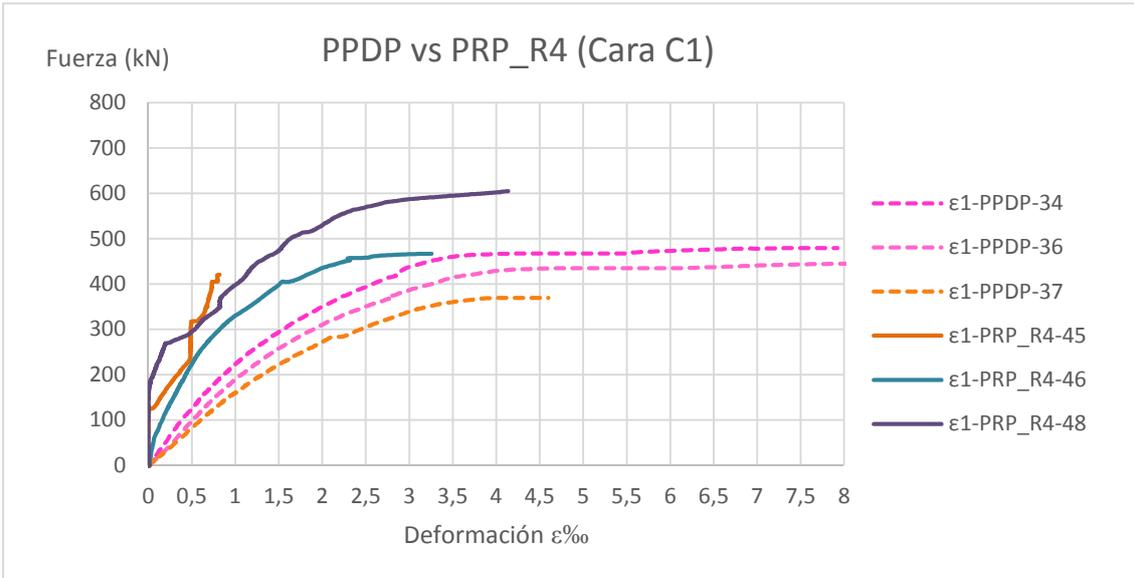


Figura 177 - Gráficas fuerza-deformación medias de los pilares PPDP y PRP_R4 cara delantera C1.

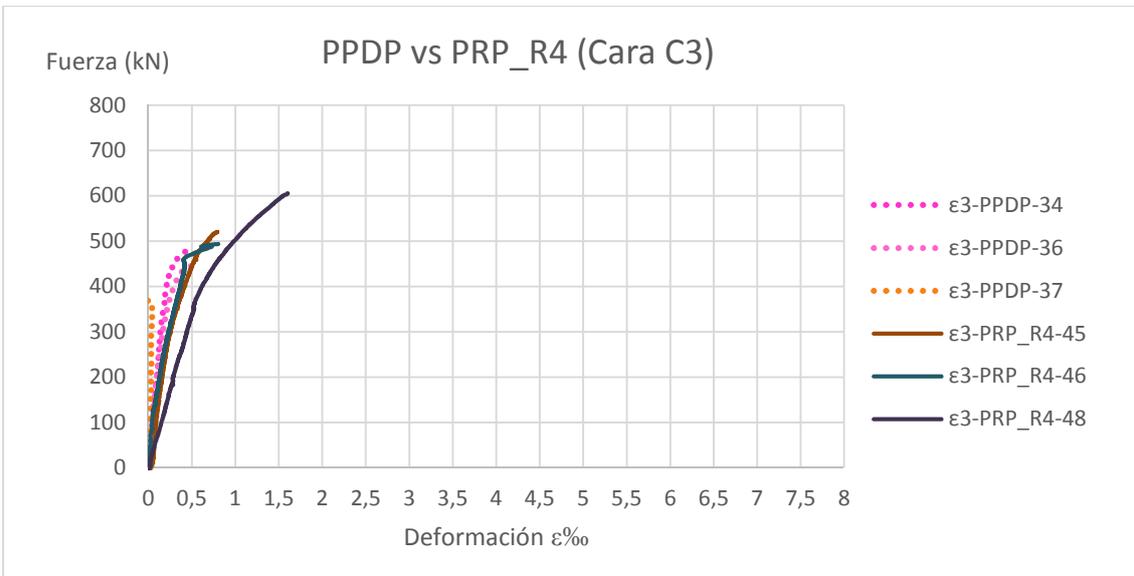


Figura 178 - Gráficas fuerza-deformación medias de los pilares PPDP y PRP_R4 cara trasera C3.

El comportamiento de la curva fuerza-deformación de los pilares PRP_R4 frente a los dañados, PPDP, y a los patrones sección original, PP, se puede observar en las figuras 179 y 180.

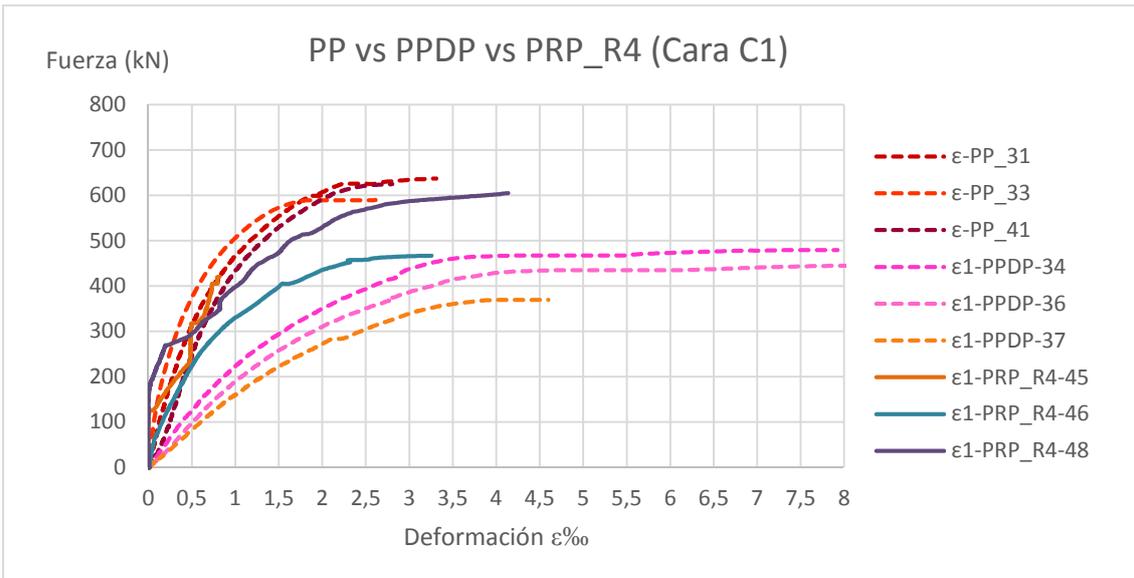


Figura 179 - Gráficas fuerza-deformación medias de los pilares PP, PPDP y PRP_R4 cara delantera C1.

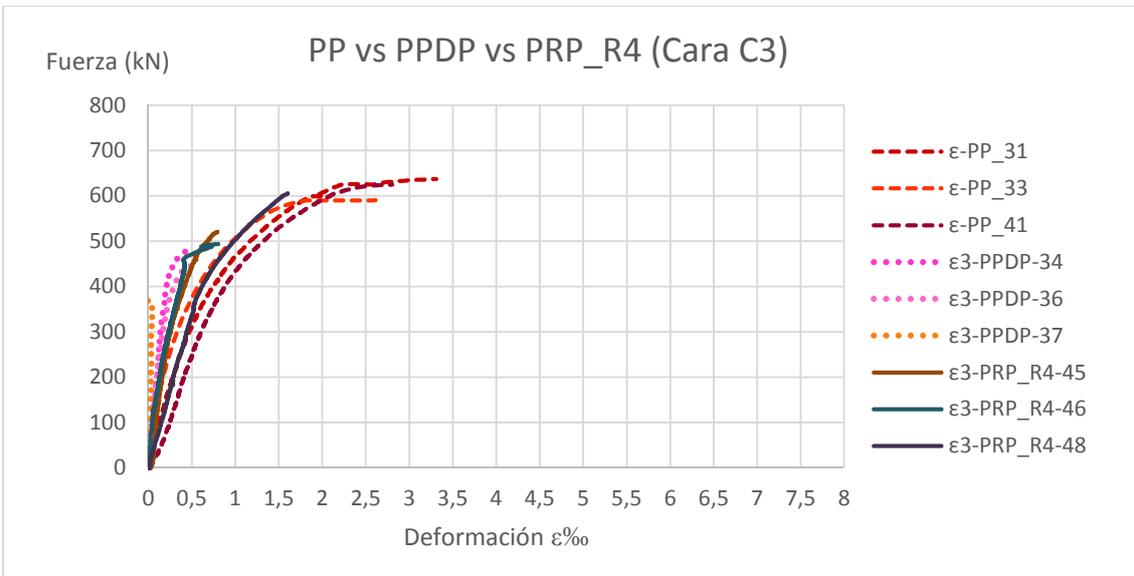


Figura 180 - Gráficas fuerza-deformación medias de los pilares PP, PPDP y PRP_R4 cara trasera C3.

4.5. Valores de Eficiencia de la Reparación

La siguiente tabla resume los distintos valores obtenidos en la fase experimental para todos los pilares ensayados. A partir de estos resultados se establecen los valores de Eficiencia, tanto respecto al Pilar Patrón sección original (PP), como a los Pilares Patrones Daño de cada familia (PPD4C, PPD1C y PPDP). A la vez se evalúa la pérdida de resistencia real de cada familia de patrón dañado con respecto a la sección original.

La Eficiencia se define como el cociente entre el máximo axil soportado por cada pilar reparado (con cada uno de los sistemas) y el máximo axil soportado por el pilar patrón de la sección original (PP).

$$Eficiencia = \frac{N_{u,PRi}}{N_{u,PP}} \cdot 100$$

Con esta fórmula obtenemos los valores de la Eficiencia para cada pilar reparado con los distintos sistemas ensayados. En la siguiente tabla se presentan todos los valores de la eficiencia, en una columna están los valores de la Eficiencia de cada pilar reparado con respecto a la capacidad portante original -% Eficiencia respecto al PP ($N_{ui} / N_{uref.PP}$)-, y en la otra columna están los valores del porcentaje de mejora de la capacidad portante de los pilares reparados respecto a su patrón dañado -% Mejora de la capacidad portante al respecto PDP ($N_{ui} / N_{uref.PD}$)-.

Tipo de Pilar	N° Pilar	N _u (kN)	N _{u,media} (kN)	% Δ (N _{u,med} :N _{u,PP})	% Eficiencia respecto al PP (N _{ui} / N _{uref,PP})	% Mejora de la capacidad respecto al PPD (N _{ui} / N _{uref,PD})
PP	31	637,34	617,51			
	33	590,14				
	41	625,06				
PPD4C	3	282,84	282,84	-54,20		
	4	NULO				
	7	NULO				
PR4C	R3 + PU	5	557,01	509,97	82,58	180,31
	R3 + PU	6	544,71			
	R3 + PU	16	428,20			
	R3 sin PU	1	575,25	520,37	84,27	183,98
	R3 sin PU	15	506,82			
	R3 sin PU	17	479,04			
	R4 + PU	2	398,24	438,00	70,93	154,86
	R4 + PU	9	475,64			
	R4 + PU	10	440,14			
	R4 sin PU	11	400,42	391,94	63,47	138,58
	R4 sin PU	12	445,69			
	R4 sin PU	13	329,72			
PPD1C	8	461,51	397,17	-35,68		
	21	332,83				
	25	NULO				
PR1C	R3 + PU	22	462,46	598,78	96,97	150,76
	R3 + PU	27	658,78			
	R3 + PU	28	675,11			
	R3 sin PU	14	551,72	580,72	94,04	146,21
	R3 sin PU	29	578,94			
	R3 sin PU	30	611,49			
	R4 + PU	19	411,29	406,71	65,86	102,40
	R4 + PU	23	402,13			
	R4 + PU	26	NULO			
	R4 sin PU	18	453,75	403,76	65,38	101,66
	R4 sin PU	20	339,69			
	R4 sin PU	24	417,84			
PPDP	34	479,93	432,19	-30,01		
	36	446,44				
	37	370,21				
PRP	R3 + PU	43	577,26	581,88	94,23	134,63
	R3 + PU	44	NULO			
	R3 + PU	47	586,50			
	R3 sin PU	32	628,33	632,14	102,37	146,26
	R3 sin PU	35	633,44			
	R3 sin PU	38	634,64			
	R4 + PU	39	573,83	594,09	96,21	137,46
	R4 + PU	40	661,10			
	R4 + PU	42	547,33			
	R4 sin PU	45	521,03	540,22	87,48	124,99
	R4 sin PU	46	493,96			
	R4 sin PU	48	605,67			

Tabla 10. Resultados N_u y valores de eficiencia.

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Introducción

En el presente capítulo se lleva a cabo la interpretación de los resultados de ensayo presentados en el capítulo anterior.

En él se analiza, para cada grado de reparación, las pautas de comportamiento de los pilares reparados en función de los materiales empleados. Este análisis se centra sobre todo en la observación de la recuperación de la capacidad portante del pilar reparado con respecto al pilar intacto y de la mejora con respecto al pilar dañado. Además de analizar la recuperación o mejora de esta resistencia última a axil, se comenta también los cambios observados en la deformabilidad de los pilares tras la reparación y los modos de rotura.

De esta forma se pretende dilucidar, para cada grado de reparación, qué materiales y técnicas son las idóneas para acometer la recuperación de las características originales del pilar.

5.2. Análisis del comportamiento de la rotura de los pilares

Los Pilares Patrón sección original (PP) son la referencia que tomar para el análisis comparativo del resto de familias de pilares ensayados, puesto que representan el comportamiento original y supuestamente deseado del pilar, antes de que sufriera ningún daño.

Como se observó en las fotografías tomadas después de la rotura de los pilares, vemos que presentan rotura por compresión simple. Llegando a deformaciones máximas alrededor del 3‰, y con un comportamiento prácticamente lineal hasta un tercio del valor de la carga máxima, como se puede observar en la gráfica tensión-deformación para los pilares patrón PP (ver figura 58).

En general, y como era de esperar, las deformaciones alcanzadas en las armaduras son prácticamente idénticas a las del hormigón.

En cuanto a los pilares dañados a cuatro caras, PPD4C, en comparación con el comportamiento de los pilares originales, como era de esperar, su deformabilidad es muy superior y su capacidad portante muy inferior (del orden de un 46% de la original, ver figura 181). Al igual que los pilares patrones, PP, mantiene el comportamiento lineal hasta un tercio del valor de la carga máxima.

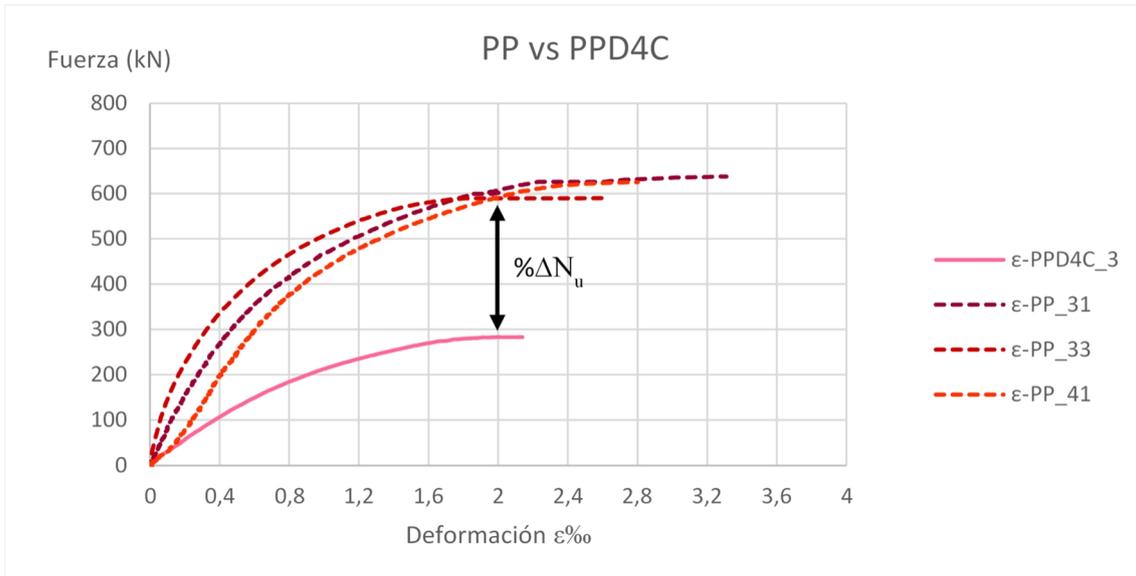


Figura 181. Gráfica fuerza-deformación media de los pilares PP-PPD4C.

A continuación, el análisis se hace más relevante, puesto que se irá viendo cómo las distintas técnicas-modo de reparación contribuyen a recuperar la capacidad portante perdida, evaluando, por consiguiente, la eficiencia de la reparación.

Pilares Reparados 4 Caras, mortero de reparación Clase R3 con Puente de unión, PR4C_R3 + PU. El fallo como se puede observar en las fotografías sucede principalmente en las juntas frías de la reparación, que se crean entre las dos primeras caras reparadas y las dos últimas, es decir, entre las caras adyacentes ortogonales (ver figura 182).

A pesar del fallo por la creación de juntas frías, la adherencia de la reparación en general es muy buena (ver figura 69), produciéndose una rotura cohesiva en el seno del soporte (hormigón original).

Pasando a estudiar el comportamiento de estos pilares de acuerdo a las gráficas tensión-deformación (ver figura 183), se observa que la reparación recupera prácticamente la rigidez original del pilar, incluso aumentándola para niveles de carga elevados, donde mantienen un comportamiento más lineal, si bien muestran un comportamiento menos dúctil.

Exhiben un comportamiento prácticamente lineal hasta cerca del 50% del valor de la carga máxima, cambiando ligeramente la pendiente de la curva hasta llegar al 90% del valor de la carga máxima, momento en el que comienza el estado plástico.

Las deformaciones máximas que alcanzan están alrededor del 1'4‰.



Figura 182. a) Detalle del fallo en las juntas frías tras el ensayo. b) detalle de la formación de la junta fría entre las caras ortogonales adyacentes, durante la reparación.

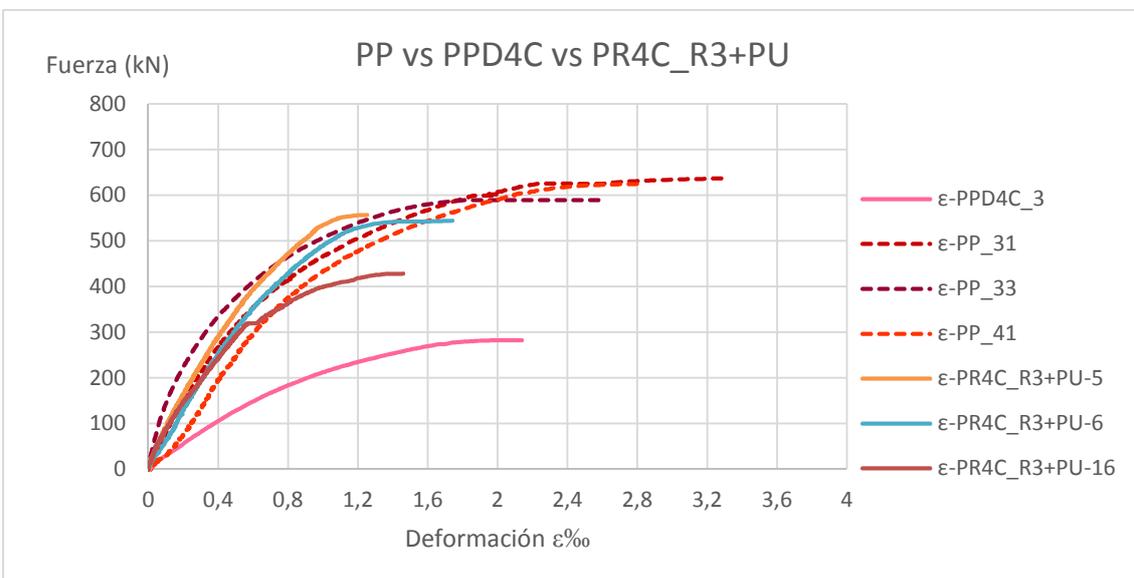


Figura 183. Gráfica Fuerza-deformación para los pilares PP, PPD4C y PR4C_R3+PU.

Valorando la eficiencia de la reparación, con respecto al espécimen original (pilares PP), es del 83%. La capacidad portante mejorada media del elemento reparado es del 180% respecto a la resistencia última del pilar dañado.

Pilares Reparados 4 Caras, mortero de reparación Clase R3 sin Puente de unión, PR4C_R3. Como sucede con los pilares PR4C_R3+PU, el fallo sucede principalmente

en las juntas frías de la reparación, que se crean entre las dos primeras caras reparadas y las dos últimas, es decir, entre las caras adyacentes ortogonales.

Para el caso de esta subfamilia de pilares (PR4C_R3), la adherencia se puede considerar buena, ya que lo deseable es que la rotura se produzca principalmente en el seno del soporte, en las caras laterales. Pero para las caras C1 y C3, la adherencia es muy buena.

De acuerdo con las gráficas Fuerza-deformación (figura 184), se observa que el pilar reparado es menos deformable incluso que el pilar intacto. La reparación por tanto recupera, e incluso aumenta ligeramente, la rigidez del pilar, sobre todo por encima del 50% de la carga última.

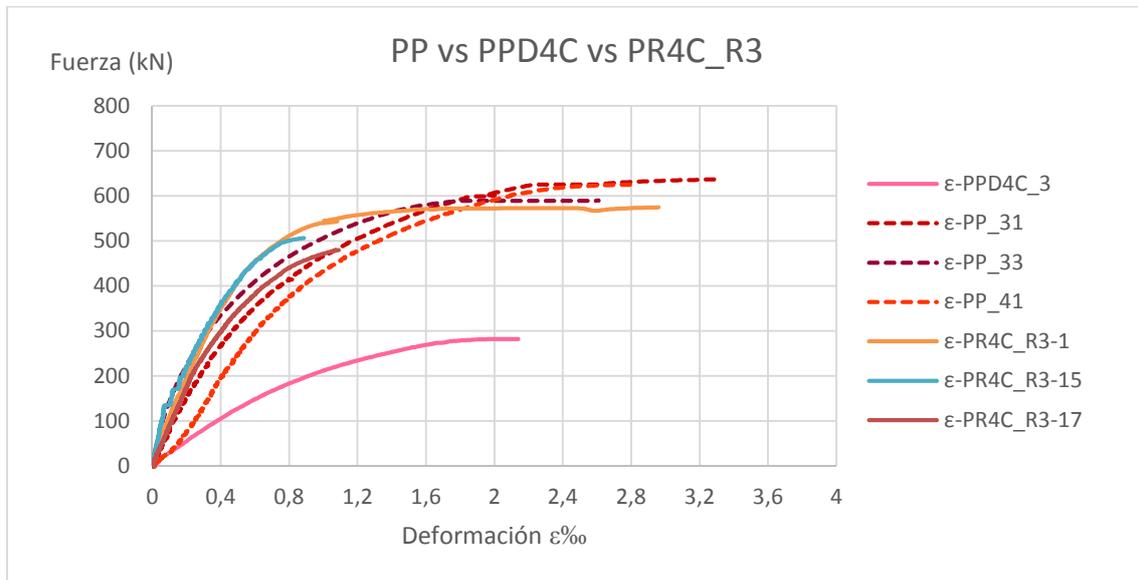


Figura 184. Gráfica Fuerza-deformación para los pilares PP, PPD4C y PR4C_R3.

Mantienen la linealidad hasta cerca del 50% del valor de la carga máxima, cambiando ligeramente la pendiente de la curva hasta llegar al 90% del valor de la carga máxima, momento en el que comienza el estado plástico.

Las deformaciones máximas que alcanzan están alrededor del 1%. Excepto en el espécimen PR4C_R3-1, donde se alcanza una deformación de hasta un 3%.

Valorando la eficiencia de la reparación, con respecto al espécimen original (pilares PP). La resistencia media obtenida en los pilares reparados es del 84% de la resistencia original. Por otro lado, la capacidad portante mejorada media del elemento reparado es del 184% respecto a la resistencia última del pilar dañado.

Realizando la primera comparativa para una de las variables estudiadas y planteadas en esta investigación, se observa que el comportamiento entre estas dos subfamilias de pilares, PR4C_R3+PU y PR4C_R3, son muy similares entre sí (ver figura 185). Ligeramente destaca la subfamilia de pilares PR4C_R3 que aporta sutilmente una mejor contribución a la reparación.

Por lo tanto, para estos casos, no se ha observado ninguna mejora perceptible en el comportamiento del pilar reparado por el uso del puente de unión entre el hormigón (soporte) y el mortero de reparación.

Por otro lado, en la familia reparada con puente de unión, en uno de los especímenes (PR4C_R3+PU-16) se ha obtenido una resistencia notablemente inferior, lo que alerta de la variabilidad que pueden exhibir estas reparaciones en su comportamiento. En la familia sin puente de unión también hay una variabilidad notable, aunque de menor entidad. Sin embargo, no se puede afirmar que esta mayor variabilidad se deba al hecho de emplear o no puente de unión y estimamos que se debe a la variabilidad general inherente a la experimentación en laboratorio y al método de reparación.

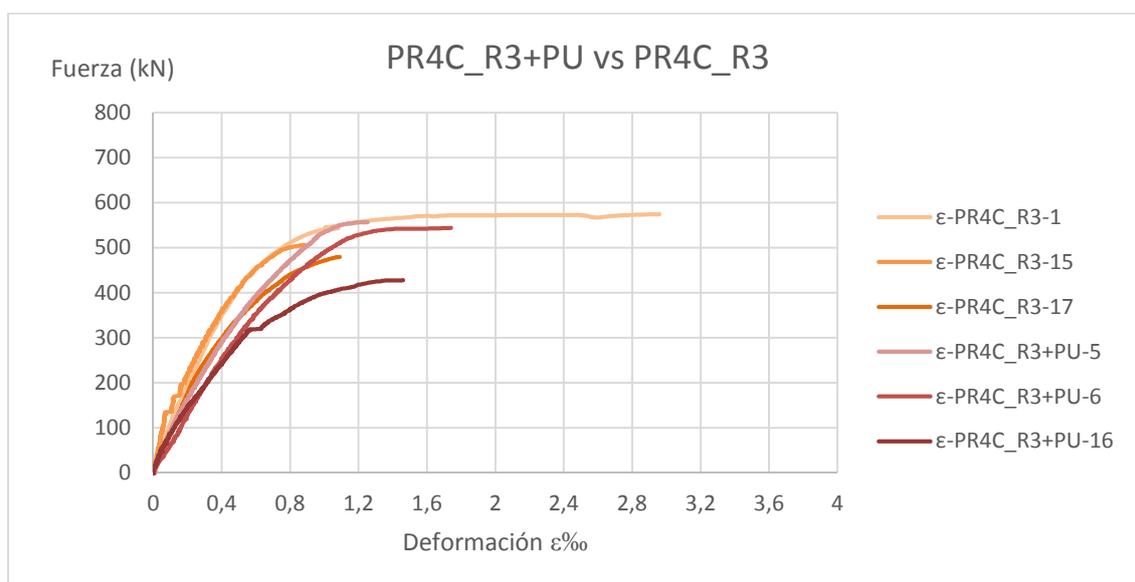


Figura 185. Gráfica Fuerza-deformación para los pilares PR4C_R3 y PR4C_R3+PU.

Pilares Reparados 4 Caras, mortero de reparación Clase R4 con Puente de unión, PR4C_R4+PU. Como sucede con los pilares PR4C_R3+PU y PR4C_R3, el fallo sucede principalmente en las juntas frías de la reparación, que se crean entre las dos primeras caras reparadas y las dos últimas, es decir, entre las caras adyacentes ortogonales.

Para el caso de esta subfamilia de pilares (PR4C_R4+PU), la adherencia en las caras laterales (caras C2 y C4) se puede considerar buena, ya que lo deseable es que la rotura se produzca principalmente en el seno del soporte. Para las caras C1 y C3, la adherencia es muy buena.

El tipo de rotura (fisuración) es parejo al de los otros dos casos expuestos, pero con mayor abertura de fisura, considerándose más bien grietas. Se observa un mayor daño en la superficie del mortero de reparación.

Según se puede observar en las gráficas Fuerza-deformación (figura 186), su comportamiento es muy variable, con dos pilares cuyas curvas fuerza-deformación se encuentran claramente entre el patrón intacto y el dañado y otro espécimen en el que la deformabilidad es inferior incluso a la del pilar intacto.

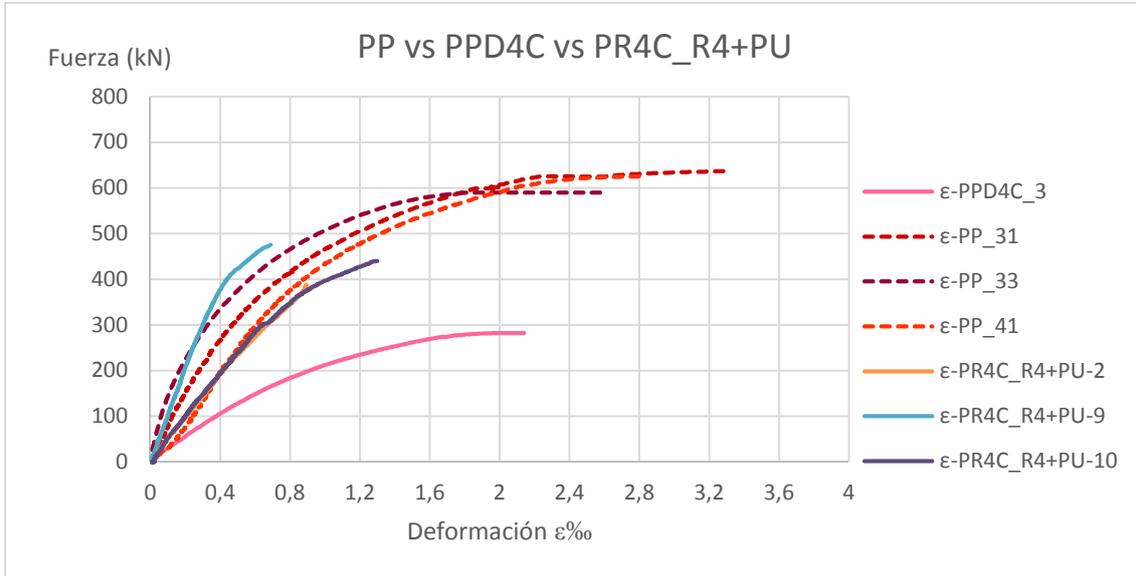


Figura 186. Gráfica Fuerza-deformación para los pilares PP, PPD4C y PR4C_R4+PU.

Mantienen un comportamiento prácticamente lineal hasta alrededor de los dos tercios del valor de la carga máxima, inclinándose en esos momentos la curva. Sin embargo, no llegan a presentar un comportamiento plástico.

Las deformaciones máximas que alcanzan están alrededor del 0'9‰.

La resistencia media obtenida en los pilares reparados es del 71% de la resistencia original. La capacidad portante mejorada media del elemento reparado es del 155% respecto a la resistencia última del pilar dañado.

Comparando las dos subfamilias con distinto mortero de reparación, en las que se ha empleado puente de unión, podemos ver las diferencias del comportamiento en la figura 187.

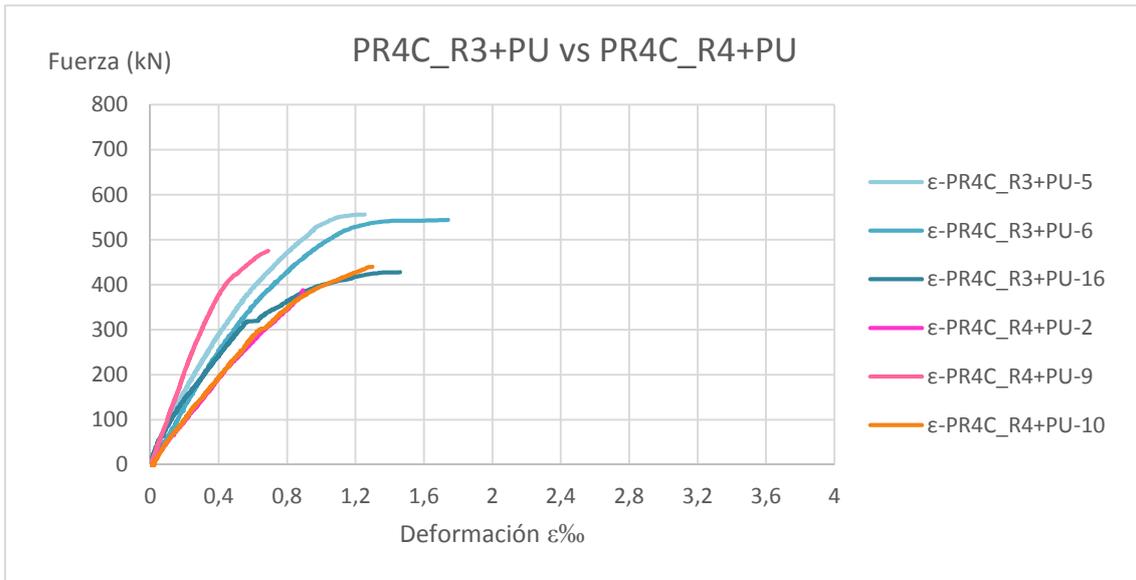


Figura 187. Gráfica Fuerza-deformación media para los pilares PR4C_R3+PU y PR4C_R4+PU.

Los pilares reparados con mortero Clase R3 tienen mejor comportamiento, llegando a presentar una fase de deformación plástica que los pilares reparados con mortero Clase R4 no presentan, y además muestran menores deformaciones que los PR4C_R3+PU. Esto nos muestra otra ligera diferencia entre la utilización de una clase de mortero u otro.

Pilares Reparados 4 Caras, mortero de reparación Clase R4 sin Puente de unión, PR4C_R4. Como sucede con los pilares PR4C_R3+PU, PR4C_R3 y PR4C+PU, el fallo sucede principalmente en las juntas frías de la reparación, que se crean entre las dos primeras caras reparadas y las dos últimas, es decir, entre las caras adyacentes ortogonales.

Según se puede observar en las gráficas tensión-deformación (figura 188), presentan un comportamiento ligeramente más rígido y con menores deformaciones que los patrones, tanto los de sección intacta, PP, como los dañados, PPD4C.

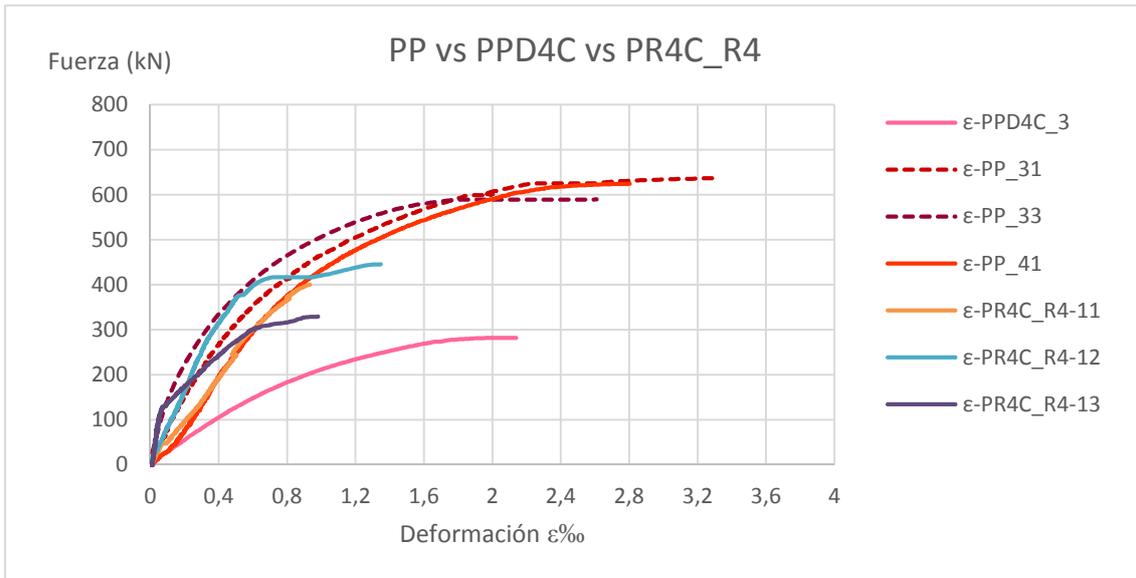


Figura 188. Gráfica Fuerza-deformación para los pilares PP, PPD4C y PR4C_R4.

Las deformaciones máximas que alcanzan están alrededor del 1‰, presentando la curva una rama de deformación plástica al aproximarse a la carga máxima.

La resistencia media obtenida en los pilares reparados es del 64% de la resistencia original. La capacidad portante mejorada media del elemento reparado es del 139% respecto a la resistencia última del pilar dañado.

Comparando los pilares reparados con mortero Clase R4 frente a la variable del puente de unión, podemos observar como se desprende de la siguiente gráfica, que en los pilares en los que no se utilizó puente de unión se observa una rama de deformación plástica hacia el final de la carga máxima, mientras que en los que se utilizó el puente de unión no se observa esta fase, por lo que su comportamiento se puede considerar menos dúctil que los pilares donde no se usó el puente de unión.

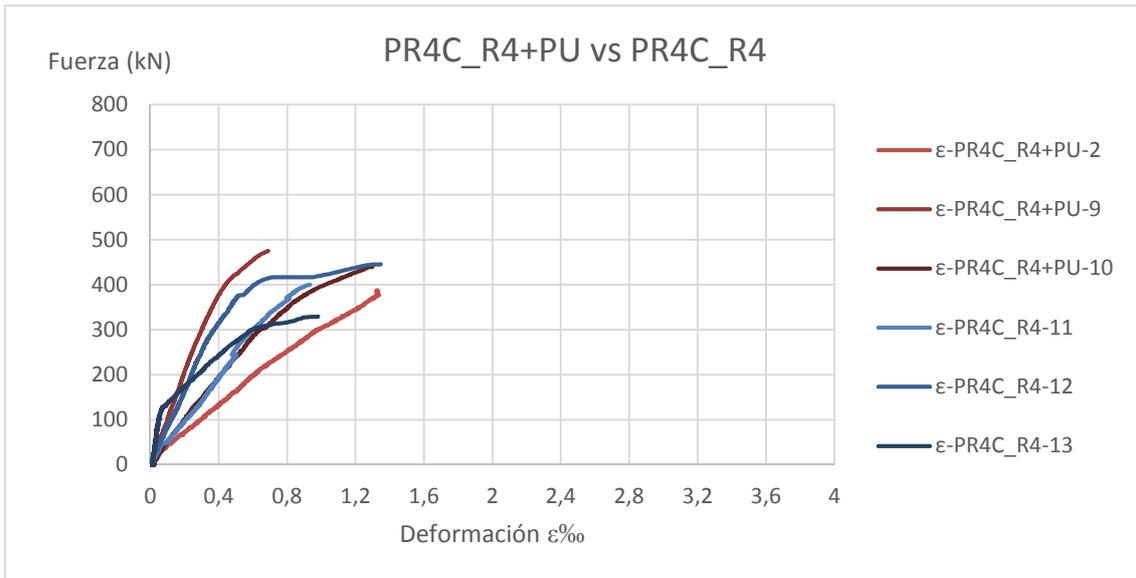


Figura 189. Gráfica Fuerza-deformación para los pilares PR4C_R4+PU y PR4C_R4.

Evaluando la eficiencia de la reparación respecto al patrón dañado se puede aseverar, que para la subfamilia de los pilares reparados con mortero Clase R4, mejora alrededor de un 10% con la utilización del puente de unión. Sin embargo, la variabilidad del comportamiento es muy elevada en ambas familias, por lo que no se puede afirmar con rotundidad que se produzca esta mejora por motivo de la utilización del puente de unión.

Centrándonos en el análisis de la familia de pilares reparados a cuatro caras, de la figura 190 se extrae la conclusión que los pilares reparados con mortero Clase R3 presentan mejor comportamiento, alcanzan mayores deformaciones en rotura y con una eficiencia mayor que los pilares reparados con mortero Clase R4. Para el caso donde se utiliza el puente de unión, el axil último de los pilares reparados con el mortero Clase R3 es del orden de un 25% superior al de los reparados con mortero Clase R4. Para los casos en los que no se utiliza puente de unión, la mejora es del 45%.

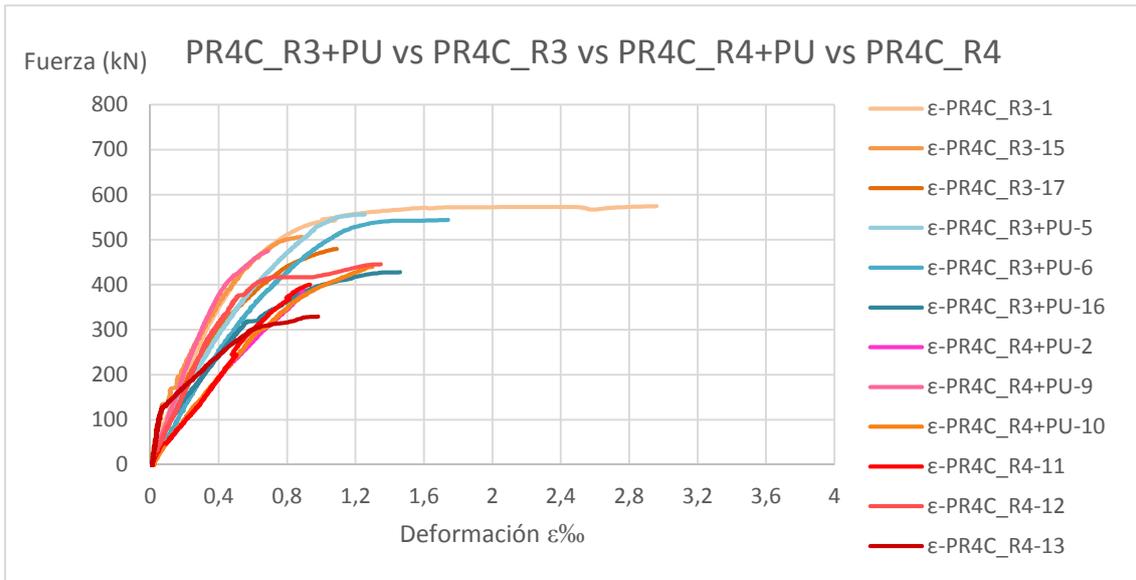


Figura 190. Gráfica Fuerza-deformación para los pilares PR4C_R3, PR4C_R3+PU, PR4C_R4+PU y PR4C_R4.

De la gráfica que recoge la figura 191 se puede extraer una visión global del comportamiento de acuerdo a la curva fuerza-deformación de la familia de pilares reparados a cuatro caras con respecto a los patrones. Vemos una vez reparados que su deformabilidad es similar a la del pilar intacto en el primer tercio de la curva fuerza-deformación. Sin embargo, la rama de deformación plástica que exhiben suele ser mucho menor, alcanzando deformaciones máximas en rotura del orden del 1‰.

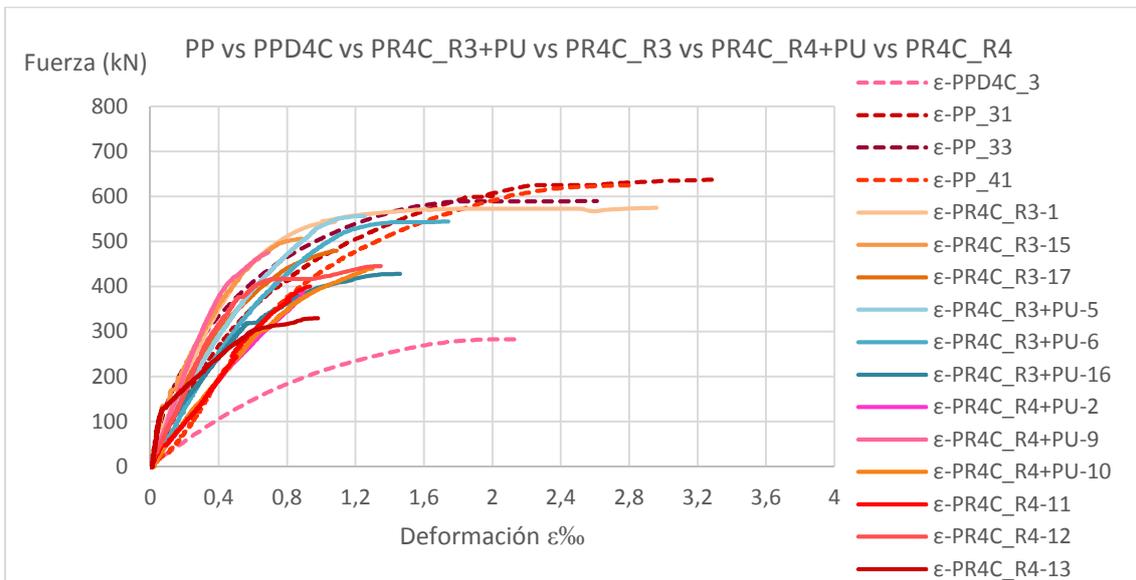


Figura 191. Gráfica Fuerza-deformación para los pilares PP, PPD4C, PR4C_R3, PR4C_R3+PU, PR4C_R4+PU y PR4C_R4.

Pilares Patrón Dañados a 1 Cara. Para la subfamilia de los pilares a 1 Cara, se analizan las dos caras, la dañada y la intacta (C3 y C1, respectivamente), puesto que tienen comportamiento diferente debido a la geometría de la sección.

Tal y como era de esperar, y como se puede observar en la figura 192, la cara dañada (C3) y la intacta (C1), sufren distintas deformaciones, dado el cambio en la posición del centro de gravedad de la sección, que provoca que el axil se encuentre descentrado respecto al centro de gravedad de la sección. Nos encontramos por tanto en una situación de compresión excéntrica (ver figuras 90 y 91, fotografías de la fisuración de las caras del pilar).

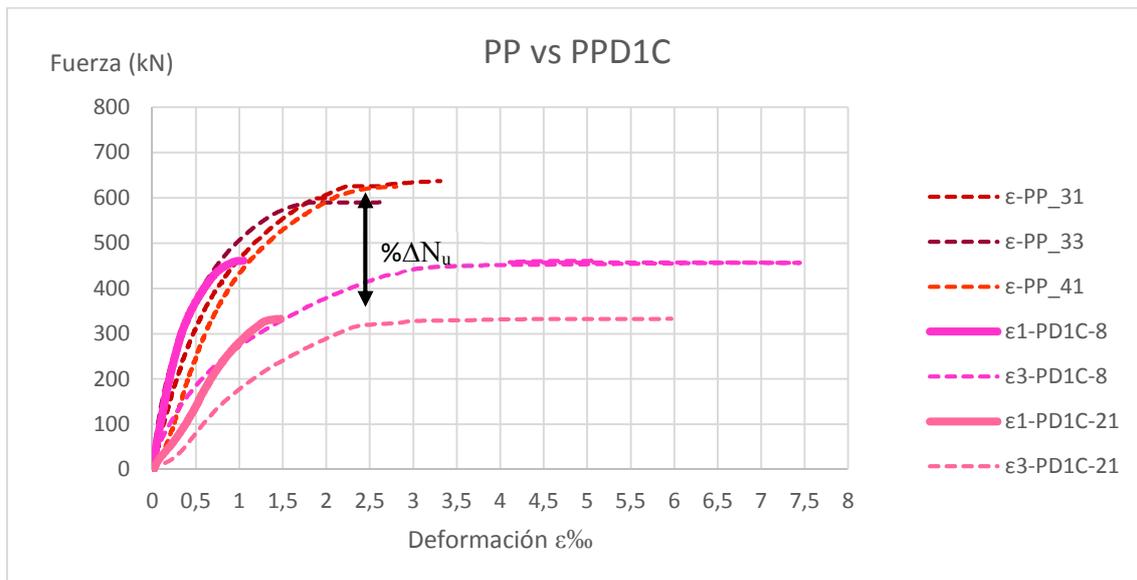


Figura 192. Gráfica fuerza-deformación medias de los pilares PP-PPD1C.

En este caso, se produce una reducción media del axil último del 36% (ver figura 192). A partir de este dato se realiza el análisis comparativo para la subfamilia de los pilares reparados a 1 Cara, observando cómo la reparación influye en el comportamiento conjunto del pilar al restituir la geometría de la sección, restableciendo, al menos parcialmente, la simetría.

Pilares Reparados 1 Cara, mortero de reparación Clase R3 con Puente de unión, PR1C_R3+PU. Como se observó en las figuras 96 y 97, el fallo de la reparación se produce por el comienzo del desprendimiento de la capa de reparación. Como consecuencia de este fallo se produce una pequeña flexión en el pilar, ya que existe una descompensación en la simetría de la sección.

En esta subfamilia de pilares se colocó un captador de desplazamiento adicional en una de las caras laterales, de manera que se pueda estudiar con más detalle la influencia de la reparación al conjunto del elemento estructural.

En la figura 193 se observa que el sobre pasar la carga el umbral de aproximadamente el 90% de la carga máxima, la curva descrita por el captador de la cara lateral

(deformaciones ε CI) muestra un cambio pronunciado en la pendiente de su curva que nos evidencia el comienzo del fallo de la adherencia de la reparación, y por lo tanto, se produce en ese momento la fisuración por la pequeña flexión en la cara C1.

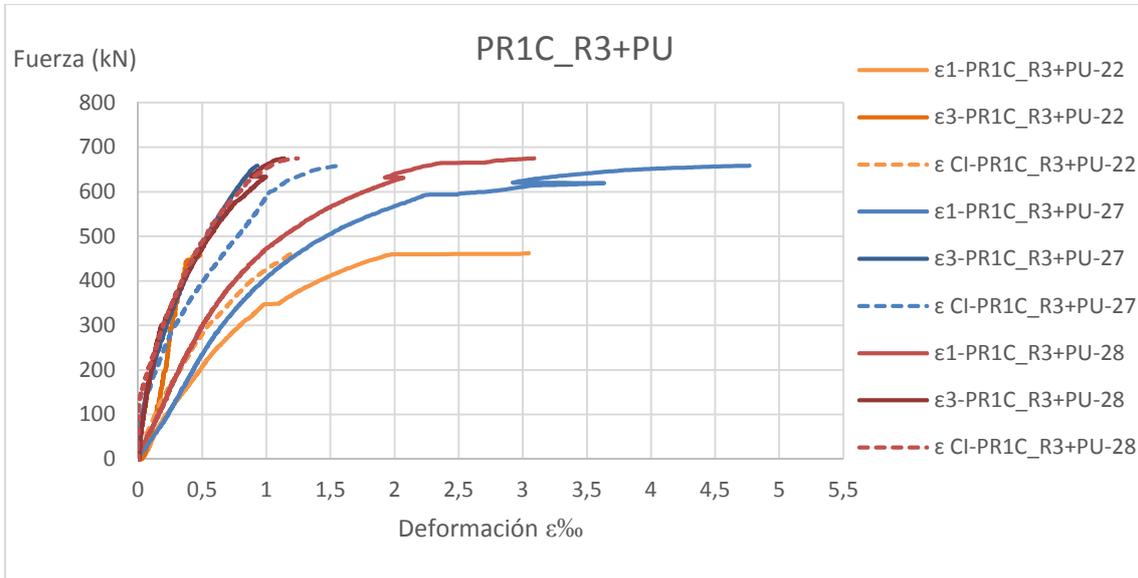


Figura 193. Gráfica fuerza-deformación medias de los pilares PR1C_R3+PU.

Apoyándonos en la figura 194, se puede observar cómo la reparación contribuye a equilibrar el comportamiento del conjunto del elemento estructural, aunque se mantiene la diferencia entre las dos caras, la cara que experimenta menor deformación pasa a ser en este caso la reparada (C3), sufriendo la intacta (C1) mayor deformación. Este hecho resulta lógico dada la mayor rigidez del mortero de reparación.

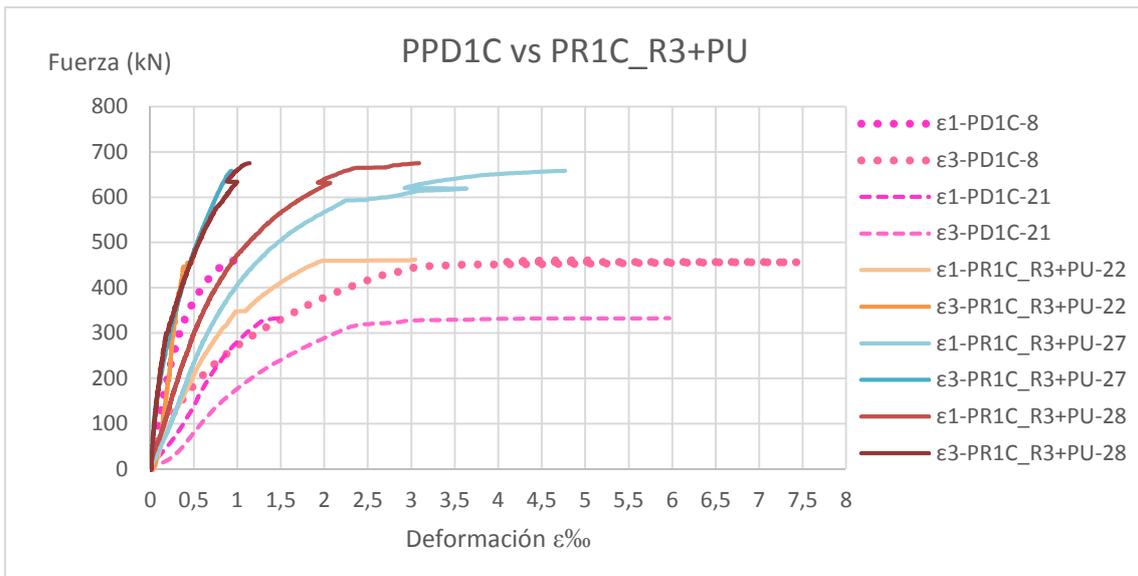


Figura 194. Gráfica fuerza-deformación medias de los pilares PPD1C-PR1C_R3+PU.

La resistencia media obtenida en los pilares reparados es del 97% de la resistencia original.

La capacidad portante mejorada media del elemento reparado es del 151% respecto a la resistencia última del pilar dañado.

En esta subfamilia en uno de los especímenes (PR1C_R3+PU-22) se ha obtenido una resistencia muy inferior a los otros dos especímenes, lo que alerta de la variabilidad que pueden exhibir estas reparaciones en su comportamiento. Se estima que se deba a la variabilidad general inherente a la experimentación y al método de reparación.

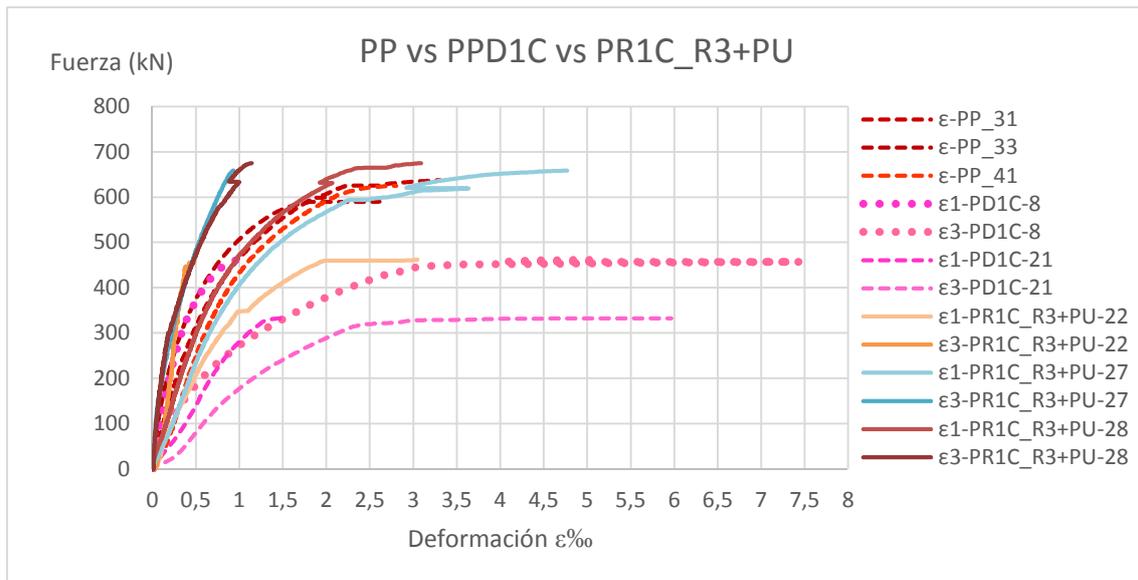


Figura 195. Gráfica fuerza-deformación pilares PP-PPD1C-PR1C_R3+PU.

Pilares Reparados 1 Cara, mortero de reparación Clase R3 sin Puente de unión, PR1C_R3. Al igual que en el caso anterior, el fallo de la reparación se produce por el comienzo del desprendimiento de la capa de reparación, aunque en esta subfamilia de pilares, se desprende una capa de 1'5cm de espesor. Como consecuencia de este fallo se produce una pequeña flexión en el pilar, ya que existe una descompensación en la simetría de la sección.

Para observar detalladamente el fallo del desprendimiento de esa fina capa de reparación, una vez concluido el ensayo se procedió a separar completamente esa lámina de mortero de reparación del pilar, pudiendo verse por debajo de esa capa las fisuras existentes, que en la superficie de la cara (Cara C3) no se apreciaban (ver figura 196).



Figura 196. Detalle de la fisuración interna en la capa de reparación.

El fallo de la reparación se establece alrededor del 90% del valor de la carga máxima, produciéndose en ese momento la fisuración en la Cara C1 provocada por la pequeña flexión, causada por la consecución de la falta de adherencia en la reparación.

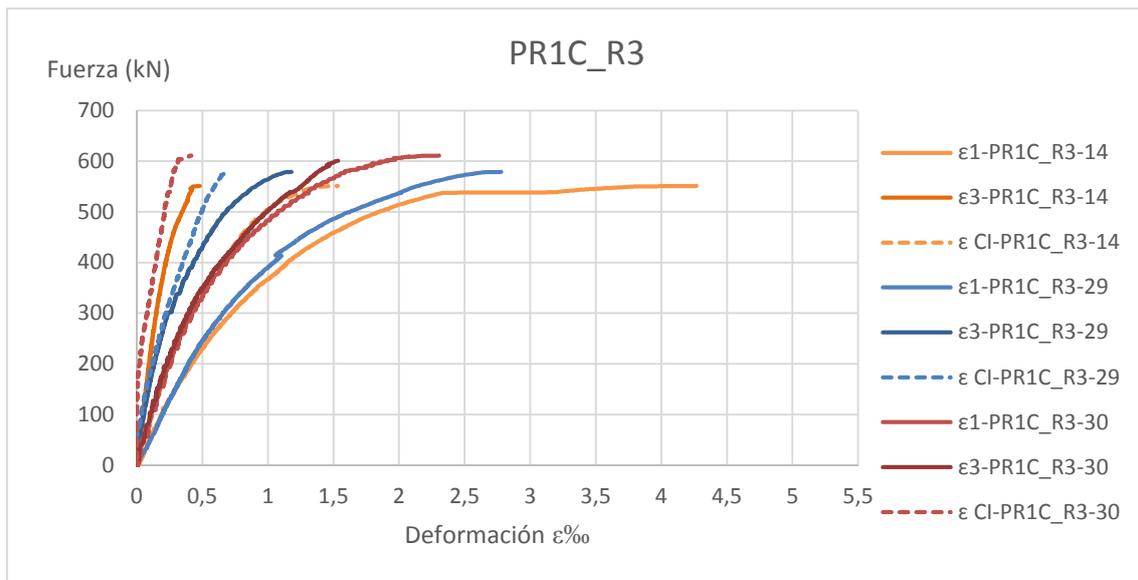


Figura 197. Gráfica fuerza-deformación medias de los pilares PR1C_R3.

De la figura 198, se puede observar cómo la reparación contribuye a equilibrar el comportamiento del conjunto del elemento estructural, aunque se mantiene una pequeña diferencia entre las dos caras, la cara que experimenta menor deformación pasa a ser en este caso la reparada (C3), sufriendo la intacta (C1) mayor deformación. Este hecho resulta lógico dada la mayor rigidez del mortero de reparación.

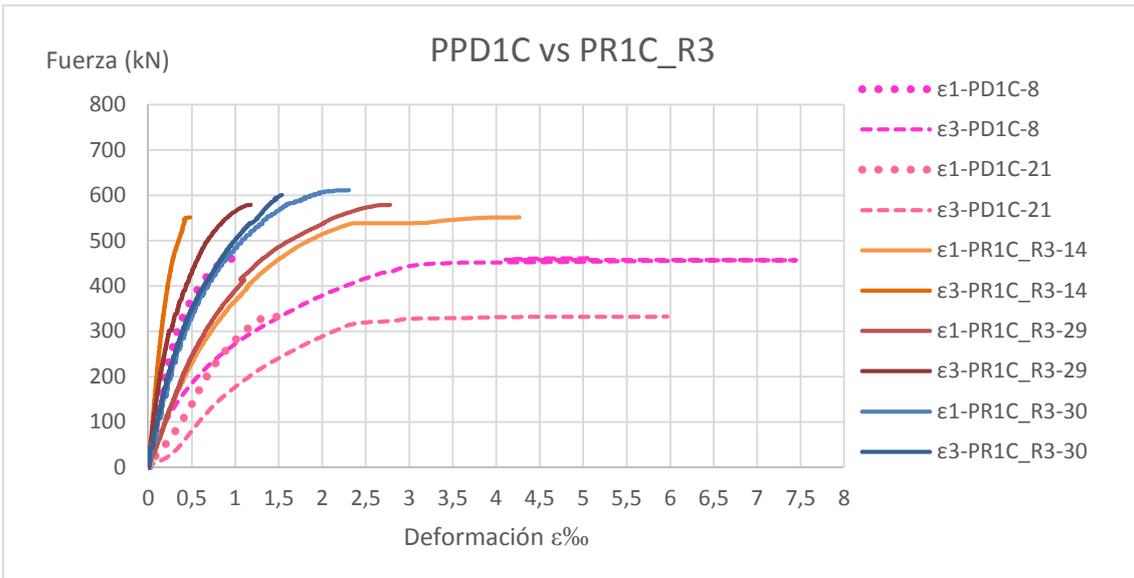


Figura 198. Gráfica fuerza-deformación medias de los pilares PPD1C-PR1C_R3.

La resistencia media obtenida en los pilares reparados es del 94% de la resistencia original.

La capacidad portante mejorada media del elemento reparado es del 146% respecto a la resistencia última del pilar dañado.

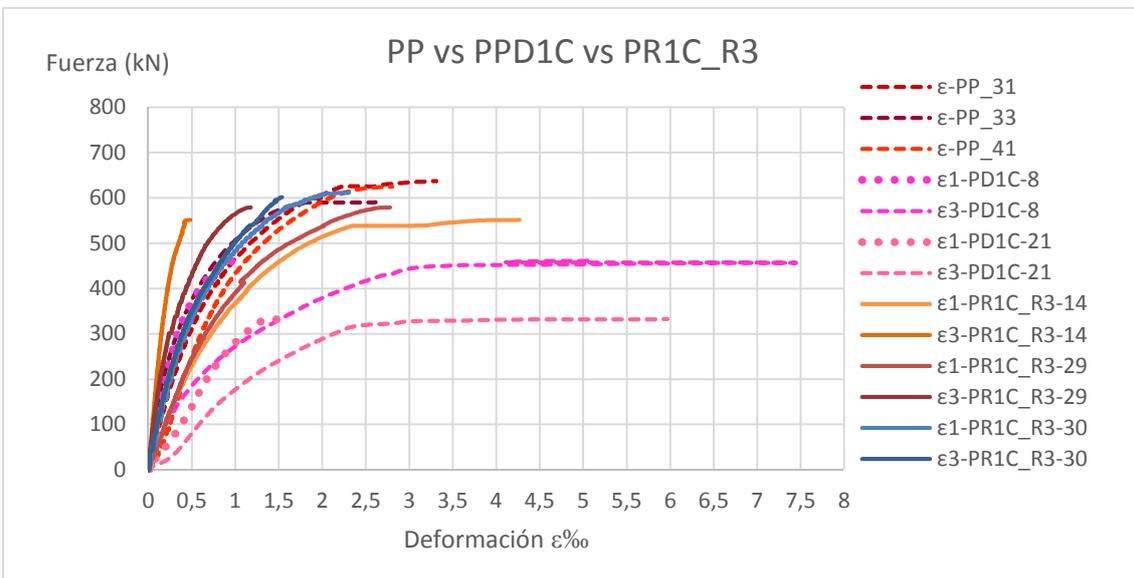


Figura 199. Gráfica fuerza-deformación medias de los pilares PP-PPD1C-PR1C_R3.

Haciendo la comparativa entre las dos subfamilias reparadas con el mortero Clase R3, PR1C_R3+PU y PR1C_R3, se observa como el comportamiento entre las dos caras tiende a acercarse entre ellas, y son muy similares entre ellos (ver figura 200). La utilización o no del puente de unión difiere en tan solo un 3% de mejora al colocarlo, lo que puede atribuirse a la variabilidad de los ensayos y no necesariamente a un mejor comportamiento de un tipo de reparación respecto a la otra.

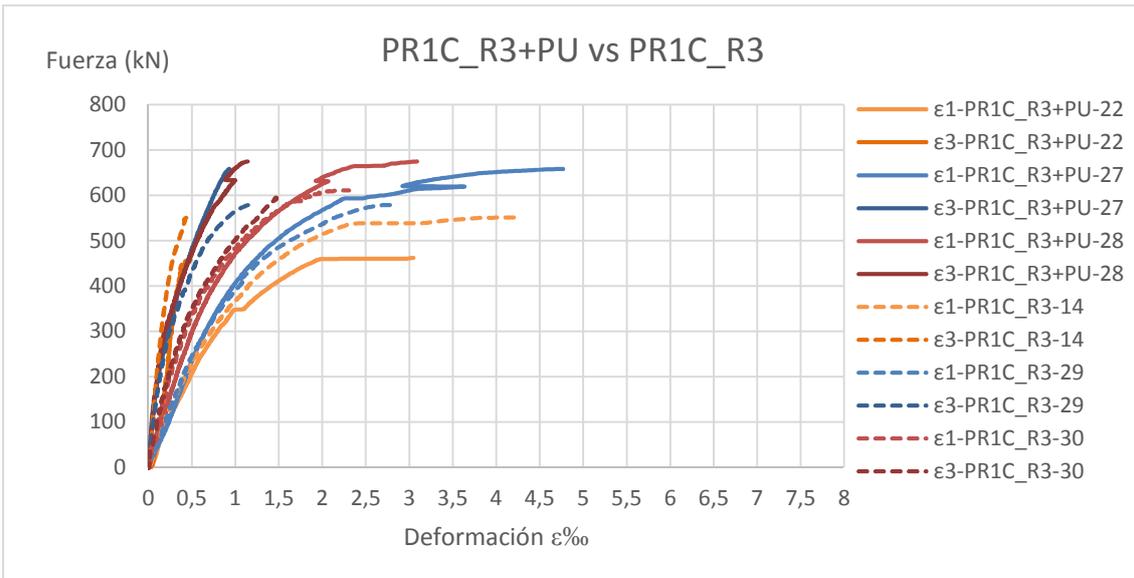


Figura 200. Gráfica fuerza-deformación medias de los pilares PR1C_R3+PU-PR1C_R3.

Se observa una ligera diferencia de comportamiento, los pilares PR1C_R3 presentan un comportamiento suavemente menos rígido que los pilares PR1C_R3+PU (ver figura 201).

Por lo tanto, para estos casos, la utilización o no del puente de unión entre el hormigón (soporte) y el mortero de reparación, no implica mejoras notables al comportamiento general del elemento estructural.

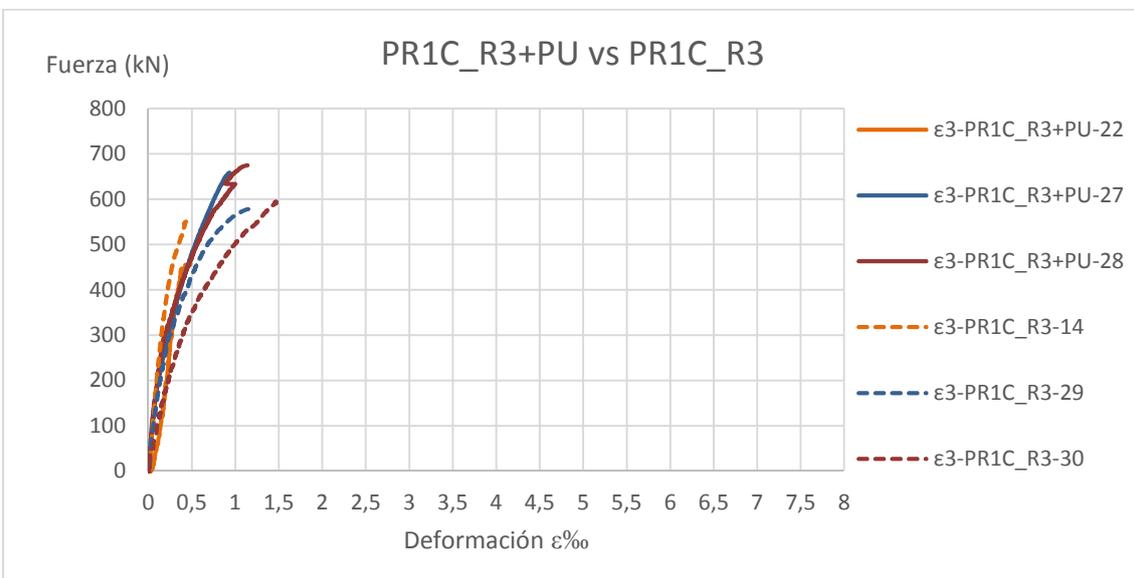


Figura 201. Gráfica fuerza-deformación pilares PR1C_R3+PU-PR1C_R3 (Cara C3).

Pilares Reparados 1 Cara, mortero de reparación Clase R4 con Puente de unión, PR1C_R4+PU. Como sucede con los pilares PR1C_R3+PU y PR1C_R3, el fallo de la reparación se produce por el comienzo del desprendimiento de la capa de reparación.

Como consecuencia de este fallo se produce una pequeña flexión en el pilar, ya que existe una descompensación en la simetría de la sección.

El fallo de la reparación se establece alrededor del 90% del valor de la carga máxima, produciéndose en ese momento la fisuración en la Cara C1 provocada por la pequeña flexión, causada por la consecución de la falta de adherencia en la reparación.

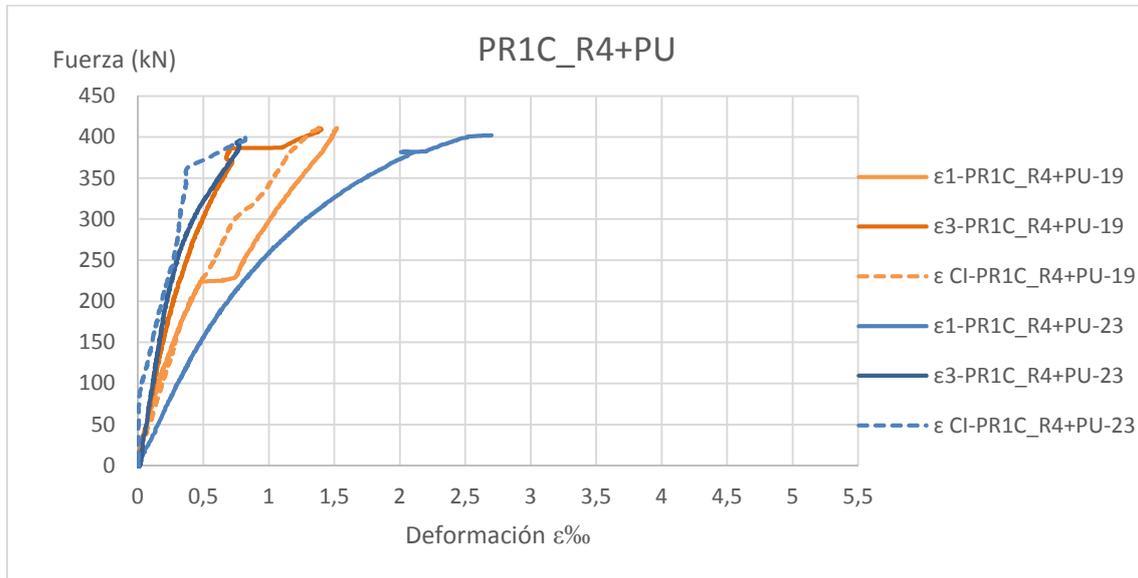


Figura 202. Gráfica fuerza-deformación medias de los pilares PR1C_R4+PU.

De la figura 203, se puede observar cómo la reparación contribuye a equilibrar el comportamiento del conjunto del elemento estructural, aunque se mantiene una pequeña diferencia entre las dos caras, la cara que experimenta menor deformación pasa a ser en este caso la reparada (C3), sufriendo la intacta (C1) mayor deformación. Este hecho resulta lógico dada la mayor rigidez del mortero de reparación.

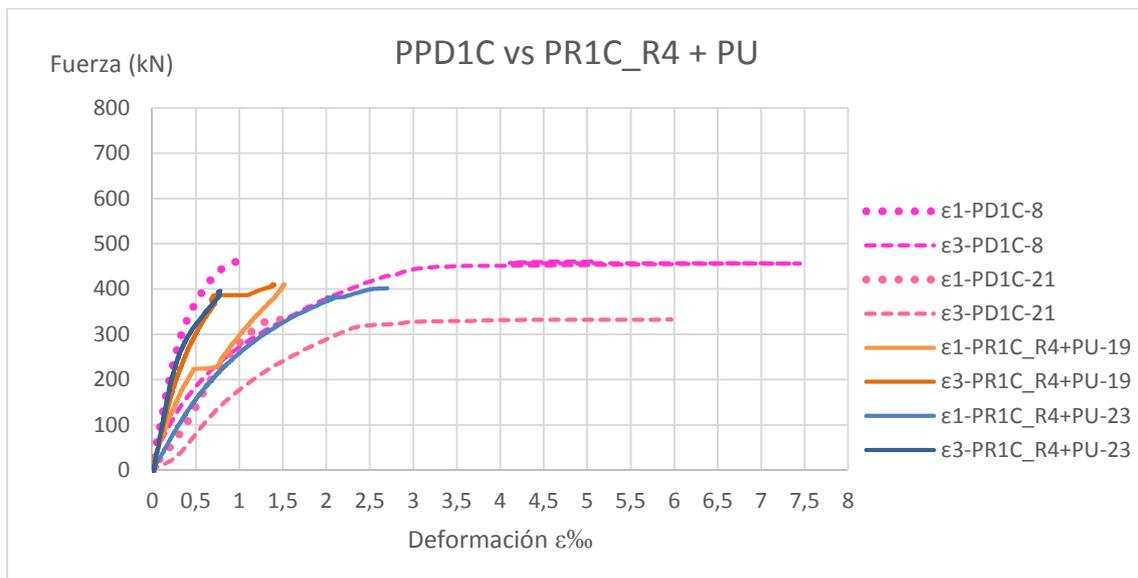


Figura 203. Gráfica fuerza-deformación medias de los pilares PPD1C-PR1C_R4+PU.

La resistencia media obtenida en los pilares reparados es del 66% de la resistencia original.

La capacidad portante mejorada media del elemento reparado es del 102% respecto a la resistencia última del pilar dañado.

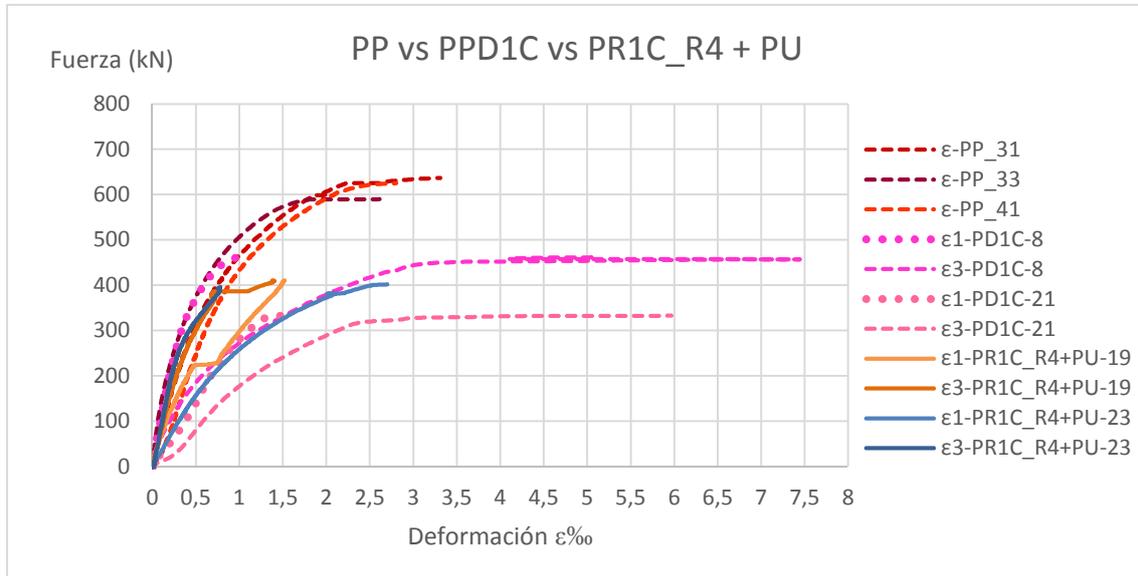


Figura 204. Gráfica fuerza-deformación medias de los pilares PP-PPD1C-PR1C_R4+PU.

En este punto del estudio ya se palpa una notoria diferencia en el comportamiento de las reparaciones con respecto a la clase de mortero utilizado. Comparando los pilares reparados con mortero Clase R3 con puente de unión con los reparados con mortero Clase R4 con puente de unión, se observa que en los pilares reparados con mortero Clase R4 apenas se mejora la capacidad portante del elemento dañado, al contrario de lo que ocurre con los R3, donde prácticamente se recupera el axil último del pilar intacto.

Pilares Reparados 1 Cara, mortero de reparación Clase R4 sin Puente de unión, PR1C_R4. Al igual que para las anteriores subfamilias de pilares reparados a 1 cara, el fallo de la reparación se produce por el comienzo del desprendimiento de la capa de reparación. Como consecuencia de este fallo se produce una pequeña flexión en el pilar, ya que existe una descompensación en la simetría de la sección. El fallo de la reparación se establece alrededor del 85% del valor de la carga máxima, produciéndose en ese momento la fisuración en la Cara C1 provocada por la pequeña flexión, causada por la consecución de la falta de adherencia en la reparación.

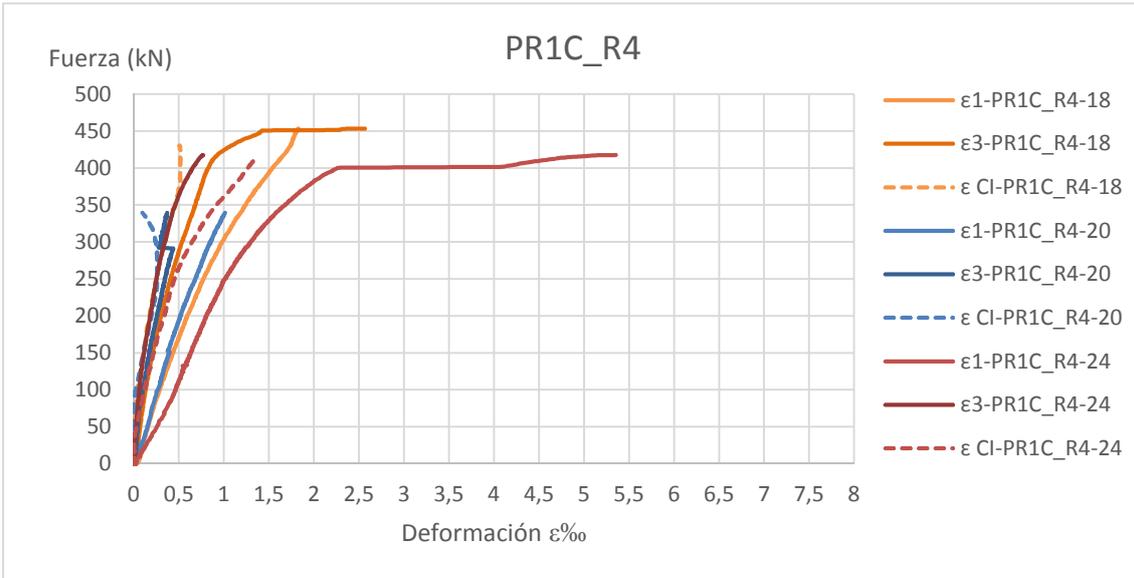


Figura 205. Gráfica fuerza-deformación medias de los pilares PR1C_R4.

De la figura 206, se puede observar cómo la reparación contribuye a equilibrar el comportamiento del conjunto del elemento estructural, aunque se mantiene una pequeña diferencia entre las dos caras, la cara que experimenta menor deformación pasa a ser en este caso la reparada (C3), sufriendo la intacta (C1) mayor deformación. Este hecho resulta lógico dada la mayor rigidez del mortero de reparación.

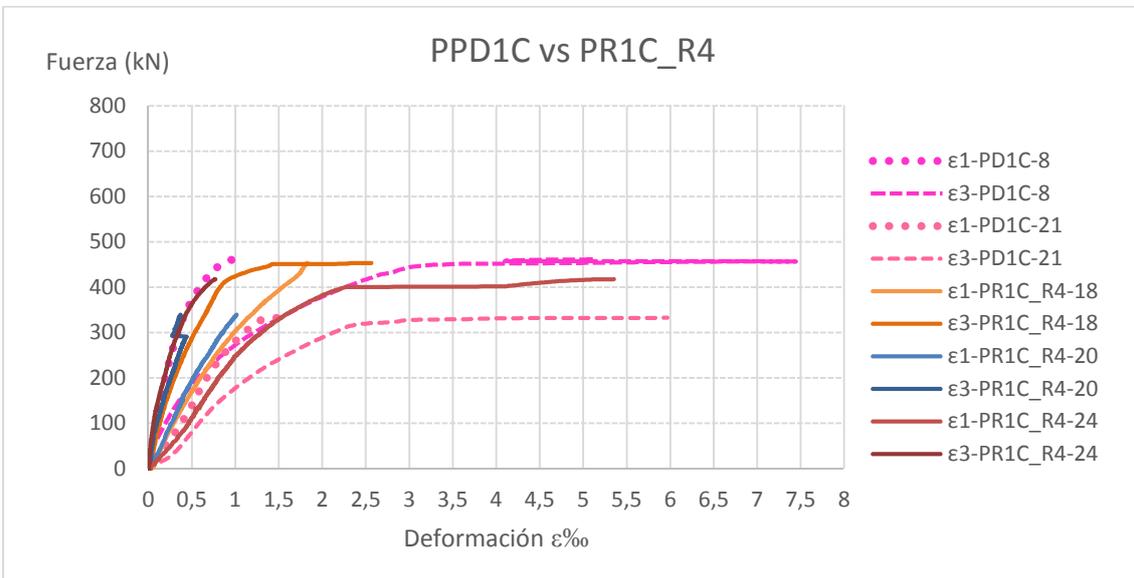


Figura 206. Gráfica fuerza-deformación medias de los pilares PPD1C-PR1C_R4.

La resistencia media obtenida en los pilares reparados es del 65% de la resistencia original.

La capacidad portante mejorada media del elemento reparado es del 102% respecto a la resistencia última del pilar dañado.

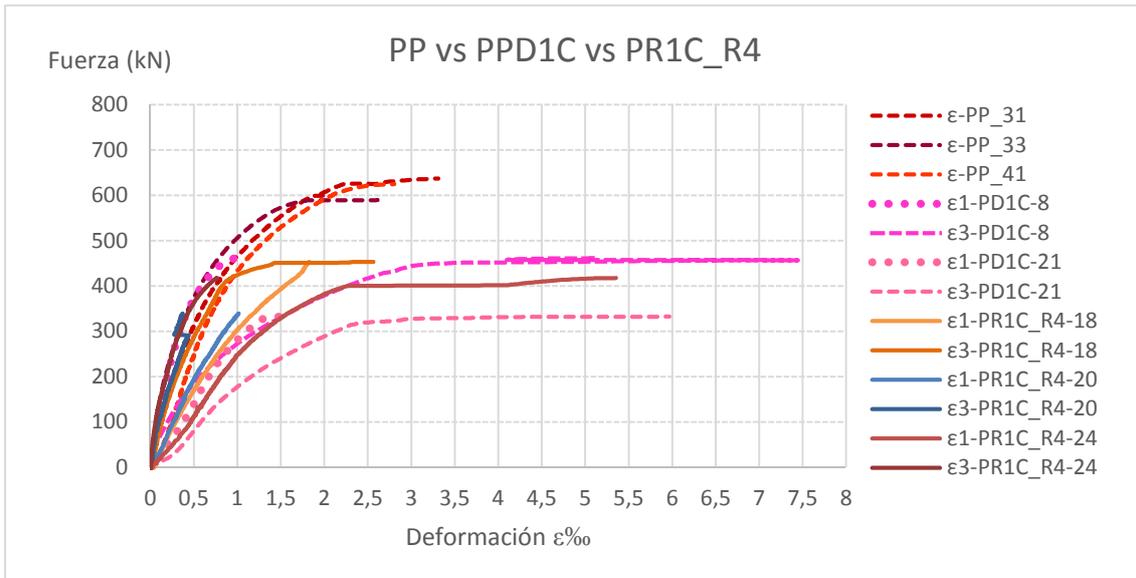


Figura 207. Gráfica fuerza-deformación medias de los pilares PP-PPD1C-PR1C_R4.

En la siguiente figura, se realiza una comparativa de las subfamilias de los pilares reparados a 1 cara con mortero Clase R4, con la variable del puente de unión. Apenas hay diferencias significativas entre el empleo o no del puente de unión para los pilares reparados con mortero Clase R4. La diferencia media de la capacidad portante entre ambas subfamilias es de apenas el 1%.

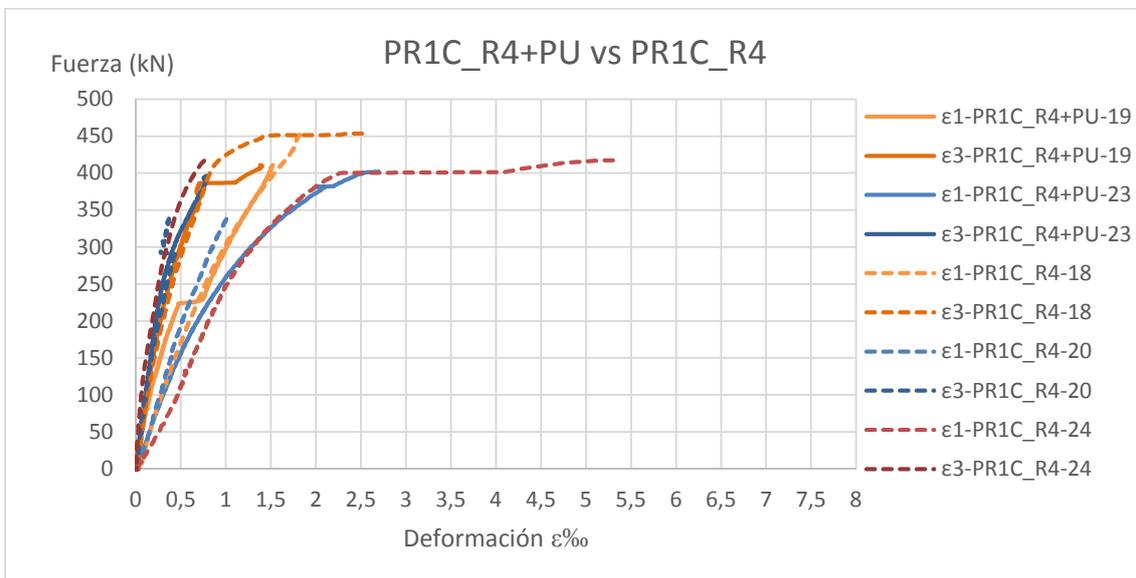


Figura 208. Gráfica fuerza-deformación medias de los pilares PR1C_R4+PU-PR1C_R4.

La figura 209 recoge el conjunto de resultados obtenidos en los ensayos sobre familias de pilares reparados a una cara.

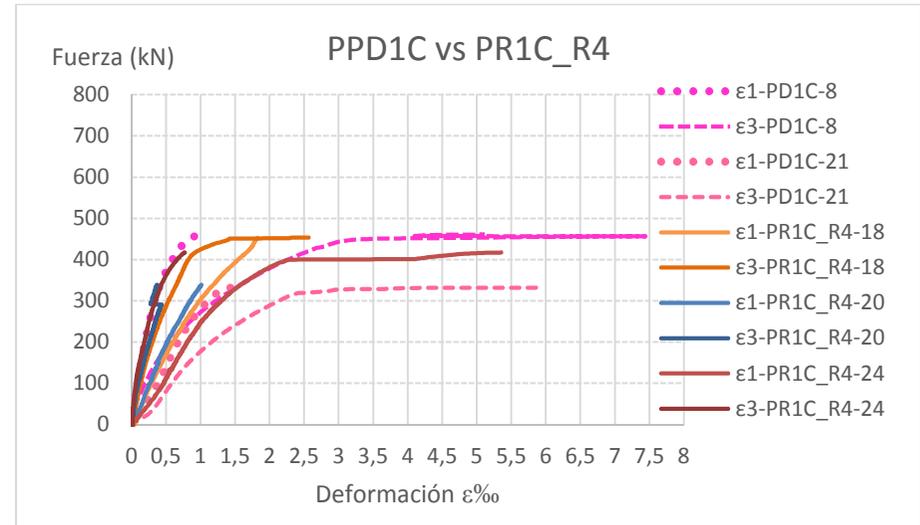
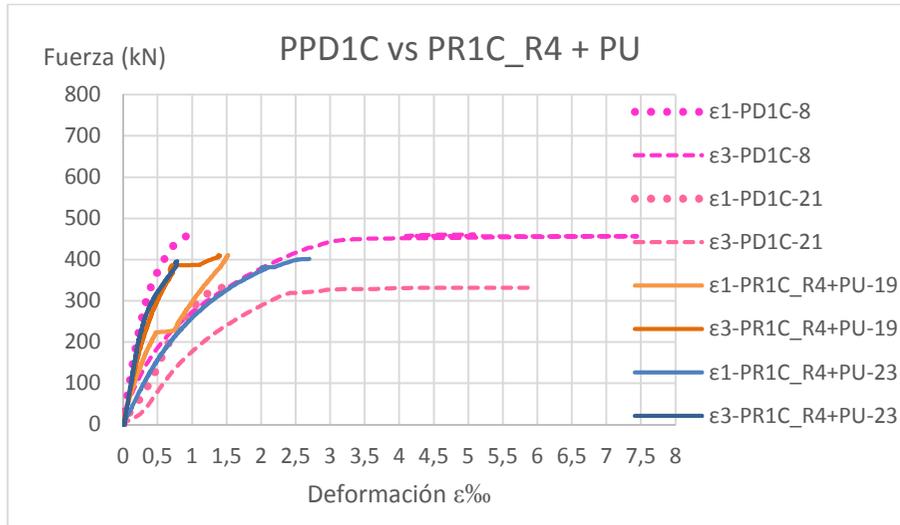
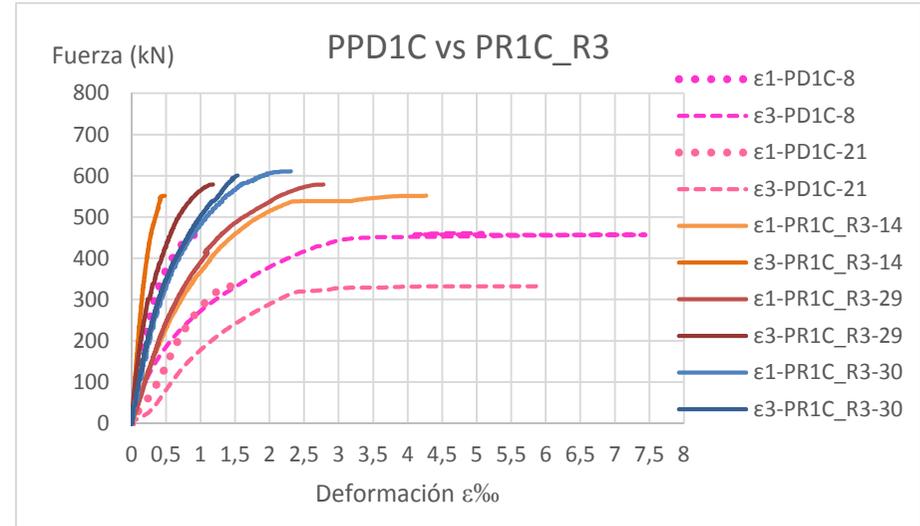
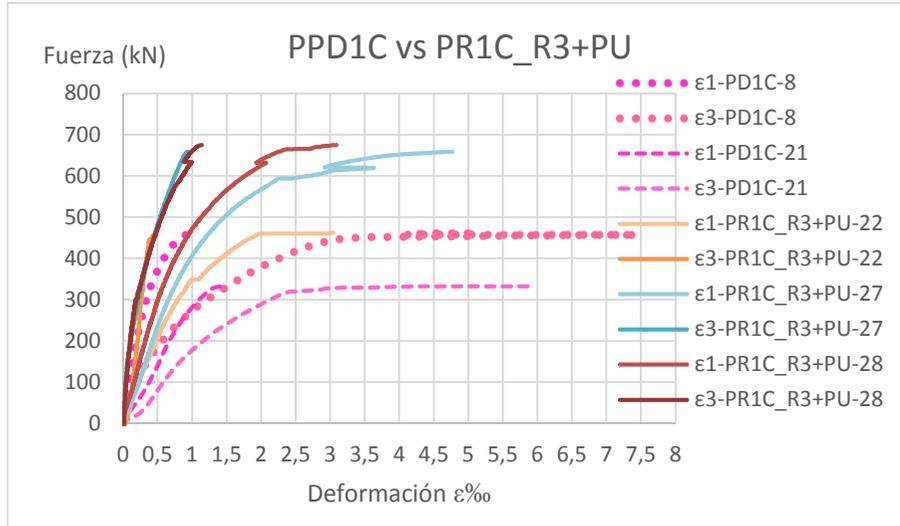


Figura 209. Conjunto de gráficas fuerza-deformación medias de los PR1C.

Tras ser reparados los pilares se observa como la reparación contribuye a la mejoría de la capacidad portante, con la clara evidencia de que los pilares reparados mediante el mortero Clase R3 aporta los mejores resultados, con respecto al patrón original, PP, que prácticamente se podría concluir que restablecen la capacidad portante del elemento estructural (aunque cabe de alertar sobre la variabilidad de los resultados). Mientras que los pilares reparados con el mortero Clase R4, se quedan bastante lejos de esa mejoría. La tabla 11 resume los porcentajes de recuperación de la capacidad portante de los pilares tras la reparación de una cara.

Tipo de Pilar	$N_{u,media}$ (kN)	% Eficiencia respecto a la capacidad portante original ($N_{ui} / N_{uref.PP}$)
PP	617,51	
PR1C	R3 + PU	96,97
	R3 sin PU	94,04
	R4 + PU	65,86
	R4 sin PU	65,38

Tabla 11. Esquema eficiencia de la reparación para los pilares reparados a 1 cara, PR1C.

Por otro lado, de ella puede deducirse que no hay ninguna diferencia de mejoría en la utilización del puente de unión.

Pilares Patrón Dañados Parcheo. Para la subfamilia de los pilares parcheo, se analizan las dos caras, la dañada y la intacta (C1 y C3, respectivamente), puesto que tienen comportamiento diferente debido a la geometría de la sección.

Tal y como era de esperar, y como se puede observar en la figura 210, la cara dañada (C1) y la intacta (C3), sufren distintas deformaciones, dado el cambio en la posición del centro de gravedad de la sección, que provoca que el axil se encuentre descentrado respecto al centro de gravedad de la sección. Nos encontramos por tanto en una situación de compresión excéntrica (ver figuras 137 y 138, fotografías de la fisuración de las caras del pilar).

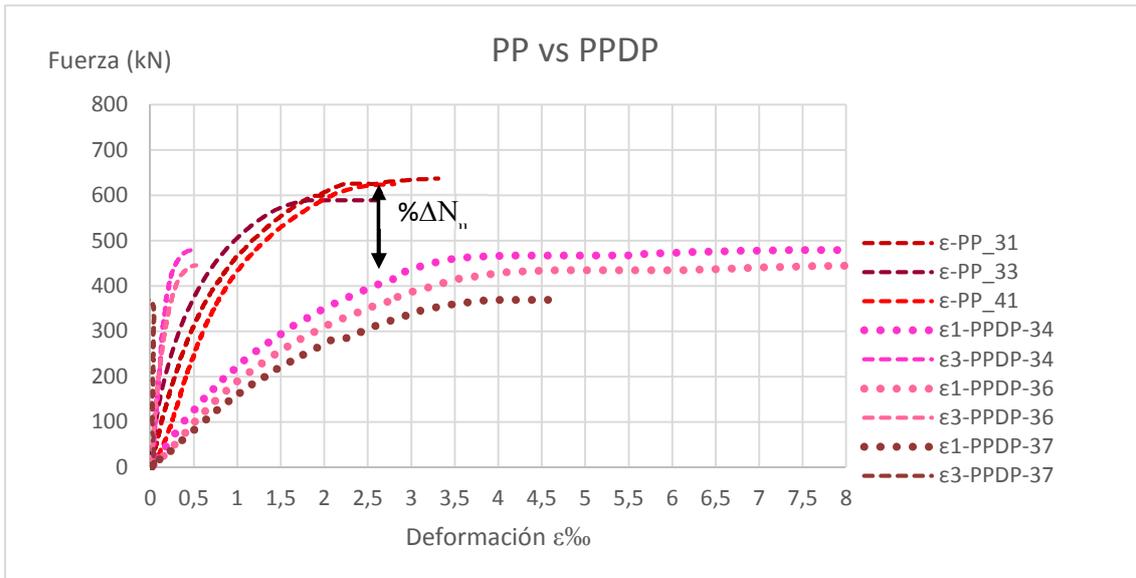


Figura 210. Gráfica fuerza-deformación medias de los pilares PP-PPDP.

En este caso, la pérdida de resistencia es del orden del 30% (ver figura 210). A partir de este dato se realiza el análisis comparativo para la subfamilia de los pilares reparados parcheo, observando cómo la reparación influye en el comportamiento conjunto del pilar al restituir la geometría de la sección, devolviendo así la simetría.

Pilares Reparados Parcheo, mortero de reparación Clase R3 con Punte de unión, PRP_R3+PU. Como se observaron en las figuras 143 y 146, el fallo de la reparación se produce por el desprendimiento de la capa de reparación. Como consecuencia de este fallo se produce una pequeña flexión en el pilar, ya que existe una descompensación en la simetría de la sección.

En esta subfamilia de pilares se colocó dos captadores de desplazamiento adicionales; uno en una de las caras laterales, de manera que se pueda estudiar con más detalle la influencia de la reparación al conjunto del elemento estructural, y el otro en la Cara C1 en la interfase hormigón-mortero.

En la figura 211 se puede hacer la siguiente conjetura, alrededor del 50% del valor de la carga máxima la curva descrita por el captador de la cara lateral (CL) muestra un cambio pronunciado en la pendiente de su curva que nos evidencia el comienzo del fallo de la adherencia de la reparación. Y llegando al 90% del valor de la carga máxima es cuando se produce la pequeña flexión en la Cara C3. La interfase hormigón-mortero de la cara reparada (C1), (deformaciones ε_{CL}), muestra un comportamiento parejo al del mortero (deformaciones ε_1), tal y como se puede observar en la figura 211.

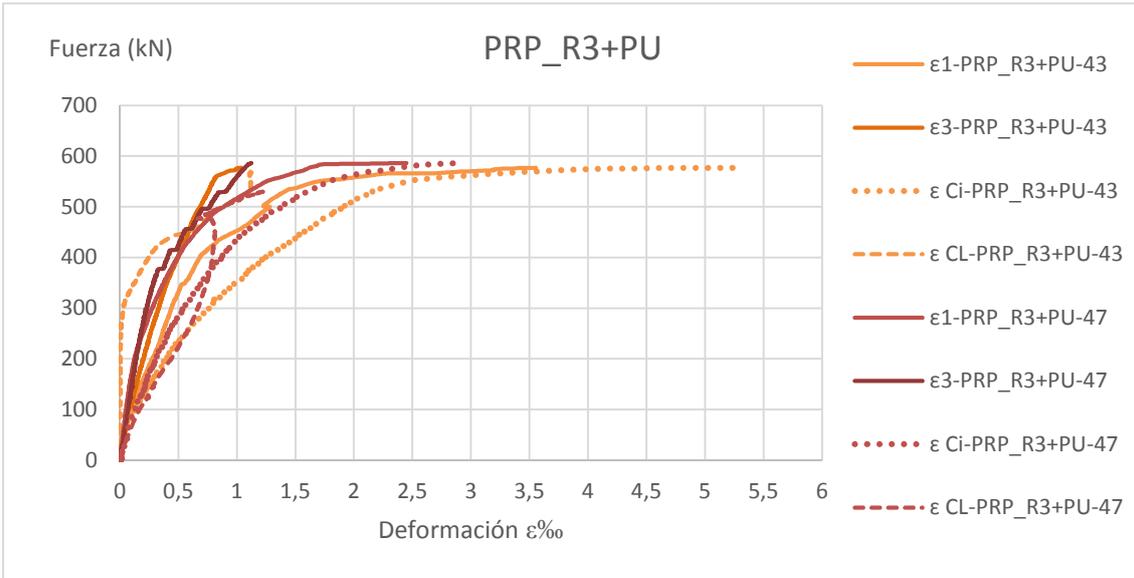


Figura 211. Gráfica fuerza-deformación medias de los pilares PRP_R3+PU.

Apoyándonos en la siguiente figura, se puede observar cómo la reparación contribuye a restablecer prácticamente la simetría del comportamiento de la sección, con una muy pequeña diferencia entre las dos caras, y esto debido a las distintas propiedades mecánicas existentes en los dos materiales (hormigón y mortero de reparación).

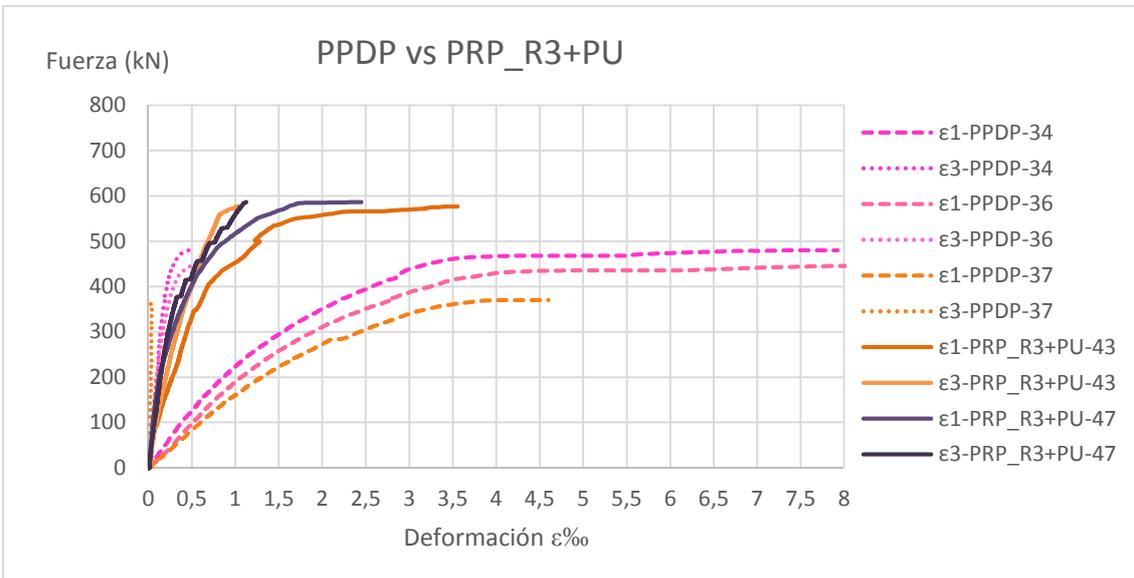


Figura 212. Gráfica fuerza-deformación medias de los pilares PPDP-PRP_R3+PU.

La resistencia media obtenida en los pilares reparados es del 94% de la resistencia original.

La capacidad portante mejorada media del elemento reparado es del 135% respecto a la resistencia última del pilar dañado.

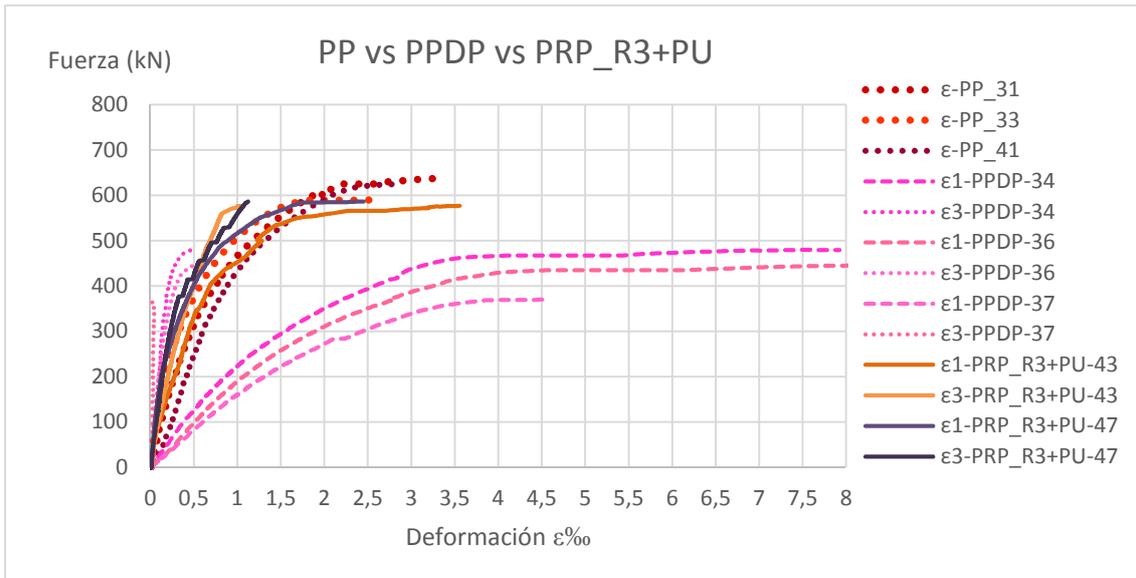


Figura 213. Gráfica fuerza-deformación medias de los pilares PP-PPDP-PRP_R3+PU.

Pilares Reparados Parcheo, mortero de reparación Clase R3 sin Puente de unión, PRP_R3. Como se pudo observar en las figuras 153 y 154, el fallo de la reparación se produce por el desprendimiento de la capa de reparación. Como consecuencia de este fallo se produce una pequeña flexión en el pilar, al perderse la simetría de la sección en el momento de la rotura de la capa de reparación y esto a su vez provoca una fisuración creada por un pico de tensión en las esquinas superiores exteriores.



Figura 214. Detalle de la fisuración en el lateral del parcheo.

En esta subfamilia de pilares se colocaron dos captadores de desplazamiento adicionales; uno en una de las caras laterales, de manera que se pueda estudiar con

más detalle la influencia de la reparación al conjunto del elemento estructural, y el otro en la Cara C1 en la interfase hormigón-mortero.

En la figura 215 se observa cómo, alrededor del 75% del valor de la carga máxima se observa un cambio en la pendiente de la curva de la cara reparada, aparentemente causado por el fallo de la adherencia de la reparación. Este cambio en la pendiente se observa también en la curva registrada por el captador CL. Alrededor del 95% del valor de la carga máxima se produce la ligera flexión en la Cara C3.

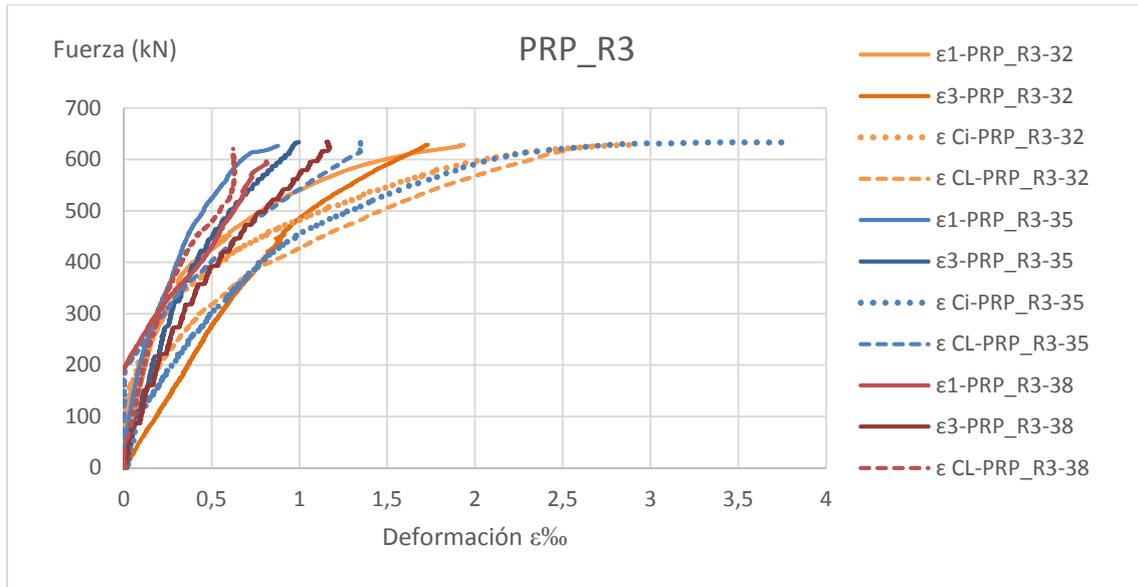


Figura 215. Gráfica fuerza-deformación medias de los pilares PRP_R3.

En la figura 216 se puede observar cómo la reparación prácticamente restituye la simetría del comportamiento del conjunto del elemento estructural, con una muy leve diferencia entre las dos caras, y esto debido a las distintas propiedades mecánicas existentes en los dos materiales (hormigón y mortero de reparación).

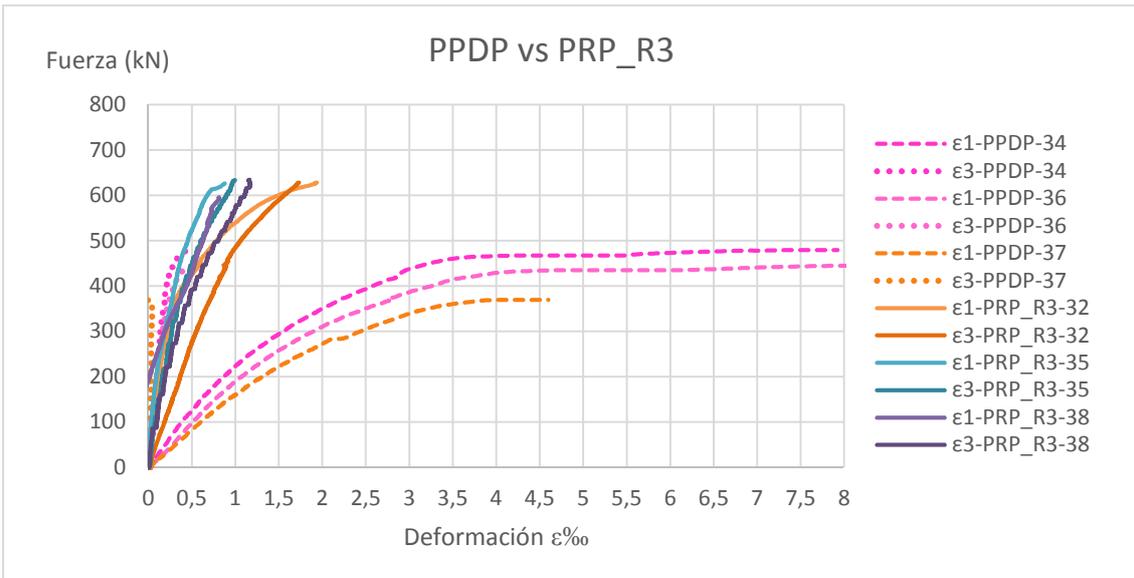


Figura 216. Gráfica fuerza-deformación medias de los pilares PPDP-PRP_R3.

La resistencia media obtenida en los pilares reparados es del 102% de la resistencia original.

La capacidad portante mejorada media del elemento reparado es del 146% respecto a la resistencia última del pilar dañado.

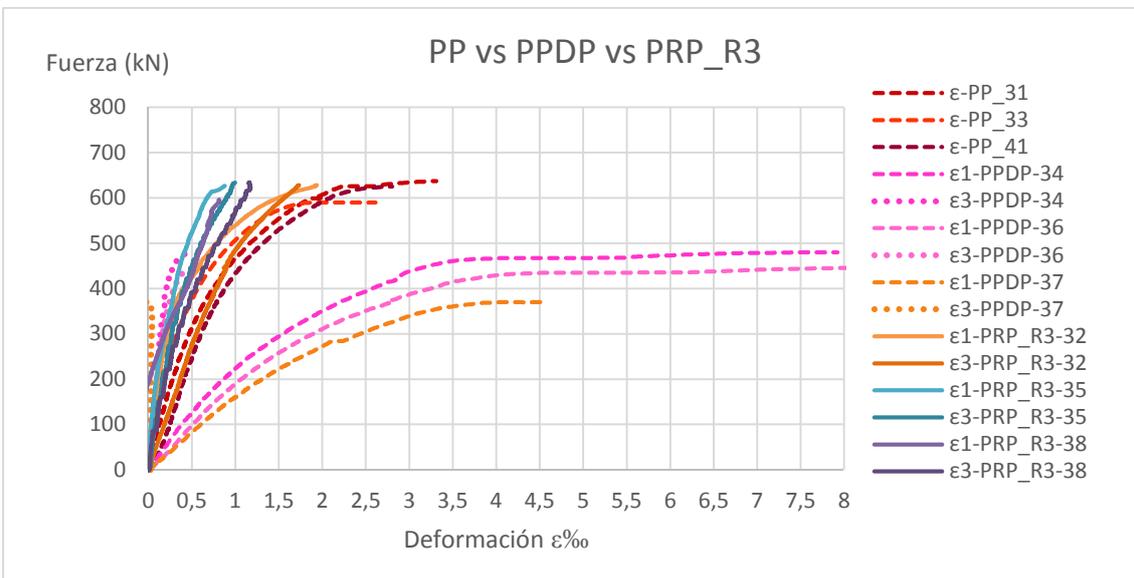


Figura 217. Gráfica fuerza-deformación medias de los pilares PP-PPDP-PRP_R3.

Haciendo la comparativa entre las dos subfamilias reparadas con el mortero Clase R3, PRP_R3+PU y PRP_R3, se observa como en ambos casos se consigue restituir en gran medida la simetría de la sección frente a axil. La resistencia última a esfuerzo axil es un 9% superior en el caso en que no se usa puente de unión.

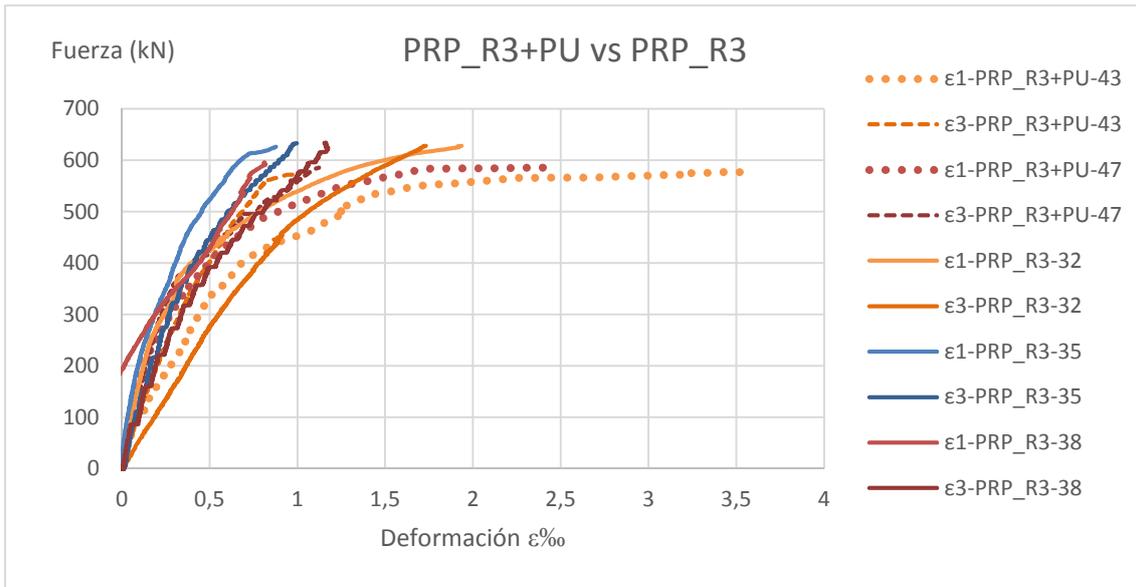


Figura 218. Gráfica fuerza-deformación medias de los pilares PRP_R3+PU-PRP_R3.

Pilares Reparados Parcheo, mortero de reparación Clase R4 con Punte de unión, PRP_R4+PU. Como se pudo observar en las figuras 162 y 163, el fallo de la reparación se produce por el desprendimiento de la capa de reparación.

En esta subfamilia de pilares se colocaron dos captadores de desplazamiento adicionales; uno en una de las caras laterales, de manera que se pueda estudiar con más detalle la influencia de la reparación al conjunto del elemento estructural, y el otro en la Cara C1 en la interfase hormigón-mortero.

En la figura 219 se observa cómo, alrededor del 75% del valor de la carga máxima se produce un cambio en la pendiente de la curva de la cara reparada, aparentemente causado por el fallo de la adherencia de la reparación. Este cambio en la pendiente se observa también en la curva registrada por el captador CL. Y llegando al 90% del valor de la carga máxima es cuando se produce el desprendimiento de la reparación. La interfase hormigón-mortero de la Cara C1 (deformaciones ϵ_{Ci}) muestra un comportamiento parejo al del mortero (deformaciones ϵ_1) hasta llegar al 70% del valor de la carga máxima, como se puede observar en la figura 219.

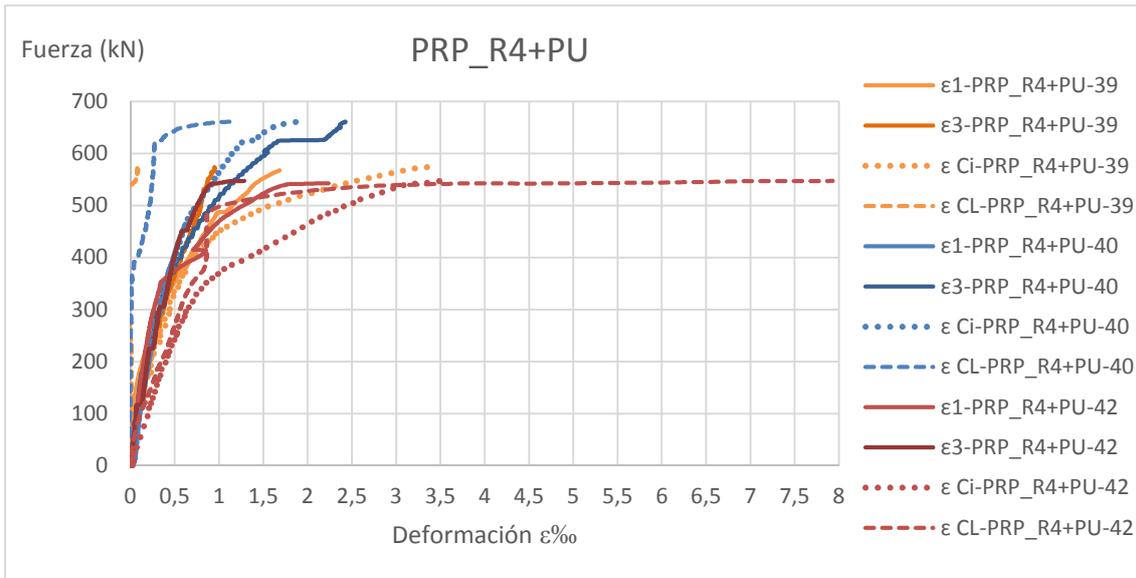


Figura 219. Gráfica fuerza-deformación medias de los pilares PRP_R4+PU.

En la figura 220 se puede observar cómo la reparación prácticamente restituye la simetría del comportamiento del conjunto del elemento estructural, con una muy leve diferencia entre las dos caras, y esto debido a las distintas propiedades mecánicas existentes en los dos materiales (hormigón y mortero de reparación).

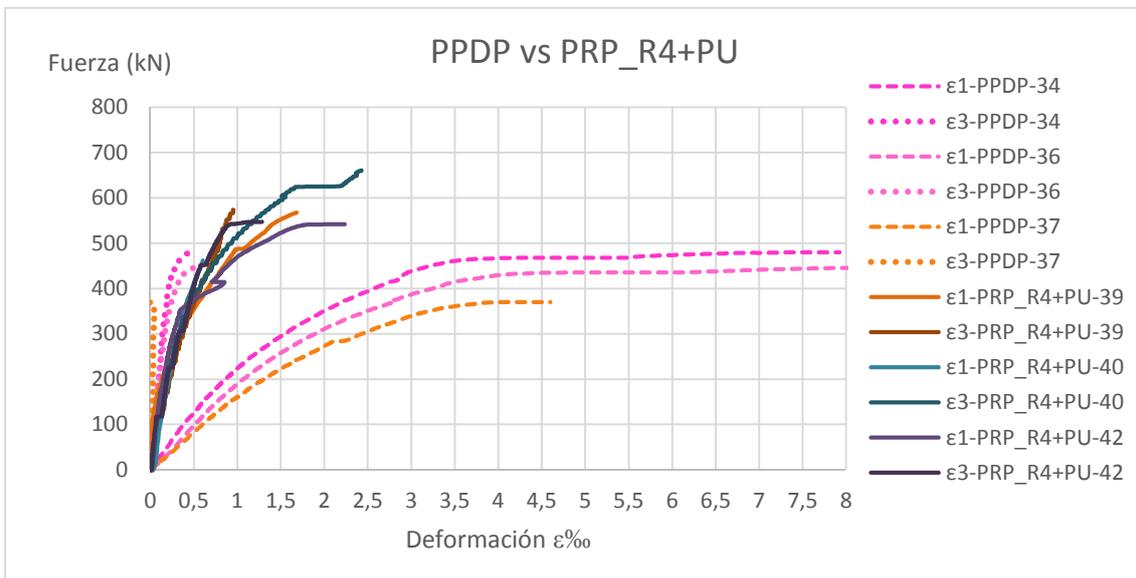


Figura 220. Gráfica fuerza-deformación medias de los pilares PPDP-PRP_R4+PU.

La resistencia media obtenida en los pilares reparados es del 96% de la resistencia original.

La capacidad portante mejorada media del elemento reparado es del 138% respecto a la resistencia última del pilar dañado.

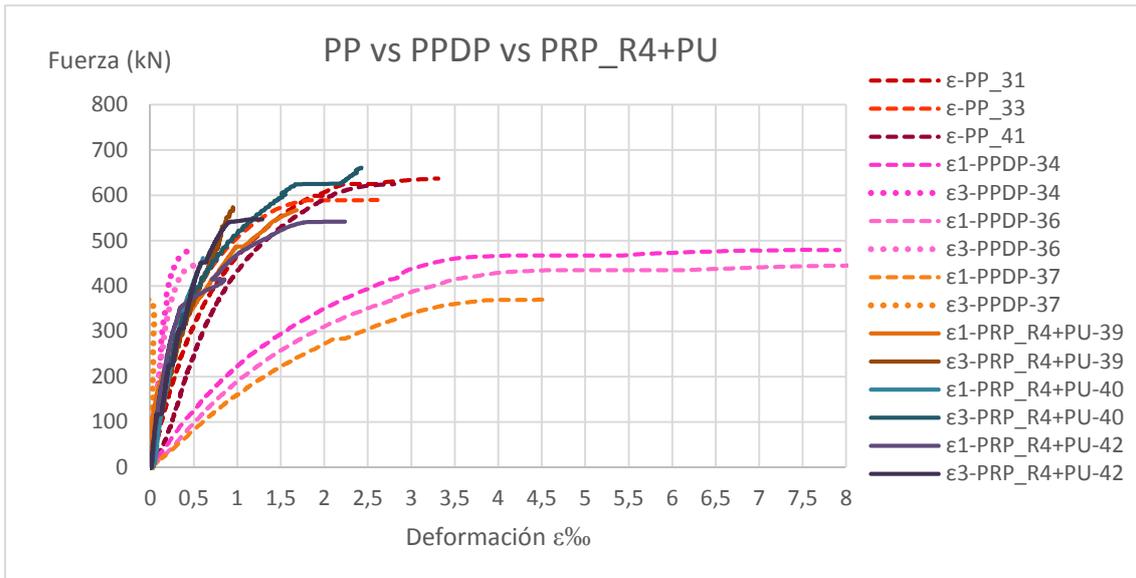


Figura 221. Gráfica fuerza-deformación medias de los pilares PP-PPDP-PRP_R4+PU.

Pilares Reparados Parcheo, mortero de reparación Clase R4 sin Puente de unión, PRP_R4. Como se pudo observar en las figuras 171 y 172, el fallo de la reparación se produce por el desprendimiento de la capa de reparación, al perderse la simetría de la sección en el momento de la rotura de la capa de reparación, y esto a su vez provoca una fisuración creada por un pico de tensión en las esquinas superiores exteriores.

En esta subfamilia de pilares se colocaron dos captadores de desplazamiento adicionales; uno en una de las caras laterales, de manera que se pueda estudiar con más detalle la influencia de la reparación al conjunto del elemento estructural, y el otro en la Cara C1 en la interfase hormigón-mortero.

En la figura 222 se observa cómo, alrededor del 75% del valor de la carga máxima se observa un cambio en la pendiente de la curva de la cara reparada, aparentemente causado por el fallo de la adherencia de la reparación. Este cambio en la pendiente se observa también en la curva registrada por el captador CL. Alrededor del 95% del valor de la carga máxima se produce la pequeña flexión en la Cara C3. La interfase hormigón-mortero de la Cara C1 (deformaciones ϵ_{Ci}) muestra un comportamiento parejo al del mortero (deformaciones ϵ_1), como se puede observar en la figura 222.

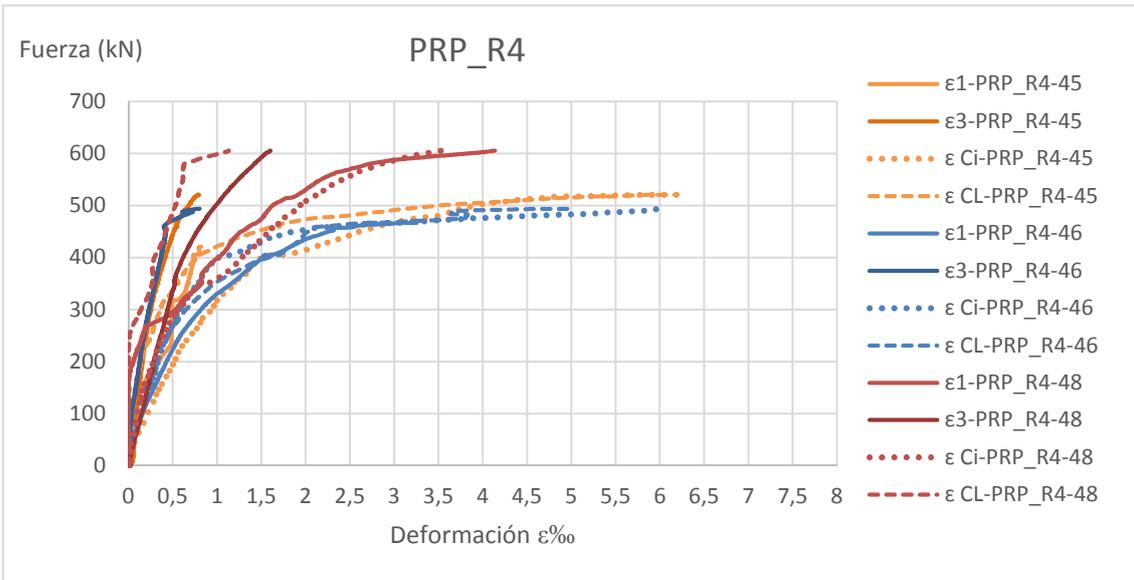


Figura 222. Gráfica fuerza-deformación medias de los pilares PRP_R4.

Apoyándonos en la siguiente figura, se puede observar cómo la reparación contribuye a equilibrar el comportamiento del conjunto del elemento estructural, aunque con una diferencia entre las dos caras, y esto debido a las distintas propiedades mecánicas existentes en los dos materiales (hormigón y mortero de reparación).

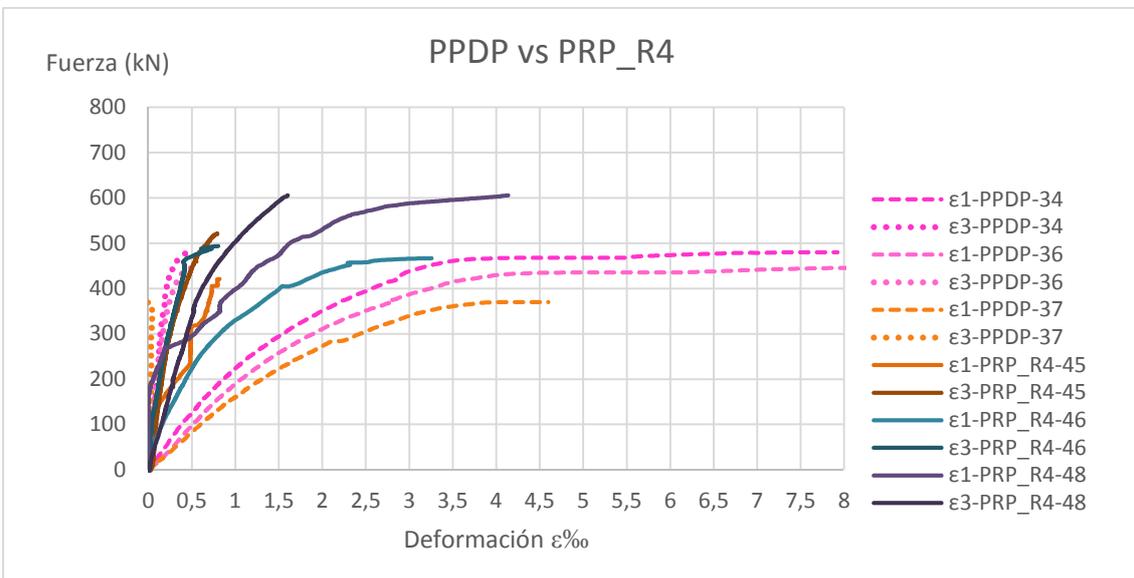


Figura 223. Gráfica fuerza-deformación medias de los pilares PPDP-PRP_R4.

La resistencia media obtenida en los pilares reparados es del 88% de la resistencia original.

La capacidad portante mejorada media del elemento reparado es del 125% respecto a la resistencia última del pilar dañado.

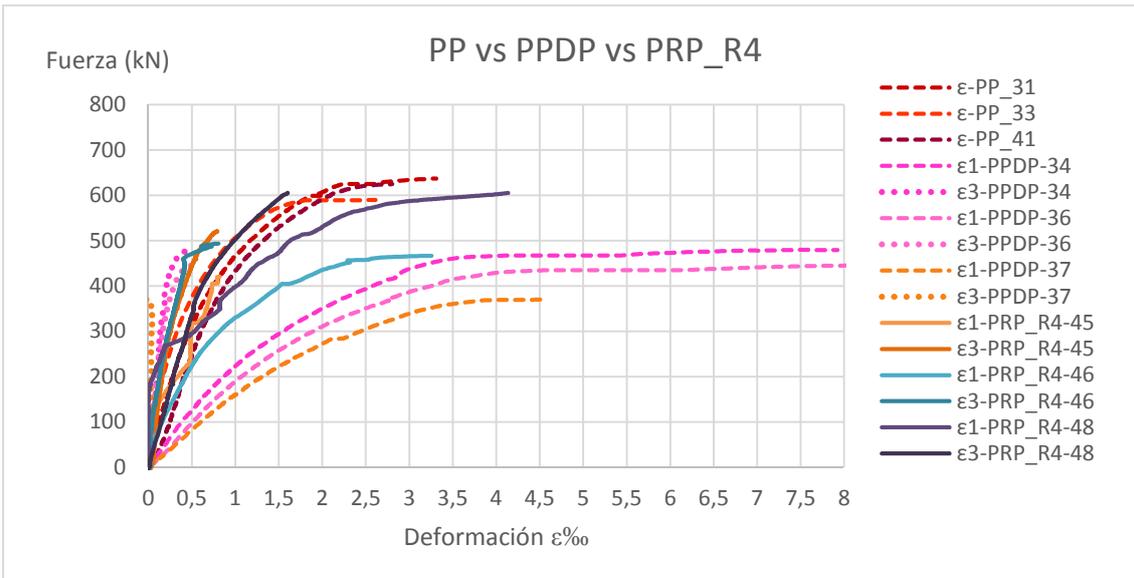


Figura 224. Gráfica fuerza-deformación medias de los pilares PP-PPDP-PRP_R4.

En la siguiente figura, se realiza una comparativa de las subfamilias de los pilares reparados parcheo con mortero Clase R4, con la variable del puente de unión. La resistencia última a esfuerzo axial es un 9% superior en el caso en que se usa puente de unión.

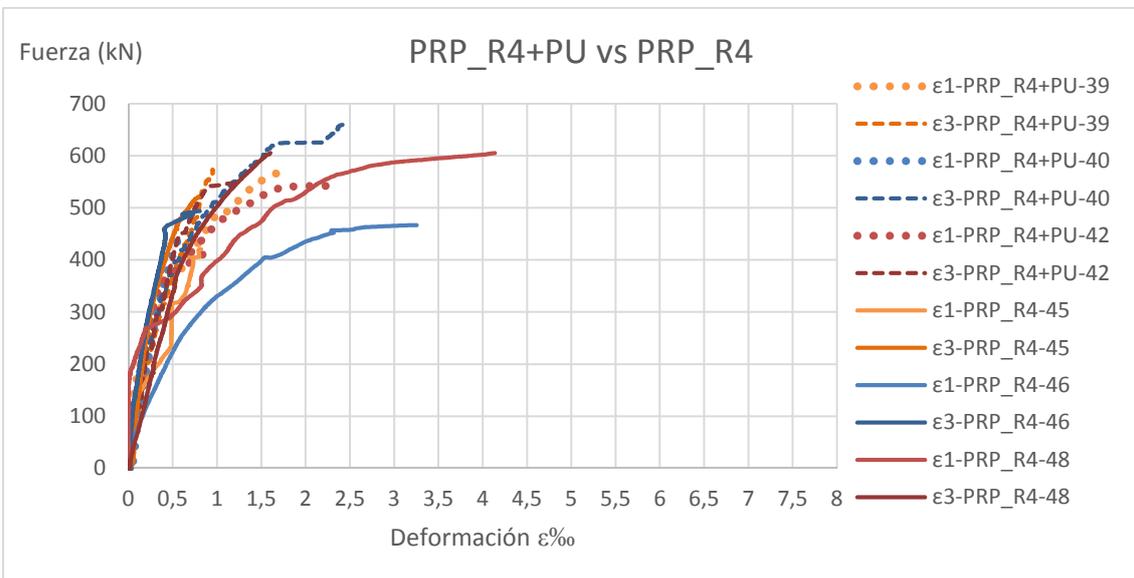


Figura 225. Gráfica fuerza-deformación medias de los pilares PRP_R4+PU-PRP_R4.

Para finalizar la comparativa de esta familia de pilares, es interesante observar la figura 226, que recoge el conjunto de gráficas fuerza-deformación para todos los casos de Pilares Reparados por Parcheo.

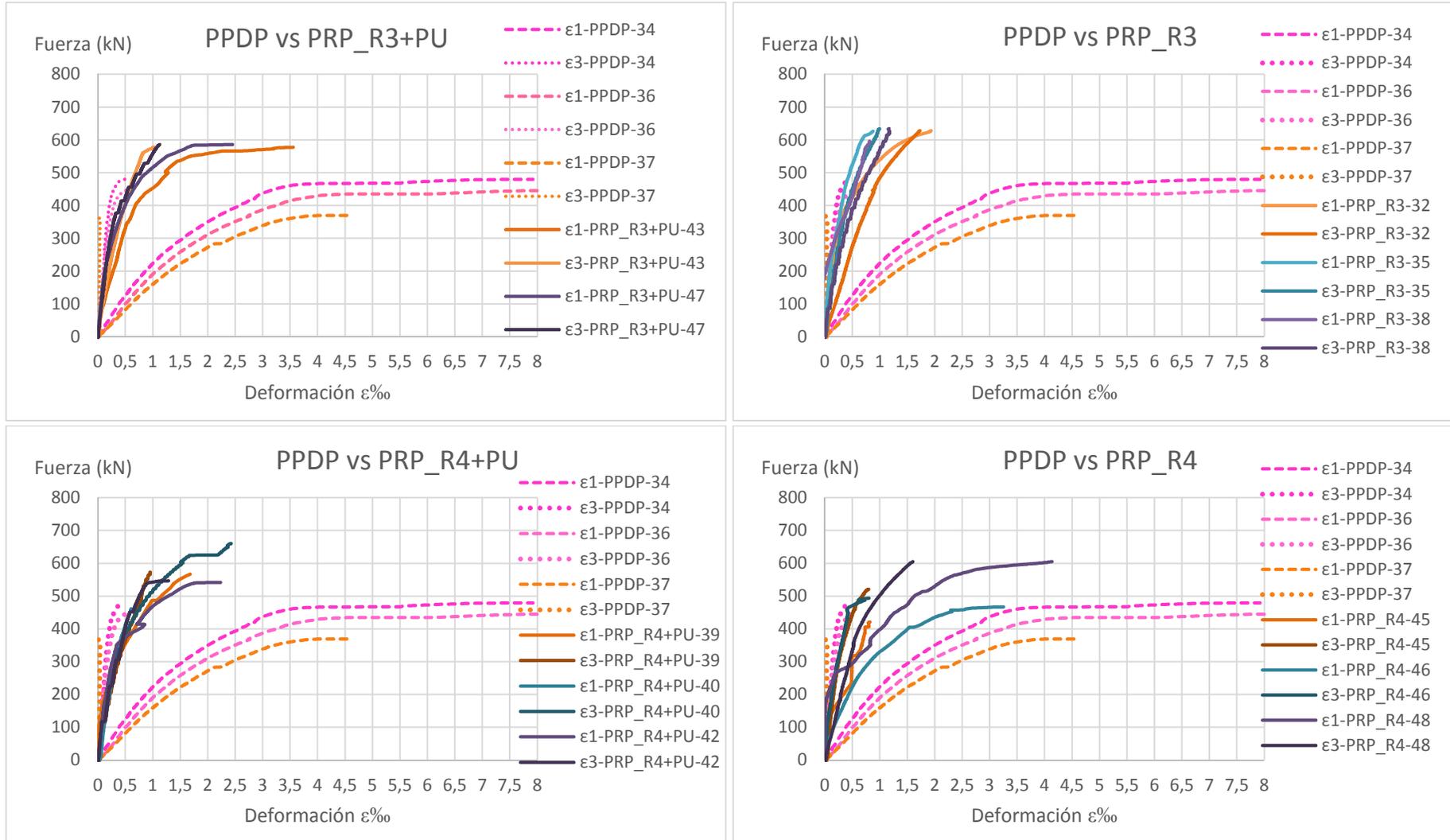


Figura 226. Gráfica fuerza-deformación pilares PRP.

Se podría concluir que este grado de reparación restituye la práctica totalidad de la resistencia última a axil original del pilar, a excepción de los pilares reparados con mortero Clase R4 sin puente de unión.

La tabla 12 resume los porcentajes de recuperación de la capacidad portante de los pilares tras la reparación por parcheo en una cara.

Tipo de Pilar	$N_{u,media}$ (kN)	% Eficiencia respecto a la capacidad portante original ($N_{ui} / N_{uref.PP}$)
PP	617,51	
PRP	R3 + PU	94,23
	R3 sin PU	102,37
	R4 + PU	96,21
	R4 sin PU	87,48

Tabla 12. Esquema eficiencia de la reparación para los pilares reparados parcheo, PRP.

A la vista de los resultados puede concluirse que el empleo de un mortero Clase R3 prácticamente restituye en este caso la resistencia última a axil original del pilar, independientemente de si se emplea o no puente de unión. Con este mortero, el hecho de que la resistencia obtenida en los ensayos sea un 9% superior en el caso de que no se emplee puente de unión puede deberse más a la propia variabilidad de los ensayos que a que proporcione una mejora significativa.

Si se emplea un mortero Clase R4, la conveniencia de emplear un puente de unión parece incuestionable. Con él el pilar también recupera la práctica totalidad de su resistencia última a axil.

5.3. Conclusiones del análisis de los resultados

En este apartado se exponen las conclusiones básicas del análisis de los resultados para cada grado de reparación.

En la tabla 13 se muestra los valores de la eficiencia de la reparación y la capacidad portante mejorada media del elemento reparado con respecto a la resistencia última del pilar dañado.

Tipo de Pilar	$N_{u,media}$ (kN)	% Eficiencia respecto al PP ($N_{ui} / N_{uref.PP}$)	% Mejora de la capacidad respecto al PPD ($N_{ui} / N_{uref.PD}$)
PP	617,51		
PPD4C	282,84		
PR4C	R3 + PU	509,97	82,58
	R3 sin PU	520,37	84,27
	R4 + PU	438,00	70,93
	R4 sin PU	391,94	63,47
PPD1C	397,17		
PR1C	R3 + PU	598,78	96,97
	R3 sin PU	580,72	94,04
	R4 + PU	406,71	65,86
	R4 sin PU	403,76	65,38
PPDP	432,19		
PRP	R3 + PU	581,88	94,23
	R3 sin PU	632,14	102,37
	R4 + PU	594,09	96,21
	R4 sin PU	540,22	87,48

Tabla 13 - Valores de la eficacia de la reparación para los tres grados de reparación.

- Para los pilares reparados a cuatro caras (PR4C), la reparación recupera la rigidez original del pilar, manteniendo un comportamiento más lineal y mostrando un comportamiento menos dúctil.
La eficiencia de la reparación para los pilares reparados con mortero Clase R3 está por encima del 83%. Para los pilares reparados con mortero Clase R4 está por debajo del 71%.
Los pilares reparados con mortero Clase R3 presentan mejor comportamiento, alcanzan mayores deformaciones en rotura y con una eficiencia mayor que los pilares reparados con mortero Clase R4. Para el caso donde se usa el puente de unión, el axil último de los pilares reparados con el mortero Clase R3 es del orden del 25% superior al de los reparados con mortero Clase R4. Para los casos en los que no se usa el puente de unión, la mejora es del 45%.
- Para los pilares reparados a una cara (PR1C), la reparación contribuye a equilibrar el comportamiento del conjunto del elemento estructural, aunque se mantiene la diferencia entre las dos caras, la cara que experimenta menor deformación es la cara reparada (C3), sufriendo la intacta (C1) mayor deformación. Este hecho resulta lógico dada la rigidez del mortero de reparación.

La eficiencia de la reparación para los pilares reparados con mortero Clase R3 está por encima del 94%. Para los pilares reparados con mortero Clase R4 está por debajo del 66%.

Los pilares reparados con mortero Clase R3 aportan los mejores resultados, con respecto al patrón original (PP), que prácticamente se podría concluir que restablecen la capacidad portante del elemento estructural. Mientras que los pilares reparados con el mortero Clase R4 se quedan bastante lejos de esa mejoría.

Por otro lado, se puede concluir que no hay ninguna diferencia de mejoría en la utilización del puente de unión.

- Para los pilares reparados por parcheo (PRP), la reparación contribuye a restablecer prácticamente la simetría del comportamiento de la sección, con una muy pequeña diferencia entre las dos caras, y esto debido a las distintas propiedades mecánicas existentes en los dos materiales (hormigón y mortero de reparación). Este grado de reparación restituye la práctica totalidad de la resistencia última a axil original del pilar, a excepción de los pilares reparados con mortero Clase R4 sin puente de unión.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

El presente documento contiene los resultados de una investigación experimental sobre la efectividad de distintos tipos de reparación de pilares de hormigón armado sometidos a compresión centrada. En esta investigación se ha estudiado los tipos de reparación más frecuentes empleados en la práctica, evaluando la influencia de las principales variables que intervienen en la reparación en el comportamiento final del pilar reparado. Los capítulos anteriores desarrollan el plan de investigación que se ha llevado a cabo y presentan y analizan sus resultados más relevantes.

El presente capítulo resume las conclusiones principales de la investigación y propone una serie de futuras líneas de investigación que permitan avanzar en el tema de estudio.

6.1. Conclusiones

El objetivo general planteado en esta investigación era el estudio de la efectividad de la reparación en función de unas variables y prestando especial atención, a las técnicas o modos de reparación; reparación integral a cuatro caras, reparación integral a una cara y reparación por parcheo.

La investigación ha consistido en una serie de 48 pilares ensayados a compresión centrada, con una sección de 20x20 cm y un hormigón HA9'5 y HA9, con tres grados de daño y reparación, con pilares patrón originales y dañados, y que han sido reparados con morteros predosificados Clase R3 y R4, con o sin puente de unión.

Para cumplir el objetivo general, se marcaron una serie de objetivos específicos. De cuyo grado de consecución se da cuenta a continuación.

- a. Se ha realizado una exhaustiva revisión bibliográfica sobre la reparación de elementos sometidos a compresión centrada, abarcando temas de reparación en general, como son la adherencia, los distintos materiales que existen en el mercado (propiedades y características, requerimientos, compatibilidad, etc.), durabilidad; hasta lo más específico de esta investigación, las distintas técnicas o modos de reparación. Para ello se han consultado artículos técnicos, tesis doctorales y normativas. Tras esta revisión se ha reflejado las escasas y casi inexistentes referencias de estudios e investigaciones sobre el grado de contribución que aportan las reparaciones al elemento estructural, para cada grado de reparación.
- b. El diseño del ensayo experimental ha reproducido adecuadamente el comportamiento de los soportes de hormigón armado reparados mediante morteros predosificados con las distintas técnicas o modos de reparación.
Se han desarrollado ensayos experimentales sobre 48 pilares patrón a escala reducida, representando todas las variables planteadas en este trabajo de investigación, pudiendo así estudiarlas en detalle (mortero Clase R3 con puente de unión; mortero Clase R3 sin puente de unión; mortero Clase R4 con puente de unión; mortero Clase R4 sin puente de unión; y cada una de estas variables aplicadas en cada grado de reparación).

- c. Se han representado los resultados obtenidos detalladamente, mediante fotografías para poder analizar el patrón de fisuración de los especímenes ensayados, y por medio de gráficas analizando el comportamiento de cada variable.
- d. Tras la exposición de los resultados se realizó el análisis pormenorizado obteniendo las siguientes conclusiones:
- i. En los pilares reparados por parcheo (daño local en una cara) es donde se ha obtenido de forma más efectiva la recuperación de la resistencia última a axil original.
De acuerdo a las distintas variables que participan en el estudio, conviene ir detallándolas por separado para definir claramente el grado de contribución. Como conclusión fundamental se obtiene que la Reparación por Parcheo utilizando el mortero Clase R3 sin puente de unión recupera totalmente la capacidad portante del elemento estructural.
Los pilares reparados por parcheo con mortero Clase R3 con puente de unión y los reparados con mortero Clase R4 con puente de unión, restituyen prácticamente la capacidad portante original, con unos porcentajes de eficiencia del 94 y 96 respectivamente, con respecto a la resistencia original.
Los pilares reparados a una cara con mortero Clase R3, con o sin puente de unión, restituyen prácticamente la capacidad portante original, con unos porcentajes de eficiencia con respecto a la resistencia original del 97 y 94 respectivamente.
La Reparación Integral a 4 Caras no restituye la capacidad portante original.
 - ii. Los resultados no muestran grandes diferencias entre la utilización o no del puente de unión, y la diferencia que en algunos casos se evidencia mejoría, corresponde a la no utilización del puente de unión. Por consiguiente, se concluye que la utilización del puente de unión no aporta mejorías significantes para establecer su uso.
 - iii. Otra conclusión principal que se da en este estudio es la necesidad de la compatibilidad entre un hormigón y el mortero de reparación, requisito fundamental para la efectividad de la reparación. Según autores como Emberson y Mays (1990), Morgan (1995), Hassan (2000), etc., el requerimiento mínimo que se debe cumplir, es que el módulo de elasticidad del hormigón sea similar al material de reparación, y la resistencia a compresión del material de reparación sea igual o superior al del hormigón. Y aquella la confiere el mortero Clase R3, debido a que presenta un módulo de elasticidad y una resistencia a compresión más similares tanto a hormigones pobres de los años 60 y 70 e incluso anteriores (HA-15), como a hormigones actuales (HA-25). Esto se cumple para las tres técnicas o modos de reparación expuestas.
Por lo tanto, de acuerdo a la compatibilidad entre los materiales, como se ha dicho, el mortero Clase R3 presenta un comportamiento excelente en el conjunto del elemento estructural, confiriendo un grado de contribución muy alto. En el caso de la Reparación por Parcheo y Reparación Integral a 1 Cara este porcentaje se sitúa en el 94 y 97%, incluso sin puente de unión, llegando al 102%.

En la Reparación Integral a 4 Caras del 82 y 84%. Quedando bastante por debajo la efectividad cuando se utiliza el mortero de Clase R4.

- iv. La Reparación Integral a 4 Caras, presentan unos resultados menores de los que cabría esperar si se considerara el confinamiento de la sección original. Aparentemente, el modo de aplicación del mortero sobre la superficie tiene una importancia relevante. En la presente investigación, el mortero se aplicó manualmente mediante encofrado a dos caras. Esto provocó la formación de juntas frías entre las dos primeras caras reparadas y las dos últimas, es decir, entre las caras adyacentes ortogonales, que ocasiona el fallo de la reparación.

6.2. Futuras líneas de investigación

Con los resultados obtenidos a lo largo de este trabajo de investigación se han alcanzado unos amplios conocimientos sobre la reparación de pilares de hormigón armado y sus distintos grados, que pueden servir de base para elaborar una guía de diseño donde se aporten recomendaciones y técnicas, que sirva de ayuda a los técnicos proyectistas de las reparaciones como a las empresas constructoras encargadas de la reparación.

Como futuras líneas maestras de investigación que sería interesante desarrollar, dando así continuidad a esta tesis doctoral, se exponen a continuación:

- Realización de los ensayos con pilares a escala real.
- Estudio del comportamiento de la adherencia con distintas clases de puente de unión (base cementosa y base epoxi).
- Para el caso de la Reparación Integral a 4 Caras, estudiar distintos modos de ejecutar la reparación, bien mediante vertido y en una sola vez o por proyección, de manera que se eviten la formación de las juntas frías entre caras ortogonales adyacentes.
- Para el caso de la Reparación por Parcheo, localizar ésta en diferentes posiciones del pilar, es decir, centrada en el vano, en la parte superior del pilar, en la parte inferior del pilar y realización de varios parcheos en la misma cara del pilar, y también varios parcheos en distintas caras y posiciones.
- Estudiar el comportamiento de los distintos grados de reparación en distintas secciones de pilares (sección cuadrada, rectangular y circular).
- Estudiar los tres grados de reparación sobre otros hormigones de distintas características.
- Estudiar la influencia de la reparación bajo el estado de carga o estado no cargado. Para fijar la necesidad o no de descargar la estructura a la hora de realizar la reparación del elemento estructural.

CAPÍTULO 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

En este último capítulo se enumeran todas las referencias bibliográficas citadas en el texto y que han sido consultadas para la realización de este trabajo de investigación.

Abdessemed, M.; Kenai, S.; Bali, A.; Kibboua, A. (2011) "Dynamic analysis of a bridge repaired by CFRP: Experimental and numerical modelling", *Construction and Building Materials*, Vol.25(3), pp. 1270-1276.

Agarwal, P.; Gupta, A.; Angadi, R. (2014)"Effect of FRP wrapping on axial behavior of concrete and cyclic behavior of external RC beam column joints", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.18(2), pp. 566-573.

Aggarwal, L. K.; Thapliyal, P. C.; Karade, S. R. (2007) "Properties of polymer-modified mortars using epoxy and acrylic emulsions", *Construction and Building Materials*, Vol.21(2), pp. 379-383.

Ahmed, S. F. U. (2011) "Mechanical and durability properties of mortars modified with combined polymer and supplementary cementitious materials", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Sept, Vol.23(9), pp. 1311(9).

Aire Untiveros, C. (2002) "Estudio experimental del comportamiento del hormigón confinado sometido a compresión", Universidad Politécnica de Cataluña (Tesis Doctoral).

Alberto, A.; Antonaci, P.; Valente, S. (2011) "Damage analysis of brick-to-mortar interfaces", *Procedia Engineering*, Vol.10, pp. 1151-1156.

Alexander, M. G.; Beushausen, Hans-Dieter; Dehn, Frank; Moyo, P. (2009) "Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II", Taylor and Francis Group, London (CRC Press/Balkema).

Al-Salloum, Y. A.; Almusallam, T. H.; Alsayed, S. H.; Siddiqui, N. A. (2011) "Seismic Behavior of As-Built, ACI-Complying, and CFRP-Repaired Exterior RC Beam-Column Joints", *Journal of Composites for Construction*, Vol.15(4), pp. 522-534.

Alsayed, S. H.; Almusallam, T. H.; Al-Salloum, Y. A.; Siddiqui, N. A. (2010) "Seismic Rehabilitation of Corner RC Beam-Column Joints Using CFRP Composites", *Journal of Composites for Construction*, Vol.14(6), pp 681-692.

American Concrete Institute ACI 201.2R-01 "Guía para la Durabilidad del Hormigón" (2.001).

American Concrete Institute ACI 546R-04 "Concrete Repair Guide" (2.004).

Arizzi, A.; Cultrone, G. (2014) "The water transfer properties and drying shrinkage of aerial lime-based mortars: an assessment of their quality as repair rendering materials", *Environmental Earth Sciences*, Vol.71(4), pp. 1699(12).

Aurrekoetxea Aurrekoetxea, J. R. (2009) "Reparación de pilares con daños parciales localizados", Universidad de Burgos (Tesis Doctoral).

Baldwin, N.J.R; King, E.S. (2003) "Field studies of the effectiveness of concrete repairs. Phase 1 Report: Desk study and literature review", HSE (Health and Safety Executive Book).

Bett, B. J.; Klingner, R. E.; Jirsa, J. O. (1988) "Lateral load response of strengthened and repaired reinforced concrete columns", ACI Structural journal, Vol.85(5), pp. 499-508.

Bianco, N.; Calia, A.; Denotarpietro, G.; Negro, P. (2013) "Laboratory Assessment of the Performance of New Hydraulic Mortars for Restoration", Procedia Chemistry, Vol.8, pp. 20-27.

Bocca, P.; Grazzini, A. (2013) "Mechanical properties and freeze-thaw durability of strengthening mortars" Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.25(2), pp. 274-280.

Broto i Comerma, C. (2005) "Enciclopedia Broto de Patologías de la Construcción".

Cabrera, J.G.; Al-Hasan, A.S. (1997) "Performance properties of concrete repair materials", Construction and Building Materials, Vol. 11(5), pp. 283-290.

Calmon, J. L.; Sauer, A. S.; Vieira, G. L.; Teixeira, J. E. S. L. (2014) "Effects of windshield waste glass on the properties of structural repair mortars", Cement and Concrete Composites, Vol.53, pp. 88(9).

Canisius, T. D. G.; Waleed, N. (2004) "Concrete patch repairs under propped and unpropped implementation", Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings, Vol.157(2), pp. 149-156.

CEOE (Confederación española de organizaciones empresariales), (2014) "La rehabilitación de edificios como motor de crecimiento y empleo", Comisión de Infraestructuras y Urbanismo.

COMITÉ EURO-INTERNACIONAL DEL HORMIGÓN (C.E.B.), (1983) "Assesment of Concrete Structures and Design". Procedures for Upgrading (Redesign). Boletín C.E.B. n1 167, pp. 288.

Contamine, R.; Si Larbi, A.; Hamelin, P. (2013) "Identifying the contributing mechanisms of textile reinforced concrete (TRC) in the case of shear repairing damaged and reinforced concrete beams", Engineering Structures, Vol.46, pp. 447(12).

Courard, L. (2000) "Parametric study for the creation of the interface between concrete and repair products", Materials and Structures, Vol.33(1), pp. 65-72.

Courard, L.; Garbacz, A.; Piotrowski, T.; Sustercic, J. (2013) "Surface properties of concrete and criteria for adhesion of repair systems", Proceedings of the 1st Symposium on Polymers in Concrete, pp. 69-82.

da Porto, F.; Stievanin, E.; Pellegrino, C. (2012) "Efficiency of RC square columns repaired with polymer-modified cementitious mortars", *Cement and Concrete Composites*, Vol.34(4), pp. 545-555.

Dante Espeche, A. (2007) "Refuerzo de pilares con encamisado de hormigón solicitados a axil centrado", *Trabajo de Investigación*, Universidad Politécnica de Madrid.

Dawood, E. T.; Ramli, M. (2011) "High strength characteristics of cement mortar reinforced with hybrid fibres", *Construction and Building Materials*, 2011, Vol.25(5), pp. 2240-2247.

Dawood, E. T.; Ramli, M. (2014) "The effect of using high strength flowable system as repair material", *Composites Part B*, Vol.57, pp. 91-95.

ElSouri, A. M.; Harajli, M. H. (2011) "Seismic Repair and Strengthening of Lap Splices in RC Columns: Carbon Fiber-Reinforced Polymer versus Steel Confinement", *Journal of Composites for Construction*, Vol.15(5), pp. 721-731.

Emberson, N. K.; Mays, G. C. (1990) "Design of patch repairs: Measurements of physical and mechanical properties of repair systems for satisfactory structural performance", *Proceedings of the international conference on protection of concrete*, University of Dundee, Scotland, September 11-13.

Emberson, N. K.; Mays, G. C. (1990) "Significance of property mismatch in the patch repair of structural concrete. Part 1: properties of repair systems", *Magazine of Concrete Research*, Vol.42(152), pp. 147-160.

Emberson, N. K.; Mays, G. C. (1990) "Significance of property mismatch in the patch repair of structural concrete. Part 2: Axially loaded reinforced concrete members", *Magazine of Concrete Research* Vol.42(152), pp. 161-170.

Emmons, P. H.; Vaysburd, A. M.; McDonald, J. E. (1993) "A rational approach to Durable Concrete Repairs", *Concrete International*, Volumen 15, pp. 40-45.

Emmons, P. H.; Vaysburd, M. (1995) "Performance criteria for concrete repair materials, Phase 1", *Technical report REMR-CS-47*, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station.

Emmons, P. H.; Vaysburd, M. (1995) "The total system concept - necessary for improving the performance of repaired structures", *American Concrete Institute*, Vol.17(3), pp. 31-36.

Emmons, P. H.; Vaysburd, M. (1996) "System concept in design and construction of durable concrete repairs", *Construction and Building Materials*, Vol. 10(1), pp. 69-75.

Eric Andrew Miller, B. S. (2006) "Experimental research of reinforced concrete column retrofit methods", *The Ohio State University* (Thesis).

Ersoy, U.; Tankut, A. T.; Suleiman, R. (1993) "Behaviour of jacketed columns", *ACI Structural Journal*, Vol.90(3), pp. 288-293.

Espeche, A. D.; León, J. (2011) "Estimation of bond strength envelopes for old-to-new concrete interfaces based on a cylinder splitting test", *Construction and Building Materials*, Vol.25(3), pp. 1222-1235.

Final Report. Corrosion research, Evaluation of residual strength and load transfer in concrete compression members repaired by patching", Research Institute, King Fahd University of Petroleum and Minerals, Dhahran, Saudi Arabia, 2003.

Fukuyama, K.; Higashibata, Y.; Miyauchi, Y. (2000) "Studies on repair and strengthening methods of damaged reinforced concrete columns", *Cement and Concrete Composites*, Vol.22(1), pp. 81-88.

Garbacz, A.; Courard, L; Kostana, K. (2005) "Characterization of concrete surface roughness and its relation to adhesion in repair systems" *Materials Characterization*, Vol.56(4), pp. 281-289.

Garzón-Roca, J.; Adam, J. M.; Calderón, P. A. (2011) "Behaviour of RC columns strengthened by steel caging under combined bending and axial loads", *Construction and Building Materials*, Vol.25(5), pp. 2402-2412.

GEHO-CEB (Grupo Español del Hormigón), (1994) "Reparación y Refuerzo de Estructuras de Hormigón - Guía FIP de buena práctica".

Gilbert Gedeon, P.E. (1995) "Evaluation and Design of Concrete Repairs", CED Engineering.

Giménez Carbó, E. (2007) "Estudio experimental y numérico de soportes de hormigón armado reforzados con perfiles metálicos sometidos a esfuerzos de compresión simple, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia.

Gopinath, S.; Iyer, N. R.; Gettu, R.; Palani, G. S.; Murthy, A. R. (2011) "A Confinement Effect of Glass Fabrics Bonded with Cementitious and Organic Binders", *Procedia Engineering*, Vol.14, pp. 535-542.

Göran Fagerlund (2004) "Strategy for maintenance and rehabilitation in concrete structures - Evaluation of alternative repair and upgrading options", REHABCON Final Report.

Gulec, C. K.; Whittaker, A. S.; Hooper, J. D. (2010) "Fragility functions for low aspect ratio reinforced concrete walls", *Engineering Structures*, Vol.32(9), pp. 2894-2901.

Haach, V. G.; Cresce El Debs, A.; Debs, M. (2014) "Influence of high column axial loads in exterior R/C beam-column joints", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.18(2), pp 558-565.

Hadi, M. N. S. (2011) "Rehabilitating destructed reinforced concrete t connections by steel straps", *Construction and Building Materials*, Vol.25(2), pp. 851-858.

Hadi, M. N. S.; Tran, T. M. (2014) "Retrofitting nonseismically detailed exterior beam-column joints using concrete covers together with CFRP jacket", *Construction and Building Materials*, Vol.63, pp. 161-173.

Han, K. B.; Hong, S. N.; Park, S. K. (2012) "RC slabs repaired and strengthened by alumina/ polymer mortar and prestressing strands in the tension zone: experimental investigation under static and fatigue loadings", *Mechanics of Composite Materials*, Vol.48(5), pp. 587-602.

HANDBOOK on Repair and Rehabilitation of RCC Buildings, (2002) published by Director General (Works), Central Public Works Department, Government of India, Nirman Bhawan.

Hans-Dieter B.; Mark Gavin A. (2007) "Performance of concrete patch repair systems", *Advances in Construction Materials*, pp. 255-262.

Hassan, K. E.; Brooks, J. J.; Al-Alawi, L. (2001) "Compatibility of repair mortars with concrete in a hot-dry environment", *Cement and Concrete Research*, Vol.23(1), pp. 93-101.

Hawa, A.; Tonnayopas, D.; Prachasaree, W.; Taneerananon, P. (2013) "Development and Performance Evaluation of Very High Early Strength Geopolymer for Rapid Road Repair", *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol.2013, pp. 1-9.

He, R.; Grelle, S.; Sneed, L. H.; Belarbi, A. (2013) "Rapid repair of a severely damaged RC column having fractured bars using externally bonded CFRP", *Composite Structures*, Vol.101, pp. 225(18).

He, R.; Sneed, L.; Belarbi, A. (2013) "Rapid Repair of Severely Damaged RC Columns with Different Damage Conditions: An Experimental Study", *International Journal of Concrete Structures and Materials*, Vol.7(1), pp. 35-50.

Helene, P.; Pereira, F. (2003) "Manual de Rehabilitación de Estructuras de Hormigón - Reparación, Refuerzo y Protección", CYTED.

Hong, S.; Park, Sun - Kyu (2013) "Behavior of concrete columns repaired with polymer mortar and epoxy fiber panel", *Advances in Materials Science and Engineering*.

Hu, J.; Koleva, D. A.; Petrov, P.; van Breugel, K. (2012) "Polymeric vesicles for corrosion control in reinforced mortar: Electrochemical behavior, steel surface analysis and bulk matrix properties", *Corrosion Science*, Vol.65, pp. 414(17).

Hwang, Soo-Duck; Khayat, K. H.; Morin, R. (2011) "Specifications and testing of self-consolidating mortar designated for annular space grouting", *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol.38(4), pp. 422-432.

Igea Romera, J.; Martínez-Ramírez, S.; Lapuente, P.; Blanco-Varela, M. (2013) "Assessment of the physico-mechanical behaviour of gypsum-lime repair mortars as a function of curing time", *Environmental Earth Sciences*, Vol.70(4), pp. 1605-1618.

Ilki, A; Bedirhanoglu, I; Kumbasar, N. (2011) "Behavior of FRP-Retrofitted Joints Built with Plain Bars and Low-Strength Concrete", *Journal of Composites for Construction*, Vol.15(3), pp. 312-326.

Isebaert, A.; Van Parys, L.; Cnudde, V. (2014) "Composition and compatibility requirements of mineral repair mortars for stone - A review", *Construction and Building Materials*, Vol.59, pp. 39(12).

Izaguirre, A.; Lanas, J.; Alvarez, J.I. (2011) "Effect of a polypropylene fibre on the behaviour of aerial lime-based mortars", *Construction and Building Materials*, Vol.25(2), pp. 992-1000.

Jeon, Se Hun; Song, Myong Shin; Kang, Hyun Ju; Song, Young Jin (2011) "The Properties of Repair Cement Mortar with Insulation Performance under the Composite Deterioration Conditions", *Advanced Materials Research*, Vol.261-263, pp. 98-103.

Jorge, S.; Dias - Da - Costa, D.; Julio, E. N. B. S. (2012) "Influence of anti-corrosive coatings on the bond of steel rebars to repair mortars", *Engineering Structures*, Vol.36, pp. 372(7).

Júlio, Eduardo N. B. S.; Branco, Fernando A. B.; Silva, Vítor D. (2005) "Concrete to concrete bond strength: influence of an epoxy-based bonding agent on a roughened substrate surface", *Magazine of Concrete Research*, Vol.57(8), pp. 463-468.

Júlio, Eduardo N. B. S.; Branco, Fernando A. B.; Silva, Vítor D. (2003) "Structural rehabilitation of columns with reinforced concrete jacketing", *Progress in Structural Engineering and Materials*, Vol.5, pp. 29-37.

Júlio, Eduardo N. B. S.; Branco, Fernando A. B.; Silva, Vítor D. (2004) "Concrete to concrete bond strength. Influence of the roughness of the substrate surface", *Construction and Building Materials*, Vol.18(9), pp. 675-681.

Júlio, Eduardo N. B. S.; Branco, Fernando A. B.; Silva, Vítor D.; Lourenço, Jorge F. (2006) "Influence of added concrete compressive strength on adhesion to an existing concrete substrate", *Building and Environment*, Vol.41(12), pp. 1934-1939.

Kakaletsis, D (2011) "Comparison of CFRP and Alternative Seismic Retrofitting Techniques for Bare and Infilled RC Frames", *Journal of Composites for Construction*, Vol.15(4), pp. 565-577.

Kalagri, A.; Karatasios, I.; Kilikoglou, V. (2014) "The effect of aggregate size and type of binder on microstructure and mechanical properties of NHL mortars", *Construction and Building Materials*, Vol.53, pp. 467-474.

Kamada, T.; Li, Victor C. (200) "The effects of surface preparation on the fracture behavior of ECC/concrete repair system", *Cement and Concrete Composites*, Vol.22(6), pp. 423-431.

Kim, S. H.; Choi, J. H. (2010) "Repair of Earthquake Damaged RC Columns with Stainless Steel Wire Mesh Composite", *Advances in Structural Engineering*, Vol.13(2), pp. 393-402.

Klaiber, F.W.; Wipf, T.J.; Kash, E.J. (2004) "Effective Structural Concrete Repair, Volume 2 of 3" Iowa State University of science and technology, Department of Civil, Construction and Environmental Engineering, Iowa DOT Project TR - 428.

Korat, L.; Mirtic, B.; Mladenovic, A.; Pranjic, A. M.; Kramar, S. (2015) "Formulation and microstructural evaluation of tuff repair mortar", *Journal of Cultural Heritage*, Vol.16(5), pp. 705-711.

Kosednar, J.; Mailvaganam, N.P. (2005) "Selection and use of polymer-based materials in the repair of concrete structures", NCR-CNRC (National Research Council Canada), NRCC-47633.

Lampropoulos, A. P.; Dritsos, S. E. (2011) "Concrete shrinkage effect on the behavior of RC columns under monotonic and cyclic loading", *Construction and Building Materials*, Vol.25(4), pp. 1596-1602.

Larbi, A. S.; Agbossou, A.; Hamelin, P. (2013) "Experimental and numerical investigations about textile-reinforced concrete and hybrid solutions for repairing and/or strengthening reinforced concrete beams", *Composite Structures*, Vol.99, pp. 152(11).

Lawrence, M.; Scannell, S.; Walker, P. (2014) "A critical review of the effect of calcitic aggregate on air-lime mortar", *International Congress on Materials and Structural Stability*, 2013-11-27 - 2013-11-30, Rabat.

Li, B; Kai, Q (2011) "Seismic Behavior of Reinforced Concrete Interior Beam-Wide Column Joints Repaired Using FRP", *Journal of Composites for Construction*, Vol.15(3), pp. 327-338.

Li, J.; Zhang, W.; Cao, Y. (2014) "Laboratory evaluation of magnesium phosphate cement paste and mortar for rapid repair of cement concrete pavement", *Construction and Building Materials*, Vol.58, pp. 122-218.

Lukovia, M.; Dong, H.; A Avija, B.; Schlangen, E.; Ye, G.; Van Breugel, K. (2014) "Tailoring strain-hardening cementitious composite repair systems through numerical experimentation", *Cement and Concrete Composites*, Vol.53, pp. 200(14).

Luo, J.; Li, Q.; Zhao, T.; Gao, S.; Sun, S. (2013) "Bonding and toughness properties of PVA fibre reinforced aqueous epoxy resin cement repair mortar", *Construction and Building Materials*, Vol.49, pp. 766(6).

Luqman Hafeez, B. S. (2008) "Development of models for strengthened reinforced concrete columns", The Ohio State University (Thesis).

Mailvaganam, N. P. (2004) "Concrete repair and rehabilitation: issues and trends", NCR-CNRC (National Research Council Canada), NRCC-47293.

Mailvaganam, N. P.; Zhang, J. (2006) "Structural and patch repair in concrete structures", *Cement and Concrete Composites*, Vol.28(8), pp. 669-670.

Mallat, A.; Alliche, A. (2011) "Mechanical investigation of two fiber-reinforced repair mortars and the repaired system", *Construction and Building Materials*, Vol.25(4), pp. 1587-1595.

Mallat, A.; Alliche, A. (2011) "A Modified Tensile Test to Study the Behaviour of Cementitious Materials", *Strain*, Vol.47(6), pp. 499(6).

Mangat, P. S.; Limbachiya, M. C. (1997) "Repair material properties for effective structural application", *Cement and Concrete Research*, Vol. 27(4), pp. 601-617.

Mangat, P. S.; O'Flaherty, F. J. (1999) "Influence of elastic modulus on stress redistribution and cracking in repair patches", *Cement and Concrete Research*, Vol.30(1), pp. 125-136.

Mangat, P. S.; O'Flaherty, F. J. (1999) "Serviceability characteristics of flowing repairs to propped and unpropped bridge structures", *Materials and Structures*, Vol. 32(9), pp. 663-672.

Maravelaki - Kalaitzaki, P.; Galanos, A.; Doganis, I.; Kallithrakas - Kontos, N. (2011) "Physico-chemical characterization of mortars as a tool in studying specific hydraulic components: application to the study of ancient Naxos aqueduct. (Report)", *Applied Physics A*, 2011, Vol.104(1), pp. 335(14).

Matias, G.; Faria, P.; Torres, I. (2014) "Lime mortars with heat treated clays and ceramic waste: A review", *Construction and Building Materials*, Vol.73, pp. 125-136.

Matthews, S.; Morlidge, J. (2008) "Achieving durable repaired concrete structures: a performance-based approach", *Structures and Buildings* Vol.161, pp. 17-28.

Mays, G.C. "Materials for the repair and strengthening of concrete structures: The influence of material properties on structural performance", *Granfield University, Royal Military College of Science, UK*, pp. 331-348.

Mays, G.C. (1995) "The structural effectiveness of large volume patch repairs to concrete structures", *Proceeding Institute Civil Eng. Struct. Buildings*, Vol.122(3), pp. 368-369.

Momayez, A.; Ehsani, M. R.; Ramezaniapour, A.A.; Rajaie, H. (2005) "Comparison of methods for evaluating bond strength between concrete substrate and repair materials", *Cement and Concrete Research*, Vol.35(4), pp. 748-757.

Morgan, D.R. (1996) "Compatibility of concrete repair materials and systems", *Construction and Building Materials*, Vol. 10(1), pp. 57-67.

Mourad, S. M.; Shannag, M. J. (2012) "Repair and strengthening of reinforced concrete square columns using ferrocement jackets", *Cement and Concrete Composites*, Vol.34(2), pp. 288(7).

Navarrete, B. (2003) "Transferencia de carga en pilares de hormigón armado con encamisados del mismo material. Un estudio experimental", Cuadernos INTEMAC, Vol.50, 46 páginas.

NORECON Task T2 (2004) "Repair Methods - a Review", NORECON Network on Repair and Maintenance of Concrete Structures.

NORECON Workshop (2003) "Decision and Requirements for Repair", NORECON Network on Repair and Maintenance of Concrete Structures.

Ong, K. C. G.; Kog, Y. C.; Yu, C. H.; Sreekanth, A. P. V. (2004) "Jacketing of reinforced concrete columns subjected to axial load", Magazine of Concrete Research, Vol.56(2), pp. 89-98.

Pacheco - Torgal, F.; Moura, D.; Ding, Yining; Jalali, Said (2011) "Composition, strength and workability of alkali-activated metakaolin based mortars", Construction and Building Materials, Vol.25(9), pp. 3732-3745.

Papayianni, I.; Pachta, V.; Stefanidou, M. (2013) "Analysis of ancient mortars and design of compatible repair mortars: The case study of Odeion of the archaeological site of Dion", Construction and Building Materials, Vol.40, pp. 84(9).

Parameswaran, S. (2004) "Investigating the role of material properties and their variability in the selection of repair materials", Purdue University (Thesis).

Park, D.; Park, S.; Seo, Y.; Noguchi, T. (2012) "Water absorption and constraint stress analysis of polymer-modified cement mortar used as a patch repair material", Construction and Building Materials, Vol.28(1), pp. 819(12).

Park, W. S.; Yun, H. D. (2011) "Seismic performance of pseudo strain-hardening cementitious composite coupling beams with different reinforcement details", Composites Part B, Vol.42(6), pp. 1427-1445.

Pelà, L.; Aprile, A.; Benedetti, A. (2012) "Experimental study of retrofit solutions for damaged concrete bridge slabs", Composites Part B, Vol.43(5), pp. 2471-2479.

Pellegrino, C.; da Porto, F.; Modena, C. (2009) "Rehabilitation of reinforced concrete axially loaded elements with polymer-modified cementitious mortar", Construction and Building Materials, Vol.23(10), pp. 3129-3137.

Pellegrino, C.; da Porto, F.; Modena, C. (2011) "Experimental behaviour of reinforced concrete elements repaired with polymer-modified cementitious mortar", Materials and Structures, Vol.44(2), pp. 517-527.

Petit, J. Y.; Wirquin, E.; Helnan-Moussa, B. (2011) "Effect of W/C and superplasticizer type on rheological parameters of SCC repair mortar for gravitational or light pressure injection", Cement and Concrete Composites, Vol.33(10), pp. 1050-1056.

Polies, W.; Ghrib, F.; Sennah, K. (2010) "Rehabilitation of interior reinforced concrete slab-column connections using CFRP sheets", *Construction and Building Materials*, Vol.24(7), pp. 1272-1285.

Qian, S.; Zhang, J.; Qu, D. (2006) "Theoretical and experimental study of microcell and macrocell corrosion in patch repairs of concrete structures", *Cement and Concrete Composites*, Vol.28(8), pp. 685-695.

Ramírez, J. L.; Bárcena, J. M. (1975) "Strength efficiency of bad quality reinforced concrete columns strengthened by two different ways", In *Colloquium Inter Association Behaviour in service of concrete structures*, Liege 4-6 Junio.

Ramírez, J. L.; Bárcena, J. M.; Feijóo, J. M. (1977) "Comparación resistente de cuatro métodos de refuerzo de pilares de hormigón armado", *Informes de la Construcción* nº290, pp. 57-68.

Ramírez, José L. (1995) "Ten concrete column repair methods", *Construction and Building Materials*, Vol. 10(3), pp. 195-202.

Raupach, M. (2006) "Patch repairs on reinforced concrete structures - Model investigations on the required size and practical consequences", *Cement and Concrete Composites*, Vol.28(8), pp. 679-684.

Realfonzo, R.; Napoli, A.; Ruiz Pinilla, J. G. (2014) "Cyclic behavior of RC beam-column joints strengthened with FRP systems", *Construction and Building Materials*, Vol.54, pp. 282-297.

Ribeiro, J. L. S.; Panossian, Z.; Selmo, S. M. S. (2013) "Proposed criterion to assess the electrochemical behavior of carbon steel reinforcements under corrosion in carbonated concrete structures after patch repairs", *Construction and Building Materials*, Vol.40, pp. 40(10).

Rodríguez, M.; Park, R. (1994) "Seismic load tests of reinforced concrete columns strengthened by jacketing", *ACI Structural Journal*, Vol.91(2), pp. 150-159.

Rousakis, T. C.; Kouravelou, K. B.; Karachalios, T. K. (2014) "Effects of carbon nanotube enrichment of epoxy resins on hybrid FRP-FR confinement of concrete", *Composites Part B*, Vol.57, pp. 210(9).

Sadone, R.; Quiertant, M.; Ferrier, E.; Chataigner, S.; Mercier, J. (2012) "Anchoring FRP laminates for the seismic strengthening of RC columns", *International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting - ICCRRR 2012*.

Sahamitmongkol, R.; Suwathanangkul, S.; Phoothong, P.; Kato, Y. (2008) "Flexural behavior of corroded RC members with patch repair - Experiments and Simulation", *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.6(2), pp. 317-336.

Sasmal, S; Ramanjaneyulu, K; Novak, B; Srinivas, V; Kumar, KS; Korkowski, C; Roehm, C; Lakshmanan, N; Iyer, NR (2011) "Seismic retrofitting of nonductile beam-column sub-

assemblage using FRP wrapping and steel plate jacketing", *Construction and Building Materials*, Vol.25(1), pp. 175-182.

Schueremans, L.; Cizer, Ö.; Janssens, E.; Serré, G.; Balen, K. V. (2011) "Characterization of repair mortars for the assessment of their compatibility in restoration projects: Research and practice", *Construction and Building Materials*, Vol.25(12), pp. 4338-4350.

SEOPAN (Asociación de Empresas Constructoras de Ámbito Nacional), "Informe anual de la construcción", años 2004 al 2013.

Sezen, H. (2012) "Repair and Strengthening of Reinforced Concrete Beam-Column Joints with Fiber-Reinforced Polymer Composites", *Journal of Composites for Construction*, Vol.16(5), pp. 499-506.

Shambira, V. M.; Nounu, G. (2000) "On the effect of time-dependent deformations on the behavior of patch-repaired reinforced concrete short columns", *Construction and Building Materials*, Vol.14(8), pp. 425-432.

Sharif, A.; Rahman, M. K.; Al-Gahtani, Ahmad S.; Hameeduddin, M. (2006) "Behaviour of patch repair of axially loaded reinforced concrete beams" *Cement and Concrete Composites*, Vol.28(8), pp. 734-741.

Shin, M.; Andrawes, B. (2011) "Emergency repair of severely damaged reinforced concrete columns using active confinement with shape memory alloys", *Smart Materials and Structures*, Vol.20(6), pp. 065018(9).

Si Larbi, A.; Contamine, R.; Hamelin, P. (2012) "TRC and hybrid solutions for repairing and/or strengthening reinforced concrete beams", *Engineering Structures*, Vol.45, pp. 12(9).

Sierra-Beltran, M. G.; Jonkers, H. M.; Schlangen, E. (2014) "Characterization of sustainable bio-based mortar for concrete repair", *Construction and Building Materials*, Vol.67, pp. 344(9).

Silva, B. A.; Ferreira Pinto, A. P.; Gomes, A. (2014) "Influence of natural hydraulic lime content on the properties of aerial lime-based mortars", *Construction and Building Materials*, Vol.72, pp. 208-218.

Singh, V. K. (2013) "Structural Repair and Rehabilitation of 3 no. (G+8) Multi-Storeyed Residential Buildings, at ONGC Colony at Chandkheda, Ahmedabad, Gujrat", *Procedia Engineering*, Vol.51, pp. 55-64.

Singh, V.; Bansal, P. P.; Kumar, M.; Kaushik, S. K. (2014) "Experimental studies on strength and ductility of CFRP jacketed reinforced concrete beam-column joints", *Construction and Building Materials*, Vol.55, pp. 194-201.

Stefanidou, M.; Anastasiou, E.; Georgiadis Filikas, K. (2014) "Recycled sand in lime-based mortars", *Waste Management*, Vol.34(12), pp. 2595-2602.

Szemerey-Kiss, B.; Török, Á.; Siegesmund, S. (2013) "The influence of binder/aggregate ratio on the pore properties and strength of repair mortars", *Environmental Earth Sciences*, Vol.69(4), pp. 1439-1449.

Szemerey-Kiss, B.; Torok, Á. (2011) "Time-dependent changes in the strength of repair mortar used in the loss compensation of stone", *Environmental Earth Sciences*, Vol.63(7), pp. 1613-1621.

Tapan, M.; Aboutaha, R. (2008) "Strength Evaluation of Deteriorated RC Bridge Columns", *Journal of Bridge Engineering*, Vol.13(3), pp. 226-236.

Tilly, G. P.; Jacobs, J. (2007) "Concrete Repairs - Performance in service and current practice" CONREPNET Thematic network on performance-based remediation of reinforced concrete structures.

Toumi, A.; Nguyen, T. - H.; Turatsinze, A. (2013) "Debonding of a thin rubberised and fibre-reinforced cement-based repairs: Analytical and experimental study", *Materials and Design*, Vol.49, pp. 90(6).

Toumi, A.; Nguyen, T.-H.; Turatsinze, A. (2013) "Benefits of Low Modulus of Elasticity and of Fibre Reinforcement of Cement Based Mortars as Thin Bonded Overlay Materials", *Experimental Mechanics*, Vol.53(9), pp. 1791-1797.

Ukrainczyk, N.; Rogina, A. (2013) "Styrene-butadiene latex modified calcium aluminate cement mortar", *Cement and Concrete Composites*, Vol.41, pp. 16(8).

UNE-EN 1504-10 (2006) "Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón" - Parte 10: Aplicación "in situ" de los productos y sistemas y control de calidad de los trabajos.

UNE-EN 1504-3 (2006) "Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón" - Parte 3: Reparación estructural y no estructural.

UNE-EN 1504-9 (2011) "Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón" - Parte 9: Principios generales para el uso de productos y sistemas.

Van Den Heede, P.; De Belie, N. (2014) "A service life based global warming potential for high-volume fly ash concrete exposed to carbonation", *Construction and Building Materials*, Vol.55, pp. 183-193.

Van Den Heede, P.; Gruyaert, E.; Robeyst, N.; De Belie, N. (2010) "Life cycle assessment of a column supported isostatic beam in high-volume fly ash concrete (HVFA concrete)", *RILEM PROCEEDINGS*, Vol.70, pp. 437-444.

Vandoros, K. G.; Dritsos, S. E. (2006) "Axial preloading effects when reinforced concrete columns are strengthened by concrete jackets", *Progress in Structural Engineering and Materials*, Vol.8(3), pp. 79-82.

Vandoros, K. G.; Dritsos, S. E. (2008) "Concrete jacket construction detail effectiveness when strengthening RC columns", *Construction and Building Materials*, Vol.22(3), pp. 264-276.

Vasconcelos, E.; Fernandes, S.; Barroso de Aguiar, J. L.; Pacheco-Torgal, F. (2011) "Concrete retrofitting using metakaolin geopolymer mortars and CFRP", *Construction and Building Materials*, Vol.25(8), pp. 3213-3221.

Wang, Q; Zhao, G; Lin, L. (1995) "Ductility of high strength reinforced concrete columns", *Nuclear Engineering and Design*, Vol.156(1), pp. 75-81.

Wang, R.; Wang, Pei-Ming (2011) "Action of redispersible vinyl acetate and versatate copolymer powder in cement mortar", *Construction and Building Materials*, 2011, Vol.25(11), pp. 4210-4214.

Williams, J. T.; Parker, A. J. (1990) "Reinforced concrete: Structural considerations and choice of products for repair", *Proceedings of the international conference on protection of concrete*, University of Dundee, Scotland, pp. 819-830.

Wipf, T. J.; Klaiber, F. W.; Raker, E. J. (2004) "Effective Structural Concrete Repair, Volume 3 of 3. Evaluation of Repair Materials for Use in Patching Damaged Concrete" Iowa State University of science and technology, Department of Civil, Construction and Environmental Engineering, Iowa DOT Project TR - 428.

Wipf, T. J.; Fanous, F. S.; Klaiber, F. W.; Eapen, A. S. (2003) "Evaluation of Appropriate Maintenance, Repair and Rehabilitation Methods for Iowa Bridges", Iowa State University of science and technology, Department of Civil and Construction Engineering, Iowa DOT Project TR - 429.

Wood, J.G.M. (1989) "Defining the properties of concrete repair materials for effective structural application", *Proc. Structural Faults Repairs*, Vol.2, pp. 231-236.

Woodson, R. D. (2011) "Concrete Portable Handbook", Butterworth Heinemann.

Xiong, G. J.; Wu, X. Y.; Li, F. F.; Yan, Z. (2011) "Load carrying capacity and ductility of circular concrete columns confined by ferrocement including steel bars", *Construction and Building Materials*, Vol.25(5), pp. 2263-2268.

Yaqub, M.; Bailey, C. G. (2011) "Cross sectional shape effects on the performance of post-heated reinforced concrete columns wrapped with FRP composites", *Composite Structures*, 2011, Vol.93(3), pp. 1103-1117.

Yaqub, M.; Bailey, C. G. (2012) "Seismic performance of shear critical post-heated reinforced concrete square columns wrapped with FRP composites", *Construction and Building Materials*, Vol.34(1), pp. 457(13).

Yaqub, M.; Bailey, C.G. (2011) "Repair of fire damaged circular reinforced concrete columns with FRP composites", *Construction and Building Materials*, Vol.25(1), pp. 359-370.

Yi, N. H.; Nam, J. W.; Kim, S. B.; Kim, I. S.; Kim, J. H. J. (2010) "Evaluation of material and structural performances of developed Aqua-Advanced-FRP for retrofitting of underwater concrete structural members", *Construction and Building Materials*, Vol.24(4), pp. 566-576.

Yunpeng, L.; Fazhou, W.; Muyu, L.; Shuguang, H. (2014) "A microstructural approach to adherence mechanism of cement and asphalt mortar (CA mortar) to repair materials", *Construction and Building Materials*, Vol.66, pp. 125(7).

Zhang, J.; Mailvaganam, Noël P. (2006) "Corrosion of concrete reinforcement and electrochemical factors in concrete patch repair", *Canadian Journal Civil Engineering* Vol. 33(6), pp. 785-793.

Zhang, Q.; Jiang, W. J.; Liao, F. W. (2011) "Research on the Benefits of Mortar Perfusion Repair Technology Based on Entropy Weight and Fuzzy Evaluation", *Applied Mechanics and Materials*, Vol.71-78, pp. 4086-4090.

Zhao, W.; Li, D. X.; Li, Q. H.; Wang, Z. X. (2010) "Researches on Properties of Polymer Modified Rapid Hardening Sulphoaluminate Cement Repair Mortar", *Advanced Materials Research*, Vol.168-170, pp. 1767-1771.

ANEJO 1. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES EMPLEADOS

a. Hormigón de los pilares

El hormigón utilizado en la fabricación de los pilares ensayados fue suministrado por una empresa fabricante de cementos.

Se solicitó un hormigón H-15. Y para ello suministraron dicho hormigón con un tipo de cemento CEMEX CEM II/A-V 42.5 R, árido calizo triturado, aditivo tipo CX ISOPLAST 6 CEMEX 0'98%.

a.1. Resistencia a compresión del hormigón.

		F _c (Mpa)	Ē _c (Mpa)
1 CUBA	1	9,2	9,47
	2	10,8	
	3	10,5	
	4	10,5	
	5	7,8	
	6	8	
2 CUBA	1	12,2	8,94
	2	10,3	
	3	7,5	
	4	6,9	
	5	6,7	
	6	8	

a.2. Módulo de Elasticidad.

Se determinó el módulo de elasticidad en compresión del hormigón fabricado para las dos cubas con una resistencia de 10'25 N/mm² para la primera tongada, y de 10 N/mm² para la segunda tongada, de acuerdo a la norma UNE-EN 83316, obteniéndose los siguientes datos.

		F _c (Mpa)	E (Mpa)	Ē (Mpa)
1 TONGADA	1	10,25	22111	20177,5
	2	10,25	18244	
2 TONGADA	1	10	19555	17698
	2	10	15841	

a.3. Puente de Unión.

Producto a base de cemento, de un componente, mejorado con resina sintética y humo de sílice.

El producto cumple con los requerimientos de la UNE-EN 1504-4 y de la UNE-EN 1504-7.

Resistencia a compresión (EN 196-1)	7 días	≈ 30 N/mm ²
	28 días	≈ 39 N/mm ²
Resistencia a flexotracción (EN 196-1)	7 días	≈ 3 N/mm ²
	28 días	≈ 8 N/mm ²
Adherencia por tracción sobre el hormigón	2-3 N/mm ²	

a.4. Mortero de reparación Clase R3

Mortero de reparación estructural de un componente, reforzado con fibras y humo de sílice que cumple con los requerimientos de la Clase R3 de la UNE-EN 1504-3.

Requerimientos	Requerimientos de acuerdo a la UNE-EN 1504-3 Clase R3 (Ensayado con una relación agua/polvo = 14,5%)		
	Método de Ensayo	Resultados (Laboratorio)	Requerimientos (R3)
Resistencia a compresión	EN 12190	40,3 N/mm ² (MPa)	>25 N/mm ² (MPa)
Contenido de ión cloro	EN 1015	<0,03 %	≤0,05%
Adherencia	EN 1542	1,9 N/mm ² (MPa)	≥1,5 N/mm ² (MPa)
Retracción restringida	EN 12617-4	1,8 N/mm ² (MPa)	≥1,5 N/mm ² (MPa)
Expansión restringida	EN 12617-4	1,7 N/mm ² (MPa)	≥1,5 N/mm ² (MPa)
Resistencia a carbonatación	EN 13295	Pasa	$d_k \leq$ hormigón de control tipo MC(0,45)
Módulo de elasticidad	EN 13412	25,2 GPa	≥15 GPa
Absorción capilar	EN 13057	0,2 kg·m ⁻² ·h ^{-0,5}	≤0,5 kg·m ⁻² ·h ^{-0,5}
Información adicional			
Resistencia a compresión (EN 196-1)	28 días		~ 40,3 N/mm ²
	(EN 196-1)		
Resistencia a tracción por flexión (EN 196-1)	28 días		~ 8,3 N/mm ²
	(EN 196-1)		
Retracción (EN 52450)	-0,817 mm/m a 20 °C 65% H.R. (a 28 días)		

a.4. Mortero de reparación Clase R4.

Mortero de reparación estructural de un componente, reforzado con fibras, de baja retracción que cumple con los requisitos de la clase R4 de la UNE-EN 1504-3.

Requerimientos	Requerimientos de acuerdo a la UNE-EN 1504-3 Clase R4 (Ensayado con una relación agua/polvo = 14,5%)		
	Método de Ensayo	Resultados	Requerimientos (R4)
Resistencia a compresión	EN 12190	54,2 N/mm ² (MPa)	≥45 N/mm ² (MPa)
Contenido de ión cloro	EN 1015	< 0,03%	≤0,05%
Adherencia	EN 1542	2,5 N/mm ² (MPa)	≥2,0 N/mm ² (MPa)
Retracción restringida	EN 12617-4	2,4 N/mm ² (MPa)	≥2,0 N/mm ² (MPa)
Expansión restringida	EN 12617-4	2,3 N/mm ² (MPa)	≥2,0 N/mm ² (MPa)
Resistencia a carbonatación	EN 13295	Pasa	$d_k \leq$ hormigón de control tipo MC(0,45) $d_k=4,9$ mm
Módulo de elasticidad	EN 13412	36,7 kN/mm ² (GPa)	≥20 kN/mm ² (GPa)
Absorción capilar	EN 13057	≈ 0,07 kg·m ⁻² ·h ^{-0,5}	≤0,5 kg·m ⁻² ·h ^{-0,5}
Información adicional			
Resistencia a Compresión (UNE-EN 12190)	1 día		~ 16 N/mm ²
	7 días		~ 38 N/mm ²
	28 días		~ 54 N/mm ²
Resistencia a flexión	1 día		~ 4 N/mm ²
	7 días		~ 7 N/mm ²
	28 días		~ 9 N/mm ²

ANEJO 2. ESQUEMA DE ACRÓNIMOS UTILIZADOS

Tipo de patrón	Acrónimo
Pilares Patrón-Sección original	PP
Pilares Patrón Dañado a 4 Caras	PPD4C
Pilares Reparados a 4 Caras, mortero Clase R3 con puente de unión	PR4C_R3+PU
Pilares Reparados a 4 Caras, mortero Clase R3 sin puente de unión	PR4C_R3
Pilares Reparados a 4 Caras, mortero Clase R4 con puente de unión	PR4C_R4+PU
Pilares Reparados a 4 Caras, mortero Clase R3 sin puente de unión	PR4C_R4
Pilares Patrón Dañado a 1 Cara	PPD1C
Pilares Reparados a 1 Cara, mortero Clase R3 con puente de unión	PR1C_R3+PU
Pilares Reparados a 1 Cara, mortero Clase R3 sin puente de unión	PR1C_R3
Pilares Reparados a 1 Cara, mortero Clase R4 con puente de unión	PR1C_R4+PU
Pilares Reparados a 1 Cara, mortero Clase R3 sin puente de unión	PR1C_R4
Pilares Patrón Dañado Parcheo	PPDP
Pilares Reparados Parcheo, mortero Clase R3 con puente de unión	PRP_R3+PU
Pilares Reparados Parcheo, mortero Clase R3 sin puente de unión	PRP_R3
Pilares Reparados Parcheo, mortero Clase R4 con puente de unión	PRP_R4+PU
Pilares Reparados Parcheo, mortero Clase R3 sin puente de unión	PRP_R4

ANEJO 3. ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 1	Gráfico de los porcentajes de participación de la producción interna de construcción por subsectores, según datos obtenidos de los informes económicos anuales, desde el 2004 hasta el 2013 realizados por SEOPAN.	15
Figura 2	Censo de Población y Viviendas 2011, según datos obtenidos del informe de septiembre de 2014, de la comisión de infraestructuras y urbanismo de la CEOE.	19
Figura 3	Rendimientos en relación a la edad de las reparaciones (Graham Tilly and Jacobs J., 2007)	20
Figura 4	Causas del fallo de la reparación (S. Matthews and J. Morlidge, 2008)	21
Figura 5	Porcentajes de las publicaciones consultadas entre los años 1989-2015, según datos de Elsevier, Ei Village, Web of Science, IEEE Xplore y Science Direct.	24
Figura 6	Porcentajes de artículo específicos consultados relativos a la investigación en cuestión.	24
Figura 7	Tipos de intervención posibles en un diagrama de pérdida de resistencia frente al tiempo, C.E.B. 1983	26
Figura 8	Geometría de las columnas, Shambira y Nounu (2000)	27
Figura 9	Geometría de los pilares y de la reparación de los mismos, Sharif et al. (2006).	29
Figura 10	Geometría de los pilares ensayados, Aurrekoetchea (2009).	30
Figura 11	Geometría y características de los pilares ensayados, Carlo Pellegrino et al. (2009).	33
Figura 12	Instrumentación de los pilares ensayados, Carlo Pellegrino et al. (2009).	33
Figura 13	Geometría de los pilares ensayados, Francesca da Porto et al. (2012).	35
Figura 14	Instrumentación de las armaduras, Francesca da Porto et al. (2012).	35
Figura 15	Instrumentación de las superficies del pilar, Francesca da Porto et al. (2012).	36
Figura 16	Número de artículos publicados en función del tipo estructural y método de refuerzo (Giménez, 2007).	38
Figura 17	Detalles de la geometría y armado de los pilares previos.	43
Figura 18	Fotografías fallo cabezas pilares (cara delantera).	44
Figura 19	Fotografías hundimiento placa de reparto.	44
Figura 20	Fotografía del detalle de las placas de reparto.	45
Figura 21	Fotografías rotura del pilar.	45
Figura 22	Detalles de la geometría y armado de los pilares previos, segunda fase.	46
Figura 23	Detalles del hormigonado para los dos diseños de la segunda tanda de pruebas.	47
Figura 24	Detalle rotura pilar hormigonado en una sola vez	48

Figura 25	Detalle rotura pilar hormigonado en dos veces (cabeza y zona central).	48
Figura 26	Fabricación del hormigón de los pilares para los ensayos previos.	49
Figura 27	Detalles de la geometría y armado de los pilares de ensayo.	51
Figura 28	Detalle elaboración daño pilares daño en las 4 caras.	54
Figura 29	Pilar daño en las 4 caras, encofrado.	54
Figura 30	Pilar daño en 1 cara, encofrado.	54
Figura 31	Pilar daño parcheo, encofrado.	55
Figura 32	Relleno de los encofrados.	56
Figura 33	Vibrado del hormigón.	56
Figura 34	Detalle del pilar daño 4 caras hormigonado.	57
Figura 35	Hormigonado pilar parcheo.	57
Figura 36	Eliminación del corcho y cepillado manual mediante púas metálicas.	58
Figura 37	Limpieza de las superficies mediante chorro de agua a alta presión.	58
Figura 38	Detalle del pilar daño 4 caras.	59
Figura 39	Detalle del pilar daño 1 cara.	59
Figura 40	Detalle pilar daño parcheo.	60
Figura 41-42	Humedecimiento de las superficies y relleno con una primera capa.	61
Figura 43-44	Relleno primera capa pilar a cuatro caras y parcheo.	61
Figura 45-46	Encofrado a dos caras, relleno del resto del espesor.	62
Figura 47-48	Aplicación del puente de unión y colocación de la primera capa de mortero de reparación.	62
Figura 49-50	Fratasado de las superficies.	63
Figura 51	Detalle del pórtico de ensayo.	65
Figura 52	Fotografías del pórtico de ensayo.	66
Figura 53	Esquema de la instrumentación de los pilares.	70
Figura 54	Colocación de la instrumentación en los pilares de parcheo, Cara C1 y C4 respectivamente.	70
Figura 55	Colocación de la instrumentación en los pilares de parcheo, Cara C3	71
Figura 56	Colocación de la instrumentación en los pilares a cuatro caras, Cara C1 y C3 respectivamente.	71
Figura 57	Colocación de la instrumentación en los pilares a 1 cara, Cara C1-C4 y C3 respectivamente.	72
Figura 58	Pilares PP tras el ensayo a compresión. Fisuración cara delantera (Cara C1) y trasera (Cara C3), respectivamente.	74
Figura 59	Pilares PP tras el ensayo a compresión. Fisuración cara laterales (Cara C2 y Cara C4).	74
Figura 60	Gráfica Fuerza-deformación correspondientes al pilar P31.	75
Figura 61	Gráfica Fuerza-deformación correspondiente al pilar P33.	75
Figura 62	Gráfica Fuerza-deformación correspondiente al pilar P41.	76
Figura 63	Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PP	76

Figura 64	Pilar PPD4C tras la rotura. Caras C3 y C4 respectivamente.	77
Figura 65	Gráfica Fuerza-deformación del pilar PPD4C.	78
Figura 66	Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares patrón sección original y daño 4 caras.	78
Figura 67	Pilar PR4C_R3+PU tras el ensayo a compresión. Fisuración cara C1.	79
Figura 68	Pilar PR4C_R3+PU tras el ensayo a compresión. Fisuración caras laterales, caras C2 y C4 respectivamente.	79
Figura 69	Pilar PR4C_R3+PU tras el ensayo. Detalle del desprendimiento de la capa de reparación tras el ensayo.	80
Figura 70	Gráfica Fuerza-deformación correspondiente a los pilares P5, P6 y P16.	80
Figura 71	Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PR4C_R3+PU.	81
Figura 72	Gráfica Fuerza-deformación de los pilares PP, PPD4C y PR4C_R3+PU.	81
Figura 73	Pilar PR4C_R3 tras el ensayo a compresión. Fisuración caras C1 y C3 respectivamente.	82
Figura 74	Pilar PR4C_R3 tras el ensayo a compresión. Fisuración de las caras laterales, caras C2 y C4 respectivamente.	82
Figura 75	Pilar PR4C_R3 tras el ensayo a compresión. Detalle del desprendimiento de la capa de reparación tras el ensayo.	83
Figura 76	Gráfica Fuerza-deformación correspondiente a los pilares P1, P15 y P17.	83
Figura 77	Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PR4C_R3.	84
Figura 78	Gráfica Fuerza-deformación de los pilares PP, PPD4C y PR4C_R3.	84
Figura 79	Pilares PR4C_R4+PU tras el ensayo a compresión. Fisuración caras C1 y C3 respectivamente.	85
Figura 80	Pilares PR4C_R4+PU tras el ensayo a compresión. Fisuración caras C2 y C4 respectivamente.	85
Figura 81	Pilares PR4C_R4+PU tras el ensayo a compresión. Detalle del desprendimiento de la capa de reparación de las caras laterales tras el ensayo.	86
Figura 82	Gráfica Fuerza-deformación correspondiente a los pilares P2, P9 y P10.	86
Figura 83	Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PR4C_R4+PU.	87
Figura 84	Gráfica Fuerza-deformación de los pilares PP, PPD4C y PR4C_R4+PU.	87
Figura 85	Pilares PR4C_R4 tras el ensayo a compresión. Fisuración caras C1 y C3 respectivamente.	88
Figura 86	Pilares PR4C_R4 tras el ensayo a compresión. Fisuración caras C2 y C4 respectivamente.	88
Figura 87	Gráfica Fuerza-deformación correspondiente a los pilares P11, P12 y P13.	89
Figura 88	Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PR4C_R4	89

Figura 89	Gráfica Fuerza-deformación de los pilares PP, PPD4C y PR4C_R4.	90
Figura 90	Pilares PPD1C tras el ensayo a compresión. Fisuración caras C1 y C3 respectivamente	91
Figura 91	Pilares PPD1C tras el ensayo a compresión. Fisuración caras C2 y C4 respectivamente.	91
Figura 92	Gráfica Fuerza-deformación de la Cara C1 correspondiente a los pilares P8 y P21.	92
Figura 93	Gráfica Fuerza-deformación de la Cara C3 correspondiente a los pilares P8 y P21.	92
Figura 94	Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PPD1C. Deformaciones medias en las caras C1 y C3 durante el ensayo.	93
Figura 95	Gráfica Fuerza-deformación pilares PP y PPD1C	93
Figura 96	Pilares PR1C_R3+PU tras el ensayo a compresión. Fisuración caras C1 y C3 respectivamente.	94
Figura 97	Pilares PR1C_R3+PU tras el ensayo a compresión. Fisuración caras laterales C2 y C4 respectivamente.	94
Figura 98	Pilares PR1C_R3+PU tras el ensayo a compresión. Detalle del desprendimiento de la reparación tras el ensayo	95
Figura 99	Gráfica Fuerza-deformación de la Cara C1 correspondiente a los pilares P22, P27 y P28.	95
Figura 100	Gráfica Fuerza-deformación de la Cara C3 correspondiente a los pilares P22, P27 y P28.	96
Figura 101	Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PR1C_R3+PU.	96
Figura 102	Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PPD1C y PR1C_R3+PU, cara delantera C1.	97
Figura 103	Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PPD1C y PR1C_R3+PU, cara trasera C3	97
Figura 104	Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PPD1C y PR1C_R3+PU.	98
Figura 105	Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PP, PPD1C y PR1C_R3+PU, cara delantera C1.	98
Figura 106	Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PP, PPD1C y PR1C_R3+PU, cara trasera C3.	99
Figura 107	Pilares PR1C_R3 tras el ensayo a compresión. Fisuración caras C1 y C3 respectivamente	99
Figura 108	Pilares PR1C_R3 tras el ensayo a compresión. Fisuración caras laterales, C2 y C4 respectivamente	100
Figura 109	Pilares PR1C_R3 tras el ensayo a compresión. Detalle del desprendimiento de la capa de reparación tras el ensayo.	100
Figura 110	Gráfica Fuerza-deformación de la Cara C1 correspondiente a los pilares P14, P29 y P30.	101
Figura 111	Gráfica Fuerza-deformación de la Cara C3 correspondiente a los pilares P14, P29 y P30.	101
Figura 112	Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilarse PR1C_R3.	102

Figura 113	Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PPD1C y PR1C_R3, cara delantera C1.	102
Figura 114	Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PPD1C y PR1C_R3, cara trasera C3.	103
Figura 115	Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PP, PPD1C y PR1C_R3, cara delantera C1.	103
Figura 116	Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PP, PPD1C y PR1C_R3, cara trasera C3.	104
Figura 117	Pilares PR1C_R4+PU tras el ensayo a compresión. Fisuración caras C1 y C3 respectivamente.	104
Figura 118	Pilares PR1C_R4+PU tras el ensayo a compresión. Fisuración cara lateral C2.	105
Figura 119	Pilares PR1C_R4+PU tras el ensayo a compresión. Fisuración cara lateral C4.	105
Figura 120	Pilares PR1C_R4+PU tras el ensayo a compresión. Detalle del desprendimiento de la capa de reparación tras el ensayo.	106
Figura 121	Gráfica Fuerza-deformación de la Cara C1 correspondiente a los pilares P19 y P23.	106
Figura 122	Gráfica Fuerza-deformación de la Cara C3 correspondiente a los pilares P19 y P23.	107
Figura 123	Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PR1C_R4+PU.	107
Figura 124	Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PPD1C y PR1C_R4+PU, cara delantera C1.	108
Figura 125	Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PPD1C y PR1C_R4+PU, cara trasera C3.	108
Figura 126	Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PP, PPD1C y PR1C_R4+PU, cara delantera C1.	109
Figura 127	Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PP, PPD1C y PR1C_R4+PU, cara trasera C3.	109
Figura 128	Pilares PR1C_R4 tras el ensayo a compresión. Fisuración caras C1 y C3 respectivamente	110
Figura 129	Pilares PR1C_R4 tras el ensayo a compresión. Fisuración caras C2 y C4 respectivamente.	110
Figura 130	Gráfica Fuerza-deformación de la Cara C1 correspondiente a los pilares P18, P20 y P24.	111
Figura 131	Gráfica Fuerza-deformación de la Cara C3 correspondiente a los pilares P18, P20 y P24.	111
Figura 132	Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PR1C_R4.	112
Figura 133	Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PPD1C y PR1C_R4, cara delantera C1	112
Figura 134	Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PPD1C y PR1C_R4, cara trasera C3.	113
Figura 135	Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PP, PPD1C y PR1C_R4, cara delantera C1.	113
Figura 136	Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PP, PPD1C y PR1C_R4, cara trasera C3.	114

Figura 137	Pilares PPDP tras el ensayo a compresión. Fisuración caras C1 y C3 respectivamente.	115
Figura 138	Pilares PPDP tras el ensayo a compresión. Fisuración caras laterales C2 y C4 respectivamente	115
Figura 139	Gráfica Fuerza-deformación de la Cara C1 correspondiente a los pilares P34, P36 y P37.	116
Figura 140	Gráfica Fuerza-deformación de la Cara C1 correspondiente a los pilares P34, P36 y P37.	116
Figura 141	Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PPDP.	117
Figura 142	Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PP y PPDP.	117
Figura 143	Pilares PRP_R3+PU tras el ensayo a compresión. Fisuración caras C1 y C3 respectivamente.	118
Figura 144	Pilares PRP_R3+PU tras el ensayo a compresión. Fisuración caras laterales C2 y C4 respectivamente	118
Figura 145	Gráfica Fuerza-deformación de la cara C1 correspondiente a los pilares P43, P44 y P47	119
Figura 146	Gráfica Fuerza-deformación de la cara C3 correspondiente a los pilares P43, P44 y P47.	119
Figura 147	Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PRP_R3+PU, caras C1 y C3.	120
Figura 148	Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PPDP y PRP_R3+PU, cara delantera C1.	120
Figura 149	Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PPDP y PRP_R3+PU, cara trasera C3.	121
Figura 150	Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PPDP y PRP_R3+PU.	121
Figura 151	Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PP, PPDP y PRP_R3+PU, cara delantera C1	122
Figura 152	Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PP, PPDP y PRP_R3+PU, cara trasera C3.	122
Figura 153	Pilares PRP_R3 tras el ensayo a compresión. Fisuración caras C1 y C3 respectivamente	123
Figura 154	Pilares PRP_R3 tras el ensayo a compresión. Fisuración caras laterales, C2 y C4 respectivamente	123
Figura 155	Gráfica Fuerza-deformación de la Cara C1 correspondiente a los pilares P32, P35 y P38.	124
Figura 156	Gráfica Fuerza-deformación de la Cara C3 correspondiente a los pilares P32, P35 y P38.	124
Figura 157	Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PRP_R3.	125
Figura 158	Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PPDP y PRP_R3, cara delantera C1.	125
Figura 159	Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PPDP y PRP_R3, cara trasera C3.	126
Figura 160	Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PP, PPDP y PRP_R3, cara delantera C1.	126
Figura 161	Gráfica Fuerza-deformación medias de los pilares PP, PPDP y PRP_R3, cara trasera C3.	127

Figura 162	Pilares PRP_R4+PU tras el ensayo a compresión. Fisuración caras C1 y C3 respectivamente	127
Figura 163	Pilares PRP_R4+PU tras el ensayo a compresión. Fisuración caras laterales C2 y C4 respectivamente	128
Figura 164	Gráficas fuerza-deformación de la Cara C1 correspondiente a los pilares P39, P40 y P42	128
Figura 165	Gráficas fuerza-deformación de la Cara C3 correspondiente a los pilares P39, P40 y P42	129
Figura 166	Gráficas fuerza-deformación medias de los pilares PRP_R4+PU.	129
Figura 167	Gráficas fuerza-deformación medias de los pilares PPDP y PRP_R4+PU, cara delantera C1	130
Figura 168	Gráficas fuerza-deformación medias de los pilares PPDP y PRP_R4+PU, cara trasera C3	130
Figura 169	Gráficas fuerza-deformación medias de los pilares PP, PPDP y PRP_R4+PU, cara delantera C1.	131
Figura 170	Gráficas fuerza-deformación medias de los pilares PP, PPDP y PRP_R4+PU, cara trasera C3.	131
Figura 171	Pilares PRP_R4 tras el ensayo a compresión. Fisuración caras C1 y C3 respectivamente	132
Figura 172	Pilares PRP_R4 tras el ensayo a compresión. Fisuración caras laterales C2 y C4 respectivamente	132
Figura 173	Pilares PRP_R4 tras el ensayo a compresión. Detalle del desprendimiento de la capa de reparación tras el ensayo.	133
Figura 174	Gráficas fuerza-deformación de la Cara C1 correspondiente a los pilares P45, P46 y P48	133
Figura 175	Gráficas fuerza-deformación de la Cara C3 correspondiente a los pilares P45, P46 y P48	134
Figura 176	Gráficas fuerza-deformación medias de los pilares PRP_R4.	134
Figura 177	Gráficas fuerza-deformación medias de los pilares PPDP y PRP_R4, cara delantera C1.	135
Figura 178	Gráficas fuerza-deformación medias de los pilares PPDP y PRP_R4, cara trasera C3	135
Figura 179	Gráficas fuerza-deformación medias de los pilares PP, PPDP y PRP_R4, cara delantera C1	136
Figura 180	Gráficas fuerza-deformación medias de los pilares PP, PPDP y PRP_R4, cara trasera C3	136
Figura 181	Gráfica fuerza-deformación pilares PP-PPD4C.	140
Figura 182	a) Detalle del fallo en las juntas frías tras el ensayo. b) detalle de la formación de la junta fría entre las caras ortogonales adyacentes, durante la reparación.	141
Figura 183	Gráfica tensión-deformación para los pilares PP, PPD4C y PR4C_R3+PU.	141
Figura 184	Gráfica tensión-deformación para los pilares PP, PPD4C y PR4C_R3.	142
Figura 185	Gráfica tensión-deformación para los pilares PR4C_R3 y PR4C_R3+PU.	143

Figura 186	Gráfica tensión-deformación para los pilares PP, PPD4C y PR4C_R4+PU.	144
Figura 187	Gráfica tensión-deformación para los pilares PR4C_R3+PU y PR4C_R4+PU	145
Figura 188	Gráfica tensión-deformación para los pilares PP, PPD4C y PR4C_R4	146
Figura 189	Gráfica tensión-deformación para los pilares PR4C_R4+PU y PR4C_R4	147
Figura 190	Gráfica tensión-deformación para los pilares PR4C_R3, PR4C_R3+PU, PR4C_R4+PU y PR4C_R4.	148
Figura 191	Gráfica tensión-deformación para los pilares PP, PPD4C, PR4C_R3, PR4C_R3+PU, PR4C_R4+PU y PR4C_R4	148
Figura 192	Gráfica fuerza-deformación pilares PP y PPD1C.	149
Figura 193	Gráfica fuerza-deformación pilares PR1C_R3+PU.	150
Figura 194	Gráfica fuerza-deformación pilares PPD1C y PR1C_R3+PU.	150
Figura 195	Gráfica fuerza-deformación pilares PP, PPD1C y PR1C_R3+PU.	151
Figura 196	Detalle de la fisuración interna en la capa de reparación	152
Figura 197	Gráfica fuerza-deformación pilares PR1C_R3	152
Figura 198	Gráfica fuerza-deformación pilares PPD1C y PR1C_R3.	153
Figura 199	Gráfica fuerza-deformación pilares PP, PPD1C y PR1C_R3	153
Figura 200	Gráfica fuerza-deformación pilares PR1C_R3+PU y PR1C_R3.	154
Figura 201	Gráfica fuerza-deformación pilares PR1C_R3+PU y PR1C_R3 (Cara C3).	154
Figura 202	Gráfica fuerza-deformación pilares PR1C_R4+PU.	155
Figura 203	Gráfica fuerza-deformación pilares PPD1C y PR1C_R4+PU.	155
Figura 204	Gráfica fuerza-deformación pilares PP, PPD1C y PR1C_R4+PU.	156
Figura 205	Gráfica fuerza-deformación pilares PR1C_R4.	157
Figura 206	Gráfica fuerza-deformación pilares PPD1C y PR1C_R4.	157
Figura 207	Gráfica fuerza-deformación pilares PP, PPD1C y PR1C_R4.	158
Figura 208	Gráfica fuerza-deformación pilares PR1C_R4+PU y PR1C_R4	158
Figura 209	Conjunto de gráficas fuerza-deformación PR1C	159
Figura 210	Gráfica fuerza-deformación pilares PP y PPDP.	161
Figura 211	Gráfica fuerza-deformación pilares PRP_R3+PU.	162
Figura 212	Gráfica fuerza-deformación pilares PPDP y PRP_R3+PU.	162
Figura 213	Gráfica fuerza-deformación pilares PP, PPDP y PRP_R3+PU.	163
Figura 214	Detalle de la fisuración en el lateral del parcheo.	163
Figura 215	Gráfica fuerza-deformación pilares PRP_R3.	164
Figura 216	Gráfica fuerza-deformación pilares PPDP y PRP_R3.	165
Figura 217	Gráfica fuerza-deformación pilares PP, PPDP y PRP_R3	165
Figura 218	Gráfica fuerza-deformación pilares PRP_R3+PU y PRP_R3.	166
Figura 219	Gráfica fuerza-deformación pilares PRP_R4+PU.	167
Figura 220	Gráfica fuerza-deformación pilares PPDP y PRP_R4+PU.	167
Figura 221	Gráfica fuerza-deformación pilares PP, PPDP y PRP_R4+PU.	168

Figura 222	Gráfica fuerza-deformación pilares PRP_R4.	169
Figura 223	Gráfica fuerza-deformación pilares PPDP y PRP_R4	169
Figura 224	Gráfica fuerza-deformación pilares PP, PPDP y PRP_R4.	170
Figura 225	Gráfica fuerza-deformación pilares PRP_R4+PU y PRP_R4.	170
Figura 226	Gráfica fuerza-deformación pilares PRP	171

Tabla 1	Requerimientos generales de los Materiales de Reparación para la Compatibilidad (Emberson y Mays, 1990)	22
Tabla 2	Programa experimental, Shambira y Nounu (2000)	27
Tabla 3a	Valores de las resistencias a compresión de los pilares ensayados, Aurrekoetchea (2009)	31
Tabla 3b	Valores de las resistencias a compresión de los pilares ensayados, Aurrekoetchea (2009)	32
Tabla 4	Propiedades mecánicas, físicas y químicas de los materiales, Francesca da Porto et al. (2012).	35
Tabla 5	Resultados de los ensayos a compresión, Francesca da Porto et al. (2012).	36
Tabla 6	Dosificación del hormigón para los ensayos previos.	50
Tabla 7	Esquema de las variables.	53
Tabla 8	Nomenclatura de las probetas.	64
Tabla 9	Esquema tipo de probeta, variable de estudio y enumeración de las probetas según el orden de hormigonado.	64
Tabla 10	Resultados N_u y valores de eficiencia.	138
Tabla 11	Esquema eficiencia de la reparación para los pilares reparados a 1 cara, PR1C.	160
Tabla 12	Esquema eficiencia de la reparación para los pilares reparados parcheo, PRP.	172
Tabla 13	Valores de la eficacia de la reparación para los tres grados de reparación.	173