# ASOCIACIÓN DE EMPRESAS DE TECNOLOGÍA DEL SUELO Y DEL SUBSUELO (AETESS)

# ESTUDIO EXPERIMENTAL SOBRE EL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE UNIONES DE MICROPILOTES

Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras.
E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid

**FUNDACIÓN AGUSTÍN DE BETANCOURT**
**JULIO 2009**

**ÍNDICE**

1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES ..... 2
2. PLANTEAMIENTO Y OBJETIVOS ..... 4
3. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS ENSAYOS ..... 7
3.1. Formato de los ensayos ..... 7
3.2. Preparación de los tubos ..... 8
3.3. Materiales ..... 11
3.4. Instrumentación y control ..... 11
4. CONSIDERACIONES GEOMÉTRICAS ..... 14
5. RESULTADOS OBTENIDOS ..... 16
5.1. Generalidades ..... 16
5.2. Tubos con diámetro exterior de 88.9 mm ..... 16
5.3. Tubos con diámetro exterior de 114.3 mm ..... 18
5.4. Tubos con diámetro exterior de 139.7 mm ..... 20
6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS ..... 22
6.1. Generalidades ..... 22
6.2. Resistencia de los ensayos con unión macho - hembra ..... 24
6.3. Resistencia de los ensayos con unión con manguito exterior ..... 26
6.4. Comportamiento en servicio del tubo en función del tipo de unión ..... 29
7. CONCLUSIONES ..... 31

APÉNDICE A ..... 34
A.1. Diagramas momento – flecha en centro de vano (tubos con diámetro exterior de 88.9 mm) ..... 35
A.2. Diagramas momento – flecha en centro de vano (tubos con diámetro exterior de 114.3 mm) ..... 36
A.3. Diagramas momento – flecha en centro de vano (tubos con diámetro exterior de 139.7 mm) ..... 37
A.4. Diagramas momento – deformación (tubos con diámetro exterior de 88.9 mm) ..... 38
A.5. Diagramas momento – deformación (tubos con diámetro exterior de 114.3 mm) ..... 40
A.6. Diagramas momento – deformación (tubos con diámetro exterior de 139.7 mm) ..... 43

APÉNDICE B ..... 45
B.1. Tubos 88,9 / xx / I ..... 46
B.2. Tubos 88,9 / xx / II ..... 48
B.3. Tubos 114,3 / xx / III ..... 50
B.4. Tubos 114,3 / xx / IV ..... 53
B.5. Tubos 139,7 / xx / V ..... 57

# 1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

El empleo de micropilotes perforados en el terreno, armados mediante tubería de acero e inyectados con lechada o mortero de cemento, es una técnica muy extendida tanto en obra civil como en edificación para la ejecución de cimentaciones profundas y pantallas flexibles de contención.

La necesidad de ejecutar dichos micropilotes con longitudes importantes supone la utilización de sistemas de unión cuando la longitud de la armadura tubular es, en general, superior a doce metros. En ocasiones este hecho está condicionado por los fuertes condicionantes de espacio y gálibo en los que se desarrollan los trabajos de micropilotaje, los cuales pueden impedir el empleo de medios mecánicos auxiliares tales como grúas para la instalación de las armaduras de un solo tramo dentro de las perforaciones. La utilización de sistemas de unión permite obtener dichas longitudes de micropilote mediante la conexión entre tramos sucesivos de longitudes menores mucho más manejables dentro de la perforación, bien de forma manual o mediante cargadores automáticos.

Existen diferentes medios de unión entre los distintos tramos de micropilotes, siendo los más habituales las uniones roscadas, entre las cuales cabe destacar, por ser las más frecuentes, las uniones machihembradas (M-H), y las uniones macho-macho con manguito exterior (M-M-Mext).

En la actualidad, no existe una normativa de obligado cumplimiento a nivel nacional para el diseño de las uniones de micropilotes, tomándose como referencia habitual diversas guías y recomendaciones que tienen un campo de aplicación muy específico, no siendo aplicables con carácter general.

Conscientes de esta realidad, la Asociación de Empresas de la Tecnología del Suelo y del Subsuelo (AETESS), a través de su Comité Técnico, decidió realizar un estudio experimental sobre la capacidad a flexión de las uniones roscadas, tanto machihembradas como con manguito exterior, al ser esta característica resistente la más determinante en gran número de aplicaciones de los micropilotes.

Debido a la gran variedad geométrica en las armaduras tubulares y a la profusa utilización de aceros de diversa calidad, se planteó un amplio programa de ensayos que permitiera determinar tanto la resistencia real de las uniones ensayadas, como obtener correlaciones entre la resistencia de los tubos continuos sin unión y las diferentes configuraciones de unión empleadas, analizando las posibles opciones de mejora a aplicar tanto en el diseño de micropilotes a flexión, como en el propio diseño de los sistemas de unión.

Para el desarrollo del estudio experimental AETESS ha firmado un Convenio de Investigación con la Fundación Agustín de Betancourt (FAB), que es una Fundación Cultural Privada, de carácter permanente, sin ánimo de lucro, entre cuyos fines fundacionales figura el de promover la investigación científica y técnica en el campo de la ingeniería civil. La FAB se encuentra adscrita a la E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid.

El equipo encargado de la realización del estudio experimental está compuesto por personal docente e investigador del Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras de la UPM. Dicho equipo de trabajo está dirigido y coordinado por el Prof. Dr. D. Pablo de la Fuente Martín, y con la participación directa del Maestro de Laboratorio José Torrico Narváez y el Dr. Carlos Zanuy Sánchez. Por parte de AETESS, el Comité Técnico creó un grupo de seguimiento para el estudio experimental.

En enero de 2009 se culminó la primera fase del trabajo, y se presentó un informe preliminar con los resultados de 14 ensayos.

El presente informe constituye el informe definitivo, con los resultados de todos los ensayos de la campaña. En total se han realizado 40 ensayos, número algo superior al inicialmente previsto.

## 2. PLANTEAMIENTO Y OBJETIVOS

Como se ha expuesto en la introducción, la utilización de micropilotes formados por una armadura tubular de acero rellena de lechada de cemento es una técnica muy extendida tanto en obra civil como en edificación para la ejecución de cimentaciones o elementos de pantalla de retención de tierras. La necesidad de ejecutar longitudes considerables de micropilotes conlleva tener que unir tramos fabricados en longitudes más cortas. Para unir los tramos de micropilotes existen diferentes procedimientos, entre los que destacan las uniones roscadas macho-hembra y las uniones con manguito exterior enroscado en dos terminaciones macho.

Las zonas de unión entre distintos tramos de armadura del micropilote pueden representar un punto con una resistencia menor que la que corresponde al micropilote continuo. El número de trabajos existentes para determinar la resistencia a flexión de la zona de unión es bastante bajo en comparación a los de otros sistemas estructurales, por lo que es necesario un esfuerzo investigador que ayude en la fase de dimensionamiento de la unión y sirva para la mejora de los sistemas existentes. La presente investigación tiene como objetivo profundizar en el conocimiento de la resistencia de los dos sistemas referidos de unión entre micropilotes. Para ello se ha establecido una campaña experimental, formada por 40 ensayos a flexión en tubos que constituyen la armadura tubular de micropilotes. La campaña contempla tubos de tres diámetros diferentes (88.9, 114.3 y 139.7 mm), dos aceros diferentes (N80, en su variedad comercial MPV-80, y St-52), y dos configuraciones para la unión: además de los tubos continuos, se han ensayado tubos con unión macho-hembra y tubos unidos con manguito exterior. Todos los tubos ensayados se encuentran rellenos con una lechada de cemento.

Los objetivos concretos de la investigación son los siguientes:

- Estudio de la influencia de los distintos tipos de unión de forma comparativa con los resultados teóricos del tubo hueco continuo. Esto incluye la incidencia en cuanto a la resistencia y al comportamiento en servicio (evolución de rigidez y deformabilidad).

- Dentro de cada tipo de ensayo, análisis de los diferentes parámetros que intervienen en el mismo, tanto en la resistencia como en la respuesta deformacional. Entre otras variables, se estudia la influencia del tipo de acero, la sección, la altura y longitud de rosca, el porcentaje de inserción de juntas y las características del manguito.

- Conclusiones respecto de los resultados experimentales y su comparación con los resultados teóricos del tubo hueco continúo. A partir de las conclusiones, se indican posibles recomendaciones de mejora de las uniones analizadas.

La Tabla 1 presenta una visión general de la campaña experimental. La denominación de ensayos como tipo A y B, que obedece a diferente instrumentación, se explica en los apartados siguientes.

La nomenclatura empleada para designar cada ensayo obedece a la siguiente regla:

$$114{,}3 \,/\, 2T \,/\, IV \,/\, 1 \qquad (1)$$

De (1), el primer número indica el diámetro exterior de la probeta (por ejemplo, 114,3 mm); el segundo término refleja si hay unión y su tipo: 2T indica que la probeta se ha conformado uniendo dos tramos con unión macho-hembra; 2TM refleja que la probeta está formada por dos tramos con extremo macho más un manguito exterior, y C indica que la probeta es continua; el tercer número muestra la colada: las coladas I, IV y V son de acero N80 (MPV-80), y las coladas II y III son de acero St-52. Finalmente, el último número indica el orden de probeta dentro de cada grupo. El listado completo de ensayos es el siguiente:

- Tubos continuos:

  88,9 / C / I / 1
  88,9 / C / I / 2
  88,9 / C / I / 4*
  88,9 / C / II/ 1
  88,9 / C / II / 2
  114,3 / C / III / 1
  114,3 / C / III / 2
  114,3 / C / IV / 1
  114,3 / C / IV / 2
  114,3 / C / IV / 4*
  139,7 / C / V / 1
  139,7 / C / V / 2

- Tubos con unión machihembrada:

  88,9 / 2T / I / 1
  88,9 / 2T / I / 2
  88,9 / 2T / I / 3*
  114,3 / 2T / III / 1
  114,3 / 2T / III / 2
  114,3 / 2T / III / 3*
  114,3 / 2T / IV / 1
  114,3 / 2T / IV / 2
  114,3 / 2T / IV / 3*
  114,3 / 2T / IV / 4*
  139,7 / 2T / V / 1
  139,7 / 2T / V / 2
  139,7 / 2T / V / 3*
  139,7 / 2T / V / 4

- Tubos con manguito exterior en la unión:

  88,9 / 2TM / II / 1
  88,9 / 2TM / II / 2
  88,9 / 2TM / II / 3*
  114,3 / 2TM / III / 1
  114,3 / 2TM / III / 2
  114,3 / 2TM / III / 3*
  114,3 / 2TM / IV / 1
  114,3 / 2TM / IV / 2
  114,3 / 2TM / IV / 3
  114,3 / 2TM / IV / 4*
  139,7 / 2TM / V / 1
  139,7 / 2TM / V / 2
  139,7 / 2TM / V / 3*
  139,7 / 2TM / V / 4*

Las probetas señaladas con * son tipo A en cuanto a instrumentación, de acuerdo a la Tabla 1.

| SECCIÓN | ACERO | UNIÓN | ENSAYOS TIPO A | ENSAYOS TIPO B |
|---|---|---|---|---|
| 88.9 x 6.3 mm | N80 (MPV-80) | Tubo continuo | 1 | 2 |
| | St-52 | Tubo continuo | | 2 |
| | N80 (MPV-80) | M-H | 1 | 2 |
| | St-52 | M-M-ext | 1 | 2 |
| 114.3 x 8.8 mm | St-52 | Tubo continuo | | 2 |
| | | M-M-ext | 1 | 2 |
| | | M-H | 1 | 2 |
| | N80 (MPV-80) | Tubo continuo | 1 | 2 |
| | | M-M-ext | 2 | 2 |
| | | M-H | 2 | 2 |
| 139.7 x 8.8 mm | N80 (MPV-80) | Tubo continuo | | 2 |
| | | M-M-ext | 1 | 3 |
| | | M-H | 1 | 3 |

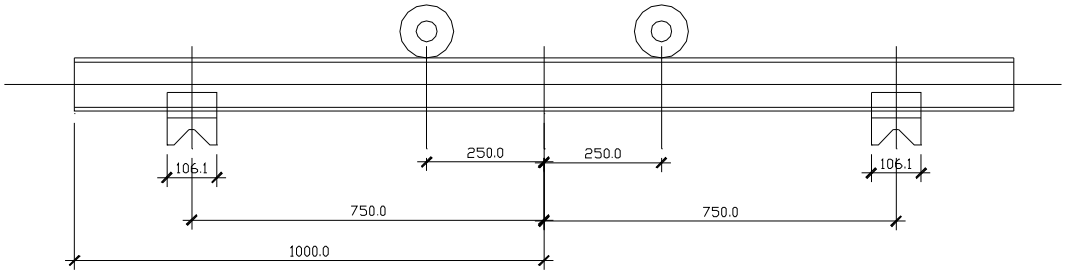
**Tabla 1** Cuadro general de los ensayos. M-H: unión machihembrada; M-M-ext: unión con manguito exterior.

# 3. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS ENSAYOS

## 3.1. Formato de los ensayos

Los ensayos se han realizado en el Laboratorio de Estructuras de la E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid. De acuerdo con el esquema de la Fig. 1a, en todos los ensayos se han considerado dos apoyos para el tubo y la actuación de dos cargas puntuales iguales, de tal forma que en el tercio central de la luz entre apoyos se produjese una situación de flexión pura. La luz entre apoyos es de 1.50 m, existiendo entre los puntos de aplicación de la carga una longitud de 0.50 m de momento constante. Las probetas tienen una longitud total de 2.00 m, volando, por tanto, 0.25 m a cada lado.

La carga total se aplica a través de dos cilindros metálicos transversales mediante una prensa tipo Amsler con capacidad de 5000 kN. Para los puntos de apoyo de los extremos de las probetas se han diseñado unos aparatos en forma de cuña que apoyan sobre dos cilindros transversales, de forma que se permite el giro libre. La Fig. 1b muestra una imagen general del ensayo dentro de la prensa.




(a)

(b)

**Fig. 1** (a) Esquema del ensayo (cotas en mm); (b) Vista general de un ensayo en el laboratorio.

En los ensayos la carga aumenta de forma progresiva hasta alcanzar la rotura o bien grandes deformaciones, como así ha sido en los ensayos de tubos sin unión en los que se producen deformaciones elevadas durante el proceso de plastificación. En estos últimos ensayos, denominados, xx / C / yy / z, la carga se ha detenido en un valor de la deformación suficiente para determinar su resistencia dentro de la rama plástica, y de forma que no se comprometiera la estabilidad de los dispositivos de medida empleados. La carga se ha aplicado de forma

monótona creciente en pequeños escalones, adaptados a la resistencia última de los distintos tubos y uniones ensayados.

### 3.2. Preparación de los tubos

En este apartado se describe el proceso de preparación de las probetas (tubos) antes de la realización de cada ensayo. Tras la recepción de los tubos huecos, se procedió a ordenar e identificar cada uno de ellos, mediante impresión en los extremos de forma mecánica y mediante rotulador (Fig. 2).

**Fig. 2** Identificación mecánica y mediante rotulador de los tubos.

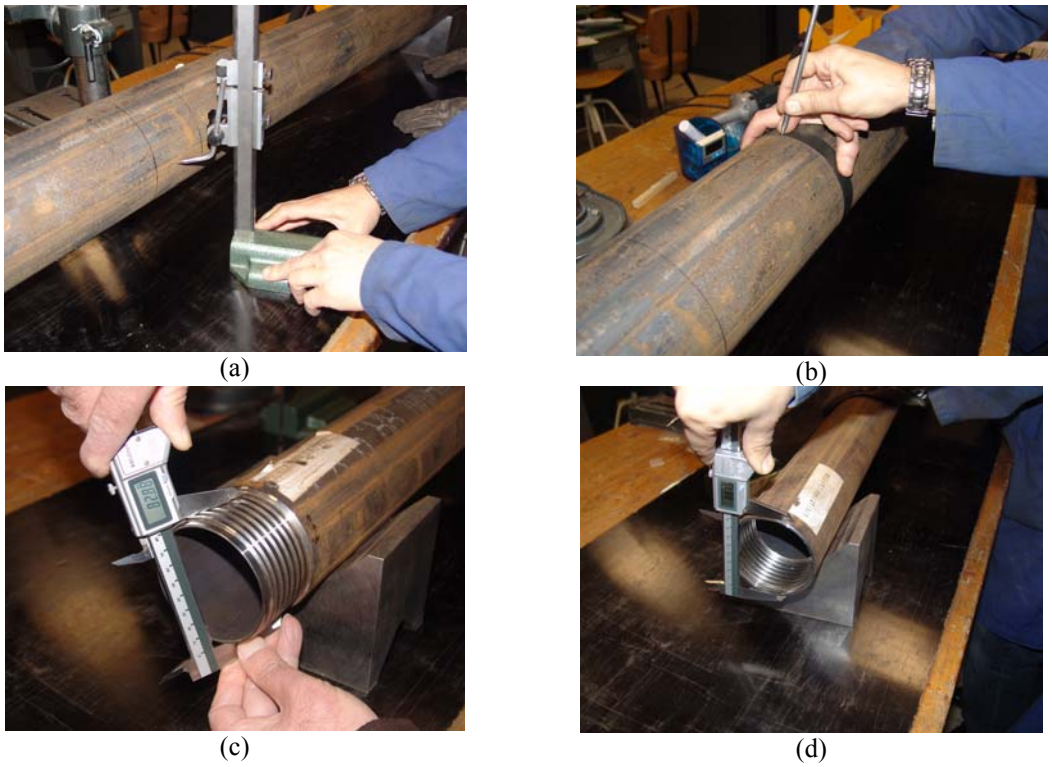



**Fig. 3** (a) Trazado de ejes del tubo; (b) Trazado de puntos de apoyo; (c) – (d) Calibración de la geometría de las probetas.

En segundo lugar se procedió al trazado de los ejes de las probetas mediante gramil, al igual que los puntos de apoyo y de aplicación de las cargas en el ensayo. En la Fig. 3a-b se observan diferentes instantes del trazado de los ejes y los puntos característicos. A continuación se

calibraron las medidas características de las probetas, incluyendo la zona de unión con gran detalle (Fig. 3c-d). En el capítulo 4 se hace referencia a este paso de calibración geométrica.

En los tubos en los que así era necesario (denominados tipo A en la Tabla 1; ver también apartado 3.4) se procedió a continuación a la colocación de las galgas extensométricas para la medida de deformaciones en el ensayo. Con respecto a las galgas que se colocan en el interior de los tubos, éstas se situaron en la superficie interna de una de las partes de la probeta antes de proceder a la unión, quedando las galgas interiores en la zona donde existe rosca. Para evitar que estas galgas interiores se dañaran durante el hormigonado de las probetas se instaló sobre ellas una protección tipo M-Coat F de Vishay, formada por unas capas de caucho y neopreno. En la Fig. 4 se puede observar el proceso de colocación de las galgas interiores, así como el estado de las mismas tras la rotura de una de las probetas en las que estaban instaladas, donde se comprueba que no sufrieron daños durante el ensayo.

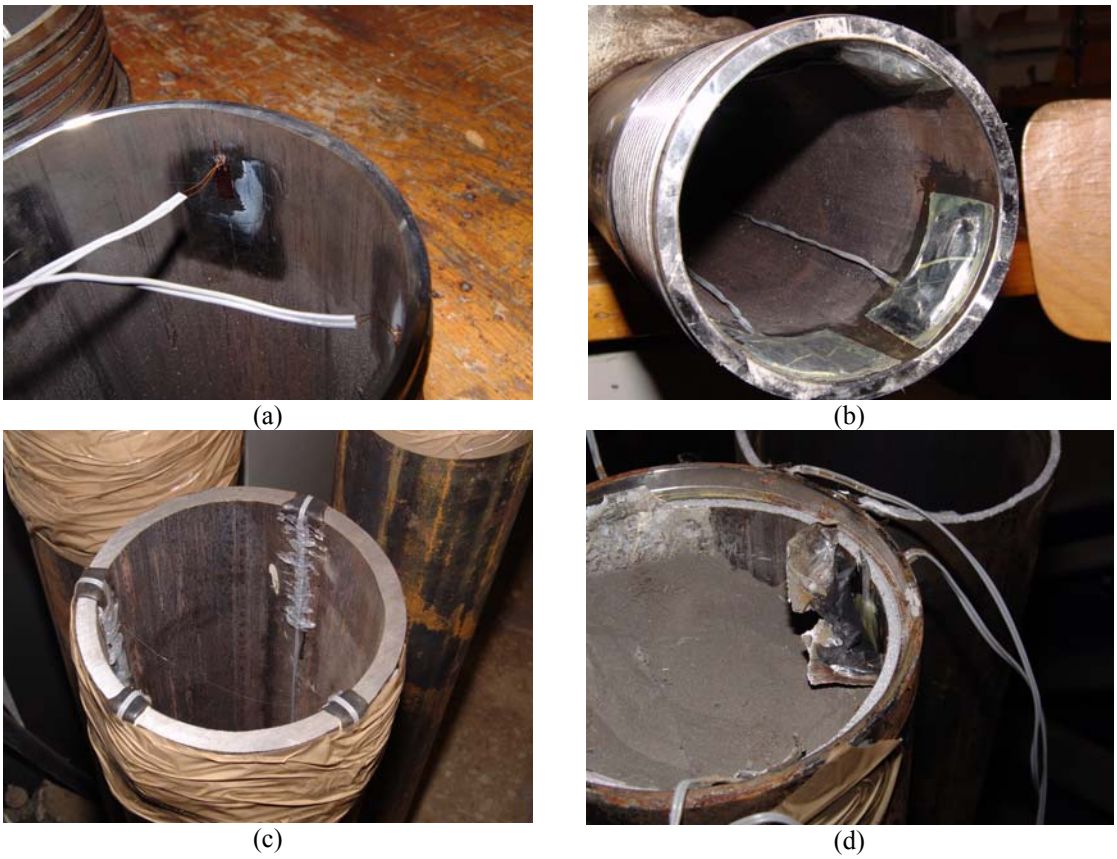



**Fig. 4** Colocación de galgas extensométricas en el interior de un tubo: (a) Galgas pegadas en la superficie interna; (b) Galgas con la capa de protección; (c) Salida de los cables por un extremo de la probeta; (d) Estado de las galgas tras la rotura de uno de los ensayos, al retirar manualmente la capa de protección.

En aquellos tubos en los que existía unión, se procedió a ejecutar la misma a tope. Para ello se empleó una llave de cadena, que asegurara el contacto entre los bordes de la unión (Fig. 5a). Una vez unidos los tramos de la unión, todos los tubos que iban a ser hormigonados se protegieron con una capa de plástico (Fig. 5b). Así se aseguraba que el hormigón no ensuciara las superficies ni dañara las galgas exteriores en las probetas que disponían de ellas.

(a)

(b)

**Fig. 5** (a) Unión de los dos tramos de micropilote mediante llave de cadena; (b) Protección exterior de las probetas.

En la Fig. 6 se han representado diferentes instantes del proceso de hormigonado. Para ello las probetas se colocaron en posición vertical, sobre una rejilla metálica especialmente preparada al efecto. La lechada de cemento se vertió empleando un tubo para asegurar que se rellenara todo el espacio interior. El tiempo que se dejó endurecer la lechada hasta la realización del primer ensayo fue de al menos catorce días.

(a)

(b)

(c)

(d)

**Fig. 6** (a) Disposición de las probetas a hormigonar; (b) Fabricación de la lechada; (c) Vertido de la lechada; (d) Estado de las probetas rellenas con la lechada fresca.

Antes de empezar cada ensayo se colocaron los aparatos de apoyo (Fig. 7a). Sus superficies se engrasaron para permitir el giro y el deslizamiento. Después se colocó cada probeta para proceder al ensayo (Fig. 7b).

(a)

(b)

**Fig. 7** (a) Disposición de los aparatos de apoyo; (b) Colocación de la probeta para ensayar.

### 3.3. Materiales

El acero empleado en las probetas de la campaña experimental es de dos tipos, N80 (en su variedad comercial MPV-80) y St-52. En los casos en los que la unión se realiza mediante manguito exterior, el material empleado en el manguito es de calidad igual o superior al del tubo. En particular, los manguitos empleados siempre están fabricados con acero N80, independientemente de que el acero de los tubos que une sea del tipo St-52, de acuerdo con la información facilitada por AETESS. Las propiedades mecánicas de los aceros se indican en la Tabla 2. En dicha tabla se indican los valores característicos de cada acero, así como los valores medios obtenidos en probetas normalizadas que han sido facilitados por AETESS.

| Colada | Tipo de acero | Límite elástico, $f_{y,0.2}$ (MPa) | Límite último, $f_u$ (MPa) | Deformación última, $\varepsilon_u$ (%) |
|---|---|---|---|---|
| I | N80 (MPV-80) | 560 (661) | 690 (939) | 10.0 (20.2) |
| II | St-52 | 360 (n.d.) | 520 (n.d.) | 22.0 (n.d.) |
| III | St-52 | 360 (n.d.) | 520 (n.d.) | 22.0 (n.d) |
| IV | N80 (MPV-80) | 560 (594) | 690 (873) | 10.0 (15.2) |
| V | N80 (MPV-80) | 560 (576) | 690 (867) | 10.0 (14.0) |

**Tabla 2** Propiedades mecánicas de los aceros empleados en los ensayos. Entre paréntesis los resultados medios en probetas sometidas a tracción; n.d. significa no disponible.

La lechada con la que se rellenan las probetas es de cemento y agua. El cemento es CEM IV/B P-V 32,5 N. La composición de la lechada es 2:1 (cemento: agua) en peso. Se realizaron ensayos de compresión en probeta cilíndrica de 150 x 300 mm a dos edades diferentes, siendo los resultados los indicados en la Tabla 3.

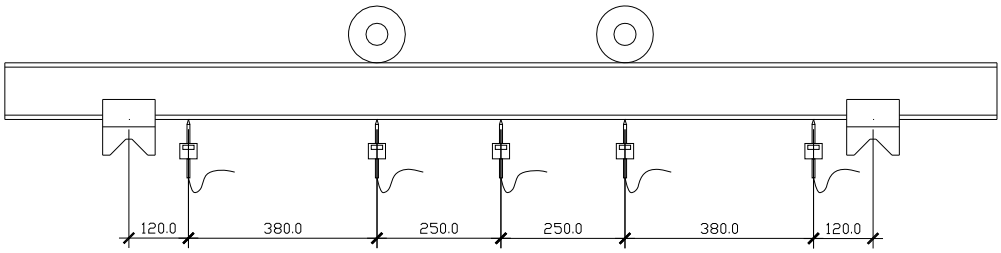
| Edad de la lechada (días) | Número de ensayos | Resistencia media (MPa) |
|---|---|---|
| 10 | 2 | 4.76 |
| 22 | 2 | 16.67 |

**Tabla 3** Resultado de los ensayos a compresión en probetas cilíndricas

### 3.4. Instrumentación y control

Los ensayos se realizan mediante control de la fuerza, la cual se aplica por medio de una prensa Amsler con una capacidad de 5000 kN. Para conseguir una fiabilidad óptima en el control de la carga aplicada en el rango de trabajo de los ensayos (0-500 kN), se ha colocado una célula de carga tipo AEP - TC4, con linealidad menor del 0.05%.

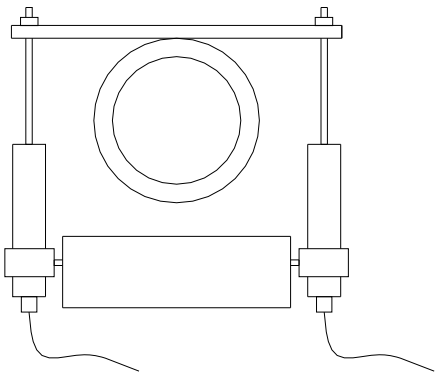
Durante el ensayo se miden las flechas en cinco puntos de la probeta sometida a flexión, tal y como se indica en la Fig. 8. Para ello se emplean cinco flexímetros electrónicos de Mitutoyo con sistema de transmisión de datos FlexPort. Dado que la forma de rotura de algunas probetas es frágil, la medición de la flecha en el centro de vano se completa con la adquirida por dos transductores de desplazamiento LVDT, tipo Monitran, con 200 mm de rango y linealidad del 0.5% (ver Fig. 9). De esta forma, cuando la carga aplicada se encuentra próxima a la resistencia de la pieza ensayada, se retiran los flexímetros para evitar que se dañen y la flecha se continúa midiendo con los LVDT.




(a)

(b)

**Fig. 8** (a) Esquema de flexímetros (cotas en mm); (b) Imagen de los flexímetros colocados sobre su bastidor.



(a)

(b)

**Fig. 9** (a) Esquema de LVDT; (b) Imagen de los LVDT colocados.

Los ensayos denominados tipo B en la Tabla 1 tienen la instrumentación descrita hasta este punto, es decir, con medida de flechas. Los ensayos denominados tipo A cuentan adicionalmente con galgas extensométricas para medir deformaciones. Las galgas se han

colocado en tres secciones, denominadas 1, 2 y 3, con cinco bandas por sección de acuerdo al esquema indicado en la Fig. 10a.

La sección 2 se encuentra en la zona de unión. En ellas las galgas se han colocado exactamente a 20 mm del borde de la unión. Es decir, en las uniones con macho – hembra, estas galgas se sitúan a 20 mm del inicio de la rosca del macho, o el final de la mitad hembra; y en los tubos con manguito exterior a 20 mm del contacto de los dos machos interiores. Interiormente también se colocan cuatro bandas extensométricas en la sección 2, tal y como muestra la Fig. 10b. Todas las galgas miden deformaciones normales, excepto las galgas interiores G42 y G44, que se han colocado verticalmente para detectar una posible deformación transversal en la zona de unión. Evidentemente, aunque se denominen como tipo A, los tubos continuos 88.9/C/I/4 y 114/C/IV/4 no tienen galgas interiores.

Todas las galgas empleadas son de 6 mm de longitud, para resistencia de 120 ohmios, tipo FLA-6-11 de Tokio Sokki.

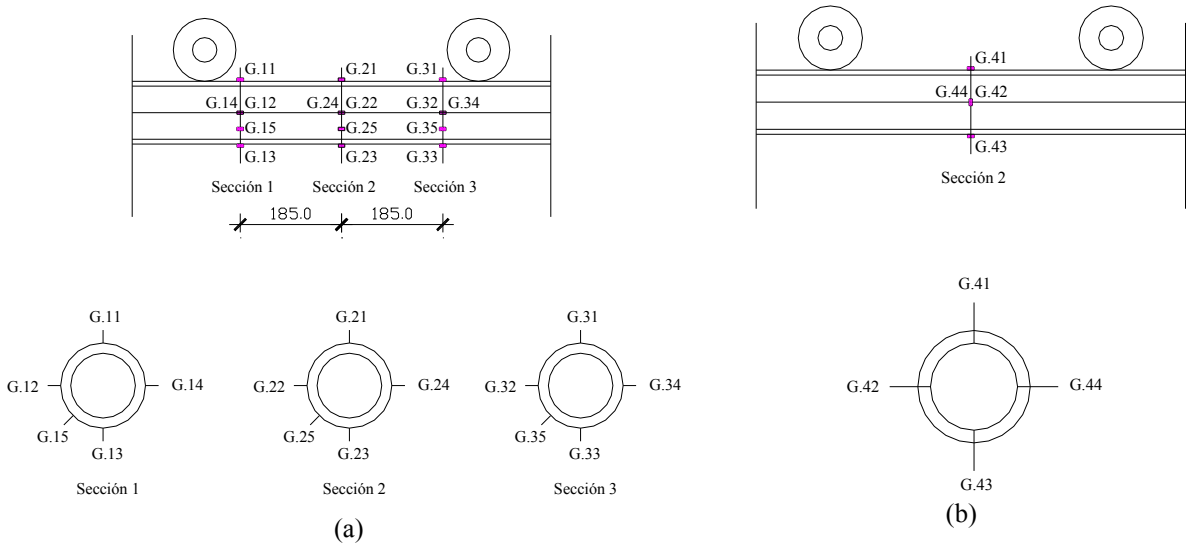
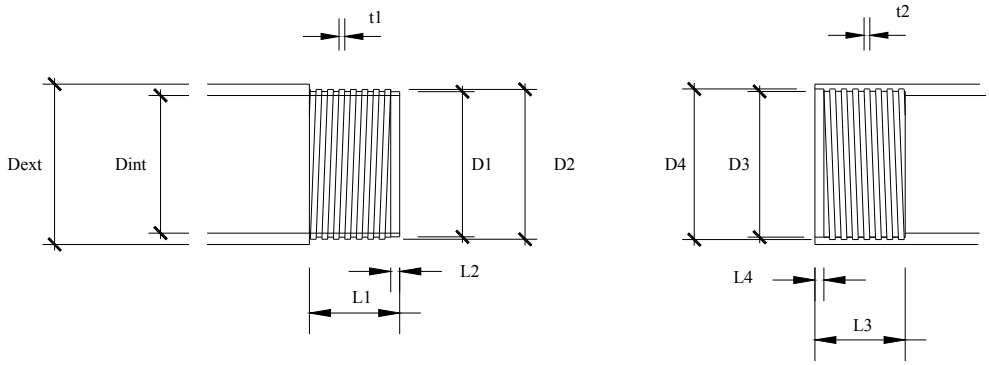


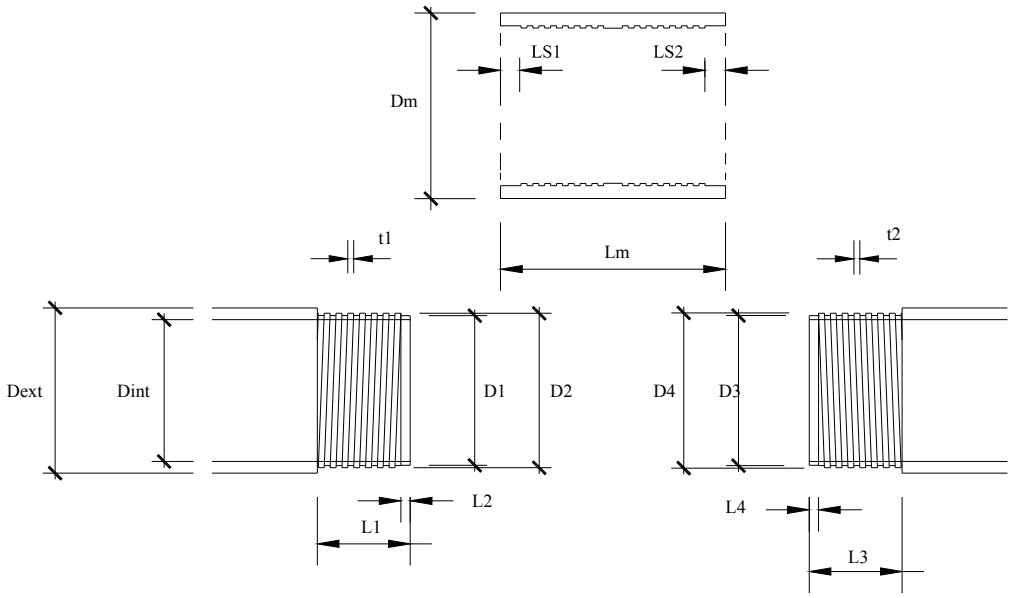

**Fig. 10** (a) Esquema de disposición de las galgas exteriores; (b) Esquema de disposición de las galgas interiores.

## 4. CONSIDERACIONES GEOMÉTRICAS

Como se ha indicado en el apartado 3.2, antes de la realización de los ensayos se ha comprobado la geometría de la unión. En este sentido, la Tabla 4 indica la comparación de las dimensiones previamente especificadas de cada detalle con los valores medidos en las probetas con unión macho - hembra. Estos valores se representan en la tabla entre paréntesis por medio del valor medio y la desviación típica. Los parámetros medidos hacen referencia a las dimensiones especificadas en la Fig. 11a. Lo mismo se ha hecho con las uniones con manguito exterior (Fig. 11b y Tabla 5).




(a)




(b)

**Fig. 11** Parámetros geométricos revisados antes de los ensayos: (a) Unión macho – hembra; (b) Unión con manguito exterior.

| | Tubos 88,9 / 2T | Tubos 114,3 / 2T | | Tubos 139,7 / 2T |
|---|---|---|---|---|
| | **Colada I** | **Colada III** | **Colada IV** | **Colada V** |
| **Dext** | 88.9 (88.9 ± 0) | 114.3 (114.3 ± 0) | 114.3 (114.3 ± 0) | 139.7 (139.7 ± 0) |
| **Dint** | 76.3 (76.1 ± 0.3) | 96.7 (96.7 ± 0) | 96.7 (96.7 ± 0) | 122.1 (122.1 ± 0) |
| **D1** | 80.5 (79.7 ± 0) | 104.3 (97.8 ± 0.1) | 104.3 (103.8 ± 0) | 128.8 (128.0 ± 0) |
| **D2** | 83.5 (82.9 ± 0) | 106.8 (103.7 ± 0.1) | 106.8 (106.7 ± 0.1) | 131.8 (131.7 ± 0.1) |
| **D3** | 80.8 (80.8 ± 0) | 104.8 (105.2 ± 0.1) | 104.8 (104.5 ± 0.1) | 129.1 (129.7 ± 0.3) |
| **D4** | 83.5 (83.4 ± 0.1) | 107.2 (108.1 ± 0.1) | 107.2 (107.7 ± 0.1) | 132.0 (133.0 ± 0.3) |
| **L1** | 50.0 (50.0 ± 0) | 50.0 (49.9 ± 0.1) | 50.0 (50.0 ± 0) | 50.0 (49.4 ± 0.4) |
| **L2** | 5.0 (5.3 ± 0.2) | 5.0 (6.4 ± 0.1) | 5.0 (6.4 ± 0.2) | 5.0 (4.8 ± 0.3) |
| **L3** | 50.5 (50.7 ± 0.2) | 50.5 (50.7 ± 0.2) | 50.5 (51.1 ± 0.1) | 50.5 (50.8 ± 0.3) |
| **L4** | 5.0 (5.1 ± 0.1) | 5.0 (5.6 ± 0) | 5.0 (6.2 ± 0.3) | 5.0 (5.1 ± 0) |
| **t1** | 3.175 (3.133 ± 0.059) | 3.175 (3.290 ± 0.014) | 3.175 (3.150 ± 0.090) | 3.175 (3.150 ± 0.100) |
| **t2** | 3.175 (3.197 ± 0.031) | 3.175 (3.160 ± 0.029) | 3.175 (3.205 ± 0.032) | 3.175 (3.295 ± 0.032) |

**Tabla 4** Valor de los parámetros geométricos que definen la unión machihembrada. Los valores entre paréntesis reflejan el valor medio medido y la desviación típica.

| | Tubos 88,9 / 2TM | Tubos 114,3 / 2TM | | Tubos 139,7 / 2TM |
|---|---|---|---|---|
| | **Colada II** | **Colada III** | **Colada IV** | **Colada V** |
| **Dext** | 88.9 (88.7 ± 0.2) | 114.3 (114.3 ± 0.1) | 114.3 (114.3 ± 0) | 139.7 (139.8 ± 0.1) |
| **Dint** | 76.3 (75.9 ± 0.3) | 96.7 (97.8 ± 0.3) | 96.7 (96.7 ± 0.2) | 122.1 (124.7 ± 0.2) |
| **D1** | 86.5(85.3 ± 0.1) | 111.9 (109.3 ± 0) | 111.9 (108.9 ± 0.2) | 136.3 (134.7 ± 0.1) |
| **D2** | 88.9 (87.9 ± 0.3) | 114.3 (111.8 ± 0) | 114.3 (111.7 ± 0) | 139.7 (138.6 ± 0.1) |
| **D3** | 86.5 (85.3 ± 0) | 111.9 (109.3 ± 0.1) | 111.9 (108.9 ± 0.1) | 136.3 (134.8 ± 0) |
| **D4** | 88.9 (87.8 ± 0) | 114.3 (111.8 ± 0.1) | 114.3 (111.6 ± 0.3) | 139.7 (138.5 ± 0) |
| **L1** | 62.0 (69.4 ± 0.2) | 82.0 (90.3 ± 0.2) | 82.0 (90.4 ± 0.1) | 102.0 (109.5 ± 0.3) |
| **L2** | 5.0 (5.5 ± 0.2) | 5.0 (5.0 ± 0.1) | 5.0 (5.2 ± 0.1) | 5.0 (6.2 ± 0.2) |
| **L3** | 62.0 (69.6 ± 0.1) | 82.0 (90.5 ± 0.5) | 82.0 (90.4 ± 0.1) | 102.0 (109.3 ± 0) |
| **L4** | 5.0 (5.3 ± 0) | 5.0 (5.3 ± 0.3) | 5.0 (5.2 ± 0) | 5.0 (6.3 ± 0.2) |
| **t1** | 3.175 (3.190 ± 0.241) | 3.175 (3.433 ± 0.024) | 3.175 (3.438 ± 0.041) | 4.23 (4.443 ± 0.086) |
| **t2** | 3.175 (3.217 ± 0.197) | 3.175 (3.443 ± 0.009) | 3.175 (3.448 ± 0.048) | 4.23 (4.388 ± 0.054) |
| **Dm** | 108.0 (107.7 ± 0.2) | 133.0 (132.5 ± 0.1) | 133.0 (133.0 ± 0.1) | 159.0 (158.9 ± 0.1) |
| **Lm** | 140.0 (140.0 ± 0) | 180.0 (180.0 ± 0) | 180.0 (180.0 ± 0) | 220.0 (218.5 ± 1.5) |
| **LS1** | 8.0 (9.2 ± 0.1) | 8.0 (8.8 ± 0.3) | 8.0 (8.7 ± 0.4) | 8.0 (10.1 ± 0.1) |
| **LS2** | 8.0 (9.1 ± 0.1) | 8.0 (8.9 ± 0.3) | 8.0 (8.7 ± 0.4) | 8.0 (10.1 ± 0.3) |

**Tabla 5** Valor de los parámetros geométricos que definen la unión con manguito exterior. Los valores entre paréntesis reflejan el valor medio medido y la desviación típica.

# 5. RESULTADOS OBTENIDOS

## 5.1. Generalidades

En este apartado 5 se describen los resultados obtenidos en los ensayos. Su análisis y discusión se lleva a cabo en el capítulo 6. Por claridad y facilidad de manejo, los gráficos se representan conjuntamente en el Apéndice A. De esta manera es más sencillo comparar los resultados de diferentes grupos de ensayos entre sí. Los apartados A.1, A.2 y A.3 del Apéndice proporcionan los diagramas momento en centro de vano – flecha en centro de vano obtenidos en los ensayos de los tubos con diámetro exterior de 88.9, 114.7 y 139.7 mm, respectivamente. Se ha representado en abscisas el valor del momento flector en el centro de vano en lugar de la carga aplicada, ya que el momento es un valor más habitual y clarificador de cara al diseño del micropilote. Dentro de cada uno de estos tres apartados, y para cada diámetro, se han separado por columnas los tres tipos de probetas ensayadas (continua, con unión macho-hembra, y con unión de manguito exterior). Además, por filas se han separado los ensayos en los que los tubos están fabricados con acero N80 (MPV-80) y St-52. En los gráficos que figuran en este Apéndice A también se representan las curvas teóricas correspondientes a los valores nominales y medios de cada colada, según el tipo de acero considerado. En el siguiente capítulo se explica la obtención de estas últimas curvas.

## 5.2. Tubos con diámetro exterior de 88.9 mm

Con el diámetro exterior de 88.9 mm se han ensayado probetas fabricadas con acero N80 (MPV-80) y St-52. Del primer tipo, se han ensayado tubos continuos y tubos con unión macho-hembra, mientras que del segundo acero, se han ensayado tubos continuos y con unión de manguito. Los diagramas momento en centro de vano – flecha en centro de vano se encuentran en el apartado A.1 del Apéndice A.

En las probetas en las que no existe unión no se ha alcanzado la rotura. Los ensayos se detuvieron cuando la probeta se encontraba en la fase de plastificación. En la probeta 88,9 / C / I / 4 se dejó de medir la flecha relativamente pronto, ya que era un ensayo de prueba del funcionamiento de las galgas extensométricas. En estos tubos continuos se realizó una última fase de descarga para observar las deformaciones remanentes alcanzadas en la fase de plastificación. La ductilidad de los tubos continuos rellenos es muy grande, tanto con acero N80 (MPV-80) (Fig. 12a) como St-52 (Fig. 12c).

Los resultados de los ensayos sobre probetas con unión macho – hembra han sido sensiblemente diferentes. En estos casos la rotura de las probetas en la zona de unión se produjo a una carga inferior a la del tubo hueco continuo, teniendo lugar antes de alcanzar la fase de plastificación de la probeta. La rotura se produjo en la primera rosca del macho en los tres ensayos de este tipo, e hizo que las probetas se partieran en dos partes de forma violenta (Fig. 12b). En el Apéndice B se pueden observar imágenes de detalle de la rotura de la unión de estas probetas, así como en la Fig. 13. El análisis del comportamiento de estos tubos se efectúa en el apartado 6.

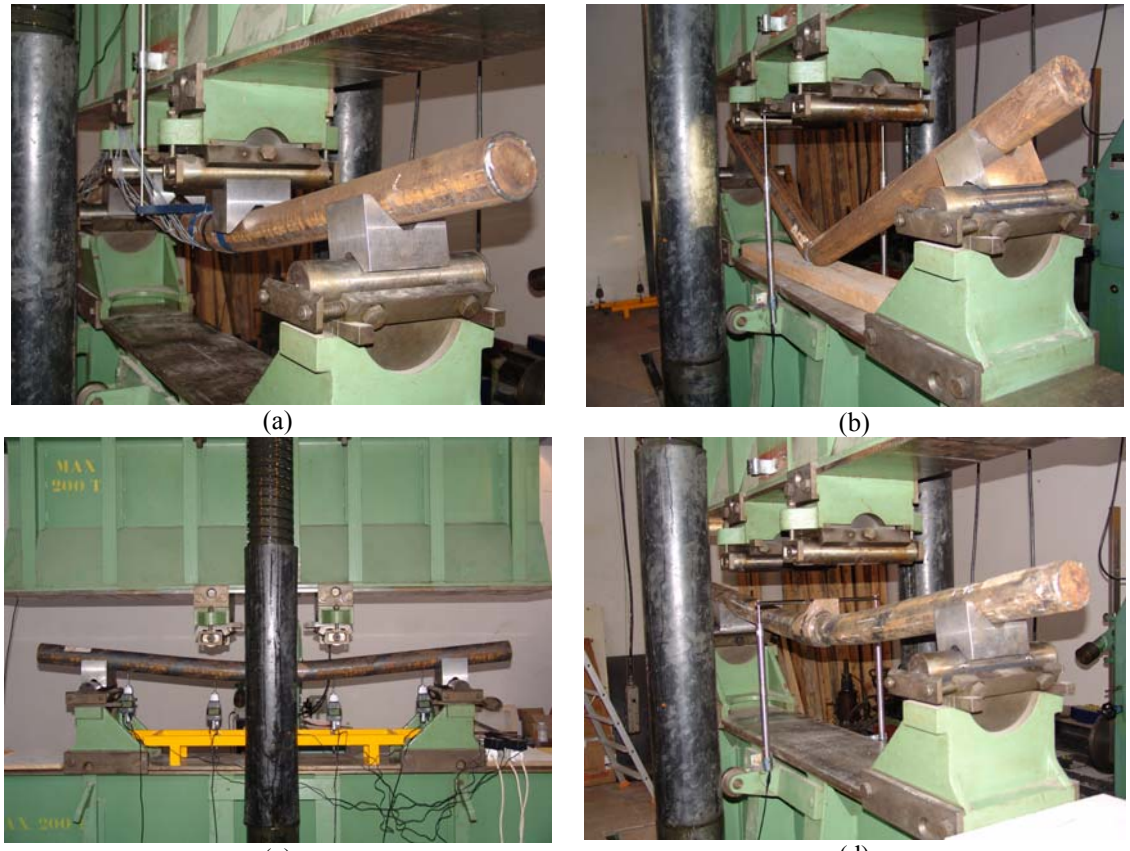



**Fig. 12** Estado de probetas con diámetro exterior 88.9 mm al final del ensayo: (a) Ensayo 88,9 / C / I / 4; (b) Ensayo 114,3 / 2T / I / 1; (c) Ensayo 88,9 / C / II / 2; (d) Ensayo 88,9 / 2TM / II / 2.

**Fig. 13** Rotura de las probeta 88.9 / 2T / I / 1 con unión macho-hembra, al nivel de la primera rosca de la parte macho de la unión.

El comportamiento de las probetas con unión con manguito exterior (ver Fig. 12d) fue muy dúctil. Ninguno de los tres ensayos de este tipo, con acero St-52, alcanzó la rotura, llegándose a medir flechas en centro de vano de hasta 10 cm. No obstante, en los tres ensayos se observa un primer pico en las gráficas momento – flecha, como se muestra en el apartado A.1 del Apéndice A, a un nivel de la carga ligeramente superior al comienzo de la rama plástica. En ese instante, se pudo escuchar en los tres ensayos un fuerte ruido, que hace suponer que pudo fallar alguna de las roscas interiores de la unión. Este hecho significó un salto notable en las deformaciones, pero la capacidad de carga de la probeta no se vio alterada, y los tubos continuaron

deformándose por la rama de plastificación, hasta un punto en que se tuvieron que detener los ensayos por superarse la carrera de desplazamiento de la prensa sin que hubiera rotura.

### 5.3. Tubos con diámetro exterior de 114.3 mm

Los ensayos realizados con el diámetro exterior 114.3 mm cubren todas las variaciones posibles en cuanto a tipo de acero y sistema de unión. Los diagramas momento flector en centro de vano – flecha en centro de vano se representan en el apartado A.2 del Apéndice A. En los resultados encontrados se ha observado la influencia tanto del tipo de unión como del acero empleado.

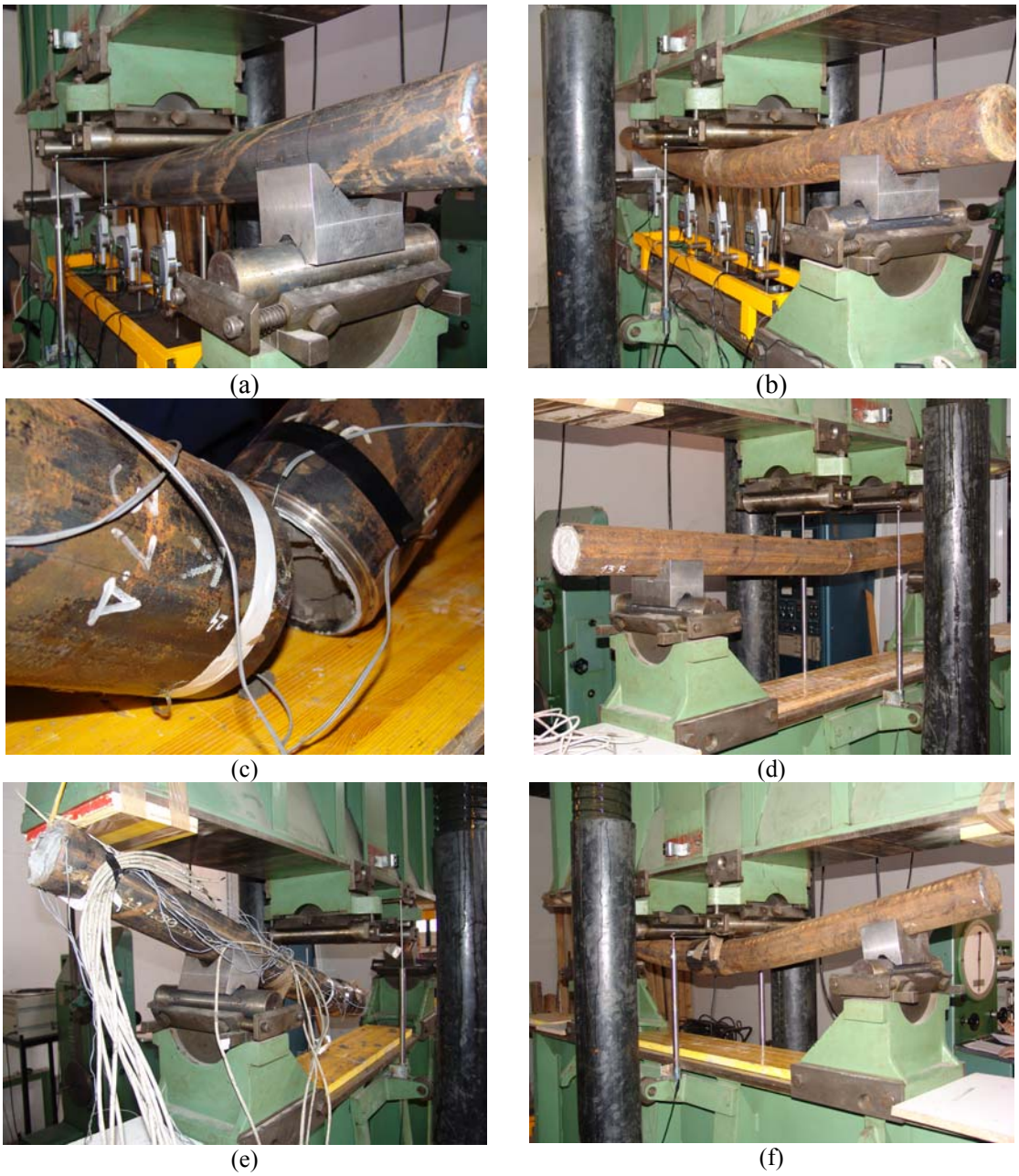
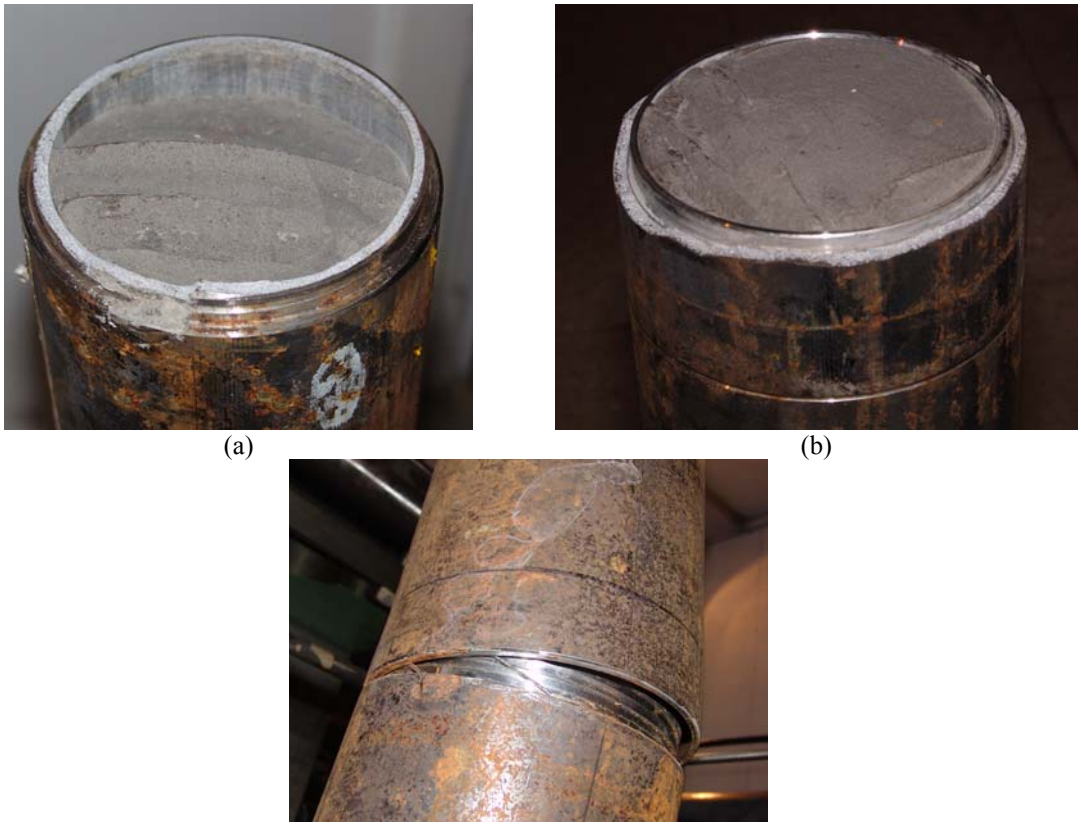



**Fig. 14** Estado de probetas con diámetro exterior 114.3 mm al final del ensayo: (a) Ensayo 114.3 / C / IV / 2; (b) Ensayo 114,3 / C / III / 1; (c) Ensayo 114.3 / 2T / IV / 4; (d) Ensayo 114.3 / 2T / III / 1; (e) Ensayo 114,3 / 2TM / IV / 3; (f) Ensayo 114,3 / 2TM / III / 2.

En lo que respecta a los tubos continuos, el comportamiento fue dúctil como se esperaba. Tanto los tubos con acero N80 (MPV-80) como con St-52 se llevaron a una carga tal que la rama de

plastificación era considerable (Fig. 14a-b), y después se descargaron, mostrando unas deformaciones remanentes muy grandes.

Nuevamente, la resistencia de los tubos con unión macho – hembra fue inferior a la de los tubos continuos, como se observa en el apartado A.2 del Apéndice A. Sin embargo, la respuesta fue diferente en función del acero empleado. Las probetas de acero N80 (MPV-80) tuvieron un comportamiento muy similar a las de 88.9 mm de diámetro. En ellas se encontró la rotura antes de entrar en la rama plástica. Los cuatro ensayos de este tipo rompieron de forma violenta, partiéndose la pieza en dos partes. La rotura se produjo en la primera rosca del macho, excepto en el ensayo 114,3 / 2T / IV / 2, que falló en la última rosca de la hembra (ver comparación en la Fig. 15). Precisamente fue este ensayo el que tuvo mayor resistencia del grupo. También de acero N80 (MPV-80) se ensayó una probeta sin lechada en el interior, dando la misma resistencia que los tubos con lechada, pero rompiendo en la rosca de la hembra. Con el acero St-52 se ensayaron tres probetas con unión macho – hembra. En ellas la resistencia fue similar a la del acero N80 (MPV-80), en términos relativos a la resistencia teórica del tubo. Sin embargo, la forma del fallo fue diferente, dado que ésta no se produjo en una de las roscas extremas, sino que tuvo lugar en una intermedia de la unión, evitando que la probeta se dividiera en dos partes. Esta comparación se observa en la Fig. 14c-d o en la Fig. 15.



(a) (b) (c)

**Fig. 15** Rotura de las probetas de 114.3 mm con unión macho-hembra. (a) Rotura por el macho en 114,3 / 2T / IV / 1; (b) Rotura por la hembra en 114,3 / 2T / IV / 2; (c) Rotura interior en 114,3 / 2T / III / 2.

El comportamiento de las probetas con unión con manguito exterior fue nuevamente diferente en función del tipo de acero. En las probetas en las que los tubos están fabricados con acero N80 (MPV-80) se produjo inicialmente la rotura de una de las roscas interiores de la unión, a una fuerza ligeramente superior al límite elástico. Este fallo, que se puede observar en el apartado A.2 del Apéndice A, no supuso el colapso de la pieza, sino que la probeta siguió resistiendo en la rama de plastificación hasta el instante en el que rompe una de las mitades en la zona exterior

a la unión (Fig. 14e). El primer fallo parcial de la rosca interior no se produjo en ninguno de los tres ensayos que se realizaron con acero St-52 (ver curvas momento – flecha del apartado A.2). Incluso, sólo en uno de estos tubos se alcanzó la rotura (en el tubo 114,3 / 2TM / III / 2 se produjo la rotura de una rosca interior a la unión, tras una flecha de más de 10 cm, Fig. 14f), deteniéndose los otros dos ensayos tras grandes deformaciones plásticas.

### 5.4. Tubos con diámetro exterior de 139.7 mm

Todos los ensayos realizados con tubos de 139.7 mm de diámetro exterior están fabricados con acero N80 (MPV-80). En el apartado A.3 del Apéndice A se representan los diagramas momento flector en centro de vano – flecha en centro de vano.

El comportamiento de los tubos continuos fue como el de las probetas con diámetros inferiores, es decir, se llevó la carga hasta un valor tal que se entró en la rama de plastificación de forma amplia, y después se descargaron. El estado final de una de estas probetas se muestra en la Fig. 16a.

Las probetas con unión macho – hembra tuvieron nuevamente una resistencia inferior a la del tubo continuo, teniendo lugar el fallo antes de entrar en la fase de plastificación, y dando lugar al colapso violento y la división en dos partes de la probeta. En tres de los cuatro ensayos de este tipo realizados, la rotura se produjo en la primera rosca del macho de la unión (ver detalle en Fig. 17a). Sólo en el ensayo 139,7 / 2T / V / 3 el fallo tuvo lugar en la última rosca de la hembra (Fig. 17b).

(a)

(b)

(c)

**Fig. 16** Estado de probetas con diámetro exterior 139.7 mm al final del ensayo: (a) Ensayo 139,7 / C / V / 2; (b) Ensayo 139,7 / 2T / V / 1; (c) Ensayo 139,7 / 2TM / V / 4.

En cuanto a los tubos con unión de manguito exterior, la rotura se alcanzó en la fase de plastificación, teniendo lugar en la primera rosca de una de las mitades que conforman la unión (Fig. 17c). En ninguno de estos cuatro ensayos se produjo la rotura previa de alguna rosca interior a la unión, como había ocurrido con diámetros menores. Es decir, la rotura de los tubos de 139.7 mm fue la más frágil de las probetas ensayadas con este sistema de unión.

(a)

(b)

**Fig. 17** Rotura de las probetas de 139.7 mm con unión macho-hembra. (a) Rotura por el macho en 139,7 / 2T / V / 1; (b) Rotura por la hembra en 139,7 / 2T / V / 3.

# 6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

## 6.1. Generalidades

En este apartado se analiza el comportamiento de las probetas en los ensayos. Como referencia en el análisis, se ha tomado para cada caso el comportamiento teórico de un tubo hueco continuo. De esta manera, en todos los gráficos de los apartados A.1, A.2 y A.3 del Apéndice A, se compara la respuesta experimental con el comportamiento teórico del tubo hueco continuo, el cual se muestra con líneas discontinuas de color negro.

En cada caso, se utilizan dos curvas teóricas (Fig. 18a): una se corresponde con las propiedades nominales o características del acero, y otra con el comportamiento medio del acero, que se podría considerar más próximo a la respuesta real del tubo. El diagrama característico del acero se compone de una rama elástica hasta el límite característico, $f_{yk}$, que es el garantizado por el fabricante, y una rama perfectamente plástica hasta una deformación última característica, $\varepsilon_{uk}$. El diagrama medio del acero, obtenido a partir de ensayos proporcionados por AETESS en diferentes coladas, es elasto – plástico, y se caracteriza por los valores medios obtenidos en probetas normalizadas, es decir, por su límite elástico, $f_y$, su límite último, $f_u$, y la deformación de rotura, $\varepsilon_u$. Los valores de estos parámetros para cada colada son los indicados en la Tabla 2. Dado que no se dispone de ensayos en probetas de acero St-52, en los tubos en los que se emplea este material se ha supuesto $f_y = f_{yk}$, $f_u$ el habitualmente considerado para este acero, y $\varepsilon_u = \varepsilon_{uk}$. Todos estos valores figuran en la Tabla 2.

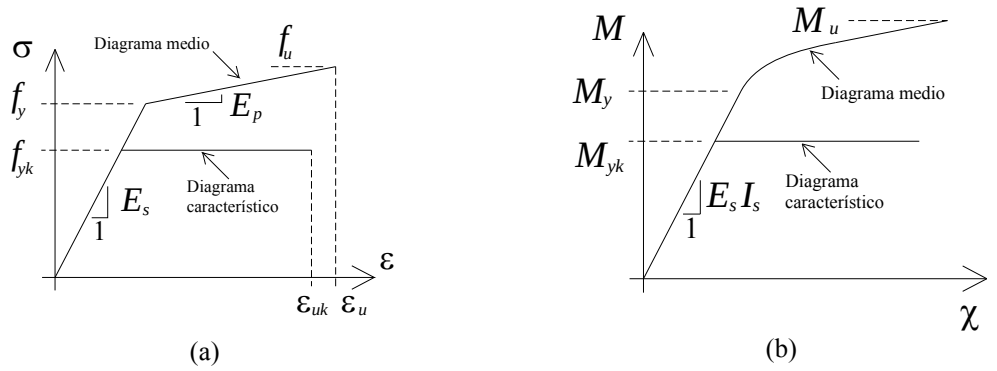



**Fig. 18** (a) Diagramas tensión – deformación del acero; (b) Diagramas momento – curvatura de una sección tubular.

Para la obtención del diagrama teórico fuerza – flecha (o momento – flecha, como se indica en el Apéndice A), se ha empleado el diagrama momento – curvatura (Fig. 18b). Nuevamente se han usado dos diagramas, el característico y el medio, correspondientes a una sección tubular. El diagrama característico es el habitualmente utilizado en proyecto, y está compuesto por la rama elástica, y una rama horizontal cuyo momento es el momento elástico. El valor del momento elástico característico se corresponde a la primera plastificación en la sección, es decir:

$$M_{yk} = \frac{2 I_s f_{yk}}{D_{ext}} \tag{2}$$

Donde $I_s$ es el momento de inercia de la sección tubular y $D_{ext}$ es el diámetro exterior. La relación momento – curvatura en la rama elástica es:

$$M = E_s I_s \chi \tag{3}$$

El diagrama momento – curvatura medio se caracteriza por una primera rama elástica, que sigue la ecuación (3) hasta el momento elástico (ecuación (4)), y una rama plástica no lineal.

$$M = \frac{2I_s f_y}{D_{ext}} \tag{4}$$

La obtención de la rama de plastificación se ha llevado a cabo mediante un análisis seccional, empleando la ecuación constitutiva elasto-plástica de la Fig. 18a. Para ello es necesario integrar las tensiones obtenidas a través de las deformaciones, las cuales se obtienen para cada nivel de la curvatura alcanzado. Un esquema del diagrama de tensiones y deformaciones se representa en la Fig. 19.

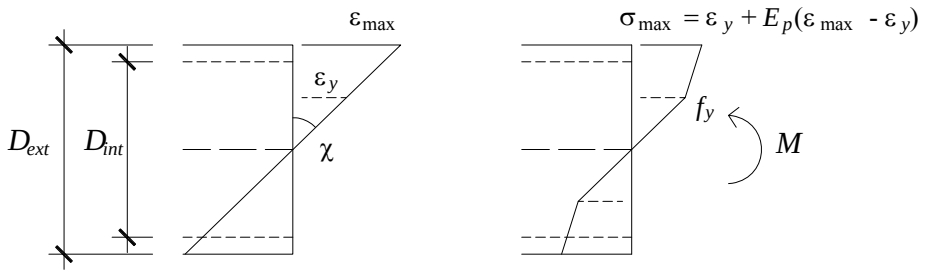



**Fig. 19** Distribución de deformaciones y tensiones en fase de plastificación

Finalmente, para la obtención de la flecha en centro de vano se integran doblemente las curvaturas. Dentro de la rama elástica se obtiene la fórmula conocida de la Resistencia de Materiales.

$$v = \frac{Pa}{48E_s I_s}\left(3L^2 - 4a^2\right) \tag{5}$$

donde $P$ es la carga total aplicada en el ensayo, $L$ es la luz (1.50 m) y $a$ es la distancia desde el apoyo al punto de aplicación de la carga (0.50 m). A medida que el tercio central de la viga plastifica, hay que considerar la no linealidad de la relación momento – curvatura para la obtención de la flecha (Fig. 20b). En este caso hay que tener en cuenta que existe una longitud $x_{el}$ en la que el comportamiento es elástico y lineal, y una longitud $a - x_{el}$ en la que hay una transición no lineal hasta que se alcanza la curvatura constante de la zona central de la viga. En los diagramas momento – flecha representados en el Apéndice A se ha empleado una simplificación lineal en esta distancia $a - x_{el}$, lo que permite la doble integración de la ley de curvaturas de una forma sencilla.

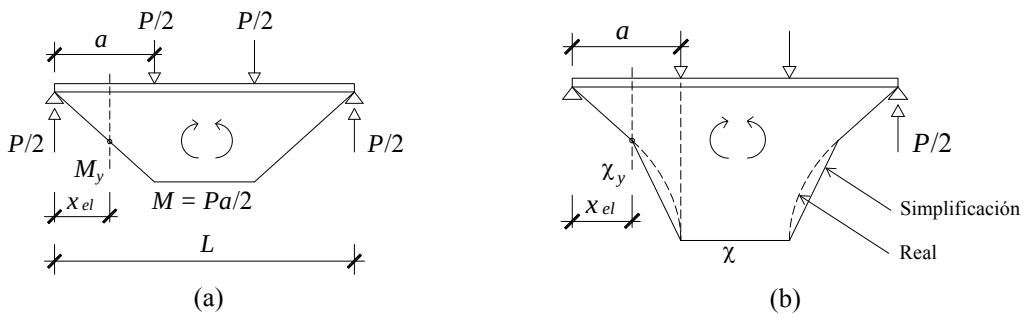



**Fig. 20** (a) Diagrama de momentos flectores en la fase de plastificación; (b) Diagrama de curvaturas en la fase de plastificación.

Como se ha indicado, todas las comparaciones se realizan con el comportamiento del tubo hueco continuo. De esta forma se considera que la contribución del relleno de lechada en la resistencia es despreciable, y que colabora sólo en evitar la inestabilidad del tubo ante compresiones. No obstante, se ha realizado una estimación de la contribución del relleno en la resistencia última. Para ello se considera que el agotamiento tiene lugar cuando en la sección transversal se alcanza simultáneamente el límite elástico por el acero traccionado y la rotura por el hormigón comprimido. Esto se representa en la Fig. 21. En ella se asume un bloque rectangular para la contribución de la lechada en compresión, y que ésta no resiste tracciones. Para resolver el problema hay que iterar en el valor de la curvatura, considerando que en el diagrama de deformaciones, la deformación en la cara inferior del acero es un pivote que vale $f_y$ / $E_s$. La solución se encuentra cuando el axil resultante es cero (flexión pura), y el momento resultante, $M_{ck}$, es el momento resistente.

En la Tabla 6 se indica el incremento de resistencia que se obtiene con respecto al momento elástico característico $M_{yk}$ de la ecuación (2). En el cálculo de $M_{ck}$ se ha considerado que la lechada tiene una resistencia de $f_{ck}$ = 25 MPa, y no se han empleado coeficientes de seguridad de los materiales. El máximo valor del incremento de la resistencia por la contribución de la lechada es del 6.4%.

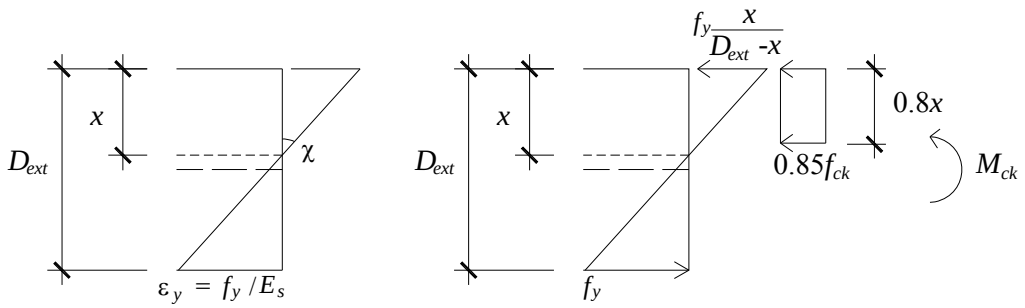



**Fig. 21** Cálculo del momento último con contribución de la lechada

| Tipo de sección | $M_{ck}$ / $M_{yk}$ |
|---|---|
| 88,9 / C / I | 1.057 |
| 88,9 / C / II | 1.053 |
| 114,3 / C / III | 1.060 |
| 114,3 / C / IV | 1.064 |
| 139,7 / C / V | 1.049 |

**Tabla 6** Incremento de resistencia de cada tipo de sección debido a la contribución de la lechada. Valores característicos sin coeficientes de seguridad de los materiales.

### 6.2. Resistencia de los ensayos con unión macho - hembra

Como se ha reflejado en el capítulo 5 y en las gráficas momento – flecha del Apéndice A, las probetas que están conectadas por el sistema de macho – hembra tienen un tipo de rotura frágil. Para establecer un criterio de resistencia se debe emplear la relación entre el momento en el que rompe cada ensayo ($M_{u,test}$) entre el momento elástico ($M_{y,0.2}$). El criterio a seguir desde el punto de vista de la Seguridad Estructural es el empleo de la relación $M_{u,test}/M_y$ (con $M_y$ en valores medios) para obtener el coeficiente de reducción de la resistencia, y después emplear en el diseño estructural ese coeficiente con valores de cálculo $M_{ud}$ / $M_{yd}$.

Se define α como el coeficiente de reducción de resistencia de la unión, de la siguiente forma:

$$\alpha = \frac{M_{u,test}}{M_y} \tag{6}$$

En base a él, el momento con el que parece adecuado diseñar la unión es el siguiente:

$$M_{ud} = \alpha \frac{M_{yk}}{\gamma_M} \tag{7}$$

siendo $\gamma_M$ el coeficiente del material. En la Fig. 22 se representa la relación $M_{u,test}/M_y$ para todos los ensayos con unión macho – hembra. Además de este valor también se ha representado la relación con respecto al momento característico $M_{yk}$, dado que en los tubos con acero St-52 no se dispone de $f_y$, por lo que se ha considerado sólo $f_{yk}$. Los valores medios y mínimos de esta relación se indican en la siguiente Tabla 7.

Dado que el tipo de rotura de este tipo de unión es frágil, es recomendable el uso del valor mínimo de α indicado en la Tabla 7 para el diseño estructural.

A la vista de los valores expuestos en la Tabla 7 parece adecuado adoptar un coeficiente, α = 0.8, para la relación entre el momento último y el momento elástico en la unión macho-hembra, para las secciones y geometrías de unión analizadas en el presente estudio, independientemente del tipo de acero (N80 o St-52). El coeficiente α se sitúa en el límite inferior del rango obtenido en los ensayos.

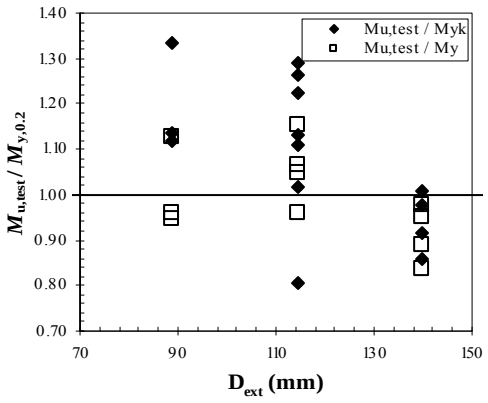



**Fig. 22** Relación entre el momento último experimental y el momento elástico en función del diámetro exterior del tubo metálico. Ensayos con unión macho – hembra.

| | $M_{u,test}$ / $M_y$ | | $M_{u,test}$ / $M_{yk}$ | |
|---|---|---|---|---|
| **Tipo de tubo** | **Valor medio** | **Valor mínimo** | **Valor medio** | **Valor mínimo** |
| **88,9 / 2T / I** | 1.013 | 0.949 | 1.196 | 1.112 |
| **114,3 / 2T / III** | - | - | 1.120 | 0.806 |
| **114,3 / 2T / IV** | 1.057 | 0.960 | 1.121 | 1.019 |
| **139,7 / 2T / V** | 0.913 | 0.836 | 0.939 | 0.860 |

**Tabla 7** Relación entre el momento último y el momento elástico en los ensayos con unión macho – hembra.

Un análisis más preciso de la resistencia de la unión debe contemplar detalles de la unión macho-hembra. Como se refleja en la Tabla 4, estas uniones se han diseñado con la misma longitud de rosca en el macho y en la hembra, independientemente del diámetro exterior del tubo. Ello hace que la relación longitud de rosca / diámetro de la unión disminuya a medida que aumenta el diámetro. En la Fig. 23a se representa la resistencia de los ensayos con respecto a

esta relación, tomando la longitud de la rosca en el macho (L1). En la Fig. 23b se representa en abscisas la relación entre la distancia libre de rosca del macho (L2 en la Tabla 4 y la Fig. 11a) y el diámetro exterior. También disminuye la resistencia cuando se reduce la relación entre el espesor neto del tubo en la zona macho de la unión con respecto al diámetro exterior ((D1 - Dint) / Dext en la Fig. 23c). Debido a que este último valor no es fácilmente modificable para el tipo de unión analizado, puede ser recomendable incrementar la longitud de rosca en los tubos de este diámetro, ya que los gráficos indican un incremento de la resistencia cuando se aumenta la longitud de rosca con respecto al diámetro.

Por otra parte, en uniones para tuberías en sistemas de extracción de gas y de petróleo la geometría es más compleja, e incluye detalles geométricos para el alivio de tensiones en la primera rosca del macho. Por ejemplo, el uso de una acanaladura en el comienzo de la zona roscada consigue reducir el factor de concentración de tensiones en la primera rosca del macho, que es la más solicitada, y como se ha visto en los ensayos es el punto en el que comienza la rotura. El uso de esta acanaladura en micropilotes, no obstante, puede verse dificultada por motivos de fabricación, y su aplicación está muy extendida en uniones de tuberías de excavación de gas y petróleo para evitar la rotura por fatiga en estas uniones.

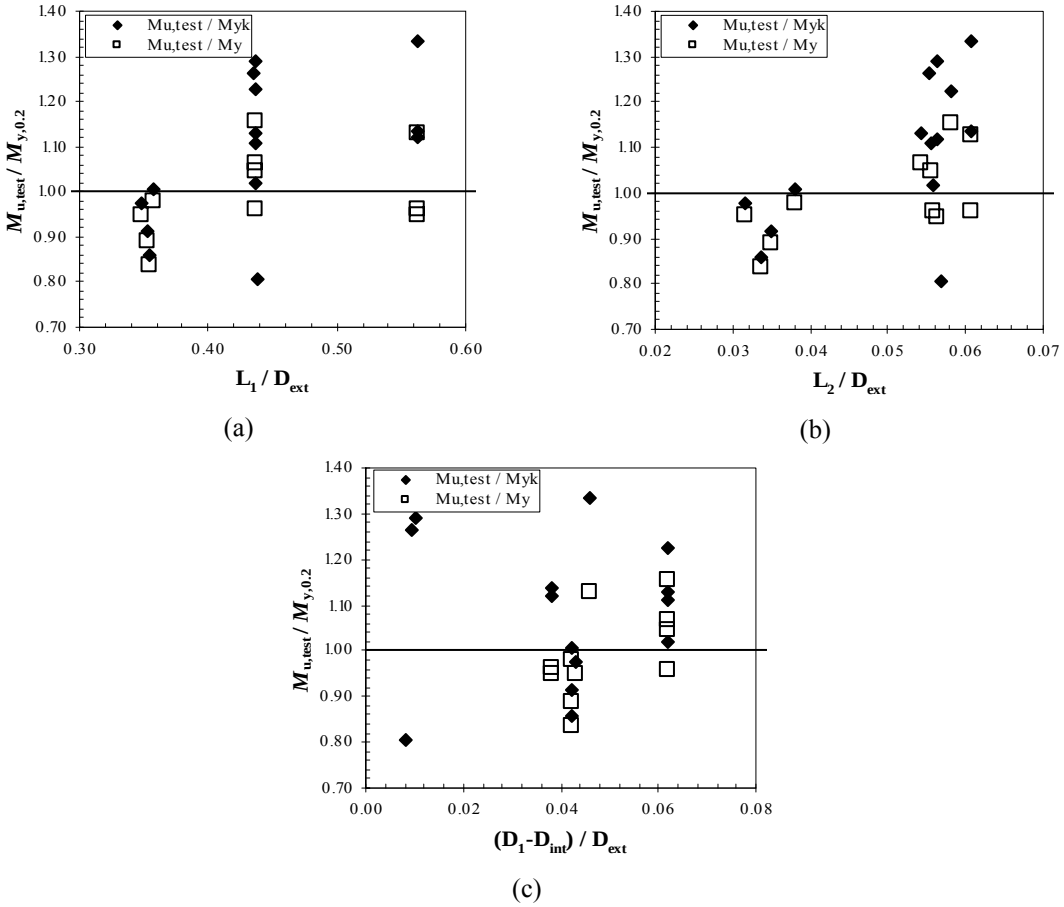



**Fig. 23** Valor relativo de la resistencia de los ensayos con unión macho – hembra con respecto a: (a) Longitud roscada del macho / Diámetro exterior; (b) Longitud libre de rosca del macho / Diámetro exterior; (c) Espesor neto del macho en la unión / Diámetro exterior.

### 6.3. Resistencia de los ensayos con unión con manguito exterior

De forma análoga a lo indicado en el apartado anterior para los tubos con unión macho – hembra, cabe pensar en la necesidad de adoptar un coeficiente, α, de reducción de la resistencia de la zona de unión para los tubos en los que se emplea manguito exterior. De esta forma, el

diseño estructural se realizaría con el momento último dado por la ecuación (7). Para la obtención del valor de α adecuado para la unión con manguito exterior, se representa en la Fig. 24 los valores de este parámetro, relación entre el momento último y el momento elástico, en función del diámetro exterior de los tubos de unión. En todos los casos se ha obtenido un valor de α superior a la unidad, encontrándose las probetas en la rama de plastificación, por lo que se debe diseñar con el momento elástico.

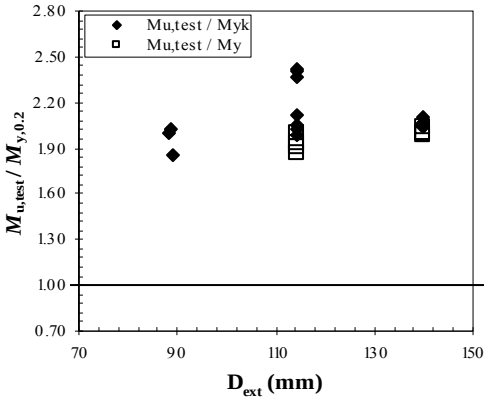



**Fig. 24** Relación entre el momento último experimental y el momento elástico en función del diámetro exterior del tubo metálico. Ensayos con manguito exterior.

Un aspecto fundamental a considerar para este tipo de unión es la ductilidad de la rotura, o capacidad de aviso que presenta este tipo de unión antes de la rotura. Para expresar este concepto se emplea a continuación un coeficiente de ductilidad CD, que expresa el valor de la flecha de cada ensayo en el momento de rotura ($v_{u,test}$) en relación a la flecha que corresponde al momento elástico ($v_{yk}$, que se obtiene en la ecuación (5) con el valor de $P$ que provoca $M_{yk}$ en la sección central):

$$\mathrm{CD} = \frac{v_{u,test}}{v_{yk}} \tag{8}$$

El valor del coeficiente de ductilidad se representa en la Fig. 25. En este gráfico se observa claramente la mayor ductilidad encontrada en las probetas de menor diámetro, como se comenta en el capítulo 5.

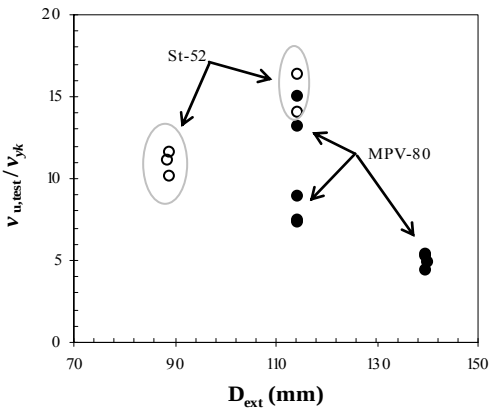



**Fig. 25** Coeficiente de ductilidad de las probetas con unión con manguito exterior. Los puntos huecos indican ensayos en los que no se obtuvo rotura. En la figura se distingue el tipo de acero utilizado en las mitades unidas.

Finalmente, en la Fig. 26 se representa el momento resistente normalizado en función de diversos parámetros geométricos de la unión. En este caso hay que tener en cuenta que las dimensiones de la unión (longitud de rosca, longitud del manguito, diámetro del manguito) son diferentes para cada diámetro exterior del tubo. En la Fig. 26 se observa que este criterio hace que la resistencia normalizada de los tubos esté menos influida por las dimensiones geométricas, ya que la relación entre la longitud de manguito y el diámetro exterior se mantiene aproximadamente constante, independientemente del diámetro.

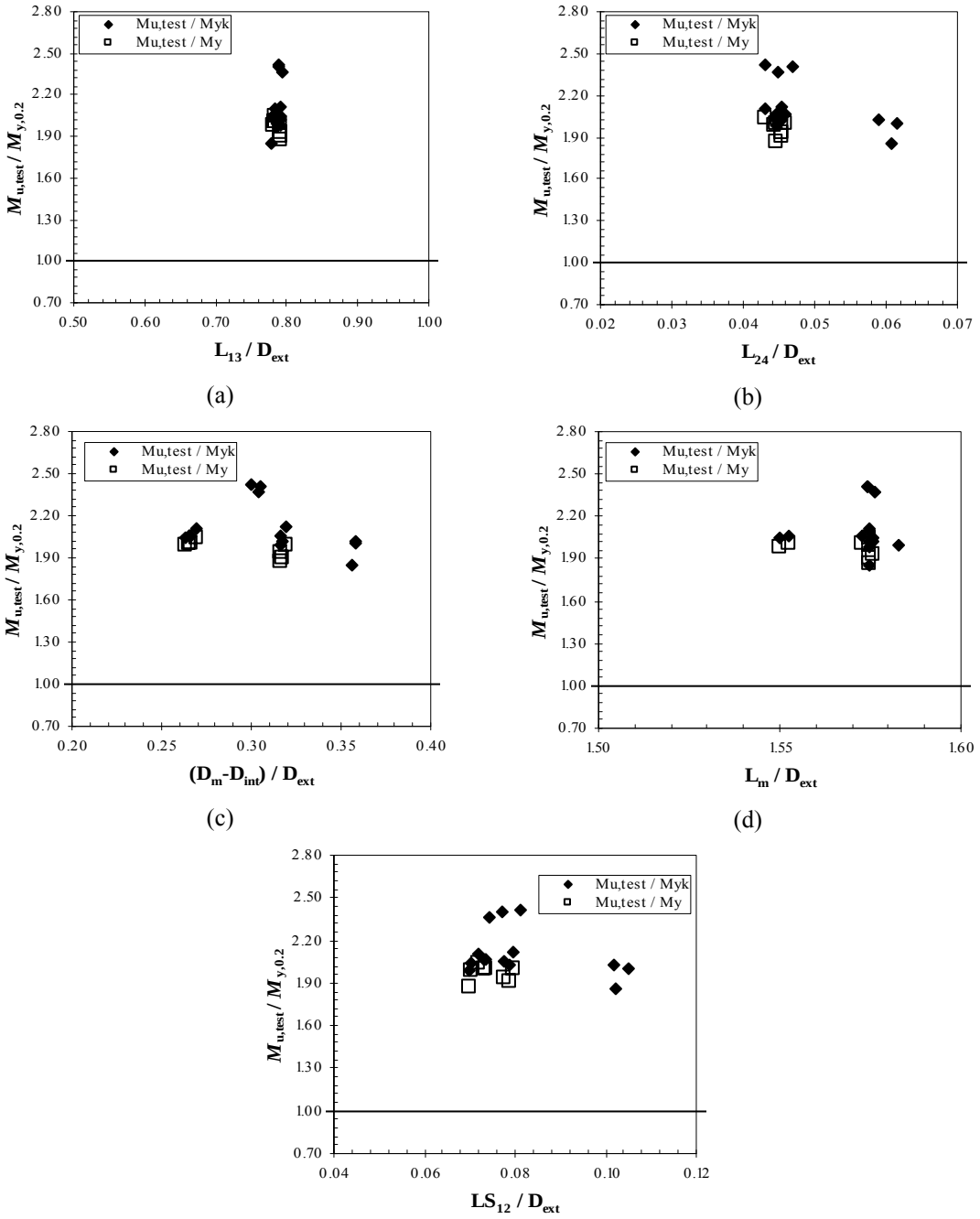



**Fig. 26** Valor relativo de la resistencia de los ensayos con unión con manguito exterior con respecto a: (a) Longitud de rosca medio en los dos lados macho / Diámetro exterior ($L_{13}$ = (L1 + L3)/2); (b) Longitud libre de rosca medio / Diámetro exterior ($L_{24}$ = (L2 + L4)/2); (c) Diámetro neto en la unión / Diámetro exterior; (d) Longitud del manguito / Diámetro exterior; (e) Longitud de solape medio / Diámetro exterior ($LS_{12}$ = (LS1 + LS2)/2).

## 6.4. Comportamiento en servicio del tubo en función del tipo de unión

En este apartado finalmente se analiza el comportamiento de las uniones de micropilotes en servicio. Ello se hace por medio de las flechas medidas en cinco puntos de la generatriz inferior de cada probeta a través de los flexímetros y las galgas extensométricas descritos en el apartado 3.4. Nuevamente se utiliza como comparación el tubo continuo hueco. En la Fig. 27 se han representado las flechas medidas en los cinco puntos para dos niveles de carga, el 50% y el 90% de la fuerza de plastificación característica. Los diagramas se indican para los cinco grupos de tubos ensayados, y en ellos se representan conjuntamente valores de probetas continuas con valores de probetas con los dos tipos de unión analizados.

En primer lugar se observa que las flechas medidas en los tubos continuos son ligeramente menores que la teórica del tubo hueco continuo, lo que se debe a un pequeño efecto de rigidización proporcionado por el relleno de lechada. En segundo lugar, se observa que las flechas medidas en las probetas con algún tipo de unión son mayores que la del tubo continuo. Dentro de los dos sistemas de unión, el uso del manguito exterior proporciona una mayor rigidez a la pieza, lo que se traduce en flechas inferiores a las que se observan en las probetas con unión macho - hembra. Esta mayor flecha de las probetas con unión macho – hembra se observa sobre todo en la sección de centro de vano, y esto se debe a que la deformada experimentada por estas probetas presenta un punto de discontinuidad en el centro.

Las flechas medidas son un resultado que también se puede observar por medio de las deformaciones medidas con las galgas extensométricas. En los apartados A.4, A.5 y A.6 del Apéndice A se han representado los diagramas momento flector – deformación medidos en todos los ensayos tipo A (Tabla 1). Nuevamente se muestran las medidas en comparación con los diagramas teóricos del tubo hueco continuo, obtenidos según lo indicado en el capítulo 5. Según las medidas de las galgas, en los tubos continuos se alcanzaron deformaciones muy grandes (mayores que el 2.5% en algún caso) sin que se llegara a romper la probeta.

En las probetas con unión macho – hembra las deformaciones medidas con las galgas indican cierto nivel de plastificación en la zona de unión, aún teniendo en cuenta que las probetas no han alcanzado la rama plástica. Especialmente las probetas 114,3 / 2T / IV / 3 y 114,3 / 2T / IV / 3 indican deformaciones mucho mayores en la zona de unión (claramente superiores a $\varepsilon_y$) que fuera de la unión. También es muy ilustrativo del funcionamiento de la unión el hecho de que las galgas exteriores de la unión (zona hembra) tienen mayor deformación que las galgas que se sitúan en la zona continua fuera de la unión. Por el contrario, las deformaciones medidas en el interior de la zona de unión son menores, lo que indica que no liberan tensiones, sino que las concentran hasta la rotura. Se observa que la rotura de la unión se produce cuando en las galgas exteriores de la unión se alcanzan deformaciones en general superiores al 6‰.

En cuanto a las deformaciones medidas con las galgas en los tubos con manguito exterior, se observa un comportamiento muy rígido en la zona del manguito, aún cuando fuera de la zona de unión se alcanzan deformaciones de hasta el 3.0%.

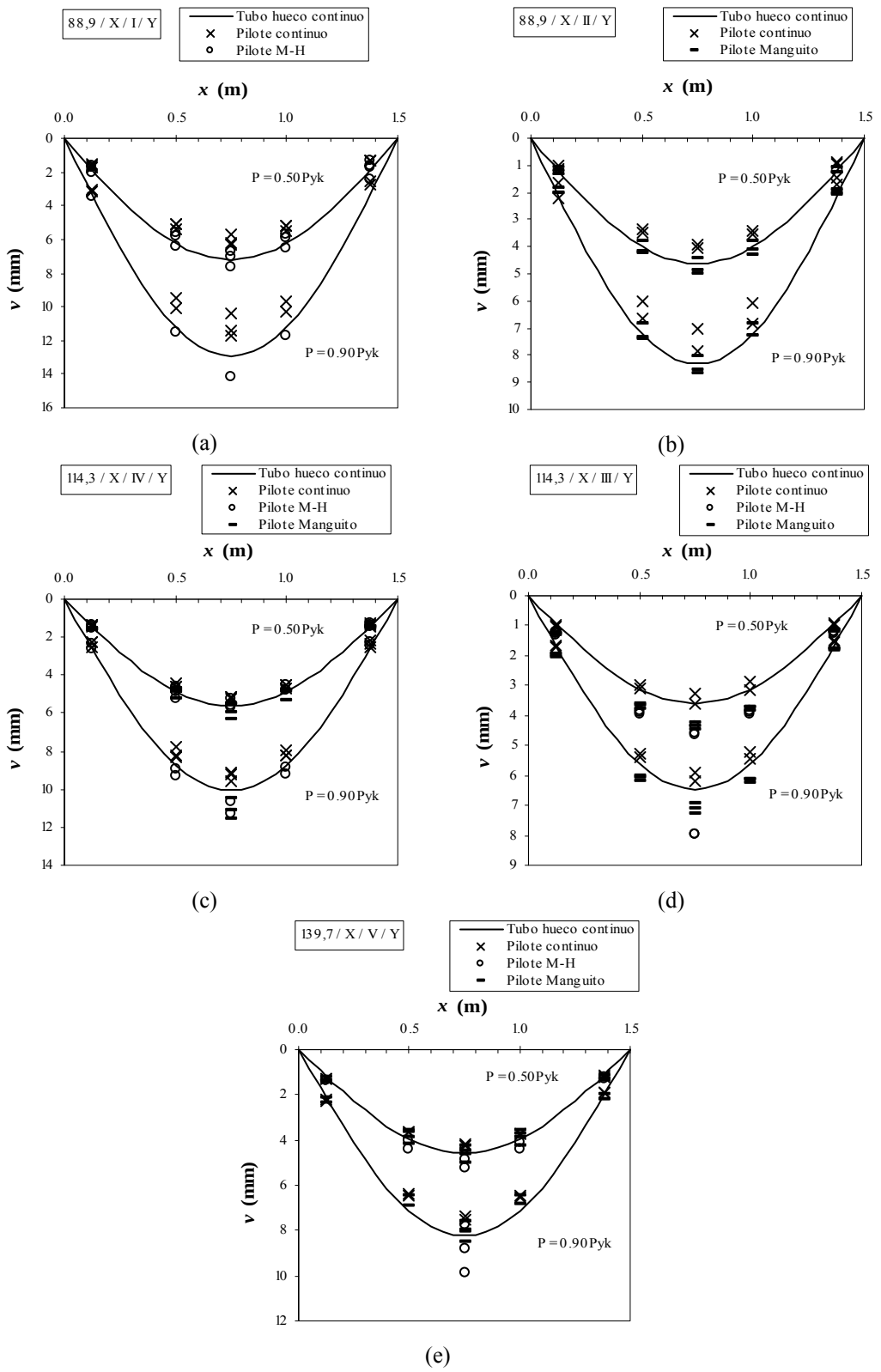



**Fig. 27** Comparación de flechas medidas en las probetas con la deformada del tubo hueco continuo: (a) Probetas 88,9 / xx / I; (b) Probetas 88,9 / xx / II; (c) Probetas 114,3 / xx / III; (d) Probetas 114,3 / xx / IV; (e) Probetas 139,7 / xx / V.

## 7. CONCLUSIONES

En el Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras de la Universidad Politécnica de Madrid y, concretamente, en el Laboratorio de Estructuras de la E. T. S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, se ha realizado una amplia campaña experimental sobre el comportamiento estructural de la armadura tubular de micropilotes, la cual ha sido financiada por la Asociación de Empresas de Tecnología del Suelo y del Subsuelo, AETESS.

La campaña contempla tubos de tres diámetros diferentes (88.9, 114.3 y 139.7 mm), dos aceros diferentes (N80, en su versión comercial MPV-80, y St-52), y dos configuraciones para la unión: además de los tubos continuos, se han ensayado tubos con unión macho-hembra y tubos unidos con manguito exterior. Se considera que el acero empleado en los manguitos es de calidad igual o superior a la del acero de los tubos unidos. Todos los tubos ensayados se encuentran rellenos con una lechada de cemento. Una vez recepcionados los tubos suministrados por AETESS se ha procedido a un detallado registro de las características geométricas, diámetros, longitud de roscas, pasos de rosca, etc.

Los tubos se han ensayado a flexión, mediante la aplicación de dos cargas puntuales, de tal forma que en el tercio central entre apoyos quedase definida una zona de momento flector constante en la que se ha dispuesto la unión.

En todos los ensayos se han controlado las flechas mediante flexímetros electrónicos y dos transductores de desplazamientos, LVDT. Además, en parte de los tubos ensayados se han colocado galgas para el registro de deformaciones en tres secciones, con cinco galgas por sección en la superficie exterior del tubo, y cuatro bandas extensométricas en la parte interior de la sección central.

A continuación se exponen las conclusiones más importantes en relación con los resultados y análisis efectuados, las cuales deben ser observadas en su conjunto y en el contexto en el que se han realizado los ensayos:

I. Se debe tener en cuenta que las conclusiones se refieren únicamente a las características de los tubos ensayados, diámetros, tipos de acero y uniones, y forma de carga (flexión pura). Asimismo debemos indicar que aunque la campaña experimental puede considerarse amplia, no deja por ello de ser limitada.

II. El comportamiento de los tubos continuos (sin unión) fue análogo para los tres diámetros ensayados, así como para los dos tipos de acero, N80 (MPV-80) y St-52. La carga se lleva hasta una fase de plastificación, y sin alcanzar la rotura se produce la descarga, la cual sigue una pendiente sensiblemente paralela a la rama de carga en fase elástica. La ductilidad de los tubos continuos rellenos de lechada es elevada.

III. En los tubos ensayados con unión macho-hembra la rotura es de tipo frágil y se produce, en general, en la primera rosca del macho en los tubos de acero N80 y en roscas intermedias en los tubos de acero St-52. Como rotura frágil, este tipo de unión no presenta capacidad de aviso previa del fallo. La rotura tiene lugar para una carga inferior a la del tubo continuo, antes de alcanzar una fase elevada de plastificación, en los tres diámetros ensayados y para ambos tipos de acero.

IV. Los tubos ensayados con manguito exterior presentan algunas características diferentes dependiendo del diámetro y del tipo de acero.

Los tubos de acero St-52 tienen un comportamiento dúctil, alcanzando flechas superiores a 10 cm sin llegar a la rotura, en los dos diámetros ensayados, 88.9 mm y 114.3 mm.

En los tubos de 114.3 mm de diámetro, con acero N80 se produce una rotura inicial en una de las roscas interiores, si bien esta circunstancia no afecta al colapso total de la pieza, la cual sigue resistiendo en la rama de plastificación hasta el instante en que rompe una de las dos mitades en la zona exterior a la unión.

En los tubos de 139.7 mm de diámetro, con acero N80, la rotura se produce en la fase de plastificación, pero sin rotura previa de alguna rosca de la unión, por lo que la rotura podría calificarse como más frágil para este diámetro.

V. De acuerdo con los resultados de los ensayos realizados en tubos con unión macho-hembra (los cuales tienen una longitud de rosca de 5.00 cm), parece adecuado adoptar un coeficiente reductor, α =0.8, para la relación entre el momento último y el momento elástico, independientemente del diámetro (de los tres ensayados) y del tipo de acero, N80 o St-52. En consecuencia, el momento, $M_{ud}$, con el que parece adecuado diseñar la unión es, $M_{ud} = \alpha \frac{M_{yk}}{\gamma_M}$, donde $M_{yk}$ es el momento característico y $\gamma_M$ el coeficiente de seguridad aplicado al material. Este coeficiente α se sitúa en el límite inferior del rango obtenido en los ensayos.

VI. Al representar el factor de reducción, α, frente a la relación, longitud de rosca del macho / diámetro exterior del tubo, en los ensayos con unión macho-hembra, se puede intuir que dicho factor aumenta con la relación señalada, lo que se puede interpretar como una mejora de la resistencia a flexión de la unión si se mantiene para todos los diámetros la misma relación, longitud de rosca del macho / diámetro exterior del tubo, que la adoptada para el diámetro inferior. En todo caso, se debe tener en cuenta que la rotura es frágil cuando se emplea este tipo de unión.

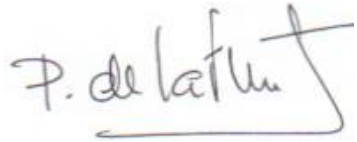
VII. Los ensayos con tubos con manguito exterior, e independientemente del diámetro (de los tres ensayados) y del tipo de acero, proporcionan para α (relación entre el momento último y el momento elástico) un valor superior a la unidad, por lo que parece adecuado diseñar la unión con el momento elástico, es decir, $M_{ud} = \frac{M_{yk}}{\gamma_M}$.

Para considerar esta conclusión, ha de tenerse en cuenta que la calidad del acero a emplear en el manguito ha de ser igual a superior a la del acero de los tubos que une. Es de destacar que el diseño de la unión con manguito exterior estudiada es tal que la relación entre la longitud del manguito y el diámetro exterior se mantiene aproximadamente constante (esta relación es 1.60, aproximadamente), siendo el espesor del manguito igual o superior al de los tubos que une.

VIII. El análisis de las flechas observadas en tubos continuos y en los dos tipos de unión ensayados, comparadas con las teóricas para el 50% y el 90% de la carga que plastifica el tubo, pone de manifiesto que las flechas registradas en los tubos continuos son ligeramente inferiores a las teóricas del tubo hueco continuo, lo que

se debe a un pequeño efecto de rigidización proporcionado por el relleno de lechada. Asimismo, se observa que el manguito exterior proporciona mayor rigidez a la pieza, lo que se traduce en flechas inferiores a las que se observan en las probetas con unión macho – hembra.

Madrid, julio de 2009



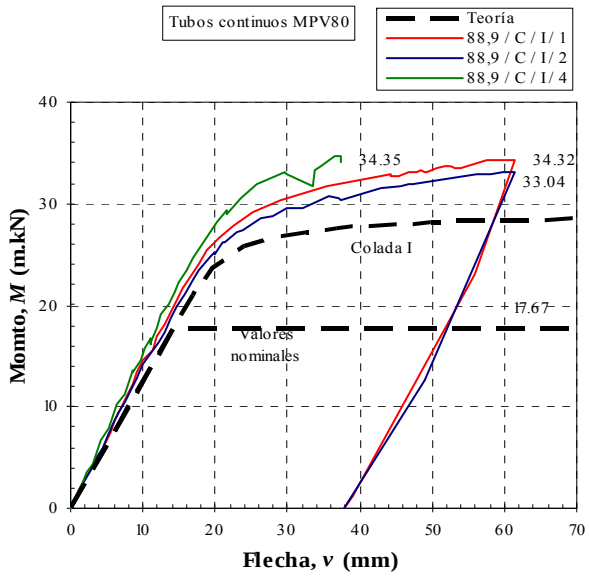
Fdo.: Pablo de la Fuente Martín
Prof. Dr. Ingeniero de Caminos, C. y P.

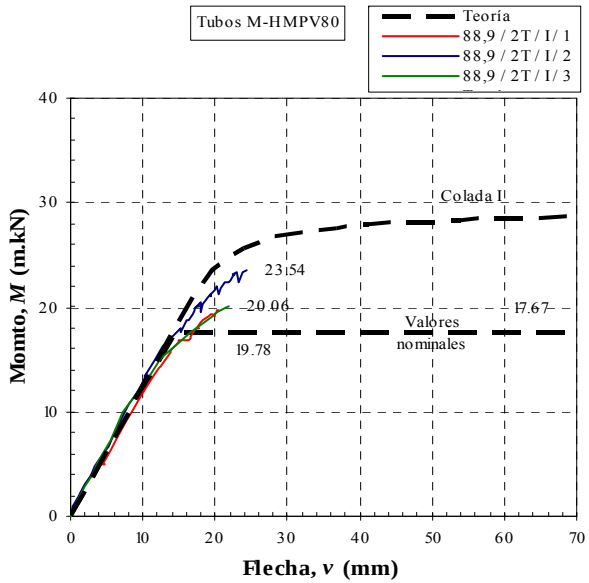
Fdo.: Carlos Zanuy Sánchez
Dr. Ingeniero de Caminos, C. y P.

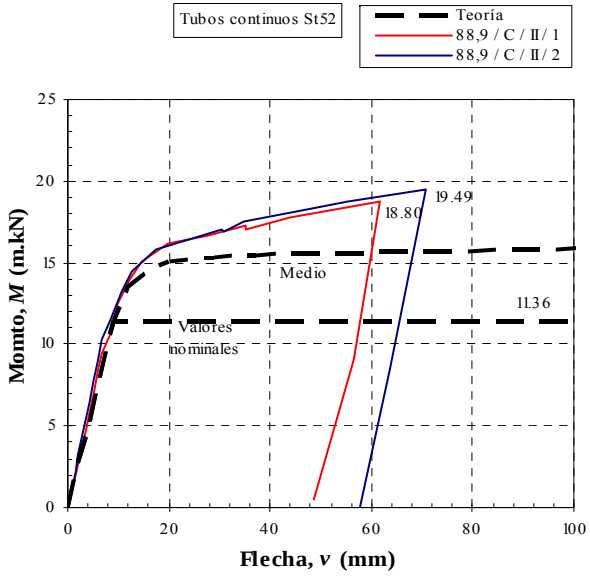
# APÉNDICE A

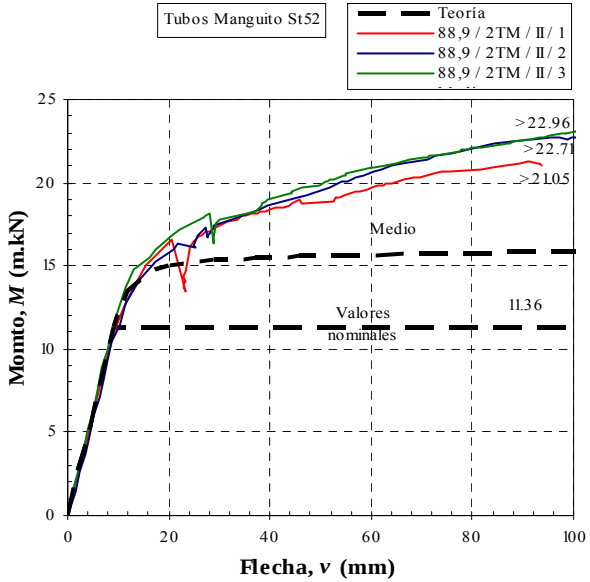
# GRÁFICOS

## A.1. Diagramas momento – flecha en centro de vano (probetas con diámetro exterior de 88.9 mm)

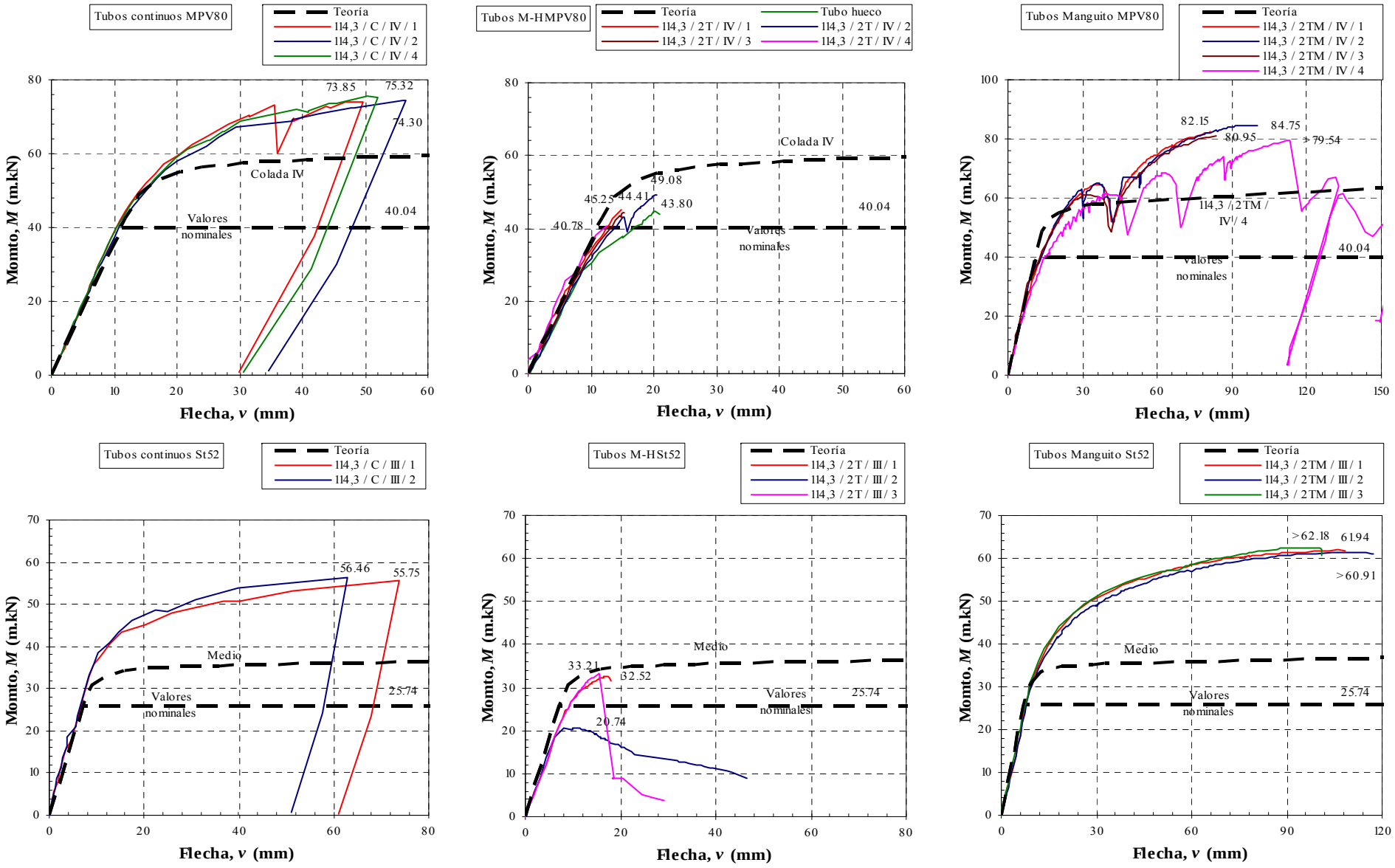


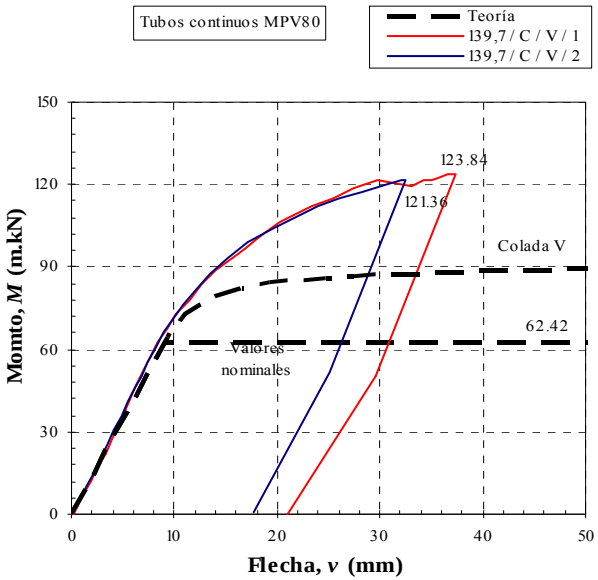



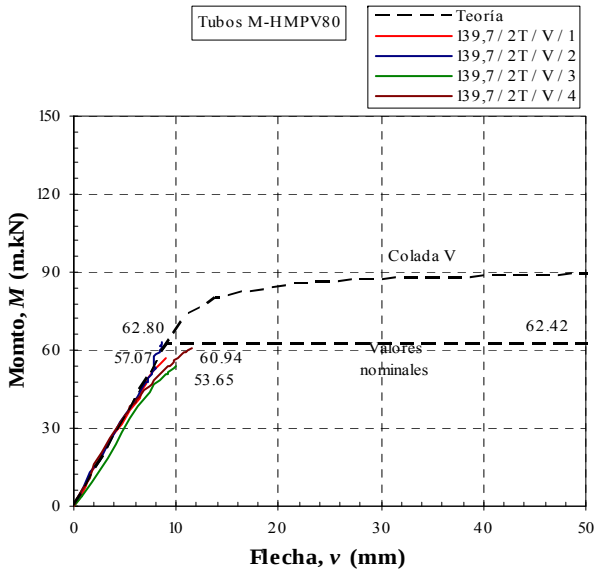



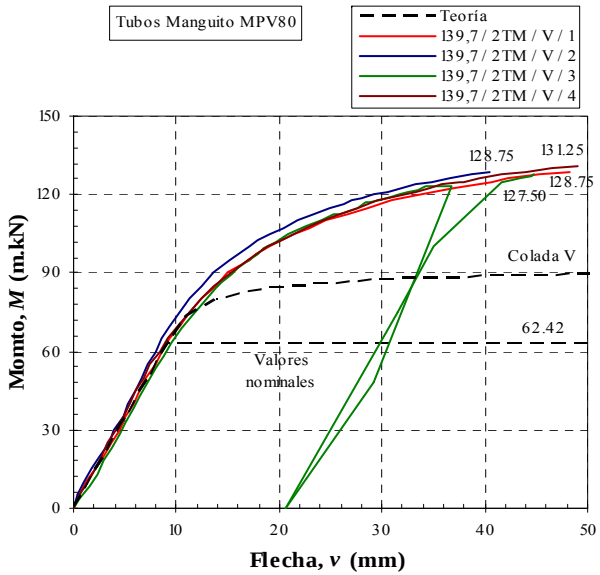
## A.2. Diagramas momento – flecha en centro de vano (probetas con diámetro exterior de 114.3 mm)



## A.3. Diagramas momento – flecha en centro de vano (probetas con diámetro exterior de 139.7 mm)

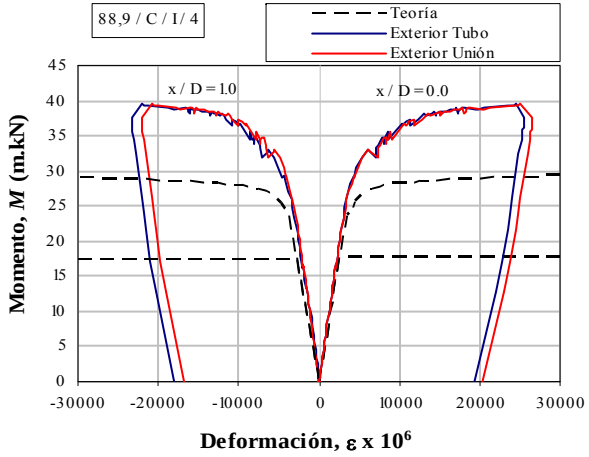


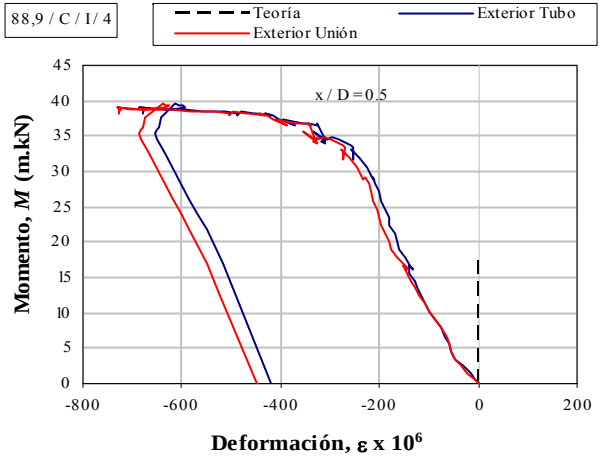



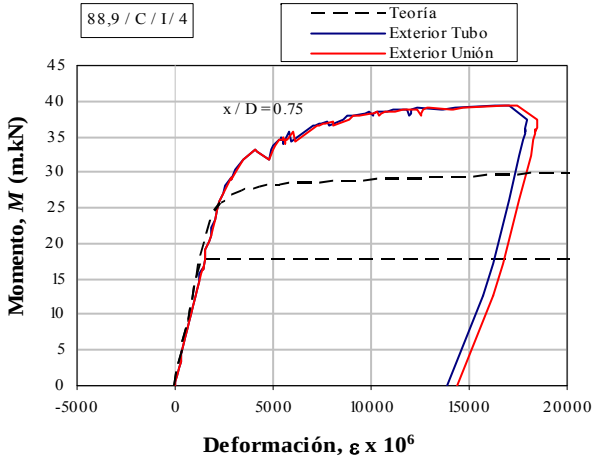



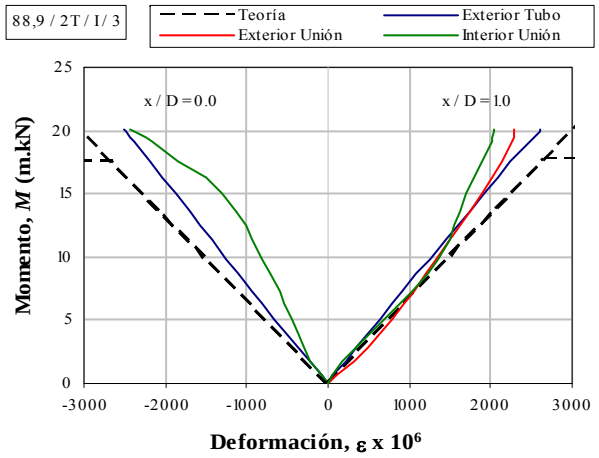
## A.4. Diagramas momento – deformación (probetas con diámetro exterior de 88.9 mm)

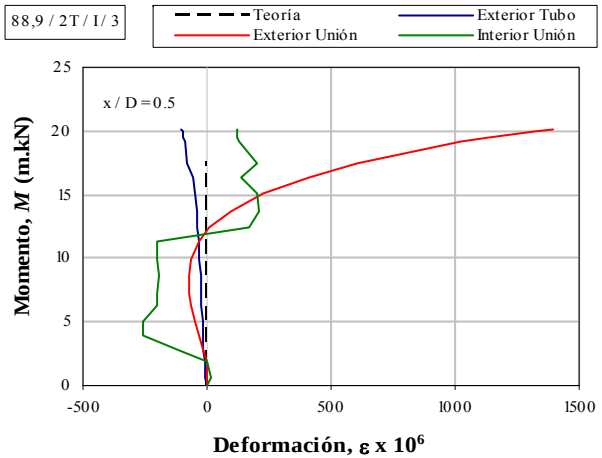
**Nota:** x / D = 0.0 (fibra superior de la sección); x / D = 0.5 (fibra media de la sección); x / D = 0.75 (fibra situada 3/4 del canto); x / D = 1.0 (fibra inferior de la sección).

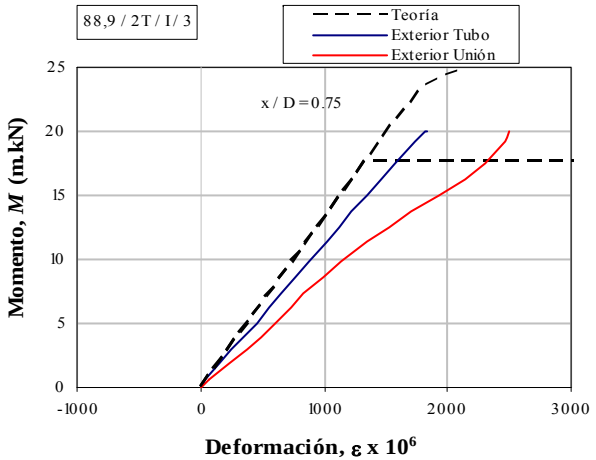


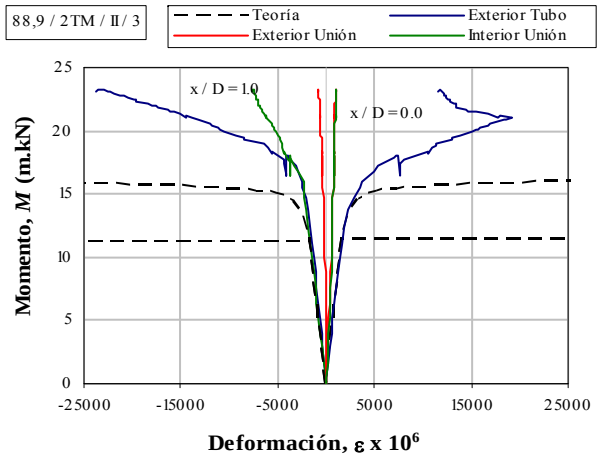



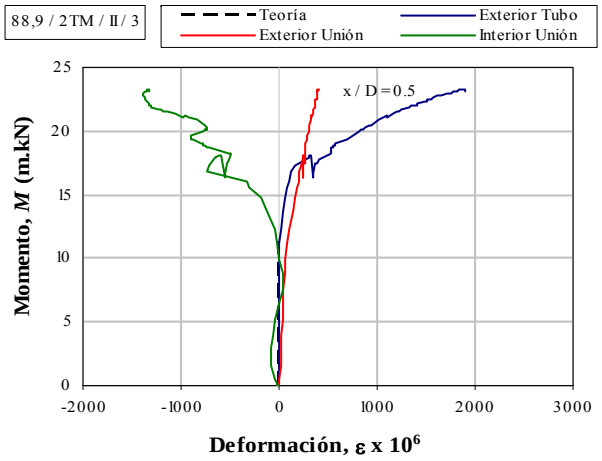



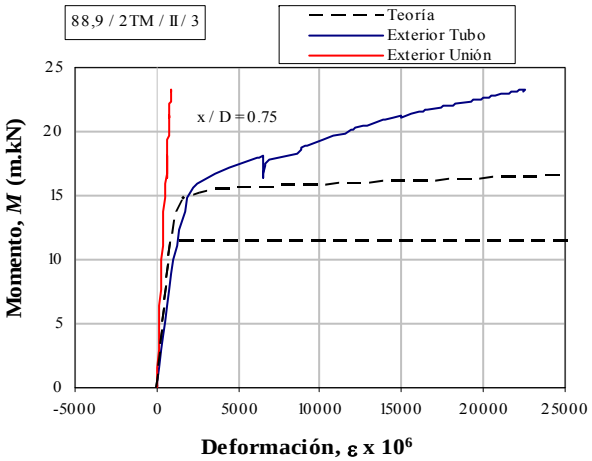



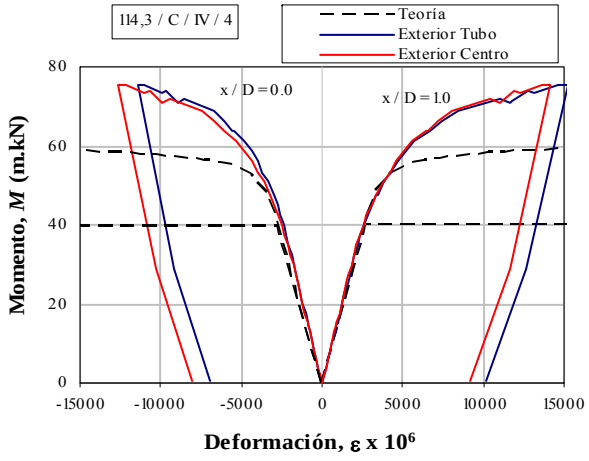

88,9 / 2TM / II / 3
Teoría
Exterior Tubo
Exterior Unión
Interior Unión
x / D = 1.0
x / D = 0.0
Momento, M (m.kN)
Deformación, ε x 10⁶
25
20
15
10
5
0
-25000
-15000
-5000
5000
15000
25000

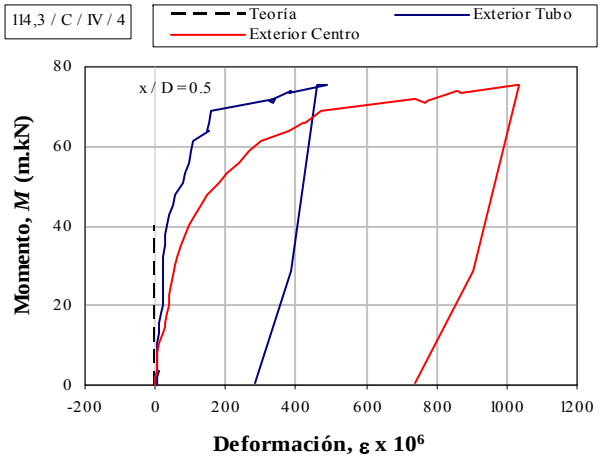

88,9 / 2TM / II / 3
Teoría
Exterior Tubo
Exterior Unión
Interior Unión
x / D = 0.5
Momento, M (m.kN)
Deformación, ε x 10⁶
25
20
15
10
5
0
-2000
-1000
0
1000
2000
3000

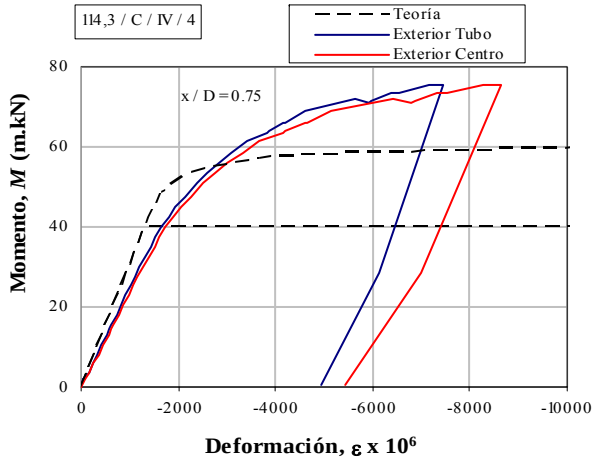

88,9 / 2TM / II / 3
Teoría
Exterior Tubo
Exterior Unión
x / D = 0.75
Momento, M (m.kN)
Deformación, ε x 10⁶
25
20
15
10
5
0
-5000
0
5000
10000
15000
20000
25000

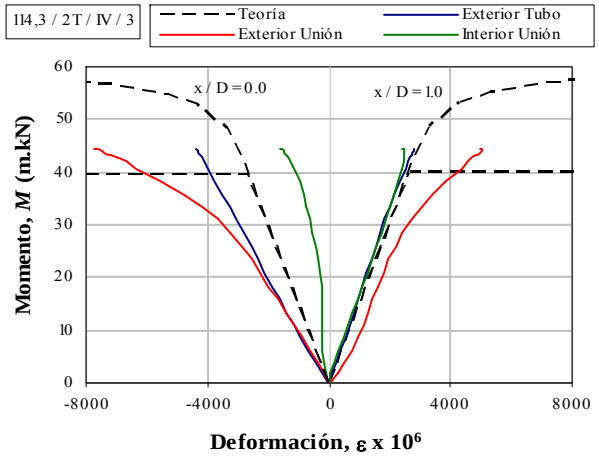
## A.5. Diagramas momento – deformación (probetas con diámetro exterior de 114.3 mm)

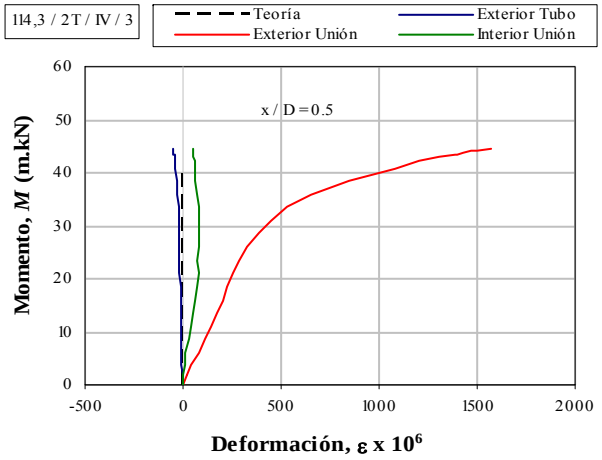
**Nota:** x / D = 0.0 (fibra superior de la sección); x / D = 0.5 (fibra media de la sección); x / D = 0.75 (fibra situada 3/4 del canto); x / D = 1.0 (fibra inferior de la sección).

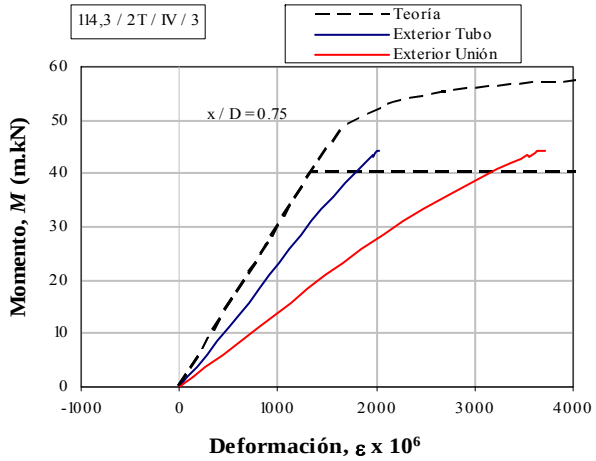


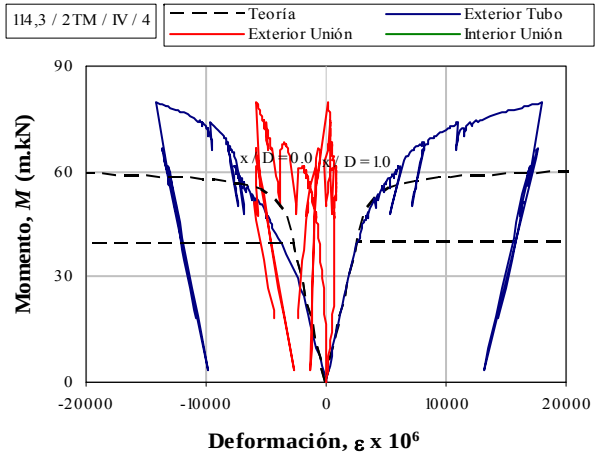



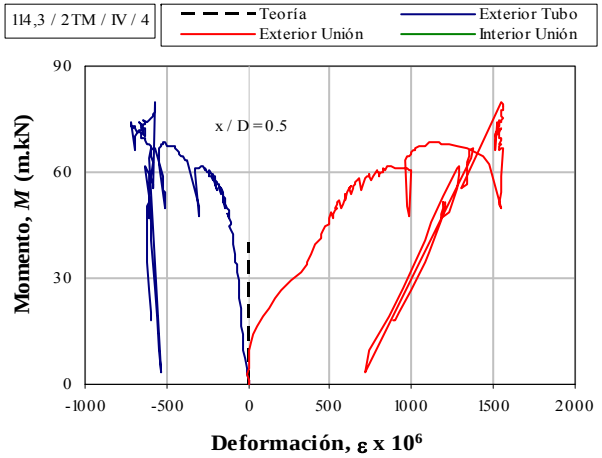



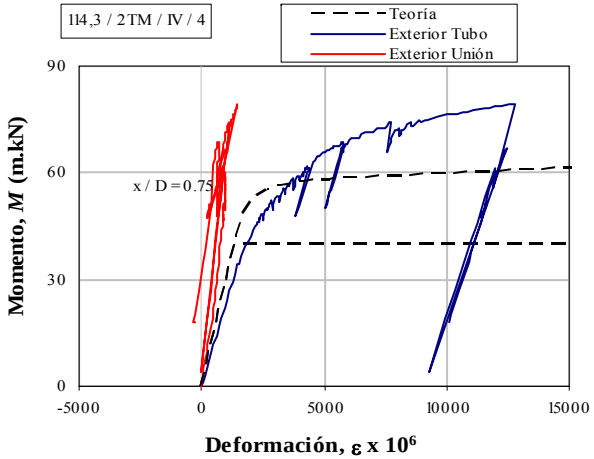



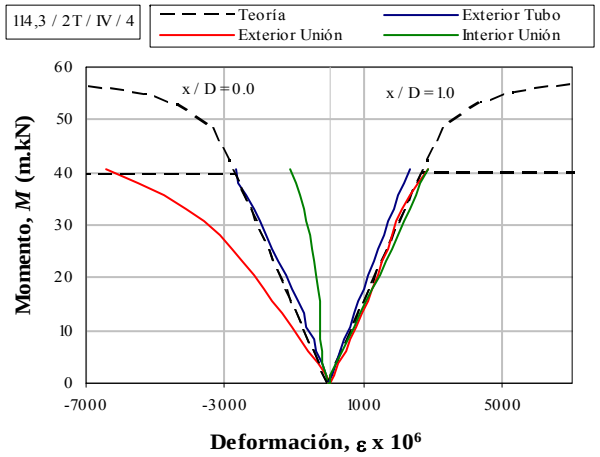



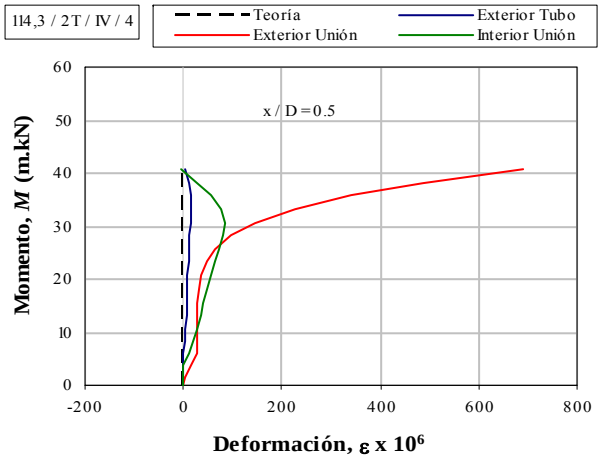



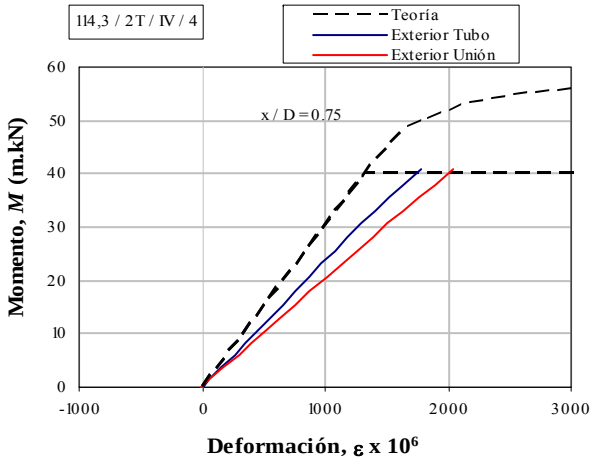

114,3 / 2TM / IV / 4
Teoría
Exterior Tubo
Exterior Unión
Interior Unión
x / D = 0.0
x / D = 1.0
Momento, M (m.kN)
Deformación, ε x 10⁶

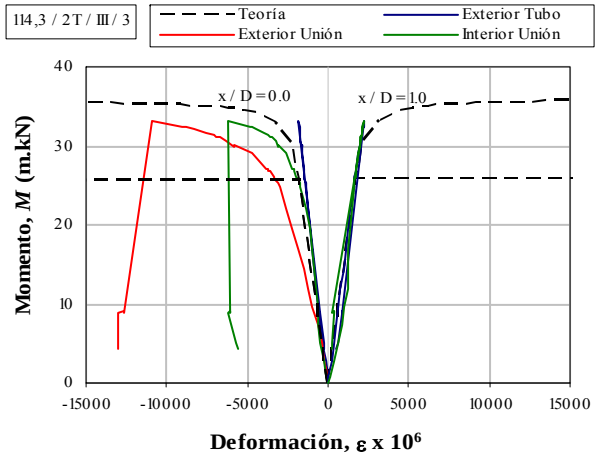

114,3 / 2TM / IV / 4
Teoría
Exterior Tubo
Exterior Unión
Interior Unión
x / D = 0.5
Momento, M (m.kN)
Deformación, ε x 10⁶

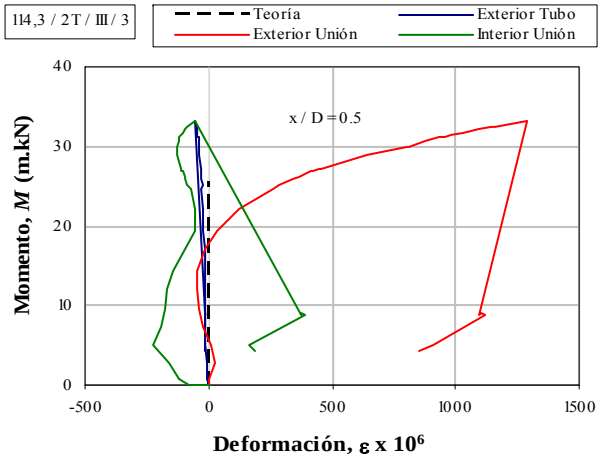

114,3 / 2TM / IV / 4
Teoría
Exterior Tubo
Exterior Unión
x / D = 0.75
Momento, M (m.kN)
Deformación, ε x 10⁶

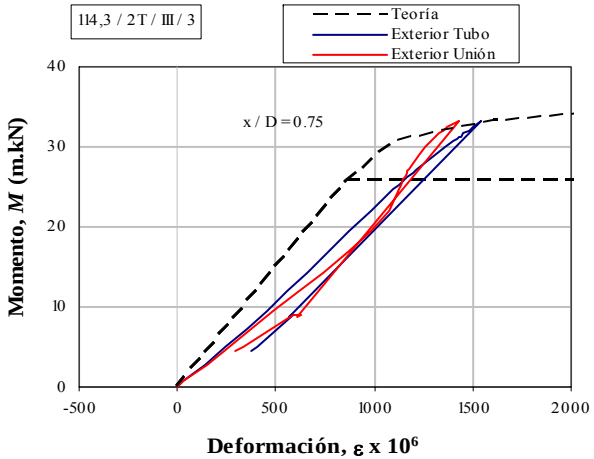

114,3 / 2T / IV / 4
Teoría
Exterior Tubo
Exterior Unión
Interior Unión
x / D = 0.0
x / D = 1.0
Momento, M (m.kN)
Deformación, ε x 10⁶

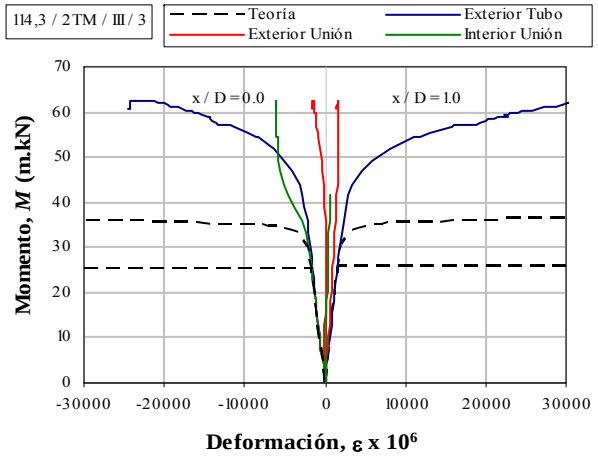

114,3 / 2T / IV / 4
Teoría
Exterior Tubo
Exterior Unión
Interior Unión
x / D = 0.5
Momento, M (m.kN)
Deformación, ε x 10⁶

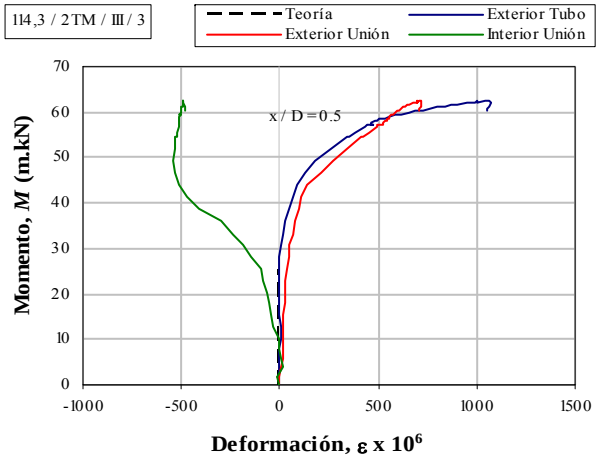

114,3 / 2T / IV / 4
Teoría
Exterior Tubo
Exterior Unión
x / D = 0.75
Momento, M (m.kN)
Deformación, ε x 10⁶

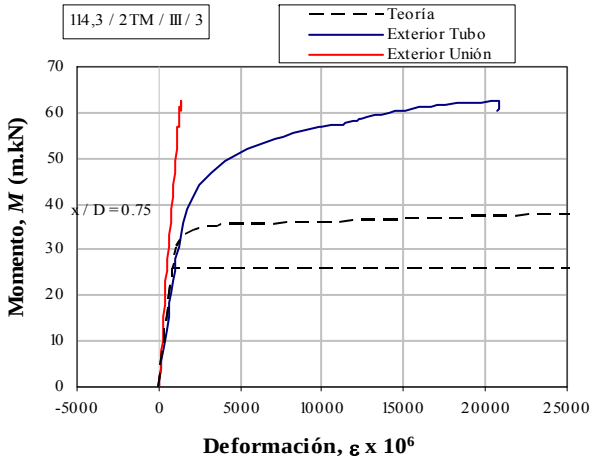

114,3 / 2T / III / 3
Teoría
Exterior Tubo
Exterior Unión
Interior Unión
x / D = 0.0
x / D = 1.0
Momento, M (m.kN)
Deformación, ε x 10⁶


114,3 / 2T / III / 3
Teoría
Exterior Tubo
Exterior Unión
Interior Unión
x / D = 0.5
Momento, M (m.kN)
Deformación, ε x 10⁶


114,3 / 2T / III / 3
Teoría
Exterior Tubo
Exterior Unión
x / D = 0.75
Momento, M (m.kN)
Deformación, ε x 10⁶

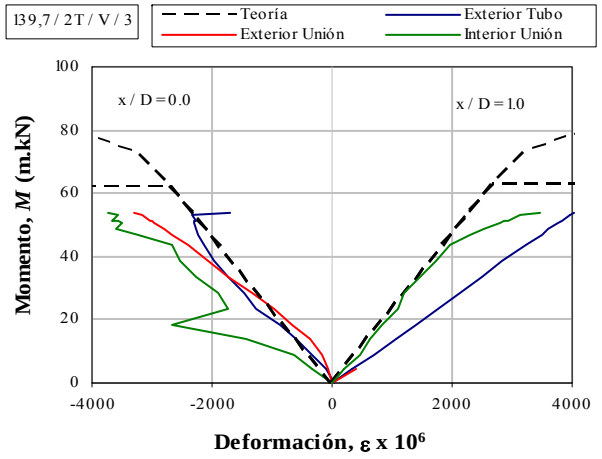

114,3 / 2TM / III / 3
Teoría
Exterior Tubo
Exterior Unión
Interior Unión
x / D = 0.0
x / D = 1.0
Momento, M (m.kN)
Deformación, ε x 10⁶

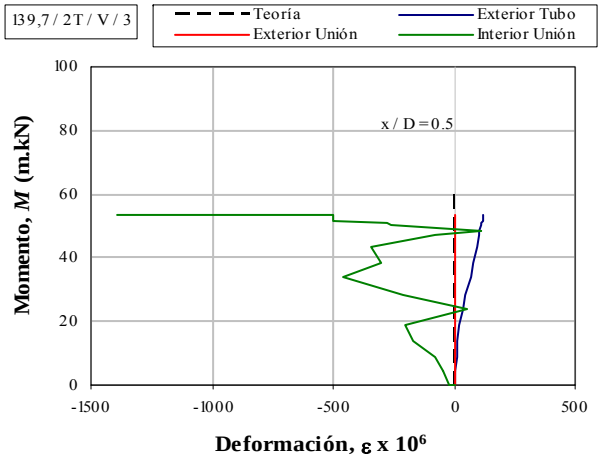

114,3 / 2TM / III / 3
Teoría
Exterior Tubo
Exterior Unión
Interior Unión
x / D = 0.5
Momento, M (m.kN)
Deformación, ε x 10⁶

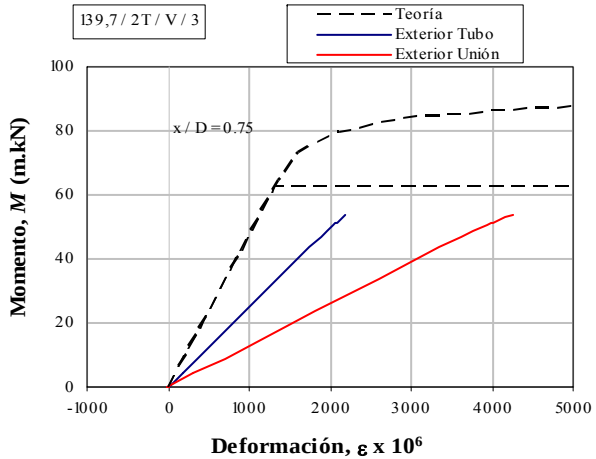

114,3 / 2TM / III / 3
Teoría
Exterior Tubo
Exterior Unión
x / D = 0.75
Momento, M (m.kN)
Deformación, ε x 10⁶

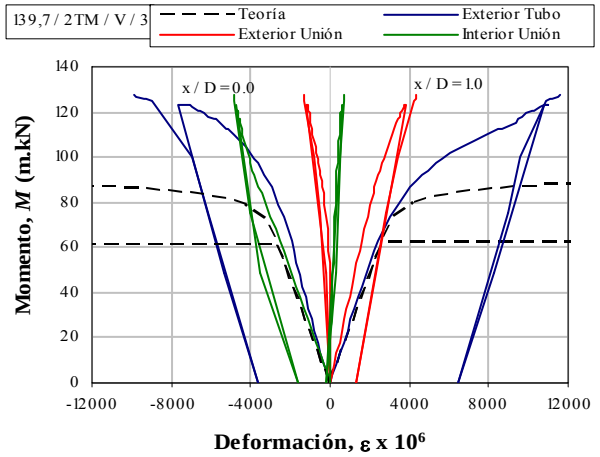
## A.6. Diagramas momento – deformación (probetas con diámetro exterior de 139.7 mm)

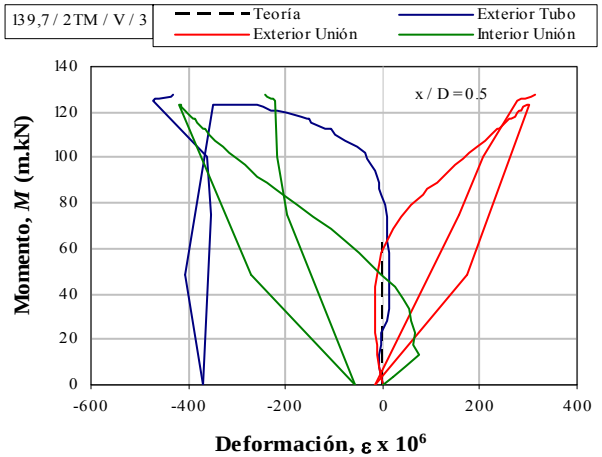
**Nota:** x / D = 0.0 (fibra superior de la sección); x / D = 0.5 (fibra media de la sección); x / D = 0.75 (fibra situada 3/4 del canto); x / D = 1.0 (fibra inferior de la sección).

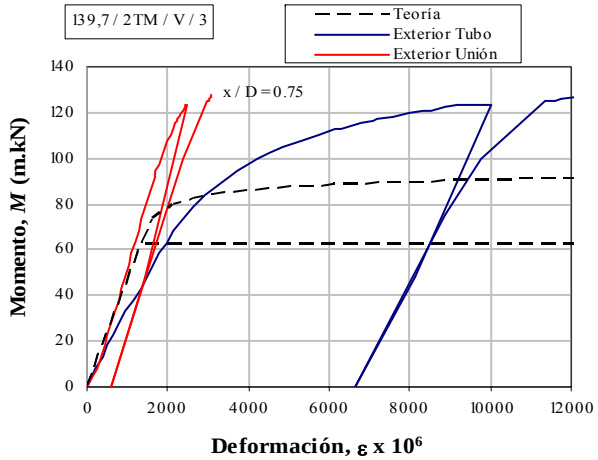


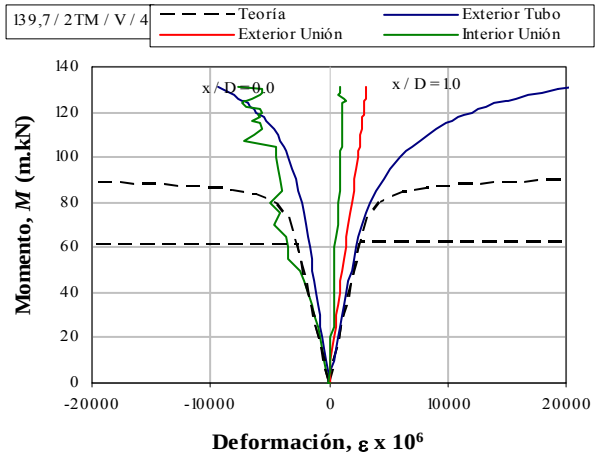



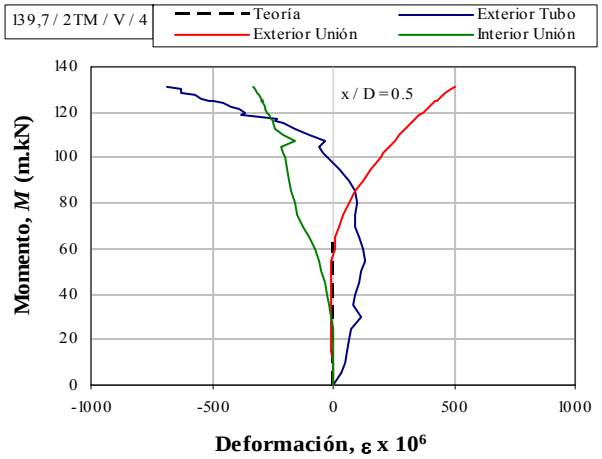



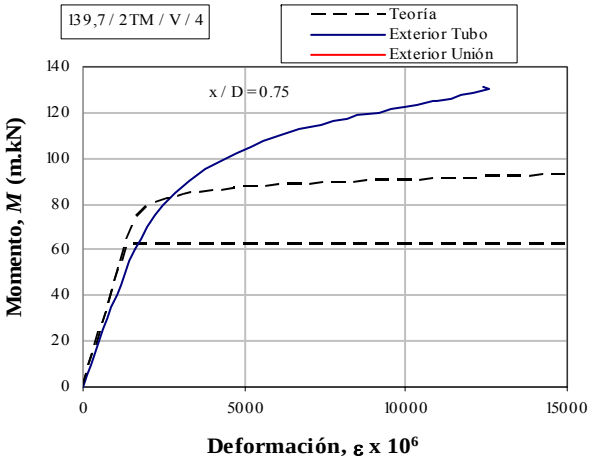




139,7 / 2TM / V / 4
Teoría
Exterior Tubo
Exterior Unión
Interior Unión
x / D = 0.0
x / D = 1.0
Momento, M (m.kN)
Deformación, ε x 10⁶
140
120
100
80
60
40
20
0
-20000
-10000
0
10000
20000


139,7 / 2TM / V / 4
Teoría
Exterior Tubo
Exterior Unión
Interior Unión
x / D = 0.5
Momento, M (m.kN)
Deformación, ε x 10⁶
140
120
100
80
60
40
20
0
-1000
-500
0
500
1000


139,7 / 2TM / V / 4
Teoría
Exterior Tubo
Exterior Unión
x / D = 0.75
Momento, M (m.kN)
Deformación, ε x 10⁶
140
120
100
80
60
40
20
0
0
5000
10000
15000

# APÉNDICE B

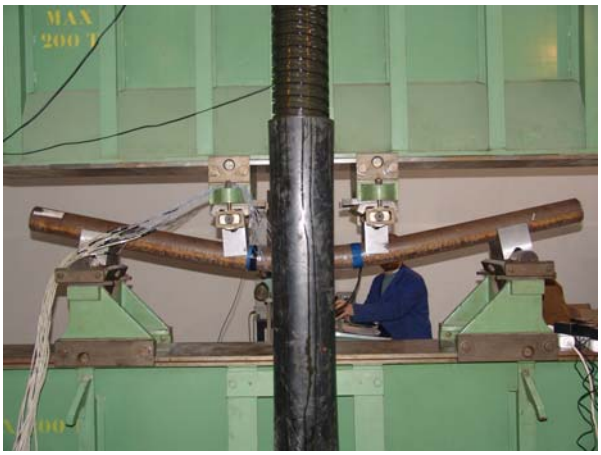
# FOTOGRAFÍAS DE LOS ENSAYOS

## B.1. Tubos 88,9 / xx / I

88,9 / C / I / 1

88,9 / C / I / 2

88,9 / C / I / 4



88,9 / 2T / I / 1

88,9 / 2T / I / 2

88,9 / 2T / I / 3

## B.2. Tubos 88,9 / xx / II

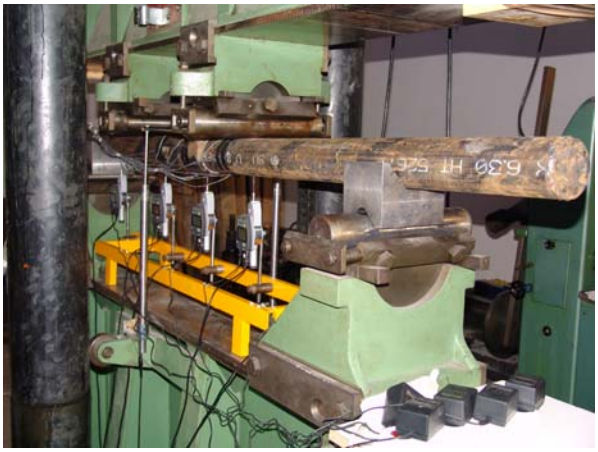
88,9 / C / II / 1

88,9 / C / II / 2

88,9 / 2TM / II / 1

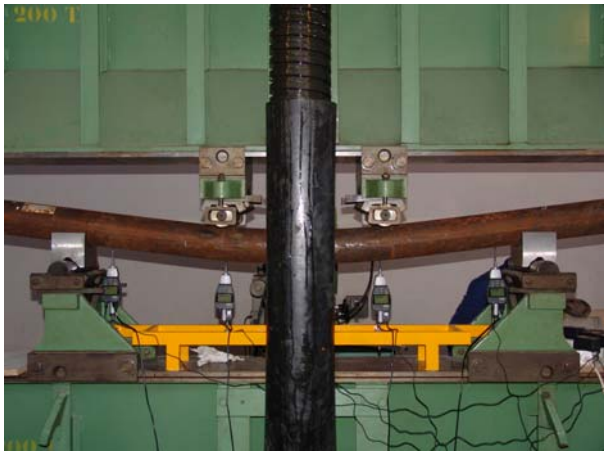
88,9 / 2TM / II / 2

88,9 / 2TM / II / 3



### B.3. Tubos 114,3 / xx / III

| 114,3 / C / III / 1 | |
|---|---|
| | |

| 114,3 / C / III / 2 | |
|---|---|
| |  |

114,3 / 2T / III / 1

114,3 / 2T / III / 2

114,3 / 2T / III / 3

114,3 / 2TM / III / 1

114,3 / 2TM / III / 2

114,3 / 2TM / III / 3

## B.4. Tubos 114,3 / xx / IV

114,3 / C / IV / 1

114,3 / C / IV / 2

114,3 / C / IV / 4

| 114,3 / 2T / IV / 1 | |
|---|---|
| | |

| 114,3 / 2T / IV / 2 | |
|---|---|
| | |

| 114,3 / 2T / IV / 3 | |
|---|---|
| | |

114,3 / 2T / IV / 4

114,3 / 2T / IV / Tubo hueco

114,3 / 2TM / IV / 1

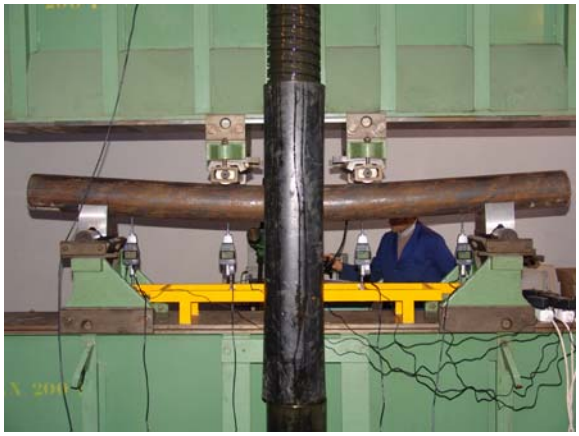
114,3 / 2TM / IV / 2

114,3 / 2TM / IV / 3

114,3 / 2TM / IV / 4

## B.5. Tubos 139,7 / xx / V

139,7 / C / V / 1



139,7 / C / V / 2

139,7 / 2T / V / 1

| 139,7 / 2T / V / 2 |
|---|
| |

| 139,7 / 2T / V / 3 |
|---|
| |

| 139,7 / 2T / V / 4 |
|---|
| |

139,7 / 2TM / V / 1

139,7 / 2TM / V / 2

139,7 / 2TM / V / 3

| 139,7 / 2TM / V / 4 |
| --- |
| |