



## ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA REPARACIÓN DE ESTRUCTURAS DE AUTOBUSES TRAS ACCIDENTE

D. RINCÓN DÁVILA<sup>1</sup>, E. ALCALÁ FAZIO<sup>1</sup>, V. BLÁZQUEZ MARTÍNEZ<sup>2</sup>, Á. MARTÍN LÓPEZ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Politécnica de Madrid  
Instituto Universitario de Investigación del Automóvil  
Campus Sur de la UPM; Carretera de Valencia km. 7, 28031 Madrid, España

<sup>2</sup>Universidad Politécnica de Madrid  
E.T.S. Ingenieros Industriales  
Calle de José Gutiérrez Abascal, 2, 28006 Madrid, España

*(Recibido 30 de marzo de 2018, para publicación 15 de julio de 2018)*

**Resumen** – El vuelco lateral es el caso de accidente más severo al que se pueden ver sometidos los autobuses y autocares, por lo que se han tomado medidas para disminuir los daños en caso de producirse. La medida más importante es la entrada en vigor del Reglamento 66 en diciembre de 1986, aumentando los requerimientos de absorción de energía en su revisión 01 al considerar el 50% de la masa de los pasajeros que se encuentran retenidos por el cinturón de seguridad. Estos vehículos tienen un valor económico elevado, por lo que su reparación en caso de accidentes de severidad media y baja es una práctica habitual, llevándose a cabo mediante el enderezamiento de los perfiles que componen la superestructura. Sin embargo, no existe regulación para los vehículos reparados ni criterios que determinen las condiciones en las que la reparación puede realizarse. Es, por tanto, necesario estudiar la problemática presentada en profundidad. Para ello, y debido al coste y tiempo necesarios para realizar ensayos en este tipo de estructuras, es importante obtener una metodología que recree el fenómeno físico mediante modelos analíticos. En este trabajo se propone la utilización de modelos M.E.F. con excelentes resultados. Por otro lado, se han realizado micrografías de secciones obtenidas en diferentes zonas afectadas por la deformación producida; de esta forma se puede ver el cambio sufrido en la microestructura en el caso de perfiles reparados. Este estudio proporciona conocimiento en un área todavía no explorada, y cuyas aportaciones avanzan en la solución del problema presentado. Los resultados de este trabajo se han realizado en el marco del proyecto SEGVAUTO-TRIES-CM, P2013/MIT-2713 Financiado por la comunidad de Madrid.

**Palabras clave** –M.E.F., microestructura, reparación, rótula plástica, superestructura.

### 1. INTRODUCCIÓN

Los accidentes que pueden sufrir los vehículos de transporte de pasajeros de grandes dimensiones han sido analizados durante décadas, concluyendo que el vuelco es el caso más severo al que se ven sometidos. En 1986 se elaboró el Reglamento 66 [1] como medida para disminuir las consecuencias del vuelco. La introducción del concepto de espacio de supervivencia definido en este reglamento y los requerimientos que se imponen a la estructura han reducido en 3-4 veces el ratio de heridos, y en 10 veces el ratio de fallecidos [2]. La entrada en vigor de la revisión 01 del Reglamento 66 [3], en la que se consideraba el 50% de la masa de los pasajeros debido a la obligatoriedad del uso del cinturón de seguridad, supone un aumento del 30% en los requerimientos de absorción de energía [4].

La reparación de autobuses y autocares tras un accidente de severidad baja-media se realiza en bancos de reparación, donde la superestructura es enderezada mecánicamente hasta situarla de nuevo en la posición original. La valoración de la severidad del accidente, así como la necesidad del vehículo de pasar la ITV tras un vuelco depende del criterio del agente de tráfico asignado. Tampoco el proceso de enderezado, ni las condiciones en las que la ITV puede aceptar la reparación se encuentran reguladas. Esto, unido a la omisión del concepto de vehículos reparados en el Reglamento 66, plantea como problema conocer las consecuencias de las reparaciones en la capacidad de absorción de energía de los vehículos y proponer criterios y herramientas que permitan un mayor estudio y la posibilidad de solucionarlo.

En trabajos anteriores de este estudio se ha calculado la pérdida de energía producida por la reparación en los perfiles que componen la superestructura para diferentes severidades de accidente [5]. Esta pérdida es significativa a partir de los 10 grados de deformación permanente, que alcanza un 10% de pérdida de absorción de energía. La pérdida se hace más relevante a medida que la deformación previa a la reparación aumenta, superando incluso el 30% en que aumentó los requerimientos el Reglamento 66 en su revisión 1 si la deformación alcanza los 20 grados de deformación.

Debido a todo lo expuesto anteriormente, es clara la necesidad de estudiar más en profundidad las consecuencias de la reparación en las estructuras de autobuses. En este trabajo se continua esta línea de investigación planteando dos claros objetivos: entender la naturaleza de la pérdida de resistencia de los perfiles reparados, cuya procedencia pueden ser los cambios en la estructura del material, en la geometría en la zona de la rótula o una combinación de ambas; proponer una metodología validada experimentalmente para realizar modelos de elementos finitos de perfiles reparados que permitan obtener el comportamiento del perfil real. Con la metodología propuesta se pretende en trabajos futuros continuar la investigación más eficientemente, al haber reducido el tiempo y los costes que suponen los ensayos físicos, así como eliminar la dispersión en los resultados intrínseca de los ensayos destructivos.

## 2. METODOLOGÍA

La metodología utilizada se compone de dos fases diferenciadas: una primera experimental, con la realización de ensayos de flexión de uniones y posterior análisis metalográfico; una segunda fase con la realización de modelos de elementos finitos. A continuación, se describen de manera detallada ambas fases:

### 2.1. Análisis metalográfico (Fase I)

El objetivo de esta fase es la determinación de la influencia del material en la pérdida de propiedades mecánicas. Para ello, se va a realizar un estudio metalográfico en distintas secciones de la rótula plástica, antes y después de la reparación, y se van a comparar con una muestra de referencia procedente de una zona del tubo sin deformar. Para obtener las diferentes muestras, es necesario la realización de ensayos de flexión utilizando la metodología propuesta por García [6], en lugar de otras metodologías como la utilizada por Kecman [7], pues ya había sido usada en los ensayos llevados a cabo en la fase previa de esta investigación [5] con buenos resultados. De esta manera se fuerza la aparición de la rótula plástica. En los ensayos se han utilizado dos perfiles idénticos, de sección 60x40x3 y acero s355, y se ha procedido de la siguiente forma:

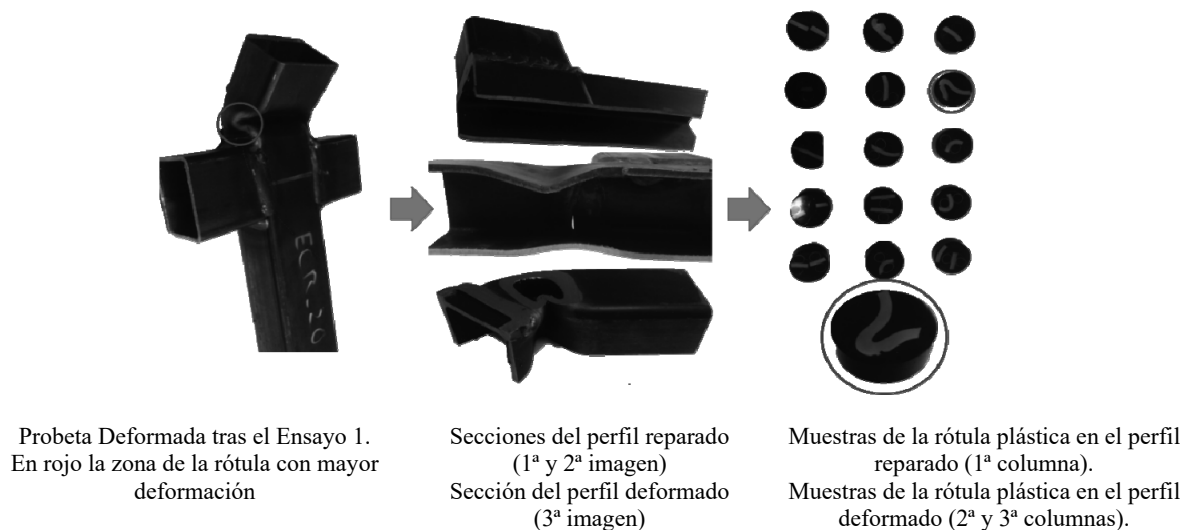


Fig. 1. Proceso de obtención de muestras para el análisis metalográfico.

- Ensayo 1: Deformación del perfil 1 hasta 50 grados; de ahora en adelante denominado “Perfil deformado”.
- Ensayo 2: Deformación del perfil 2 hasta 22 grados.
- Ensayo 3: Enderezado del perfil 2; de ahora en adelante denominado “Perfil reparado”.

Con estas dos muestras de perfiles, se han llevado a cabo cortes en toda la sección de la rótula para obtener una cantidad de muestras representativa de la misma, que posteriormente se han atacado para la realización de las micrografías. Las micrografías obtenidas se van a comparar con dos enfoques: por un lado, se van a comparar cada una de ellas con la muestra de material de referencia; por otro lado, se van a comparar las muestras que pertenecen al mismo punto de la rótula para el caso del perfil deformado y el reparado.

## 2.2. Caracterización mediante modelos M.E.F. (Fase II)

El objetivo de esta segunda fase es desarrollar una metodología para realizar modelos mediante el método de los elementos finitos que reproduzca fielmente la formación de la rótula plástica en perfiles reparados, de manera que el estudio de perfiles reparados sea posible con un número limitado de ensayos físicos, reduciendo el coste y el tiempo necesarios para avanzar en este tema.

La hipótesis con la que se inicia el estudio es la no variación de la microestructura del material tras la reparación, y por tanto la no influencia en la formación de la rótula inicial, representativa de la deformación del accidente, y en la posterior operación de enderezado, equivalente a la reparación del vehículo accidentado. En el modelo los parámetros que definen el material son constantes, dejando únicamente la posibilidad de deformación permanente en la pieza durante el proceso. Esta hipótesis se debe verificar con los resultados de la fase anterior. La Fase II sigue el proceso descrito en la tabla 1.

Los resultados obtenidos se han comparado con las curvas Momento-ángulo (M-w), procedentes de los ensayos realizados en fases anteriores de este estudio [5], utilizando el software de correlación de curvas experimentales y teóricas CORA (CORrelation and Analysis) [8]. Este software compara dos señales en el tiempo utilizando dos métodos: el *Corridor method* y el *Cross correlation method*. Ambos proporcionan coeficientes entre cero y uno, siendo uno la correlación perfecta, si bien el coeficiente del segundo método es una combinación de otros tres coeficientes (fase, tamaño y forma). En este trabajo se va a utilizar el segundo coeficiente sin combinar, por lo que la correlación se cuantifica con cuatro coeficientes; debido a la naturaleza de la curva M-w, el coeficiente de fase siempre va a ser 1, por lo que al combinarlo con los coeficientes de tamaño y forma mejora la correlación y se pierde sensibilidad en el valor. Por tanto, con los coeficientes sin combinar se tiene toda la información y, en este caso, se considera que tal cantidad de coeficientes no es inabordable.

Tabla 1. Proceso Fase II.

Tarea	Descripción
<b>II-A Construcción del modelo M.E.F.</b>	Se genera el modelo M.E.F del perfil y el utillaje. Se verifica la convergencia de los resultados en función del tamaño de elemento.
<b>II-B Aplicación de los casos de carga</b>	Se generan 6 casos de carga correspondientes a los ensayos realizados. Cada caso de carga se compone de: 1 – Primera deformación. 2 – Enderezado. 3 – Segunda deformación.
<b>II-C Correlación con curvas empíricas</b>	Se almacena como salida la curva Momento-Ángulo del ciclo. Se calculan los coeficientes de correlación entre las curvas de ensayo y las de los modelos.

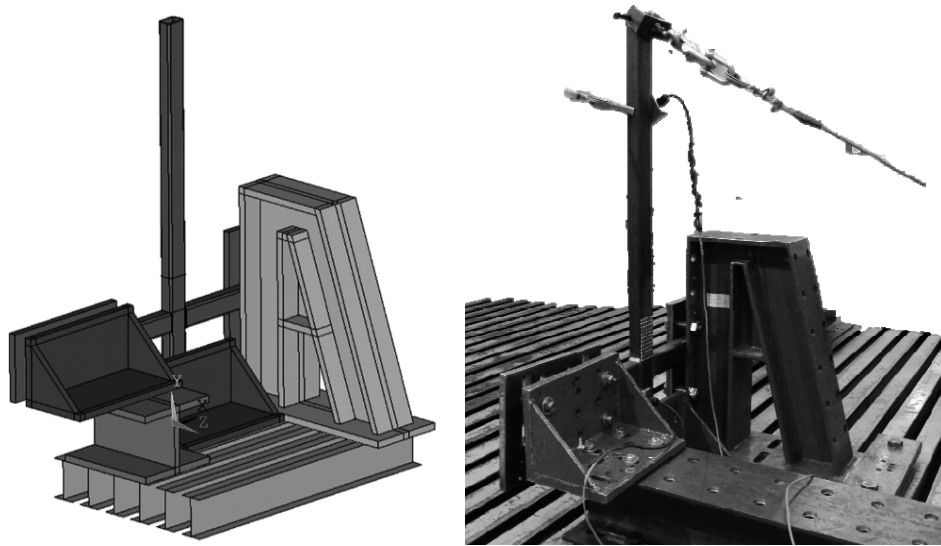


Fig. 2. Modelo y montaje real.

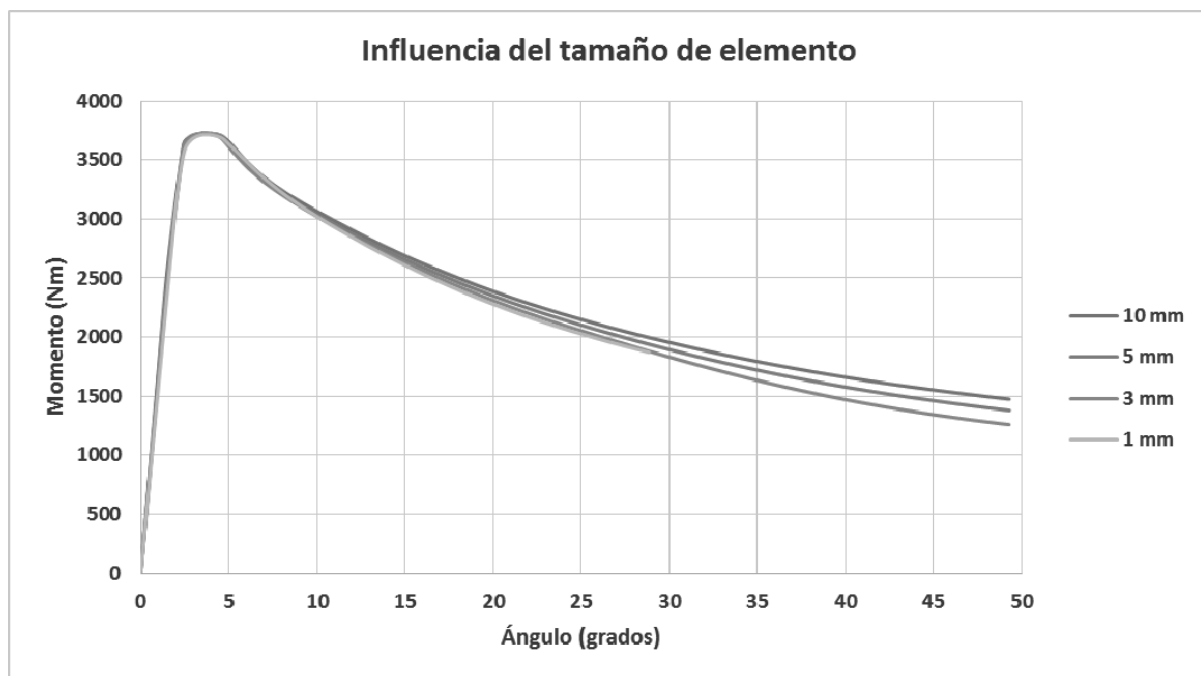


Fig. 3. Convergencia de resultados en función del tamaño de malla.

La Fig. 2 muestra el modelo geométrico del perfil ensayado, el utillaje y la bancada de ensayos; a la derecha una imagen del montaje real. La Fig. 3 contiene las curvas M-w para diferentes tamaños de malla, donde se observa que a partir de 3 mm los resultados obtenidos no varían.

Los modelos se han realizado utilizando el software ANSYS 17.1 con cálculo implícito estático y grandes deformaciones. Este tipo de modelos han sido utilizados ampliamente en la resolución de problemas de flexión en perfiles tubulares de pequeño espesor, y cuyos resultados se encuentran disponibles en la literatura técnica [9, 10,11]. La tabla 2 resume las características del modelo de elementos finitos.

Tabla 2. Características del modelo M.E.F.

<b>Tipología de elemento</b>	SHELL 181 – 4 nodos – Perfiles en ‘I’ bancada SOLID 185 – 8 nodos – Uillaje SOLID 186 - 20 nodos – Perfil tubular
<b>Material</b>	Bilinear Kinematic
<b>Número de nodos</b>	86738
<b>Número de elementos</b>	20757

### 3. RESULTADOS

En este apartado se presentan los resultados de ambas fases, si bien la discusión se encuentra en el apartado 4.

#### 3.1. Resultados del análisis metalográfico (Fase I)

Fig. 4 a Fig. 8 contienen los resultados de las probetas deformada y reparada comparando con la referencia del material, siendo ésta una zona donde no hay deformación plástica. La Fig. 9 compara las mismas zonas antes y después de la reparación. Para referenciar la posición de las zonas correspondientes a cada micrografía, se han enumerado y marcado en un modelo de elementos finitos, posicionando también la referencia y marcándola como R. En todos los casos el aumento aplicado es  $\times 100$ .

#### 3.2. Resultados de la caracterización mediante modelos M.E.F. (Fase II)

La Fig. 5 muestra la comparación entre la deformada de los perfiles ensayados y el modelo. En la Fig. 11 están representadas las curvas M-w de la primera rótula procedentes de los ensayos realizados anteriormente en color gris [5] y la obtenida por el modelo en color azul. En dichos ensayos, se sometieron los perfiles a un proceso similar al descrito en 2.1 (ensayos 2 y 3): seis perfiles idénticos fueron doblados 5,

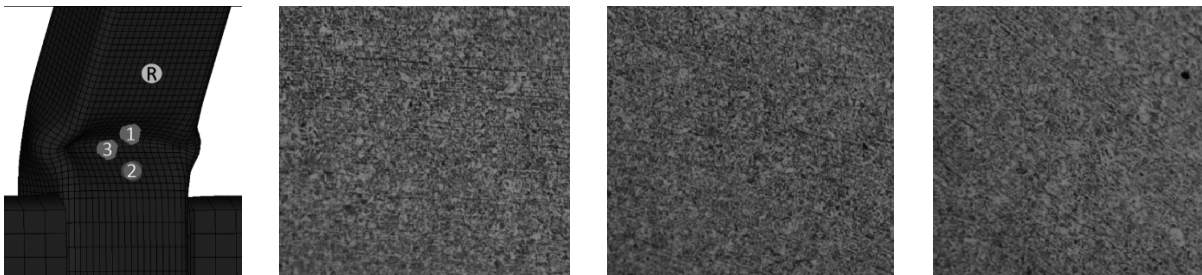


Fig. 4. Micrografías 1 – Comparativa referencia - perfil deformado pared compresión (Ensayo 1).

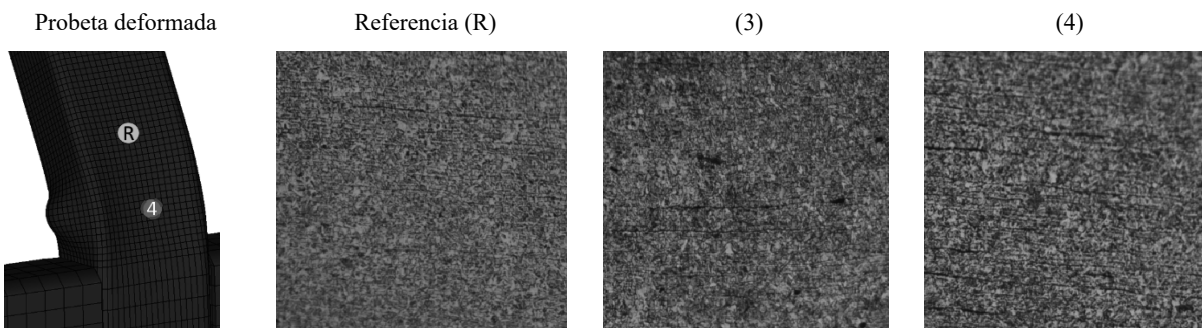


Fig. 5. Micrografías 2 – Comparativa referencia - perfil deformado paredes compresión - tracción (Ensayo 1).

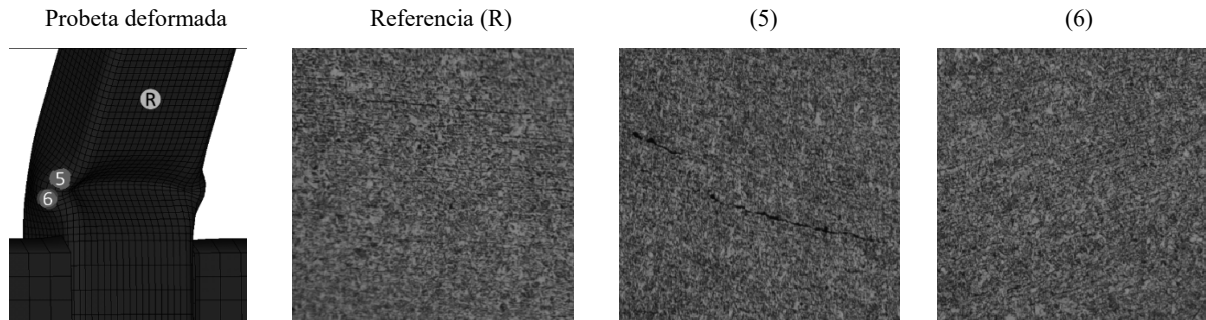


Fig. 6. Micrografías 3 – Comparativa referencia - perfil deformado pared lateral (Ensayo 1).

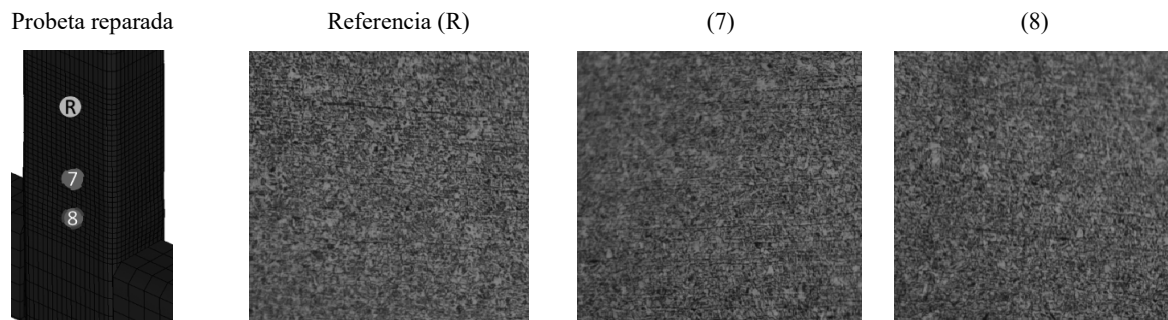


Fig. 7. Micrografías 4 – Comparativa referencia - perfil reparado pared compresión (Ensayo 3).

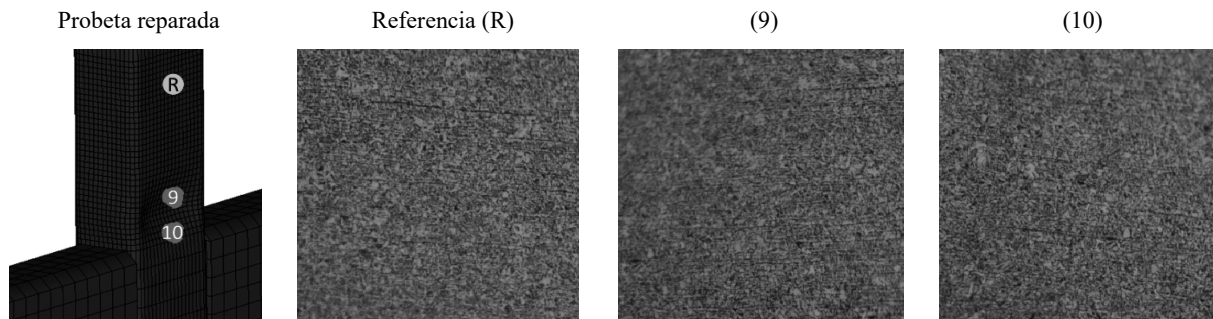


Fig. 8. Micrografías 5 – Comparativa referencia - perfil reparado pared tracción (Ensayo 3).

10 o 20 grados simulando diferentes severidades de vuelco; después se enderezaron hasta la posición inicial; por último, se doblaron nuevamente más de 30 grados en la misma dirección que la primera deformación o en la opuesta, dando lugar a seis casos de carga.

La Fig. 12 contiene las curvas de los ensayos para el ciclo completo de carga y la comparación con el modelo. En la tabla 3 están los valores de los cuatro coeficientes procedentes del CORA para cada caso de carga y cada una de las tres fases del ciclo: primera rótula (R1), enderezado (E), y segunda rótula (R2).

#### 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

De la Fig. 4 a la Fig. 8, correspondientes a las micrografías de las probetas deformada y reparada comparadas con la referencia del material, se pueden observar pequeñas diferencias debidas a la dirección del laminado o la curvatura producida por la deformación en líneas plásticas, sobretodo en la muestra 5 (Fig. 6), donde se aprecia la curva en la pared lateral de la rótula plástica. Sin embargo, tanto los constituyentes, como la forma y tamaño del grano es la misma, correspondiente a un acero no aleado como es el s355. En la Fig. 9 se muestra una vez más que no hay diferencias en el grano antes y después de la re-

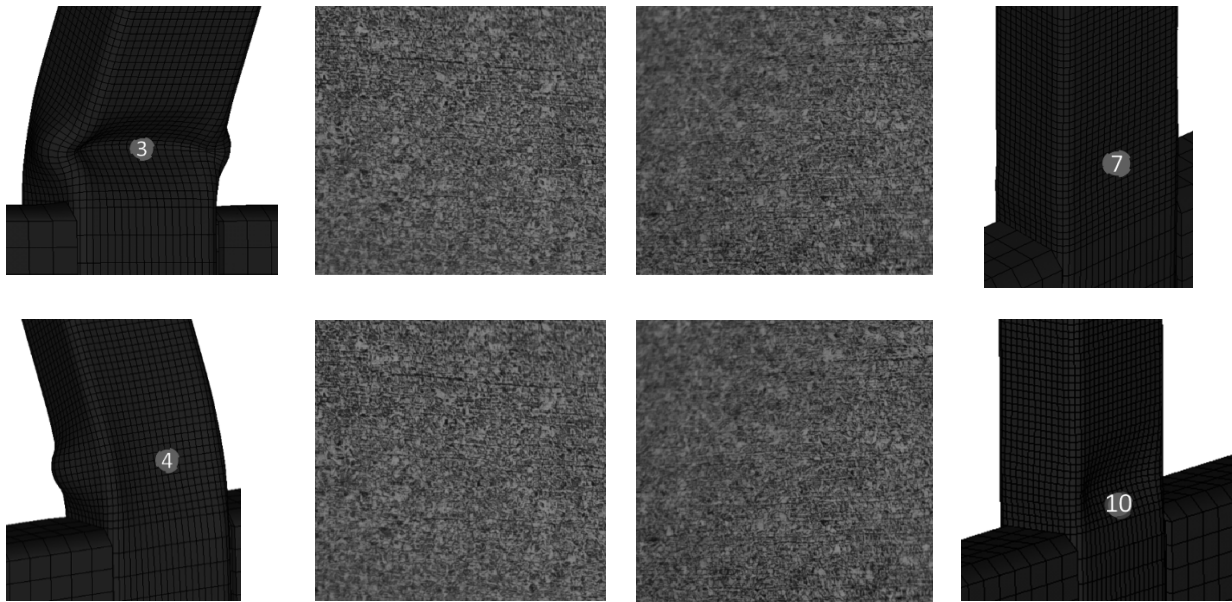


Fig. 9. Comparativa perfil deformado - perfil reparado pared compresión (arriba) y pared tracción (abajo).

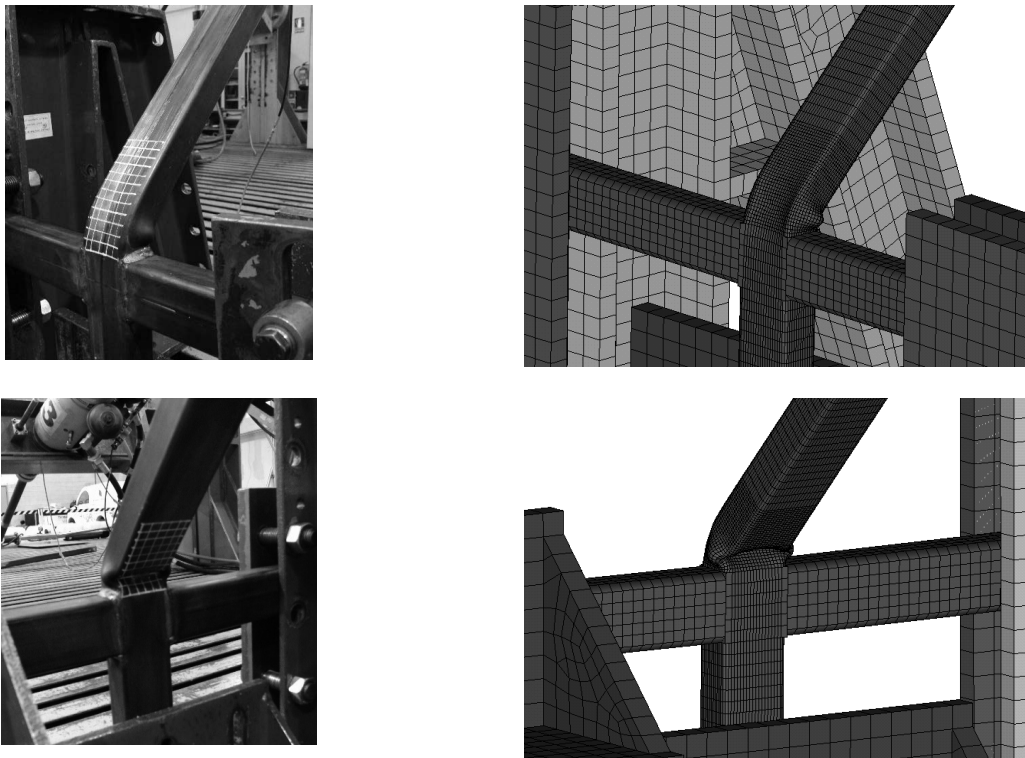


Fig. 10. Deflexiones en ensayo y modelo M.E.F.

paración, ni en la pared comprimida ni en la traccionada. No hay, por tanto, diferencias en la composición o estructura en las imágenes mencionadas.

De la Fig. 10 y Fig. 11 se verifica que la metodología propuesta para la realización de modelos M.E.F. es válida para reproducir el mecanismo de colapso de estos perfiles a flexión uniaxial; la deformación de las paredes del tubo es idéntica, y la curva Momento-ángulo está dentro del corredor de curvas procedentes de ensayos, donde la sujeción a la bancada, así como la propia rigidez de la misma, modifican ligera-

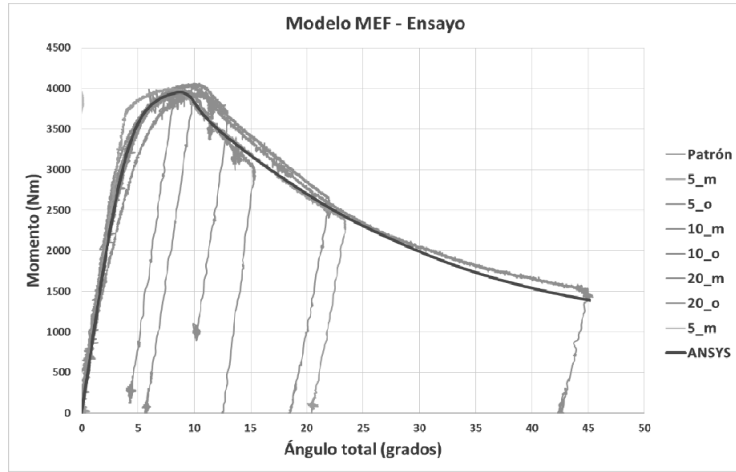


Fig. 11. Comparación curva M-w ensayo y modelo M.E.F.

— Ensayo    —+— Modelo M.E.F.

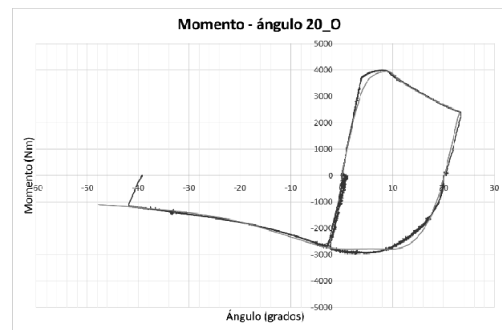
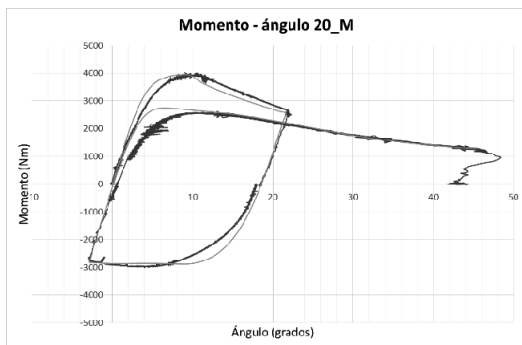
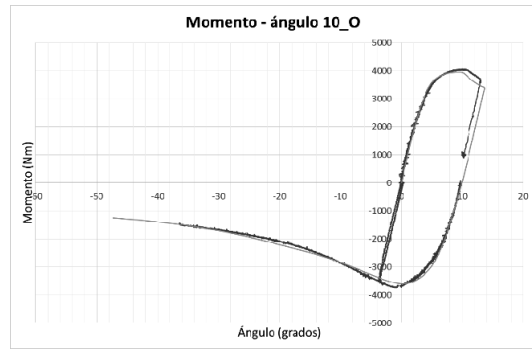
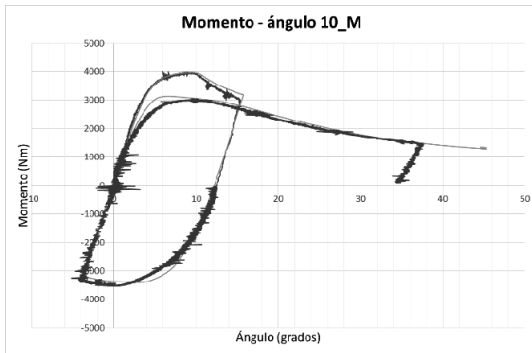
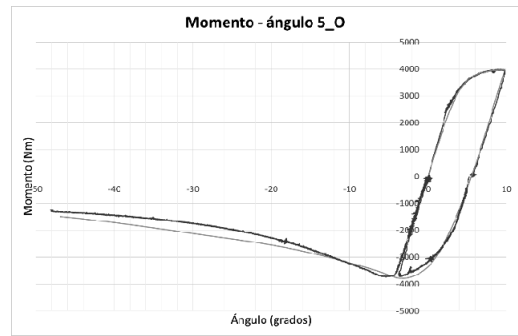
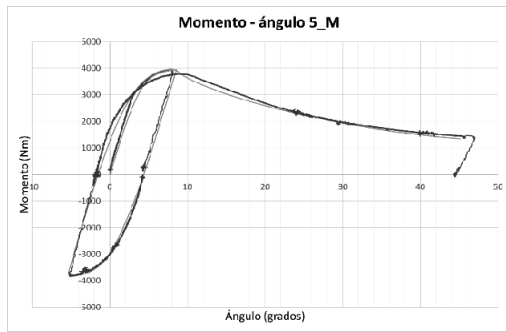


Fig. 12. Comparación curva M-w ensayo y modelo M.E.F. Todos los casos de carga.



Tabla 3. Coeficientes de correlación (COR).A)

ID ensayo	5_M			5_O			10_M		
	R1	E	R2	R1	E	R2	R1	E	R2
Corredor	0.89	0.88	0.95	0.87	0.86	0.68	0.96	0.83	0.94
Shape	0.99	0.99	0.99	1	0.98	0.99	0.99	0.99	1
Size	0.92	0.95	0.96	0.97	0.99	0.86	0.97	0.98	0.90
Phase	1	1	1	1	1	1	1	1	1
ID ensayo	10_O			20_M			20_O		
	R1	E	R2	R1	E	R2	R1	E	R2
Corredor	0.98	1	1	0.85	0.87	0.86	0.94	0.89	1
Shape	1	1	1	0.99	0.99	0.99	1	1	1
Size	0.98	1	0.99	0.99	0.96	0.88	0.95	0.99	0.98
Phase	1	1	1	1	1	1	1	1	1

ramente el comportamiento global del sistema, además de la propia aleatoriedad en las muestras de ensayo, dando lugar a variaciones en la curva Momento-ángulo.

En la Fig. 12 están todos los gráficos de los ciclos para los casos de carga aplicados. La similitud entre el modelo y los ensayos es elevada, como se demuestra con los cuatro coeficientes de correlación de la tabla 3, donde el menor valor es 0.68, estando el resto por encima de 0.83 y en muchos casos, igualado a 1. El mínimo aparece en la curva de la segunda rótula, deformación de un perfil reparado, del ensayo 5\_O; en la gráfica se ve cómo la rigidez del modelo es algo superior tras el colapso que la obtenida en el ensayo. Es posible que esto se deba a una particularidad de la muestra ensayada o del ensayo, si bien otra posibilidad es que para deformaciones tan pequeñas el modelo sea, efectivamente, más rígido que el perfil real. También el momento máximo alcanzado en la segunda rótula para los ensayos '\*\_M' es ligeramente superior en el modelo, aunque al estar en una zona donde la deformación elástica todavía tiene mayor peso que la plástica, es probable que se deba a la rigidez del utillaje.

En cuanto a los coeficientes utilizados, se puede desestimar el valor del coeficiente *Phase*, que mide el desfase en señales cíclicas; en los casos estudiados únicamente hay una fase, luego es lógico que ese coeficiente no pueda ser distinto de 1.

## 5. CONCLUSIONES

Se han realizado ensayos de flexión de perfiles de acero de sección rectangular, simulando la sollicitación predominante en vuelco lateral de autobuses y autocares, así como la reparación por enderezado. En base a estos ensayos se han obtenido muestras para la realización de micrografías que permiten observar cómo afectan las grandes deformaciones a la microestructura. Las muestras recogidas son suficientes para caracterizar la rótula plástica tanto antes como después de la reparación, y tras el estudio realizado se ha determinado que la microestructura del acero no se ve influenciada por las grandes deformaciones producidas por la formación de rótulas plásticas.

Por tanto, la pérdida de propiedades mecánicas de este tipo de perfiles al ser reparados tras un accidente no se debe a cambios en la estructura del material, sino únicamente a la variación de la geometría en la sección de la rótula. Como se ve en la Fig. 10, esta alteración en la geometría es cuantificable y apreciable simplemente mediante inspección visual.

La metodología propuesta para la realización de modelos mediante el método de los elementos finitos está basada en la premisa anteriormente comprobada en cuanto a la influencia inapreciable de cambios en el material, por lo que los modelos únicamente se basan en la variación de la geometría durante el ciclo de carga. Estos modelos reproducen fielmente el comportamiento de los perfiles reparados, obteniendo por tanto una metodología validada para la determinación de la curva momento-ángulo de perfiles reparados.

## AGRADECIMIENTOS

Los investigadores agradecen a la Comunidad de Madrid la financiación del proyecto SEGVAUTOTRIES-CM, P2013/MIT-2713 en el marco del cual se han obtenido los resultados del mismo.

## REFERENCIAS

- [1] UNECE Regulation N° 66 00 Series, “Uniform technical prescriptions concerning the approval of large passenger vehicles with regard to the strength of their superstructure”, United Nations Economic Commission for Europe, Geneva (1986)
- [2] Matolcsy, K., “The severity of bus rollover accidents”, *20th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)*, Paper Number: 07 0989 (2007)
- [3] UNECE Regulation N° 66 01 Series, “Uniform technical prescriptions concerning the approval of large passenger vehicles with regard to the strength of their superstructure”, United Nations Economic Commission for Europe, Geneva (2005)
- [4] García, A. *et al.*, “Impact of the use of safety belts on the structural requirements under rollover of coaches”, *International Journal of Heavy Vehicle Systems*, ISSN (Online) 1741-5152 (Print) 1744-232X, **13**(3)163-169 (2006)
- [5] Alcalá, E. *et al.*, “Experimental assessment of the strength of coaches structures after collision repair”, *Actas del XII Congreso de Ingeniería del Transporte*, 2571-2579, Valencia (2016)
- [6] García, A., “Estudio teórico y experimental del comportamiento de las superestructuras de vehículos de grandes dimensiones para el transporte de pasajeros bajo la acción de vuelco lateral”, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid (1990)
- [7] Kecman, D., “Bending collapse of rectangular and square section tubes”, *International Journal of Mechanical Sciences*, **25**(9-10) 623-636 (1983)
- [8] CORA Release 3.6 User’s Manual, Partnership for Dummy Technology and Biomechanics, Alemania (2012)
- [9] Cazzola, G.J. *et al.*, “Study of the bending response of metal foam-filled beams applied to enhance the rollover behaviour of coach structures”, *International Journal of Crashworthiness*, **18**(6), 620-32 (2013)
- [10] Zhang, X. *et al.*, “Bending collapse of square tubes with variable thickness”, *International Journal of Mechanical Sciences*, **106**(Supplement C), 107-16 (2016)
- [11] Kim, H. *et al.*, “Numerical and analytical study on deep biaxial bending collapse of thin-walled beams”, *International Journal of Mechanical Sciences*, **42**(10), 1947-70 (2000)

## EXPERIMENTAL STUDY OF POST-ACCIDENT COACHES STRUCTURES REPAIR

**Abstract** – Rollover is the most severe accident involving buses and coaches, so countermeasures have been taken to diminish the damages in case of an accident occurs. The most important of these countermeasures is the entry into force of UNECE Regulation 66 on December 1986, increasing the energy absorption requirements in revision 01 by taken in consideration the 50% of the mass of the passengers as consequence of the mandatory installation, and use, of the seat belts. These vehicles have a high economic value, so they are repaired if the mechanical damage is not severe, by means of mechanical straightening in repair benches. However, there is no regulation for these repaired vehicles nor criteria determining the cases within the repair can be an option. It is mandatory the study of this issue to reach a further knowledge. Due to the cost and time to perform tests in these structures, it is important to obtain a methodology capable to reproduce the phenomenon by analytic models. In this work, a F.E.M. model is proposed with great results. On the other hand, micrographs of several sections affected by mechanical deformation show the changes in the microstructure when a profile is repaired. This study provides knowledge in an area not yet explored, and whose contributions represent an advance in the solution of the problematic explained above. The results of this work are included in the project SEGVAUTOTRIES-CM, P2013/MIT-2713 funded by the Autonomous Community of Madrid.

**Keywords** – F.E.M., Microstructure, Plastic Hinge, Repair, Superstructure.