

Capítulo 7:

Modelo Teórico de Perfiles Reparados.

7 MODELO TEÓRICO DE PERFILES REPARADOS.

En este capítulo se desarrolla un modelo teórico para el comportamiento de perfiles reparados mediante enderezado, y se comprueba la correlación con ensayos realizados y con los modelos de elementos finitos.

7.1 Modelo teórico de perfiles reparados.

El modelo propuesto se basa en el modelo presentado en el capítulo anterior para la obtención de la curva Momento-Ángulo. Es necesario contemplar un nuevo parámetro que indique el daño producido en el perfil del que se quiere obtener la curva de comportamiento tras la reparación. Para ello, se utiliza un parámetro fácil de medir en un perfil deformado: el ángulo girado. Otros parámetros, como la geometría deformada, son difíciles de medir e implicaría tener acceso a la zona de la rótula plástica; además de no aportar un significado del daño producido al usuario, pues no hay una correlación clara entre milímetros de deformación y nivel de daño en la estructura del vehículo. El ángulo girado, sin embargo, puede medirse en cualquier parte del perfil por encima de la rótula, y su valor está directamente relacionado con el daño de la estructura del vehículo.

El modelo propuesto puede dividirse, al igual que hace Kecman, en el cálculo del momento máximo y el cálculo de la zona de colapso. En este caso, además, se añade la zona elasto-plástica que puede aparecer en algunos casos.

7.1.1 Momento máximo.

El momento máximo alcanzado por un perfil reparado depende de la geometría deformada y del material: en el modelo de elementos finitos propuesto en los capítulos 4 y 5 se incluye el efecto Bauschinger del material, así como las tensiones residuales. Sin embargo, en el modelo propuesto, este efecto es difícil de considerar pues en cada zona de la rótula varía el valor de límite elástico y las tensiones residuales. Por ello, se propone la dependencia únicamente de la geometría, y en todos los casos se utiliza el valor del límite elástico del material original.

La geometría deformada se introduce mediante los valores de z_A e y_B que se obtienen del modelo del capítulo anterior para el ángulo plástico que ha alcanzado el perfil tras el accidente o primera deformación.

La hipótesis utilizada, basada en los modelos y ensayos realizados durante la tesis, se puede enunciar de la siguiente forma:

La reparación del perfil consiste en la formación de una rótula plástica inversa, con una zona elasto-plástica que abarca el ángulo girado durante la primera deformación. Durante la zona elasto-plástica, la rótula inicial se deshace y se forma en dirección contraria, manteniendo el momento constante hasta que la geometría deformada en la rótula inversa es similar a la geometría deformada tras el accidente.

El momento máximo alcanzado en la rótula inversa depende, pues, de la inercia del perfil al iniciar el proceso de enderezado, y se mantiene aproximadamente constante durante todo el proceso de formación de la rótula inversa. La Figura 117 muestra la curva de primera deformación hasta el punto 1, seguida de una curva de reparación hasta el punto 3,

formándose la rótula inversa durante el tramo 2-3, y colapsando a partir de este punto para el caso de la segunda deformación en sentido opuesto. Si la deformación es en el mismo sentido, se debe producir una segunda inversión en el tramo 4-5, si bien este tramo ya no es de momento constante.

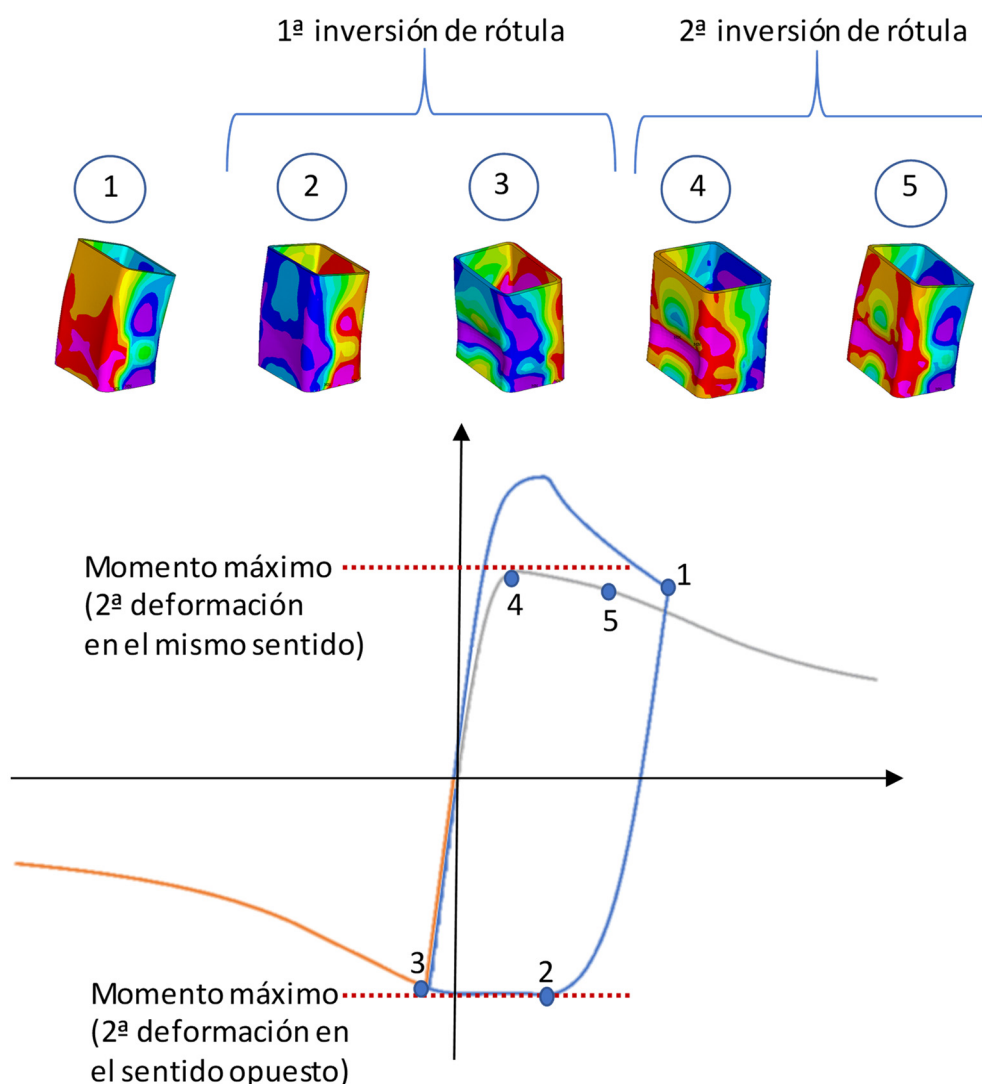


Figura 117. Curva Momento-Ángulo genérica con reparación y segunda deformación.

Con esta teoría se explica la obtención del momento máximo para una segunda deformación en sentido opuesto a la primera. Si la segunda deformación se produce en el mismo sentido que la primera, el momento máximo depende, nuevamente, de la inercia en dicho instante. La inercia del perfil tras el enderezado puede considerarse idéntica sin importar la dirección del giro (puntos 3 y 4), por lo que el momento máximo en ambos sentidos se consideran idénticos. Si bien esta hipótesis no es correcta, pues aun considerando que la inercia sea la misma, el efecto Bauschinger y las tensiones residuales en el material deben alterar el momento alcanzado en ambos sentidos, los resultados muestran que dicha alteración no es muy relevante. En la Figura 118 se puede apreciar como el momento máximo alcanzado para una misma pre-deformación, es similar para una segunda deformación independientemente del sentido

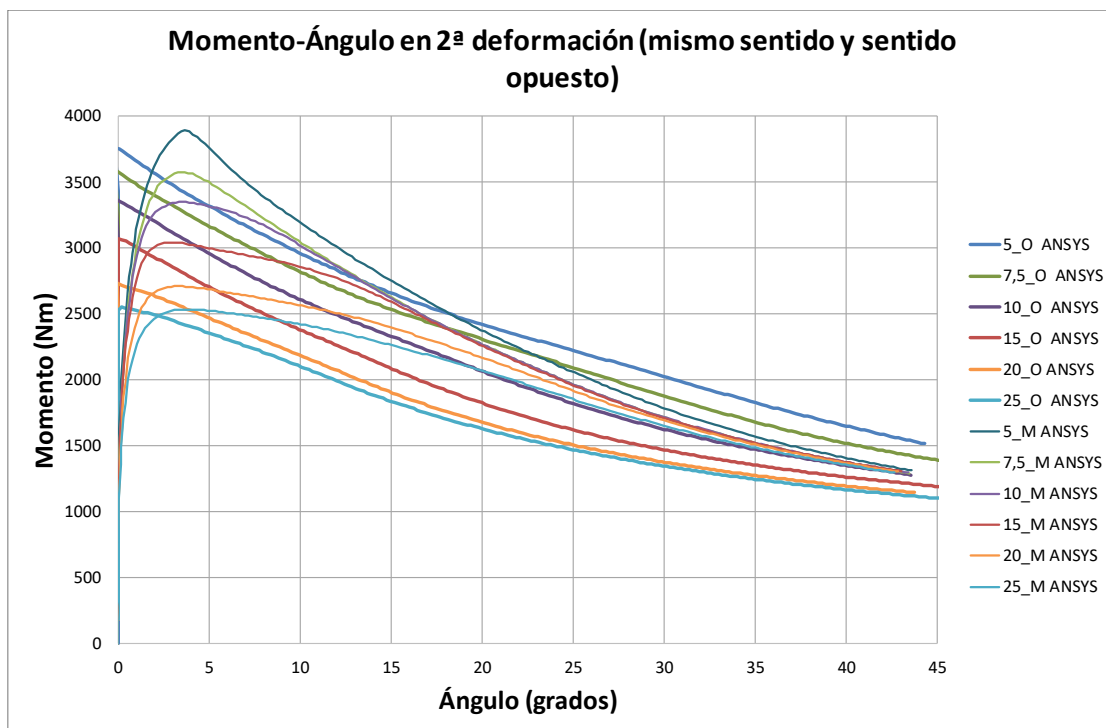


Figura 118. Curvas Momento-Ángulo en segunda deformación perfil 60.40.3 s355.

Con las hipótesis utilizadas para el cálculo del momento máximo se pueden explicar todos los comportamientos encontrados:

- Un aumento del ángulo girado en primera deformación implica una mayor deformación del perfil y, por tanto, una menor inercia y un menor momento máximo.
- La variación de la inercia es mayor en los primeros ángulos de giro, por lo que a medida que el ángulo girado en primera deformación aumenta, la disminución del valor de momento máximo es menor.
- Si el ángulo girado en primera deformación es inferior al ángulo de la meseta, no hay variación en la geometría y el momento máximo será igual en primera y segunda deformación.

7.1.2 Zonas elasto-plástica y plástica.

La meseta es, por definición, la parte de la curva donde el perfil todavía no ha iniciado la rótula plástica. Por tanto, la zona elasto-plástica o meseta, siguiendo con la teoría utilizada para calcular el momento máximo, solo puede aparecer cuando la segunda deformación se produce en la misma dirección que la primera deformación.

En el caso contrario, la segunda deformación en sentido opuesto, la curva momento-ángulo es una continuación de la reparación (Figura 117). Tras la reparación, se ha formado la rótula inversa y, por tanto, si se sigue deformando en dicho sentido, el perfil continúa colapsando.

Si la segunda deformación es en el mismo sentido que la primera, se debe invertir de nuevo la rótula iniciada durante la reparación, por lo que la extensión de la misma depende del ángulo que necesite el perfil para reinvertir la rótula (Figura 119):

- En perfiles de pared delgada, con $Q > 50$, el colapso de la estructura se produce a un ángulo equivalente a aquel que produce la geometría deformada en un 75% de la estructura reparada.
- En perfiles de pared gruesa, con $Q < 50$, la extensión de la meseta es la diferencia entre el ángulo girado y el valor de la meseta en primera deformación.

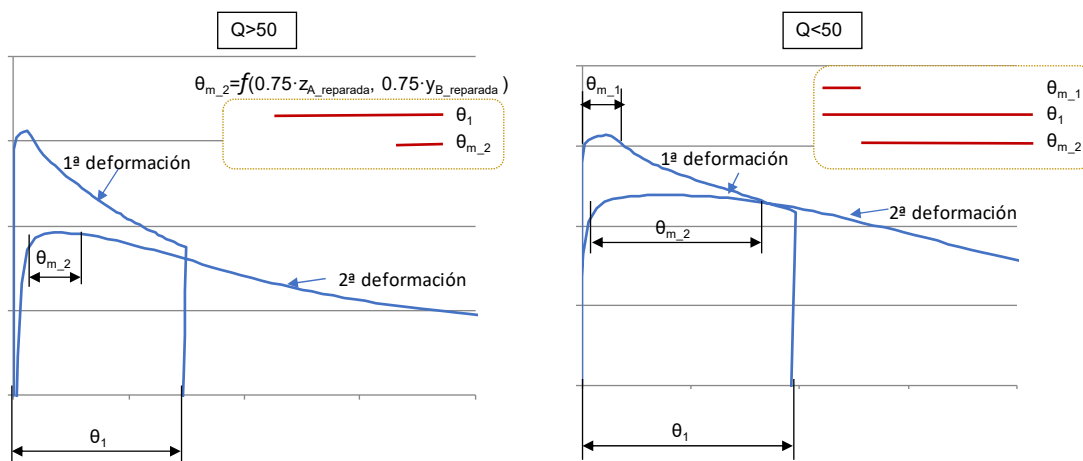


Figura 119. Extensión de la meseta en 1ª y 2ª deformación.

Una vez alcanzado el valor final de la meseta, se inicia el proceso de colapso. Este proceso se calcula con el mismo modelo propuesto para el perfil sin deformar, iniciando todas las variables geométricas correspondientes al valor de ángulo para el cual colapsa la estructura en segunda deformación; este valor de ángulo varía en función del tipo de perfil. Por otro lado, analizando los resultados de los modelos de elementos finitos, la deformación de la geometría reparada es aproximadamente un 75% de la geometría tras la primera deformación, si bien están invertidos los flancos a tracción y compresión. Teniendo lo anterior en cuenta, se propone:

- Perfiles con segunda deformación en sentido opuesto: el ángulo inicial de la rótula inversa corresponde al valor de ángulo que proporciona un 75% de la deformación de la geometría tras la primera deformación.
- Perfiles con segunda deformación en el mismo sentido: tras el proceso de enderezado, la geometría es, igualmente, un 75% de la deformada tras la primera deformación. Sin embargo, al deformar en sentido opuesto a la reparación, se debe invertir la rótula. En este punto, aparecen dos variantes en función del índice Q , tal y como ocurre con la zona elasto-plástica comentada anteriormente.
 - $Q > 50$: el colapso se produce a partir de una geometría que es el 75% de la geometría ya reparada, aunque invertidos nuevamente los flancos a tracción y compresión. En este caso, el colapso de la estructura se produce antes de llegar al ángulo girado en primera deformación.
 - $Q < 50$: el colapso se produce para un valor de ángulo que coincide con el valor de ángulo igual al de la rótula girada en primera deformación, es decir, a la diferencia entre el valor girado en primera deformación y el valor de la meseta. En este caso, la estructura mantiene el momento máximo durante el proceso de inversión de la rótula y hasta alcanzar el ángulo correspondiente al valor de ángulo que produce la geometría de la primera deformación.

7.2 Metodología de verificación del modelo.

Una vez desarrollado el modelo en base a las hipótesis expuestas en el apartado anterior, se comprueba en una serie de casos representativos. Para ello, se realiza un diseño de experimentos basado en la técnica de muestreo ortogonal (*Orthogonal Sampling*). Esta técnica obtiene un número de casos dentro del dominio establecido para el cual se minimiza la correlación entre las diferentes variables y se maximiza la zona del dominio estudiada. De esta manera, con pocas muestras se puede realizar un DOE cuya robustez sea suficiente para el objetivo propuesto.

En este caso, se definen las variables: alto, ancho y espesor de la sección, así como el ángulo girado en primera deformación, como variables para el muestreo mediante muestreo ortogonal. Las variables límite elástico y módulo tangente se obtienen mediante un muestreo aleatorio dentro del rango determinado. Los rangos de las variables se muestran en la Tabla 27, y el resultado del muestreo para 18 casos, en la Tabla 28. Un ángulo positivo, implica una segunda deformación en el mismo sentido de la primera deformación, y un valor negativo implica la segunda deformación en sentido opuesto.

Tabla 27. Rango de las variables para el DOE de perfiles reparados.

RANGO DE LAS VARIABLES						
	ancho	alto	espesor	ángulo	sip	Etan
mín	50	30	2	-25	270	100
máx	80	50	4	25	500	1000

Tabla 28. DOE Muestreo ortogonal.

ID	ancho	alto	espesor	ángulo	sip	sipu	Etan	Q
1	53.5	38.2	2.2	-17.5	366	431.8	329	66
2	72.9	37.1	3.5	20	471	567.4	482	35
3	62.4	42.9	3.6	25	452	615.8	819	31
4	64.1	39.4	2.1	-22.5	331	423	460	95
5	74.7	31.2	3.2	7.5	403	522	595	38
6	80.0	45.3	2.5	-10	395	483.4	442	101
7	69.4	46.5	2.9	22.5	343	461.4	592	60
8	78.2	35.9	3.1	12.5	284	472.4	942	50
9	65.9	33.5	2.8	-15	433	524.8	459	46
10	51.8	41.8	2.4	-7.5	492	554.4	312	61
11	50.0	32.4	2.0	15	418	441.8	119	66
12	55.3	48.8	3.3	5	394	462.8	344	37
13	57.1	34.7	4.0	-12.5	466	539.2	366	19
14	67.6	30.0	3.8	10	401	479.8	394	22
15	71.2	50.0	3.9	-20	350	546.8	984	37
16	76.5	47.6	2.7	-25	350	512	810	83
17	58.8	44.1	2.6	17.5	477	539.2	311	62
18	60.6	40.6	3.4	-5	380	555	875	33

La correlación entre las variables dos a dos se muestran en la Figura 120. La mayor correlación entre las variables es del 24% para la correlación entre el ancho y el espesor de la sección, siendo la correlación entre variables total es del 5%. Con estos resultados, se considera que el muestreo es suficientemente robusto y se tiene todo el dominio representado.

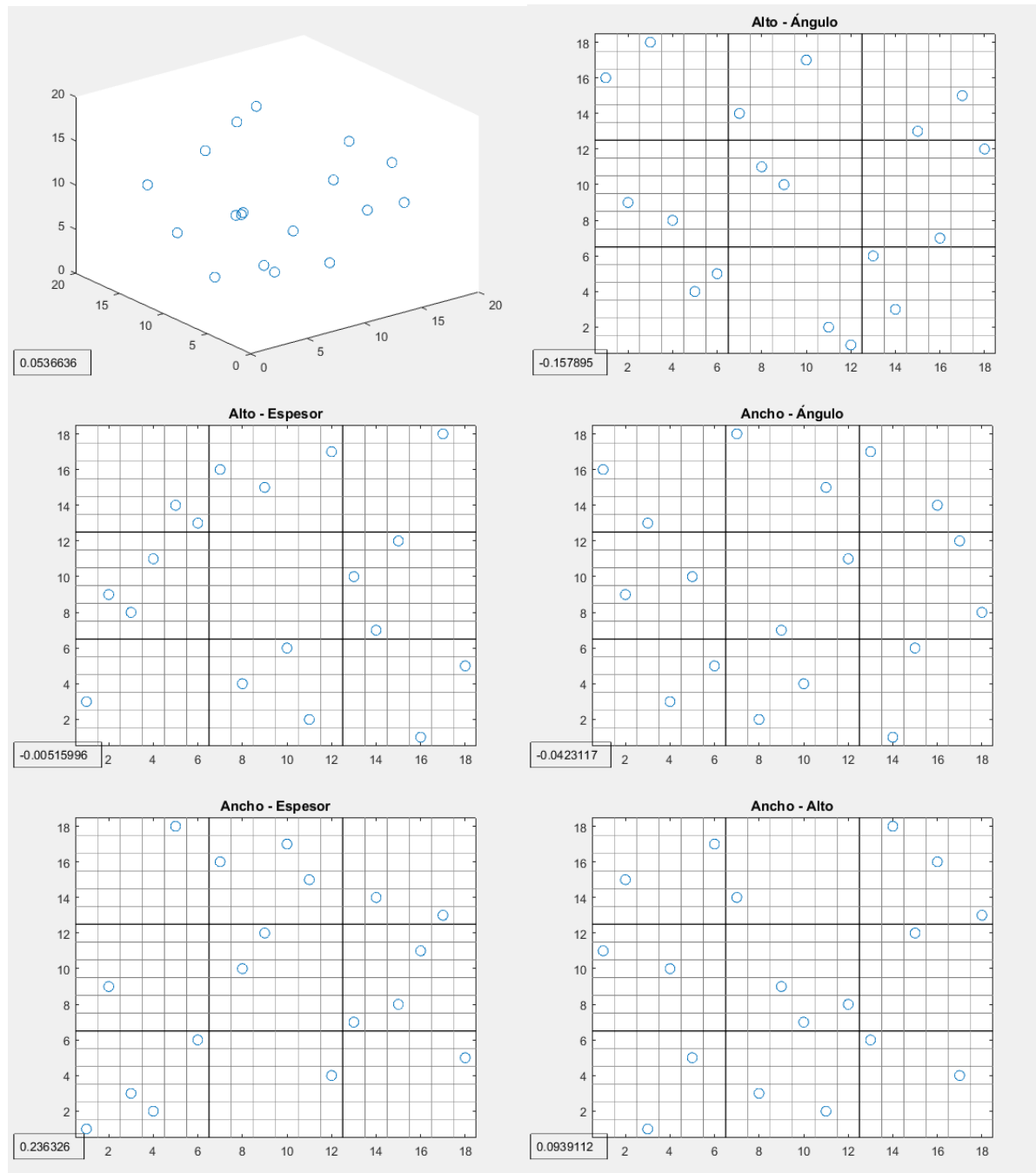


Figura 120. DOE - Correlación entre variables.

7.3 Resultados.

A continuación se muestran los resultados para el DOE basado en el muestreo ortogonal, y se finaliza el capítulo de resultados con la comparación del modelo y los ensayos de reparabilidad realizados para el capítulo 4.

7.3.1 DOE basado en el muestreo ortogonal.

Los resultados del modelo para los casos del DOE propuesto se presentan en las figuras siguientes (Figura 121 a Figura 126). Para la visualización de los resultados se han dividido los casos en cuatro grupos, según el sentido de la segunda deformación y el índice Q. De esta forma, es posible detectar tendencias debida a factores que no se han tenido en cuenta.

En primer lugar, la Figura 121 muestra los resultados de la curva Momento-Ángulo para perfiles de pared delgada ($Q > 50$), cuya segunda deformación es en el sentido contrario a la primera deformación.

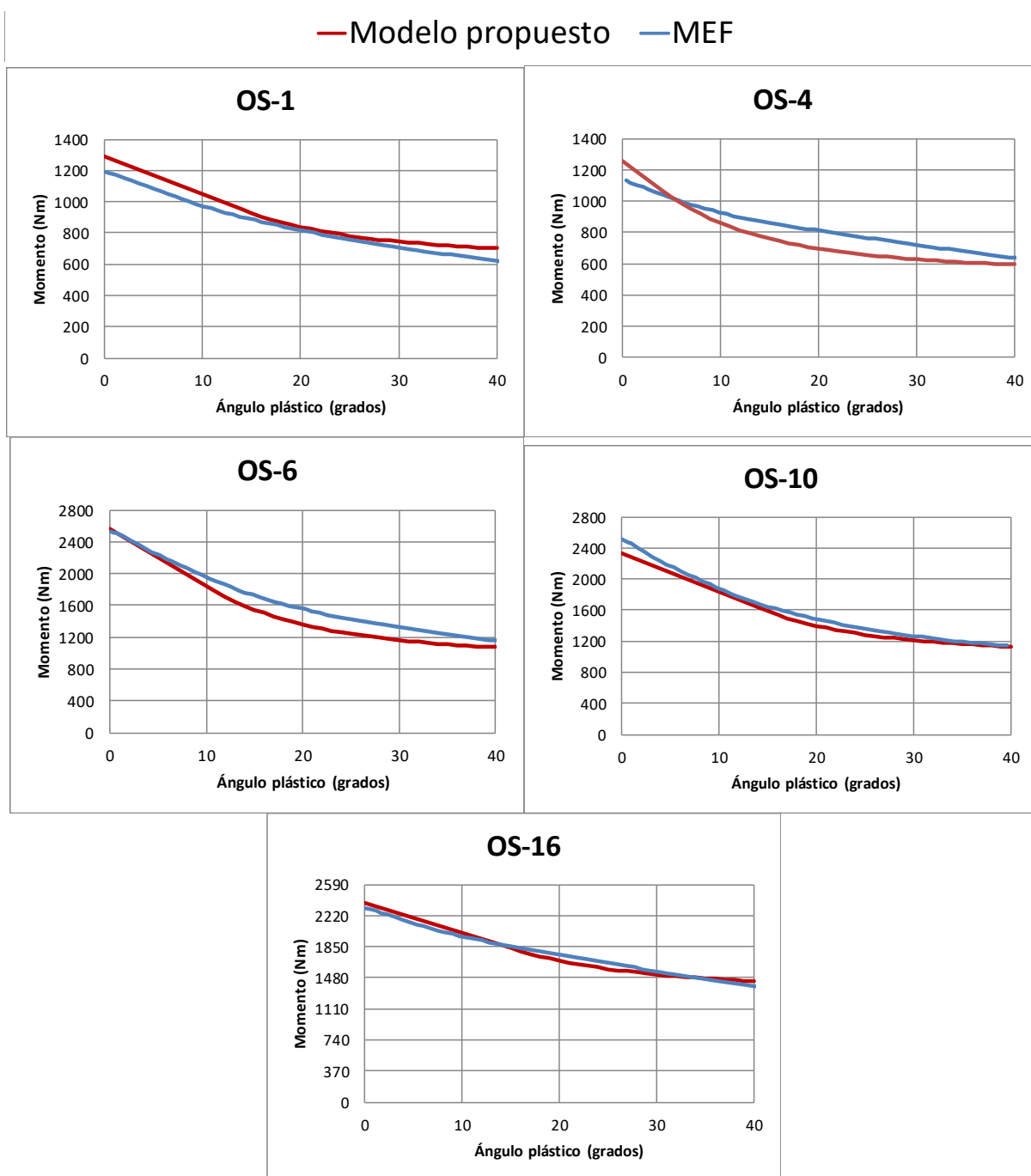


Figura 121. 2ª Deformación en sentido opuesto. MEF – Modelo propuesto. Casos $Q > 50$

Se comprueba que tanto la forma de la curva como el error cometido en magnitud no es elevado, ya que todas las curvas obtenidas mediante el modelo propuesto alcanzan un error máximo del 13% para el valor de ángulo cuyo error es máximo (casos OS-4 y OS-6, ángulo de 20°). Además, el momento máximo es en todos los casos similar al obtenido mediante elementos finitos.

La Figura 122 muestra los resultados de la curva Momento-Ángulo para perfiles de pared gruesa ($Q < 50$), cuya segunda deformación es en el sentido contrario a la primera deformación.

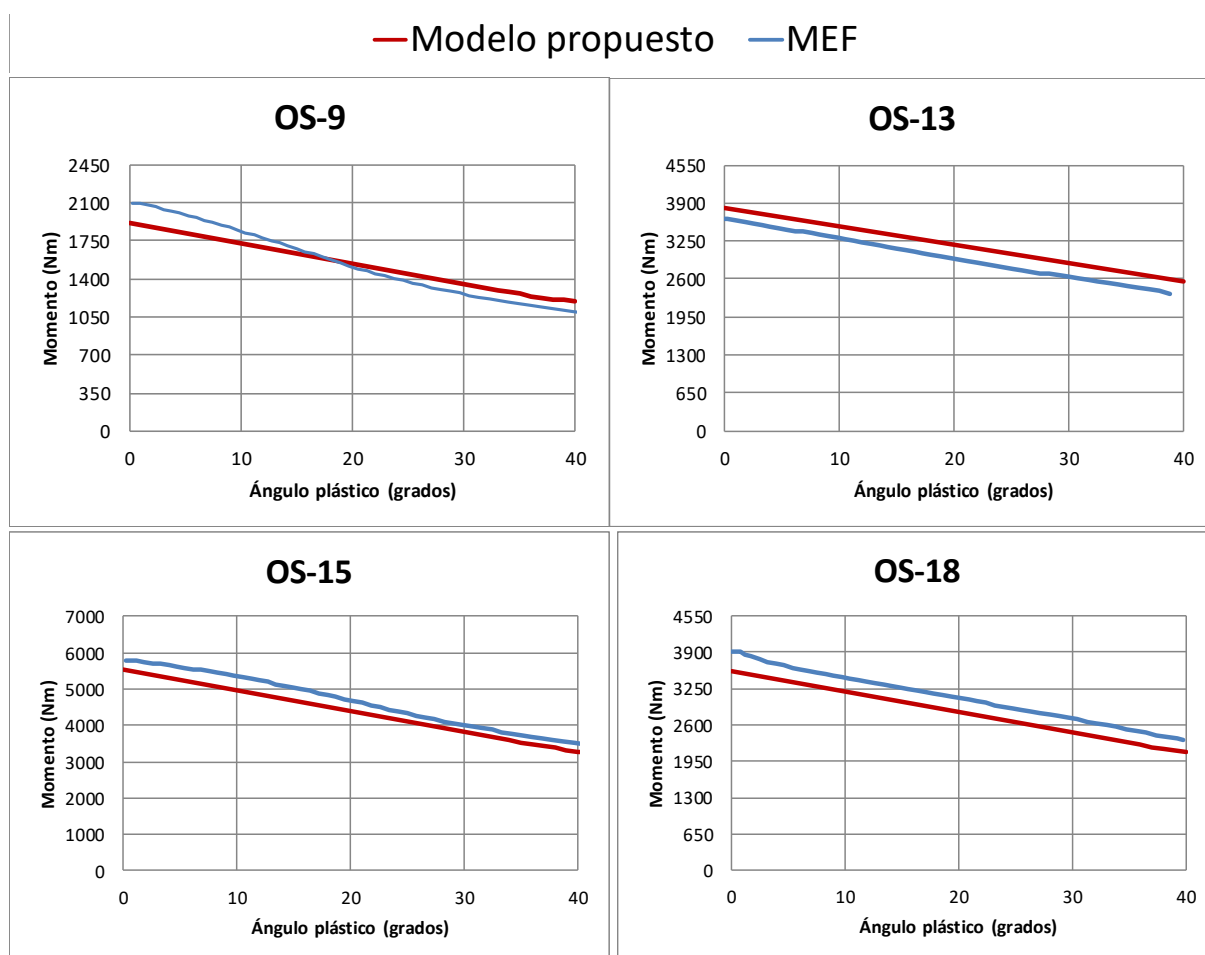


Figura 122. 2ª Deformación en sentido opuesto. MEF – Modelo propuesto. Casos $Q < 50$

Al igual que para perfiles de pared delgada, la forma de la curva es muy similar, siendo en este caso una recta. El valor de momento máximo tiene un error superior que para perfiles de pared delgada, debido al error cometido en la estimación del ángulo de meseta y, por tanto, de la deformada de la rótula tras la primera deformación. El error máximo cometido es precisamente en el instante inicial, alcanzando un valor máximo del 8%.

Se considera que, independientemente del índice Q , el modelo propuesto predice el comportamiento del perfil tras el enderezado.

La Figura 123 muestra los resultados de la curva Momento-Ángulo para perfiles de pared delgada ($Q > 50$), cuya segunda deformación es en el mismo sentido que la primera deformación. Como se comenta en las hipótesis utilizadas para desarrollar el modelo, en este caso aparece una zona elasto-plástica, por lo que la predicción del comportamiento aumenta su complejidad si se compara con el caso de los perfiles cuya deformación es en el sentido opuesto.

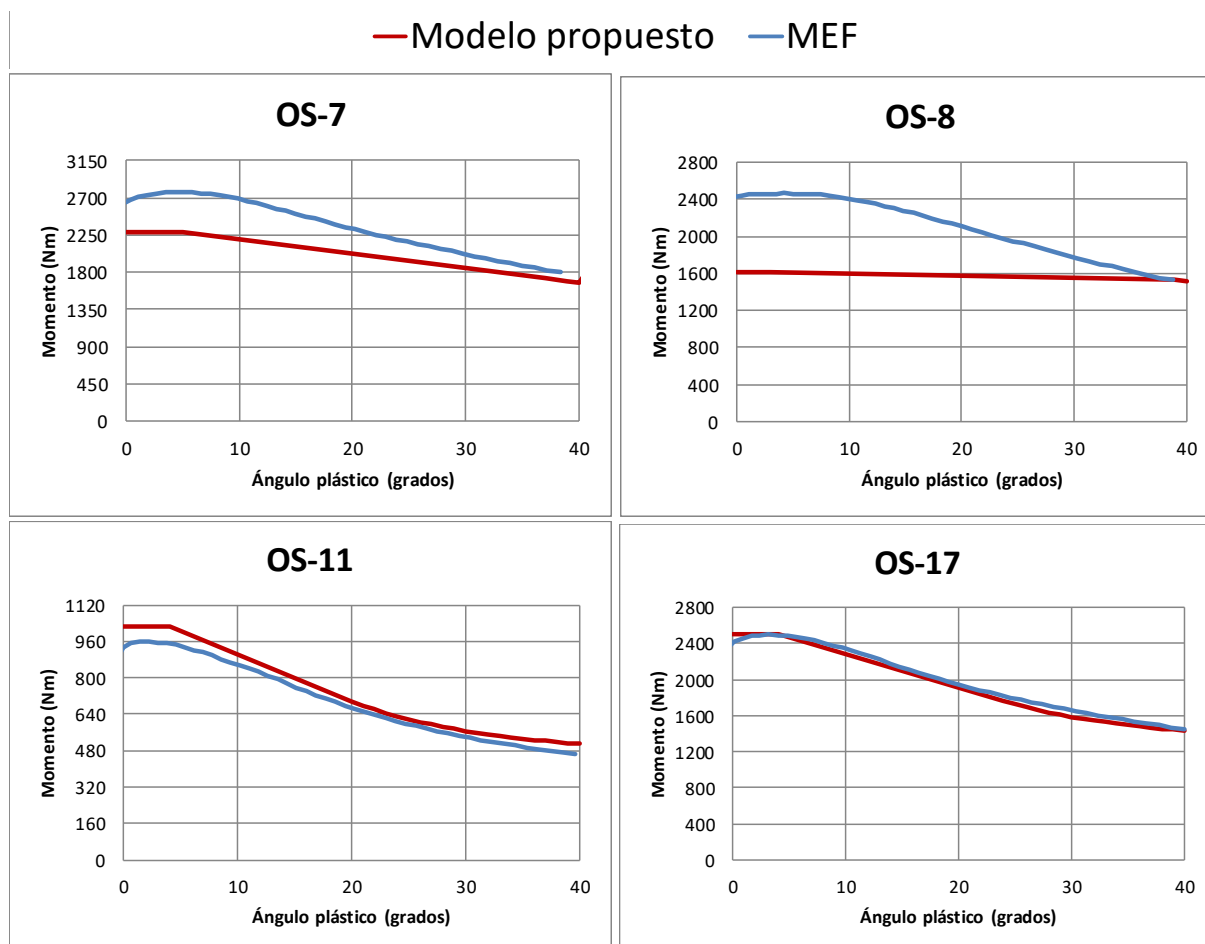


Figura 123. 2ª Deformación en mismo sentido. MEF – Modelo propuesto. Casos $Q > 50$

El valor de ángulo que abarca la zona elasto-plástica coincide, aproximadamente, con los valores obtenidos por el modelo de elementos finitos. Hay que tener en cuenta que en la curva del modelo de elementos finitos dicha zona elasto-plástica no es una meseta de momento constante, por lo que es difícil determinar con exactitud un valor. El valor de momento máximo es similar en los casos OS-11 y OS-17, si bien en los casos OS-7 y OS-8, este error es elevado: 17% y 33%, respectivamente. Este error en el momento máximo afecta al error cometido en el resto de la curva, pues si bien para los últimos valores de ángulo los valores son cercanos al modelo de elementos finitos, la teoría utilizada establece una aproximación lineal entre el momento máximo y aquel de la curva de colapso que produzca una variación mínima de la tangente.

Una mayor aproximación al valor del momento máximo produciría una mayor correlación entre las curvas para la zona de colapso. Los casos OS-7 y OS-8 tienen, por otro lado, un valor elevado del módulo tangente, al contrario que los casos OS-11 y OS-17. Si se reduce a la mitad el módulo tangente para ambos casos, se obtienen los resultados de la Figura

125. Para este caso, los valores de momento máximo estimados son muy similares que para los casos originales y, sin embargo, los valores obtenidos por el momento de elementos finitos son mucho más aproximados y, por tanto, también lo es el resto de la curva. El caso OS-8 modificado sigue teniendo un error elevado, debido a un error en la estimación de la geometría: según el modelo de elementos finitos, el valor de z_A alcanzado tras la primera deformación es de 2.2mm, siendo de 7.3 el obtenido por la teoría desarrollada en esta tesis. Es posible que al tener un índice Q de valor 50, un módulo tangente elevado sí varíe la longitud de la meseta que, según la teoría, es nula para perfiles de valor $Q=50$ independientemente del módulo tangente. La Figura 145 representa la primera deformación del caso OS-8 para ambos valores de módulo tangente, y puede comprobarse cómo si bien disminuye al disminuir el módulo tangente, en ambos casos su extensión es aproximadamente de 2 grados. Al ser un caso límite, todos los errores cometidos en la primera deformación afectan a la curva obtenida para la segunda deformación.

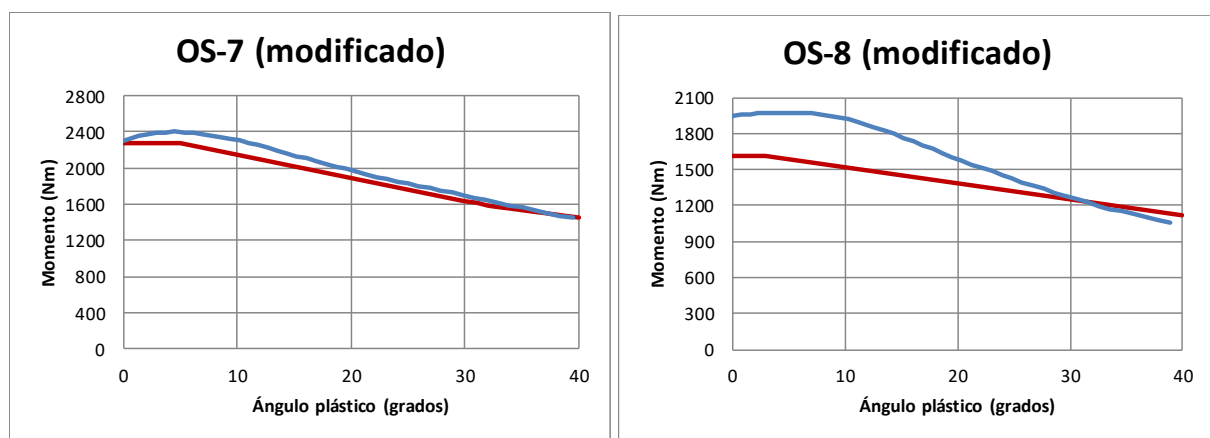


Figura 124. 2ª Deformación en mismo sentido. MEF – Modelo propuesto. Casos OS-7 y OS-8 modificados.

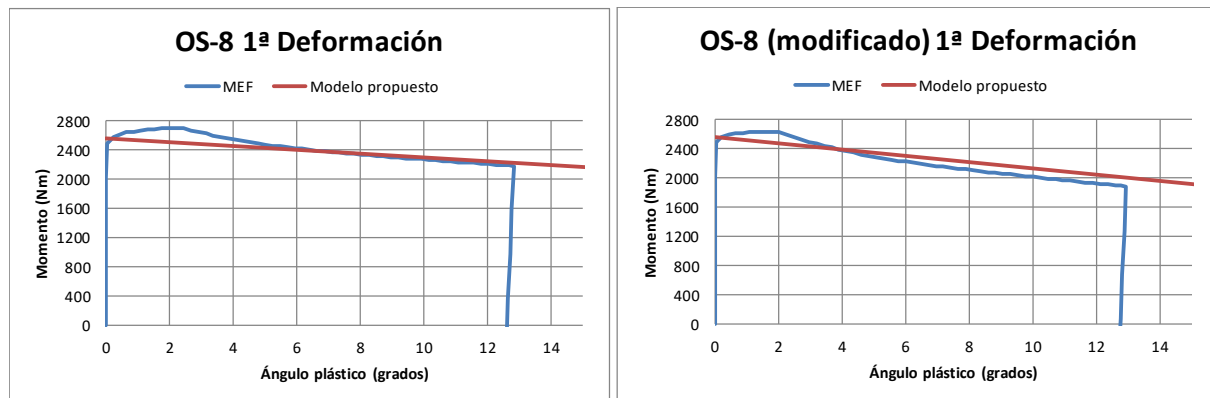


Figura 125. 1ª Deformación. MEF – Modelo propuesto. Casos OS-7 y OS-8 modificados.

Por último, la Figura 126 muestra los resultados de la curva Momento-Ángulo para perfiles de pared gruesa ($Q < 50$), cuya segunda deformación es en el mismo sentido que la primera deformación. El momento máximo obtenido es, en todos los casos, similar al obtenido mediante el modelo de elementos finitos, con un error máximo del 12% para el caso OS-2. El valor de la meseta también reproduce fielmente el comportamiento del perfil, así como la zona de colapso, tanto en magnitud como la tendencia, siendo el caso OS-14 aquel para el cual el error en las zonas elasto-plástica y plástica es máximo.

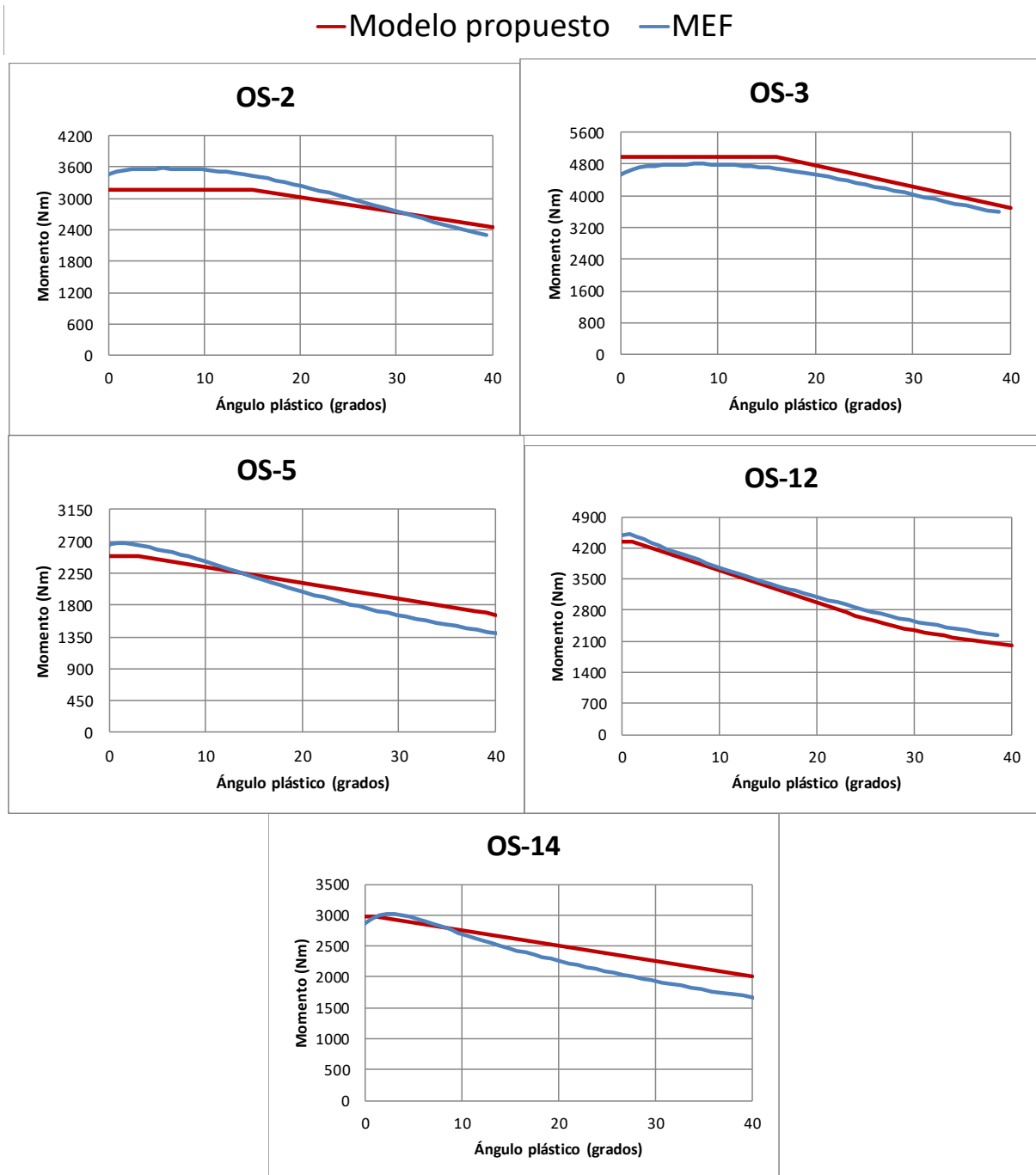


Figura 126. 2ª Deformación en mismo sentido. MEF – Modelo propuesto. Casos Q<50

Los errores cometidos en todos los casos estudiados no se consideran elevados, siendo el modelo capaz de predecir la magnitud y forma de las curvas de comportamiento de los perfiles reparados. La magnitud del error para la segunda deformación no es, si se compara con el error de magnitud obtenido para la primera deformación en el capítulo 6 (Figura 116), mayor en magnitud. En primera deformación, el error en magnitud era inferior al 15%, y en este caso el error es inferior al 17% salvo en OS-8, que asciende al 33%.

7.3.2 Ensayos realizados.

Los siguientes gráficos comparan el comportamiento obtenido durante los ensayos realizados en el capítulo 4 con el modelo propuesto en este capítulo. En primer lugar, la Figura 127 compara las curvas Momento-Ángulo del ensayo con la del modelo propuesto en el capítulo 6 para la primera deformación de un perfil, con el objetivo de comprobar que no aparece un error elevado que pueda derivar en errores en la segunda deformación. Como curva de ensayo, se utiliza la de la probeta patrón, al ser la única en la que se alcanzó los 40 grados de deformación plástica.

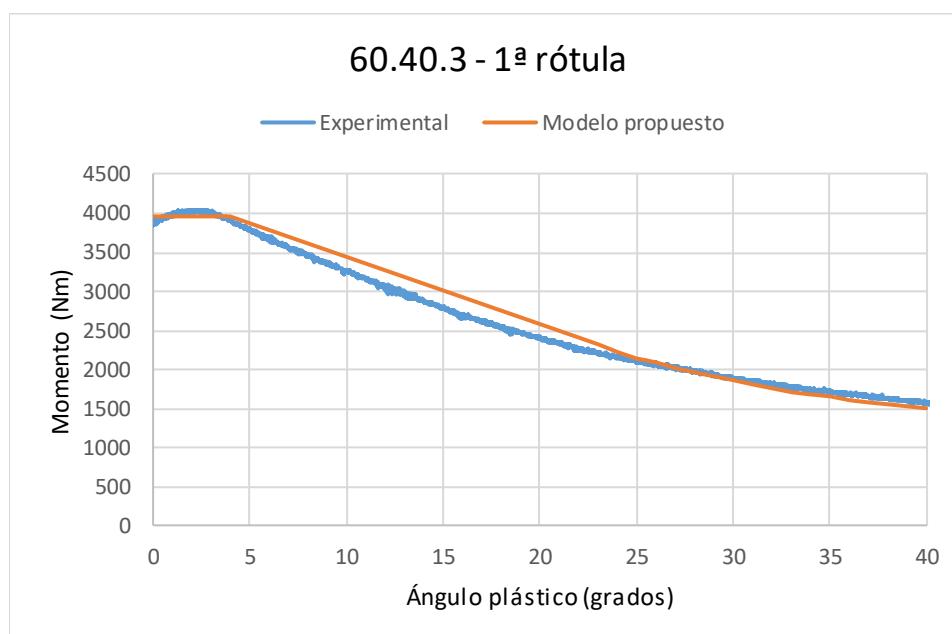


Figura 127. 1ª Deformación. Ensayo – Modelo propuesto. Caso 60.40.3.

Puede comprobarse que tanto la zona elasto-plástica como la zona de colapso son muy similares en magnitud y forma.

La Figura 128 compara las curvas obtenidas para la segunda deformación del perfil en los seis ensayos realizados. El valor introducido para cada caso como valor de ángulo del perfil deformado en primera deformación se obtiene de las gráficas de ensayo, pues no en todos los ensayos se consiguió deformar hasta el valor inicialmente propuesto. Estos casos son:

- El ensayo a 5 grados de deformación con segunda deformación en el mismo sentido (5_M), se alcanzó un valor de 4.3 grados en primera deformación.
- El ensayo a 10 grados de deformación con segunda deformación en el mismo sentido (10_M), se alcanzó un valor de 12 grados en primera deformación.
- El ensayo a 20 grados de deformación con segunda deformación en el mismo sentido (20_M), se alcanzó un valor de 18 grados en primera deformación.

El ajuste del modelo es elevado, tanto en el cálculo del momento máximo como en la magnitud y la forma de la zona de colapso. En el caso de la predicción del momento máximo, el mayor error es del 14% para el caso 10_O, si bien el caso con mayor error promediado a lo largo de toda la curva es el 20_M: la estimación del momento máximo sobreestima el valor obtenido en el ensayo, así como la extensión de la meseta. Esta sobreestimación puede deberse al propio modelo teórico, si bien no se realizó el ciclo

correctamente al no enderezar por completo el perfil, como puede apreciarse en la Figura 129.

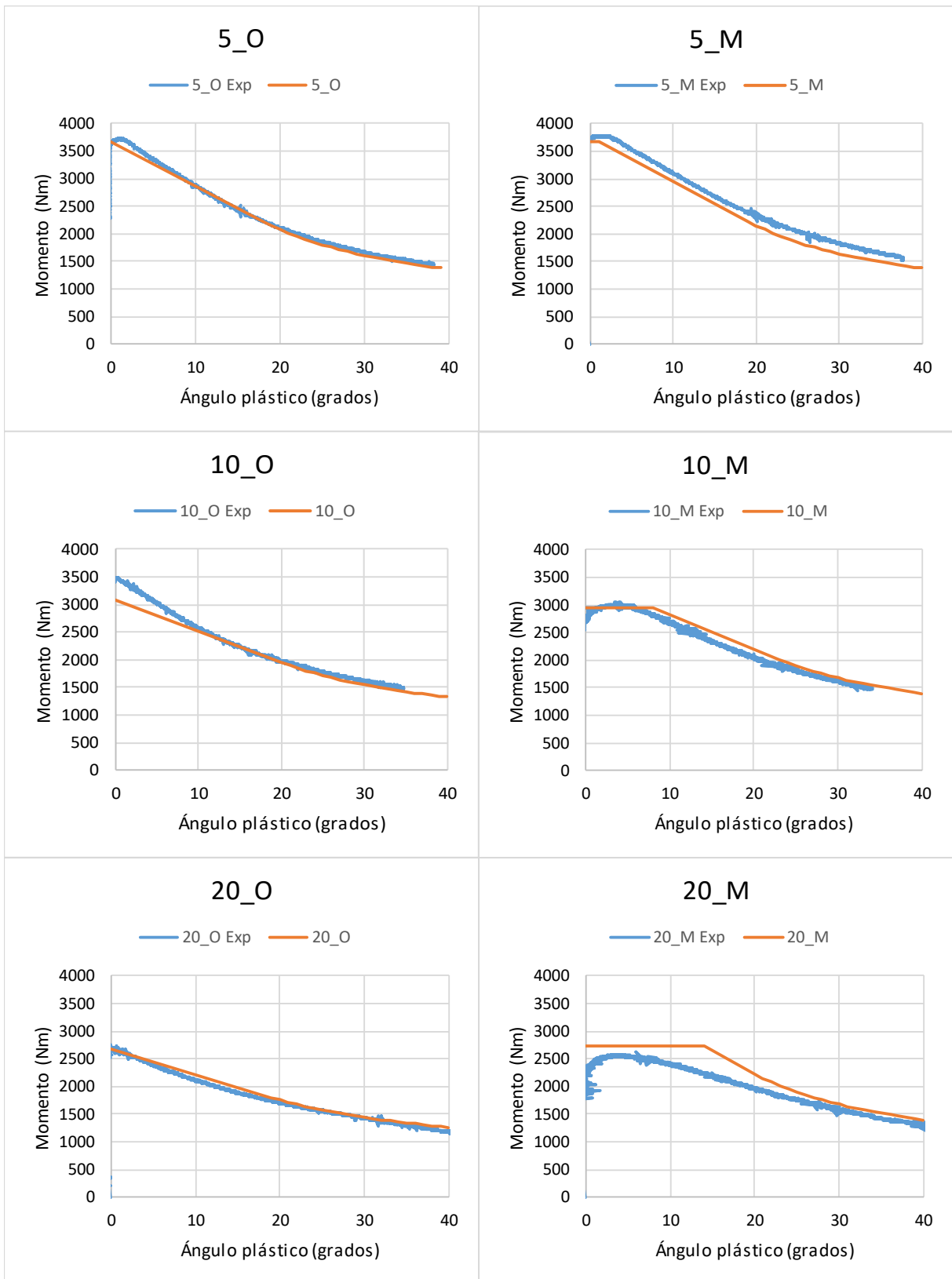


Figura 128. 2ª Deformación. Ensayo – Modelo propuesto. Caso 60.40.3.

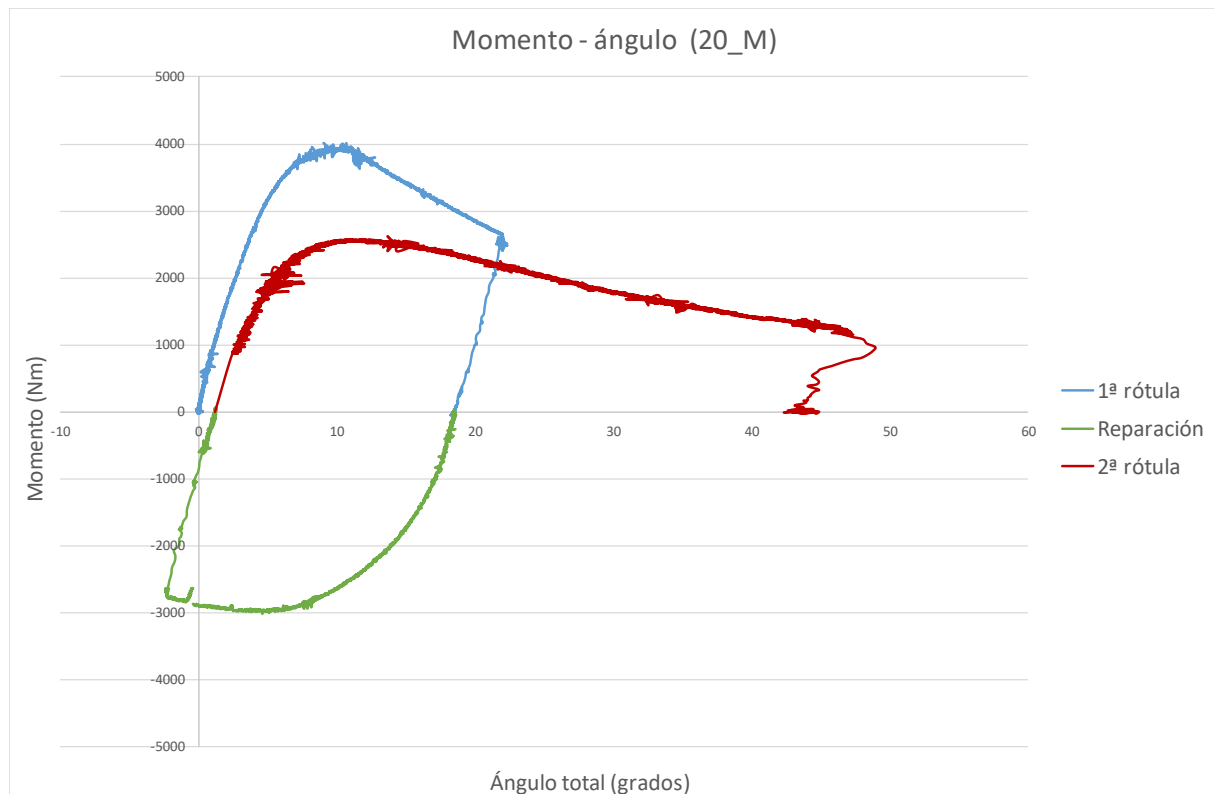


Figura 129. Ciclo del ensayo 20_M.

Al igual que con la comparativa de los casos simulados mediante elementos finitos, el modelo teórico propuesto se aproxima con gran exactitud al comportamiento del perfil reparado.

Además de los ensayos mostrados para el perfil 60.40.3, se realizaron con posterioridad ensayos con un perfil 45.45.4 s355, cuyo índice Q es muy bajo ($Q=18$), con objeto de verificar mediante ensayo el comportamiento del modelo teórico en perfiles cercanos al comportamiento macizo. Al ser un perfil con gran zona de meseta, los ángulos girados en primera deformación son elevados: 20 y 40°, de manera que se produzca rótula plástica. Los resultados tienen alta correlación, y pueden observarse en el anexo 1.

7.4 Conclusiones.

El modelo propuesto predice el comportamiento a flexión de perfiles reparados con una alta correlación en magnitud y forma, para perfiles con índice Q mayor e inferior a 50. Se considera, por tanto, que las hipótesis utilizadas para el desarrollo del modelo son correctas dentro del dominio estudiado.

El modelo propuesto se basa en el modelo teórico desarrollado en el capítulo 6, variando únicamente el cálculo del momento máximo y la geometría inicial de la rótula. Se introducen tres nuevos parámetros de entrada a los ya utilizados para predecir la primera deformación: el ángulo girado por el perfil en la primera deformación, y los parámetros de la geometría que definen dicha deformación, z_A e y_B , estos último obtenidos directamente del modelo para la primera deformación.

Las divergencias encontradas proceden de dos parámetros de entrada del modelo: el módulo tangente y la geometría de la rótula. El módulo tangente influye en el momento

máximo alcanzado durante la reparación, aumentando para valores elevados del módulo tangente. La geometría de la rótula, introducida mediante los parámetros z_A e y_B , se obtienen del modelo para la primera deformación, por lo que errores en dicha predicción derivan en errores en la segunda deformación. Las consecuencias adquieren mayor importancia en la predicción del comportamiento cuya segunda deformación es en el mismo sentido que la primera, ya que en estos casos aparece zona elasto-plástica, cuya extensión es sensible a los errores comentados. Además, en estos casos se realizan dos inversiones de rótula, por lo que la incertidumbre debida a la geometría de la rótula y tensiones residuales es mayor que en perfiles cuya segunda deformación se produce en sentido opuesto, donde solo tiene lugar una inversión de rótula.

Capítulo 8:

Valoración del Aspecto Dinámico.

8 VALORACIÓN DEL ASPECTO DINÁMICO.

El vuelco de un autobús es, de manera intrínseca, un evento dinámico. Sin embargo, con excepción del capítulo 9, a lo largo de esta tesis se han realizado aproximaciones al vuelco mediante ensayos y simulaciones cuasiestáticas. La razón de elegir el ensayo cuasiestático es debido a la simplicidad del equipo y la instrumentación, así como del tratamiento de los resultados, además del control que proporciona al investigador sobre la realización del ensayo.

En el vuelco de un vehículo, las velocidades de deformación son menores que, por ejemplo, en el choque frontal de un turismo, y mucho menores que otros fenómenos como explosiones e impactos de proyectiles. El proceso de deformación dura aproximadamente 100 ms, con velocidades de deformación máximas del entorno de 10 s^{-1} , según los modelos estudiados en el capítulo 8. Las velocidades de deformación entre 3 y 30 s^{-1} se consideran velocidades de deformación medias, siendo a partir de los 250 s^{-1} las consideradas como altas velocidades de deformación. Teniendo en cuenta esta información, no parece que el vuelco vaya a presentar implicaciones elevadas derivadas del efecto dinámico.

En cuanto al diseño del ensayo cuasiestático, permite obtener el valor de ángulo girado por el perfil de manera instantánea, e incluso parar el ensayo y continuarlo sin ningún tipo de repercusión en el resultado. De esta forma, se puede realizar el ensayo hasta un valor concreto de ángulo girado, y verificar que el enderezamiento se ha llevado a cabo hasta la posición inicial. Además, ha permitido utilizar la técnica DIC que se presentó en el capítulo 5, no siendo posible de haber sido un ensayo dinámico.

Se ha asumido que las hipótesis planteadas para el estudio del vuelco pueden ser contrastadas mediante resultados estáticos, y extrapolar los resultados a dinámico sin ninguna justificación.

En este capítulo se pretende verificar la validez de dicho planteamiento. Para ello, se exponen aquellas hipótesis que de manera implícita se han planteado, para a continuación estudiarlas y verificarlas.

8.1 Hipótesis consideradas.

- [1] Los resultados de pérdida de energía de los perfiles reparados se calcularon en base a simulaciones y ensayos estáticos. Se ha considerado que en dinámico estos valores se mantienen constantes, así como la forma de la curva Momento-Ángulo. Esta idea se corresponde con la segunda hipótesis planteada.
- [2] Durante el estudio llevado a cabo de flexión en perfiles reparados, se comprobó que, una vez formada la rótula, la posición se mantiene fija durante el enderezamiento y la segunda deformación. En ningún caso se formó una segunda rótula por encima de la primera, o una rótula cuya forma geométrica difiriera de la rótula inicial. La extrapolación de este resultado al caso dinámico debe estudiarse, aunque a priori no hay ningún factor que promueva la formación de la rótula en otra posición. Esta idea es la primera hipótesis planteada en este capítulo.

Dado que los modelos MEF y teóricos de perfiles reparados se han validado y comprobado con ensayos y simulaciones cuasiestáticos, la comprobación de las dos hipótesis planteadas es de gran importancia para demostrar la robustez del trabajo realizado en esta tesis.

8.2 Comprobación de las hipótesis.

Si bien la realización de ensayos dinámicos de flexión de perfiles sería la forma más directa de verificar las hipótesis, debido a la dificultad de realizar los ensayos y de procesar los resultados dinámicos, no se ha optado por esta opción. En los dos siguientes subapartados se propone un método alternativo para demostrar ambas hipótesis, y cuyos resultados se muestran a continuación del método.

8.2.1 Curva de comportamiento y energía en perfiles reparados.

Se propone realizar la comprobación de esta hipótesis mediante la realización de simulaciones por el método de los elementos finitos. Para ello, se utiliza un modelo dinámico de perfil, explicado en detalle en el apartado 9.1.2, en lugar del modelo de módulo de autobús, al ser el primero más simple de resolver y cuya curva de comportamiento en estático es conocida. A dicho modelo se le va a someter a un ciclo de reparación y posterior deformación, en condiciones cuasiestáticas y dinámicas, con el objeto de comparar los resultados.

El ciclo al que se somete el perfil consiste en una primera deformación a 15° y su posterior enderezamiento, terminando con una segunda deformación de 40° en el mismo sentido que la primera deformación (caso denominado 15_M), y en el sentido contrario (15_O). La predeformación de 15° es suficiente para la formación de la rótula plástica y pérdida de propiedades físicas, y por lo tanto se puede comparar el comportamiento estático y dinámico para el perfil original y para uno dañado tras la reparación.

La única diferencia entre el modelo estático y dinámico, es la adición al modelo dinámico del modelo de endurecimiento por velocidad de deformación de Cowper-Symonds, explicado en 3.1.4, y utilizando los mismos parámetros que en el apartado 9.1.2. Este modelo mayorará el límite elástico del material en función de dichos parámetros y la velocidad de deformación para cada elemento del mallado.

En primer lugar, y antes de realizar el ciclo completo, se ha realizado la comparación de las curvas Momento-Ángulo y Energía-Ángulo para los casos estático y dinámico, en una primera deformación de aproximadamente 40° (Figura 130).

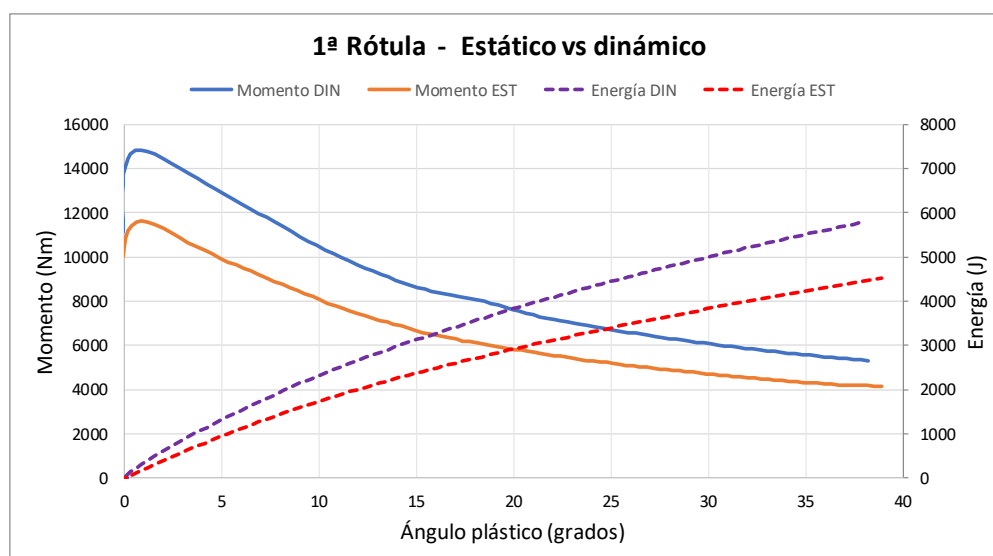


Figura 130. Comparación curva M-θ y E-w entre modelo estático y dinámico.

En la Figura 130 se comprueba que la curva dinámica está mayorada, pero su forma, tanto meseta como caída en la zona de plasticidad, es idéntica a la curva en estático.

A continuación, se realizan los ciclos 15_M y 15_O. Un ejemplo de la deformación del modelo, para el caso 15_O estático, puede verse en la Figura 131. La Figura 132 muestra la geometría de la rótula plástica en el instante final de cada fase del ciclo en el ensayo, de manera análoga a la Figura 131.

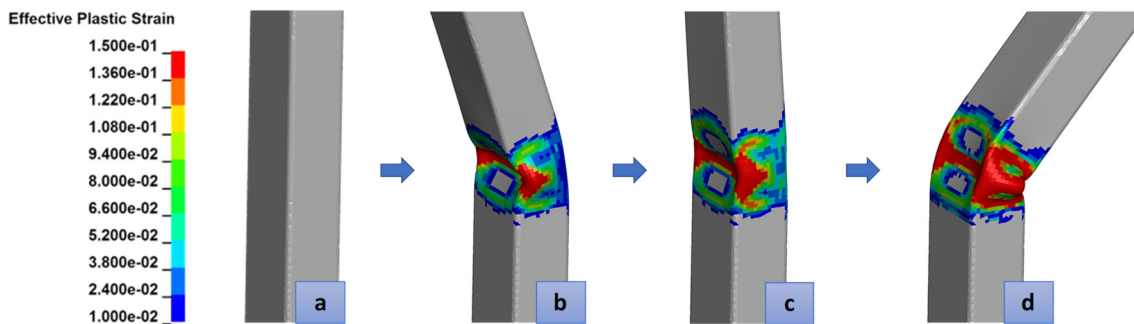


Figura 131. Ciclo 15_O: posición inicial (a); 15° (b); 0° (c); -40° (d). Alargamiento unitario.

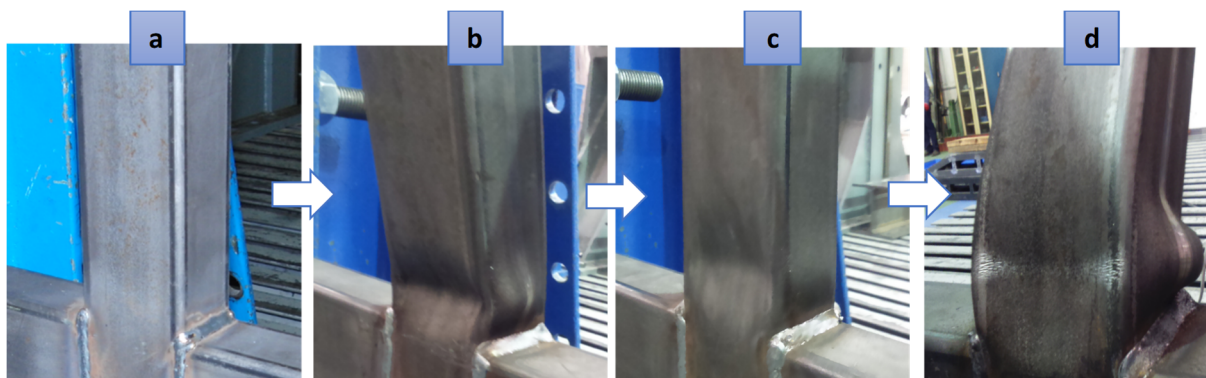


Figura 132. Ciclo 15_O: posición inicial (a); 15° (b); 0° (c); -40° (d). Ensayo.

En la Figura 133 se muestra la curva Momento-Ángulo para el caso 15_O simulado y el realizado mediante ensayo, no habiendo grandes diferencias entre ambos. El objeto de este ensayo físico adicional es verificar que la metodología utilizada es predictiva del comportamiento real pese a usar un software diferente al utilizado en la validación (capítulo 5).

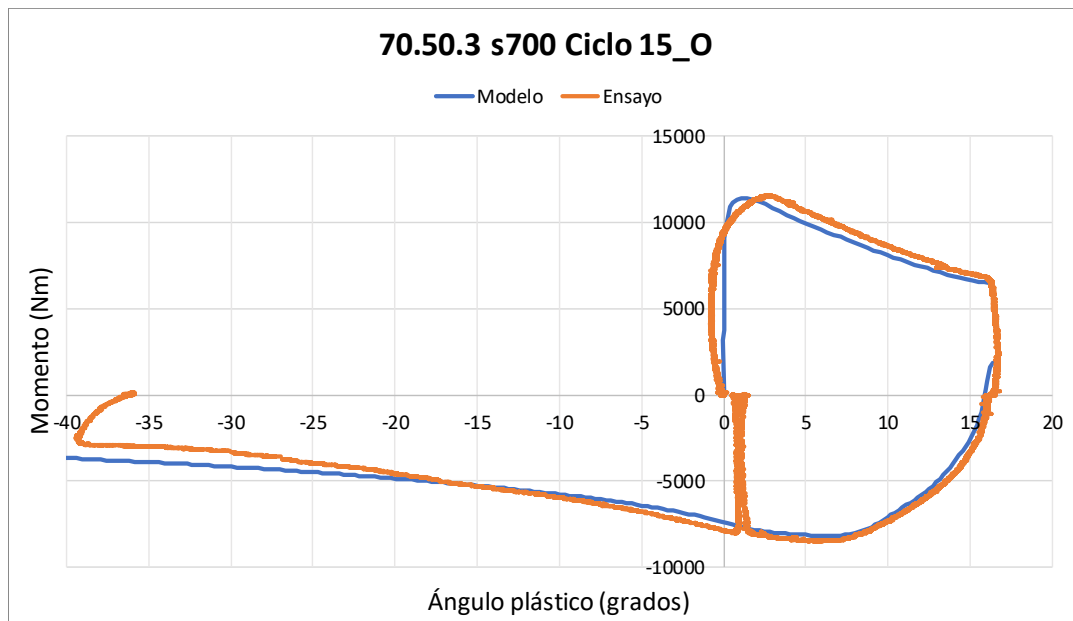


Figura 133. Ciclo M- θ en estático de un perfil 70.50.3 a 15° de predeformación. Ensayo y modelo.

Los resultados de las cuatro simulaciones se muestran en la Figura 134: en línea de puntos las simulaciones estáticas y en línea continua las dinámicas. El recorrido de la primera deformación y la reparación es el mismo para las simulaciones, independientemente del sentido de la segunda deformación.

Como puede comprobarse, la conclusión es la misma que se llegó con la primera deformación hasta 40° de la Figura 130: la forma de la curva estática y dinámica es la misma pero mayorada para el caso dinámico.

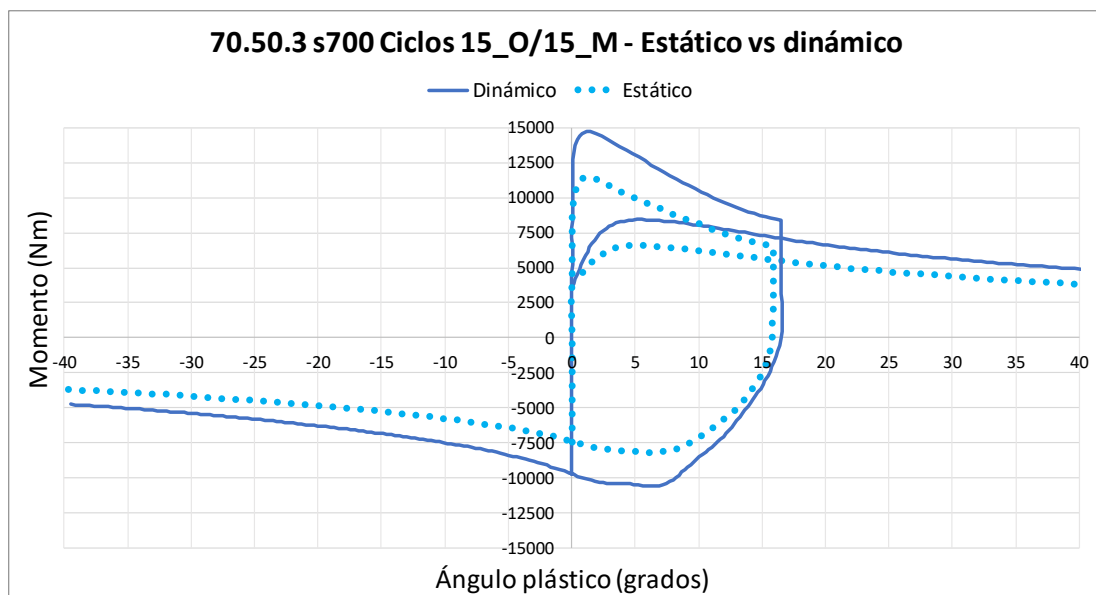


Figura 134. Ciclos M- θ en ambos sentidos de un perfil 70.50.3 a 15° de predeformación. Estático y dinámico.

Visto que el comportamiento en estático y dinámico es el mismo, queda por comprobar si los valores de pérdida de energía de los perfiles reparados con respecto a los perfiles originales también se mantienen. Esta pérdida de energía se define según la Ecuación 100:

$$'Pérdida R2/R1'(\theta) = \frac{E_{Rótula\ 2}(\theta) - E_{Rótula\ 1}(\theta)}{E_{Rótula\ 1}(\theta)}$$

Ecuación 100. Pérdida de energía entre primera y segunda rótula.

La pérdida de energía se ha calculado para cada ángulo girado. En la Figura 135 y Figura 136 se grafican en el eje de ordenadas primario la energía absorbida por la formación de la rótula en un perfil reparado 15 grados y el perfil original, tanto para la simulación en estático como en dinámico; en el eje de ordenadas secundario se grafica la pérdida de energía definida anteriormente, para la simulación estática y la dinámica.

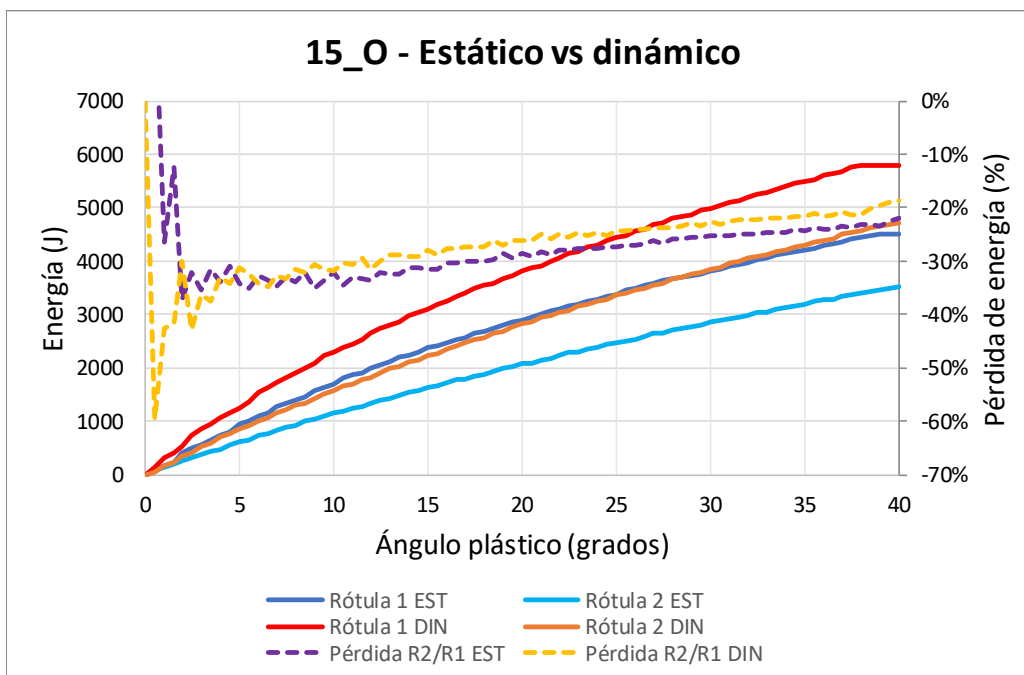


Figura 135. Comparación curva M-θ y E-w para segunda deformación (15_O) entre modelo estático y dinámico.

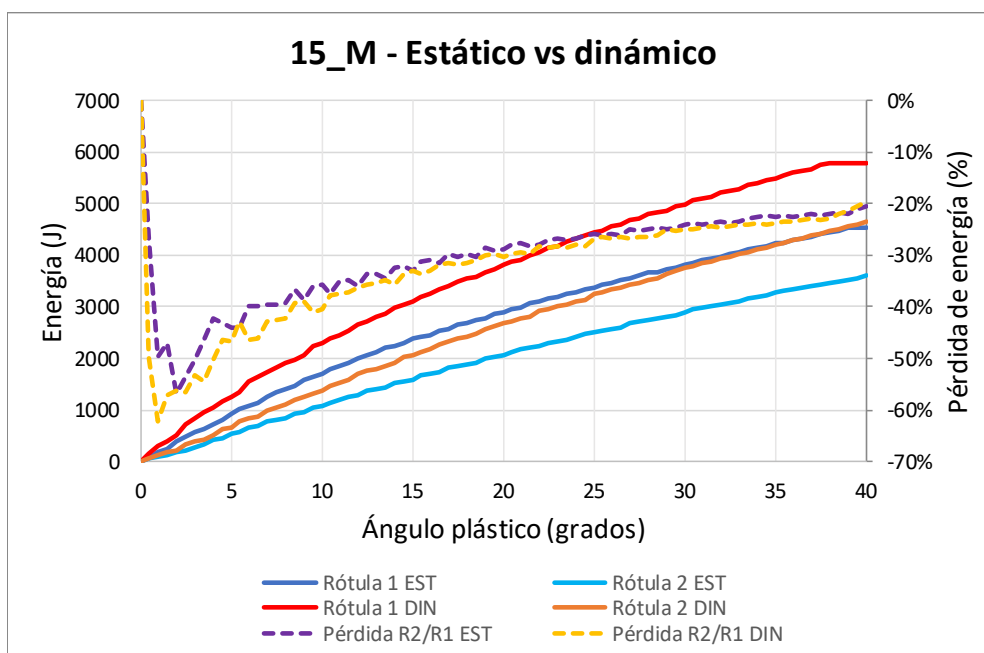


Figura 136. Comparación curva M-θ y E-w para segunda deformación (15_M) entre modelo estático y dinámico.

Obviando los primeros tres grados de deformación anteriores a la formación de la rótula plástica, los valores de pérdida de energía de los perfiles reparados son muy similares tanto en estático como en dinámico, si bien difieren en un 2% en el caso 15_O.

8.2.2 Posición de la rótula plástica.

Si bien se ha comprobado en el apartado anterior que la rótula del perfil reparado se forma sobre la primera rótula en los cálculos dinámicos (Figura 131), se propone realizar la comprobación de esta hipótesis de manera adicional mediante la observación de los tres ensayos de vuelco de un módulo de autobús, realizados de manera secuencial y alternando el sentido del vuelco. Las características de estos ensayos se exponen con más detalle en el capítulo 9.

En concreto, se comprueban mediante fotografías las rótulas formadas en los montantes de la sección frontal en los tres ensayos realizados (Figura 137 y Figura 138).

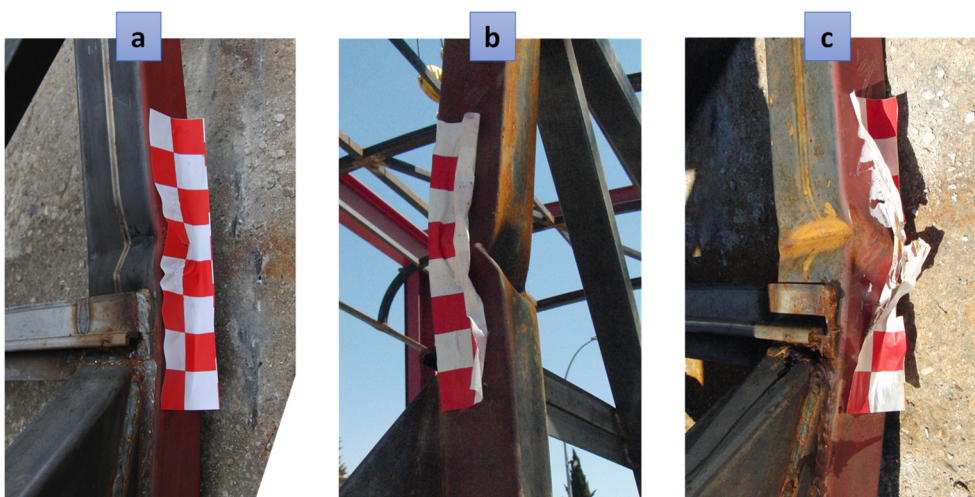


Figura 137. Rótula montante delantero izquierdo: a) Ensayo 1; b) Ensayo 2; c) Ensayo 3.

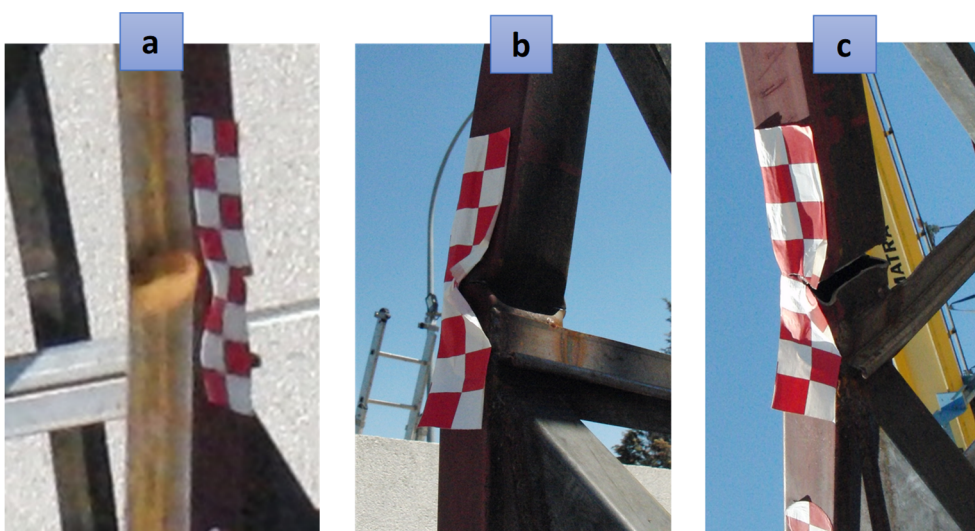


Figura 138. Rótula montante delantero derecho: a) Ensayo 1; b) Ensayo 2; c) Ensayo 3.

Las pegatinas colocadas para el seguimiento mediante “tracking” de video proporcionan la forma de marcar el centro de la rótula. Dicho centro se encuentra a $3.5/8$ de la parte superior de la pegatina para el caso de la Figura 137 y a la mitad de la pegatina para el caso de la Figura 138. En ambas figuras se comprueba cómo la rótula en todos los casos se produce,

por tanto, en la misma posición. Además, no hay una rótula sobre otra o con líneas de plasticidad diferentes a las obtenidas para una primera deformación.

8.3 Conclusiones.

Al inicio del capítulo se comentaban las causas por las que se decide realizar ensayos y simulaciones cuasiestáticas durante la práctica totalidad de la tesis, que pueden resumirse en:

- Simplicidad de la realización del ensayo y el procesado de los resultados.
- Control del investigador en la ejecución y precisión del ensayo de flexión.

Además de estas razones, el ensayo a flexión cuasiestático es el más común en la literatura científica, utilizándose el ensayo dinámico para la obtención de los parámetros de modelos de endurecimiento dinámico. Todos los modelos teóricos de rótulas plásticas se han realizado y validado con ensayos cuasiestáticos. Por otro lado, el Reglamento 66 también promueve la realización de ensayos cuasiestáticos para la obtención de la curva Momento-Ángulo y para el cálculo del vuelco mediante simulación. Quedaría por tanto justificado el uso de ensayos y simulaciones estáticas para la formación de la rótula plástica de perfiles sin predeformación por enderezamiento. Sin embargo, en esta tesis se han utilizado para la obtención de curvas Momento-Ángulo de perfiles reparados: estos perfiles se encuentran fuera del alcance del Reglamento 66 y del resto de trabajos de la literatura técnica, por lo que no quedan cubiertos de manera explícita.

Los resultados presentados en este capítulo corroboran el uso de los modelos cuasiestáticos para la modelización de perfiles reparados. Las hipótesis planteadas al inicio se cumplen:

- [1] Una vez formada una rótula, el enderezado y posterior deformación producen una rótula en la misma posición que la primera y sin añadir nuevas líneas de plasticidad que deformen la geometría de la rótula.
- [2] El comportamiento de la rótula en dinámico es análogo al estático, estando mayorada la curva de comportamiento para el primer caso. Los valores de pérdida de energía absorbida tienen una desviación máxima del 2% entre simulaciones cuasiestáticas y dinámicas.

Por todo lo expuesto, se considera que la realización de ensayos cuasiestáticos para el estudio de la reparabilidad en perfiles tubulares de acero es apropiada y no produce un resultado diferente al ensayo dinámico.

Capítulo 9:

Desarrollo de Modelos MEF de Estructuras Reparadas de Autobuses.

9 DESARROLLO DE MODELOS MEF DE ESTRUCTURAS REPARADAS DE AUTOBUSES.

Los modelos actuales de vehículos completos suelen requerir ensayos de componentes de manera adicional al ensayo virtual, para suplir las carencias de dichos modelos. Con esta metodología combinada se entrega la contraseña de homologación a los vehículos. Sin embargo, modelos capaces de predecir fallos locales como roturas en los perfiles en las zonas cercanas a las uniones soldadas, por motivos de coste computacional, no han sido viables hasta la fecha.

La mayoría de los modelos utilizados por laboratorios acreditados utilizan la tipología viga por ser más eficiente en tiempo de cálculo. Esta tipología no permite la recreación de fallos locales y es más limitada para reproducir las deformaciones del vuelco, lo que obliga a realizar de manera adicional ensayos de componentes para verificar que no se generan roturas.

El objetivo de este apartado es desarrollar una metodología validada mediante ensayo para la realización de modelos de elementos finitos con tipología placa (o SHELL), según el Anexo 9 del Reglamento 66 que incluye el fallo local por rotura tras alcanzar el alargamiento unitario máximo. Por último, se va a extender esta metodología a estructuras reparadas mediante enderezamiento.

Con una metodología como la presentada en este apartado, los modelos son más representativos y no necesitan de ensayos adicionales.

9.1 Metodología

La metodología utilizada para el desarrollo de este trabajo se compone de dos fases diferenciadas: una primera experimental, con la realización de un ensayo de vuelco de una sección representativa de autobús; una segunda fase con la simulación mediante elementos finitos de la misma estructura. Por último, se realiza una comparación entre los resultados de ensayo y la simulación para verificar la metodología propuesta.

Con la misma metodología se realizan tres vuelcos:

- **Vuelco 1 - Primera deformación:** Se realiza con la estructura original de un módulo de autobús según el ensayo de vuelco del Reglamento 66 Anexo 5.
- **Vuelco 2 - Segunda deformación:** Se realiza sobre la estructura tras el vuelco 1, pero con giro en el sentido contrario y un valor de energía del 75% del establecido para el vuelco 1. Este vuelco es una generalización de la reparación, pero sin la condición de devolver la estructura a la posición original.
- **Vuelco 3 - Tercera deformación:** Se realiza sobre la estructura tras el vuelco 2, pero con sentido en el sentido contrario y un valor de energía del 100% del establecido para el vuelco 1. No se ha minorado la energía al ser el último ensayo y no importando la destrucción del módulo.

A continuación, se describen de manera detallada las dos fases:

9.1.1 Fase I: Ensayo de vuelco.

El objetivo de esta primera fase es la realización de la parte experimental de la metodología de cálculo propuesta.

Para la realización del ensayo de vuelco, se ha utilizado una plataforma de vuelco como la definida en el Reglamento 66. La estructura ensayada lleva posicionadas varias dianas para su posterior seguimiento del video con el software Tracker para el “tracking” de video, de manera que sea posible conocer la deformada en cada instante tras el impacto contra el suelo. La grabación del ensayo se realiza con una cámara de alta velocidad rosca Nikon 35mm f/2 y una frecuencia de adquisición de 1000 frames por segundo; se posiciona con un nivel para conseguir la horizontalidad requerida con respecto al suelo.

La estructura ensayada consiste en la estructura de acero sin el carrozado ni otros elementos mecánicos o asientos. Para mayorar la masa del conjunto hasta obtener la energía requerida que le corresponde a dicha sección del vehículo se han añadido lastres de acero. La Tabla 29 recoge la masa y la altura del centro de gravedad (Hcdg), de cada elemento y del conjunto.

La Figura 139 muestra una vista transversal de la estructura de acero de la sección representativa y los lastres utilizados. También se pueden ver las pegatinas usadas como dianas por el software de “tracking”.



Figura 139. Estructura ensayada.

Tabla 29. Masa y Hcdg de la estructura.

Datos estructura ensayada		
	Masa (kg)	Hcdg (mm)
Módulo	993	1446
Lastre inferior	1384	1290
Lastre superior	1476	1420
Total	3854	1380

Una vez lastrada la estructura, la altura del centro de gravedad del módulo es de 1380 mm con respecto al suelo, y utilizando un método gráfico se puede calcular la caída del centro de gravedad desde la posición de equilibrio inestable en la plataforma de vuelco hasta el instante del primer impacto contra el suelo. Este cálculo gráfico se puede ver en la Figura 140. Sin más que aplicar la expresión ($E = m \cdot g \cdot \Delta h_{gr}$), se obtiene el valor de la energía potencial del ensayo entre el instante de equilibrio y el de primer impacto con el suelo; este valor, en este caso de 38942 J, debe coincidir con la energía puesta en juego en la simulación de la Fase II.

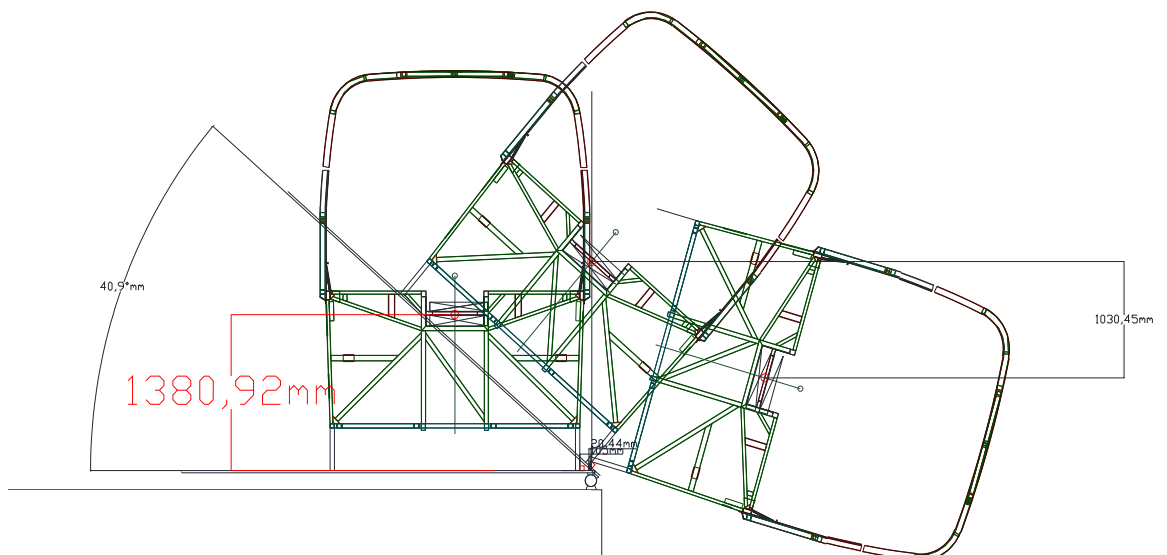


Figura 140. Cálculo gráfico de la caída del centro de gravedad.

La Figura 141 muestra un instante del ensayo con los seis puntos escogidos para la realización del seguimiento de la trayectoria. El punto A pertenece a la zona de la estructura que no interviene en la absorción de energía, por tanto, únicamente es necesario un punto para definir el movimiento de dicha zona. Los puntos B, C, D, E y F se consideran suficientes para describir el movimiento y la deformación de la superestructura, ya que se caracteriza la sección transversal de la sección representativa ensayada.

Para las trayectorias obtenidas se considera como eje X la dirección horizontal y eje Y la vertical, siendo ambos ejes estacionarios durante todo el ensayo

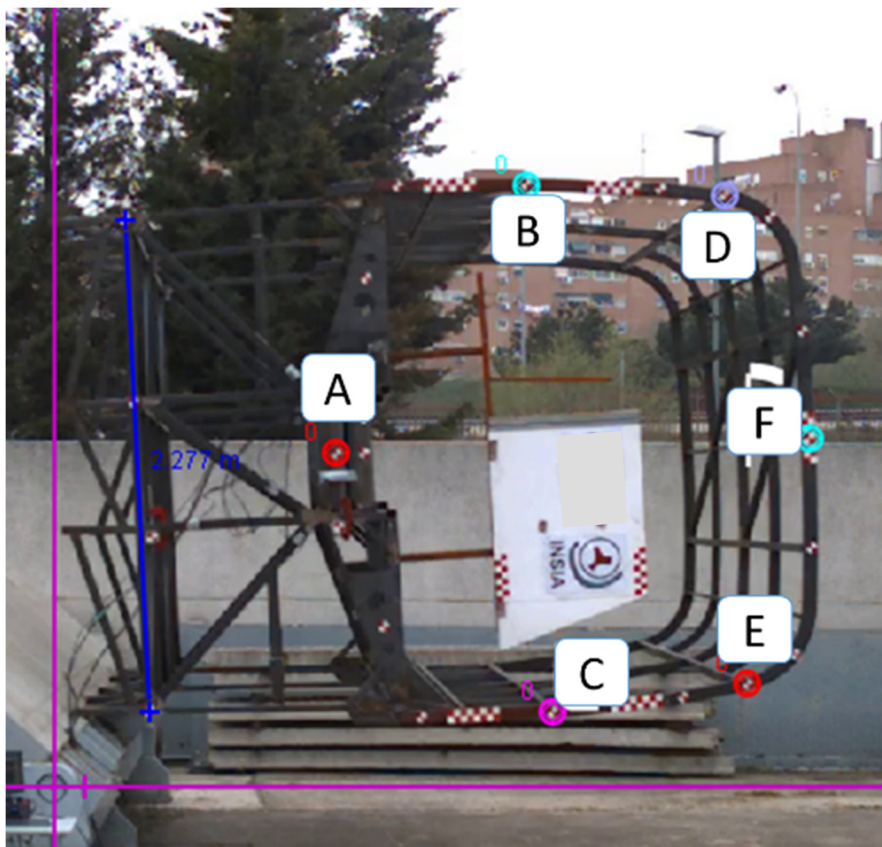


Figura 141. Puntos de seguimiento en la estructura.

Estos cinco puntos de seguimiento están duplicados en el extremo opuesto para la realización del vuelco 2, en el que se invierte el sentido de giro.

9.1.2 Fase II: Modelo.

El objetivo de esta fase es la realización de la parte analítica de la metodología de cálculo propuesta. Para ello se va a realizar un cálculo dinámico mediante modelos M.E.F. representativo del ensayo realizado en la fase anterior.

Debido a la naturaleza del cálculo dinámico, es necesario caracterizar a la perfección la inercia del vehículo, o en este caso de la sección representativa o módulo. Por tanto, una vez realizada la modelización de la perfilaría, se debe añadir la masa restante de otros dispositivos como los asientos o la fibra del techo, así como la masa de los pasajeros y los lastres utilizados en el ensayo real. Con esto se garantiza que la posición del centro de gravedad coincida con la de la estructura ensayada, y por tanto la energía potencial será a su vez coincidente con la calculada en la Fase I para el ensayo. En este caso, únicamente se debe añadir la masa de los lastres, que han sido modelizados como dos bloques sólidos con las dimensiones exteriores reales y la densidad necesaria para que la masa sea la correspondiente.

La Figura 142 muestra el módulo dibujado en 3D y los lastres modelizados.



Figura 142. Modelo sólido del módulo y estructura real.

Para la realización del modelo de cálculo, se ha utilizado un algoritmo explícito de resolución de modelos de elementos finitos con el software LS-Dyna. El modelo se ha realizado con tipología placa y modelos de material bilineal con criterio de fallo por alargamiento unitario y endurecimiento por velocidad de deformación utilizando el modelo de Cowper-Symonds. Los coeficientes para dicho modelo de endurecimiento son obtenidos por otros autores mediante ensayo(44, 45), y se recogen en la Tabla 30. Como se puede comprobar en la literatura, los valores de endurecimiento se obtienen mediante una regresión de los resultados de los ensayos, por lo que estos valores dependen de las velocidades de deformación a las que se han realizado los ensayos, no pudiendo ser utilizados extrapolando fuera de dicho rango. La capacidad de endurecimiento es diferente en aceros en función de los aleantes y la cantidad de carbono, por lo que los valores de C y p para aceros de alto límite elástico deben ser distintos que los usados para calidades inferiores, si bien entre dos calidades cercanas en composición y propiedades pueden ser utilizados sin cometer errores mayores que la propia incertidumbre de la regresión. Los valores obtenidos para el acero s355 se utilizan además para el s275; los valores obtenidos para el acero s690 se utilizan para el s700, que es el material utilizado en la fabricación del vehículo ensayado.

Tabla 30. Parámetros del modelo de endurecimiento por velocidad de deformación.

Parámetros para el modelo de Cowper - Symonds		
	C	p
Acero s275/s355	4945	2.696
Acero s690	3.3E+07	6.9

En cuanto al criterio de fallo unitario, se ha calculado realizando una simulación de un ensayo de tracción uniaxial de una probeta modelada con el mismo tipo de elemento y tamaño de malla que el utilizado en el modelo del módulo. Este método ha sido probado anteriormente (46), y permite obtener mediante simulaciones iterativas el valor de fallo en el elemento que devuelve un alargamiento a rotura de la probeta cercano al real o establecido por normativa. Para el caso del acero de alto límite elástico se ha obtenido un criterio de fallo en el elemento de 0.7, produciendo la rotura en el entorno del 15% de alargamiento. En

los aceros de calidad inferior no se ha incluido el criterio al no ser necesario para la estructura ensayada, pues las rótulas plásticas se producen en los perfiles de alto límite elástico.

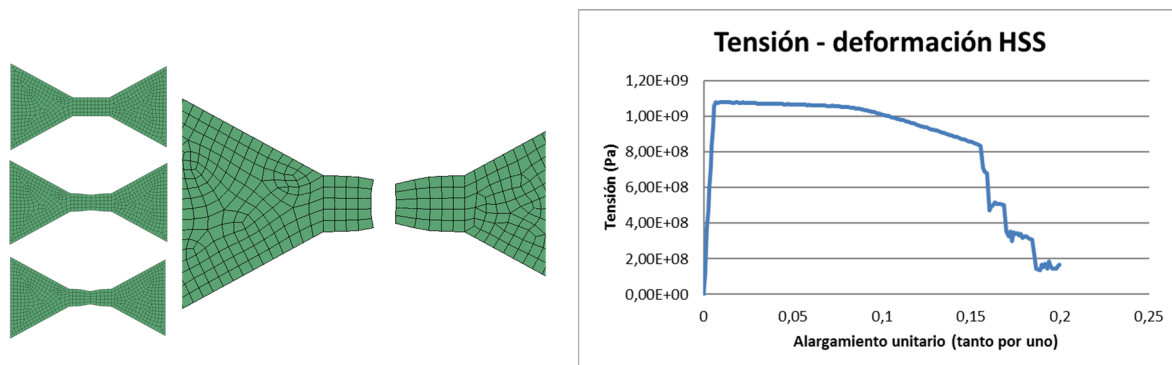


Figura 143. Modelo para ensayo de tracción y curva tensión-deformación.

Esta curva de tensión-deformación se ha incluido en el modelo mediante el modelo de material bilineal "*Piecewise_linear_plasticity*". Los valores de límite elástico y módulo tangente se han obtenido simulando un submodelo de la unión de manera iterada y contrastando el resultado con la curva Momento-Ángulo obtenida en un ensayo real de flexión de dicha unión. Dicho submodelo se puede ver en la Figura 144.

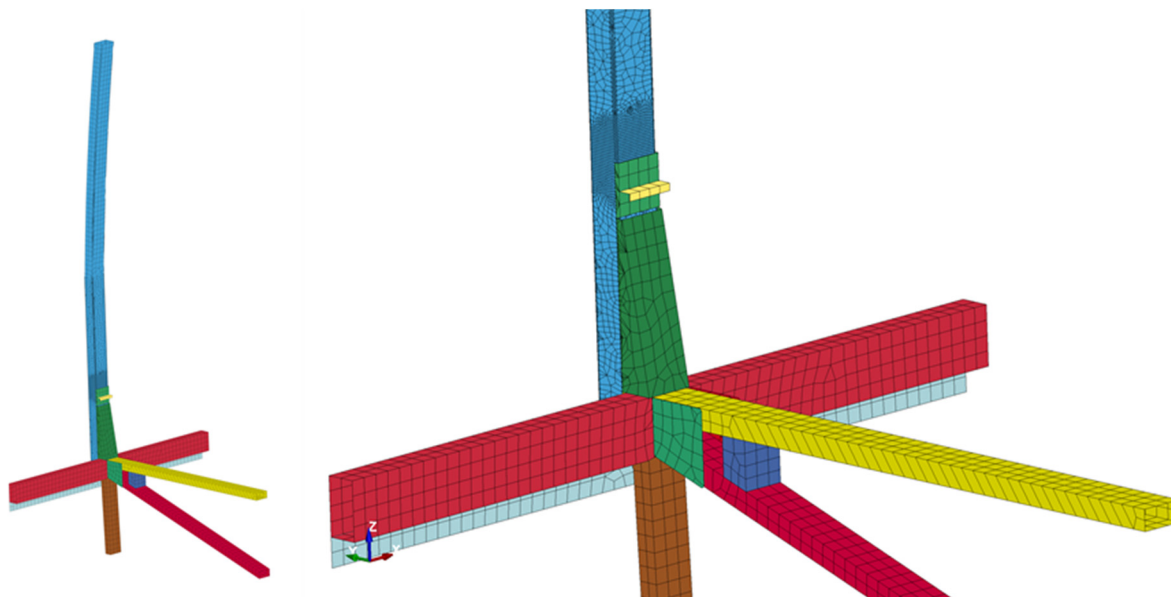


Figura 144. Modelo de unión para ensayo de flexión.

Al modelo bilineal de material se le ha añadido un tramo adicional a partir de la tensión de rotura teórica, de manera que desde el alargamiento unitario en ese instante hasta el alargamiento del criterio de fallo utilizado (0.7), no haya un endurecimiento por deformación que sobreestime la realidad. Las curvas de tensión-deformación para los tres tipos de acero utilizados en la fabricación de la unión están en la Tabla 31.

Tabla 31. Parámetros del modelo de material piecewise linear plasticity.

Parámetros para el modelo de material		
	Deformación unitaria verdadera	Tensión verdadera (MPa)
Acero s275	0.00200	275
	0.20701	504
	0.21511	508
Acero s355	0.00200	355
	0.19885	573
	0.20701	579
Acero s700	0.00200	970
	0.13976	1075
	0.20842	1083

Con las curvas de tensión-deformación anteriores y el criterio de fallo introducido, se obtiene la curva Momento-Ángulo de la Figura 147, obteniendo resultados similares en magnitud y forma a la curva obtenida por ensayo. En la Figura 146 se puede apreciar la formación de la rótula en el modelo, así como la eliminación de los elementos que superan el criterio de fallo, emulando a la aparición de las grietas. Sin embargo, y pese a las grietas en el montante, en la curva de comportamiento no se aprecia una gran discontinuidad al haber contacto entre los elementos en ambos lados de la grieta.

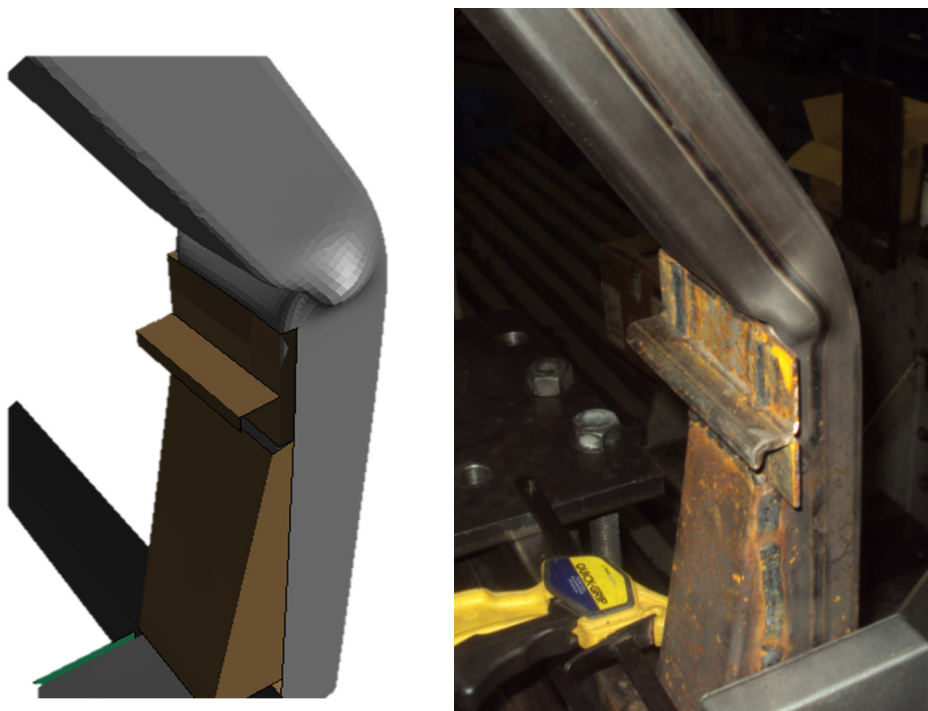


Figura 145. Rótula plástica en modelo de unión y ensayo.

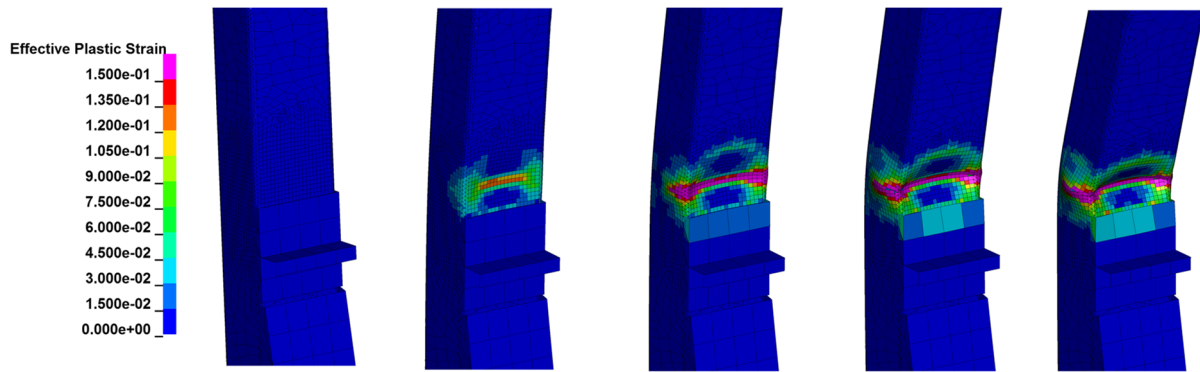


Figura 146. Formación de rótula plástica en modelo de unión.

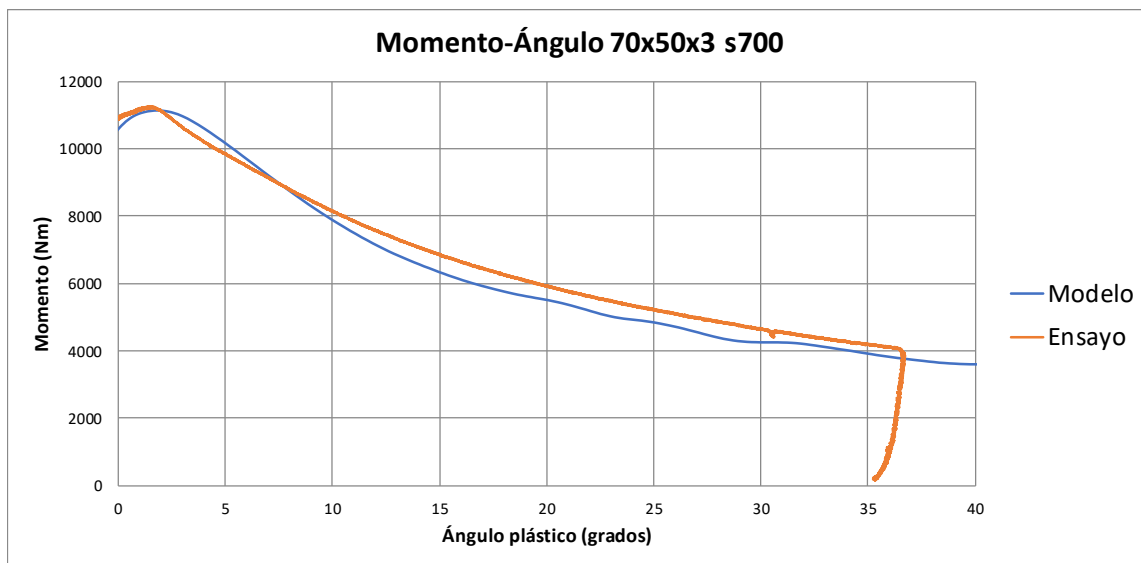


Figura 147. Momento-Ángulo plástico de la unión 70x50x3 s700.

Tras la realización de este submodelo, se aplica lo aprendido en el modelo de la estructura del módulo: criterio de fallo, curva tensión-deformación, tipología de elemento y tamaño de malla. El mallado se ha realizado con un tamaño global de 20 mm, disminuyendo hasta los 2 mm en las zonas cercanas a las uniones donde se van a formar las rótulas plásticas. El número total de elementos es 240670 y de nodos 236878. El modelo mallado del módulo con los lastres es el que aparece en la Figura 148.

El módulo se coloca en la plataforma definida en el Reglamento 66 en el primer punto de impacto contra el suelo, tal y como exige dicho reglamento. La plataforma y el suelo se han modelado con planos rígidos (*RIGIDWALL*), y un coeficiente de rozamiento de 0.2, definiendo un contacto entre los nodos del módulo y dichos planos.

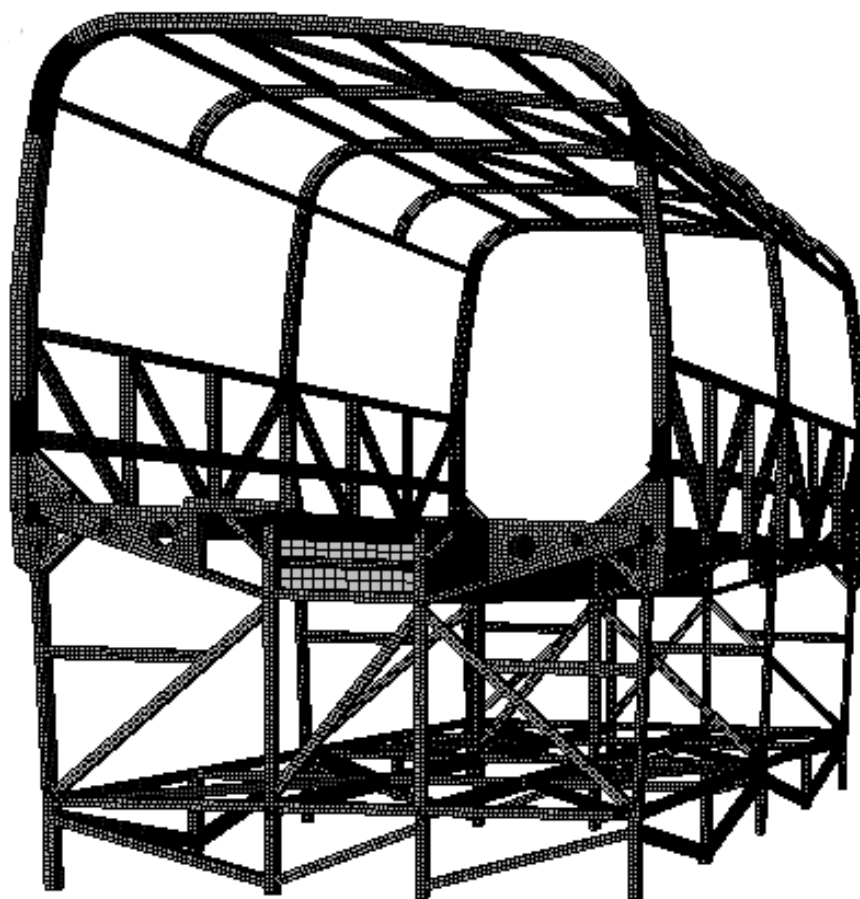


Figura 148. Modelo M.E.F. del módulo.

Al modelo se le ha añadido la acción de la gravedad y una velocidad angular inicial que simula la que posee el módulo ensayado al finalizar el recorrido de vuelco desde la posición de inestabilidad sobre la plataforma. La magnitud de la velocidad angular es 2.24 rad/s , siendo el punto de aplicación el punto de giro de la estructura sobre el tope de la plataforma. Con este valor se obtiene una energía cinética inicial idéntica a la calculada en el ensayo.

El tiempo de simulación es de 110 ms , que es el tiempo entre el primer impacto y la máxima deformación en el ensayo.

Finalmente, los resultados obtenidos se han comparado con las señales de desplazamiento procedentes de los ensayos realizados en la Fase I para cada uno de los cinco puntos escogidos. Estos valores se han obtenido durante el post-procesado como el valor de desplazamiento en X e Y de los nodos que se encuentran en la posición central de las dianas en la estructura ensayada.

9.2 Primera deformación.

En la Figura 149 se representa el módulo en la plataforma de vuelco en el instante inicial de la simulación, coincidente con el instante de primer impacto contra el suelo.

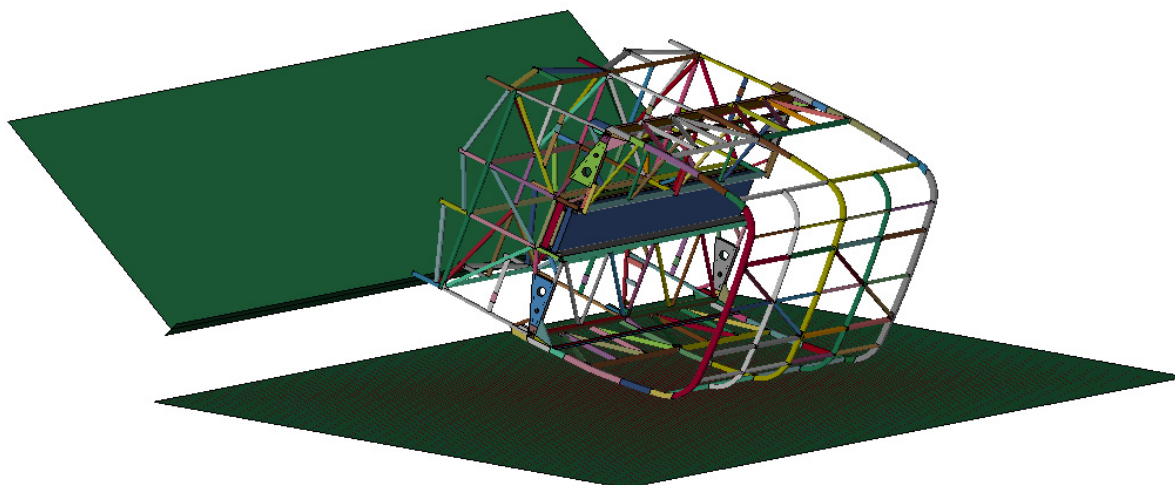


Figura 149. Modelo M.E.F. del módulo en el instante del primer impacto contra el suelo.

En primer lugar, se realiza una comparación de la deformada de manera cualitativa, así como de la posición de las rótulas y las grietas.

La Figura 150 compara la estructura deformada en el instante de máxima deformación con el resultado de la simulación. Se puede ver como ambas deformadas son similares tanto en magnitud como en la posición de las rótulas plásticas.

Las rótulas plásticas se forman en los montantes a la altura del piso, concretamente en el carril de butacas, y en el techo aparecen en la zona curvada.

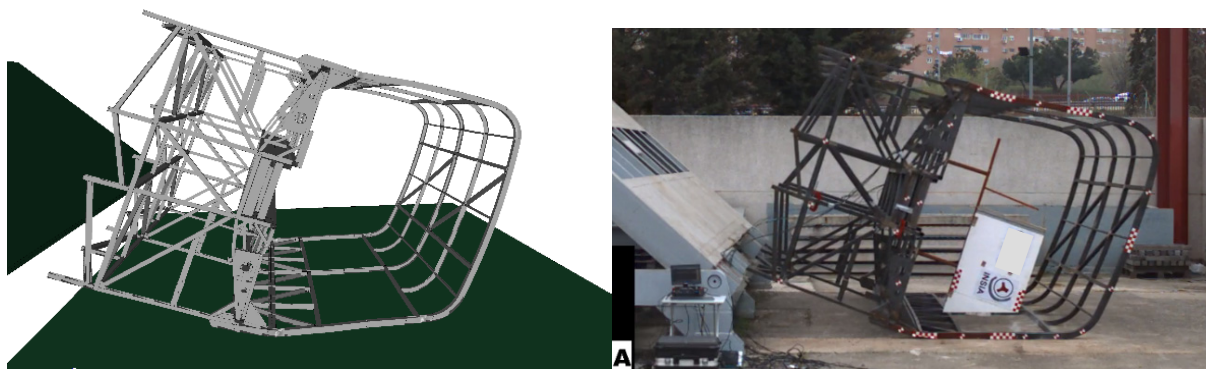


Figura 150. Instante de máxima deformación. Modelo M.E.F. y ensayo.

Un ejemplo de deformación a nivel de piso se puede ver en la Figura 151. En esta zona aparecen grietas en los redondeos del perfil, tal y como se predice en el modelo.

En el lateral que impacta contra el suelo aparece deformación en el travesaño en la zona del piso de butacas, debido al peso adicional que supone el lastre. Esta deformación también se predice en el modelo, tal y como puede verse en la Figura 152.

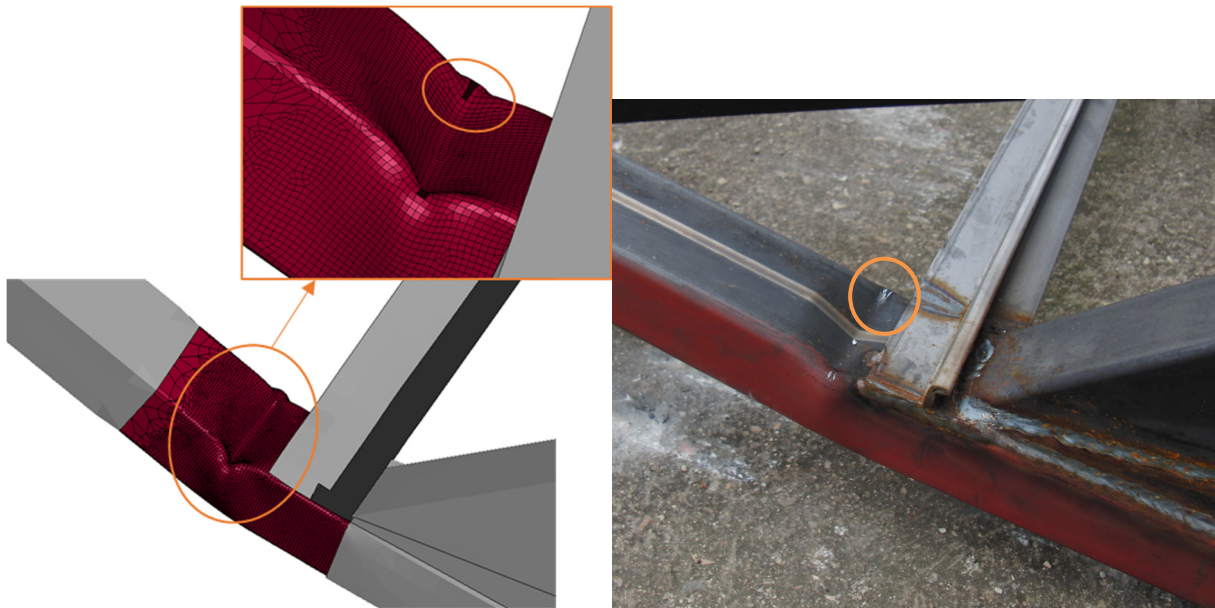


Figura 151. Grieta en montante zona de piso. Modelo M.E.F. y ensayo.

Los resultados muestran una gran correlación con el ensayo de manera cualitativa, ya que tanto deformaciones como grietas se producen en la misma zona, si bien las grietas producidas son algo mayores en el modelo.

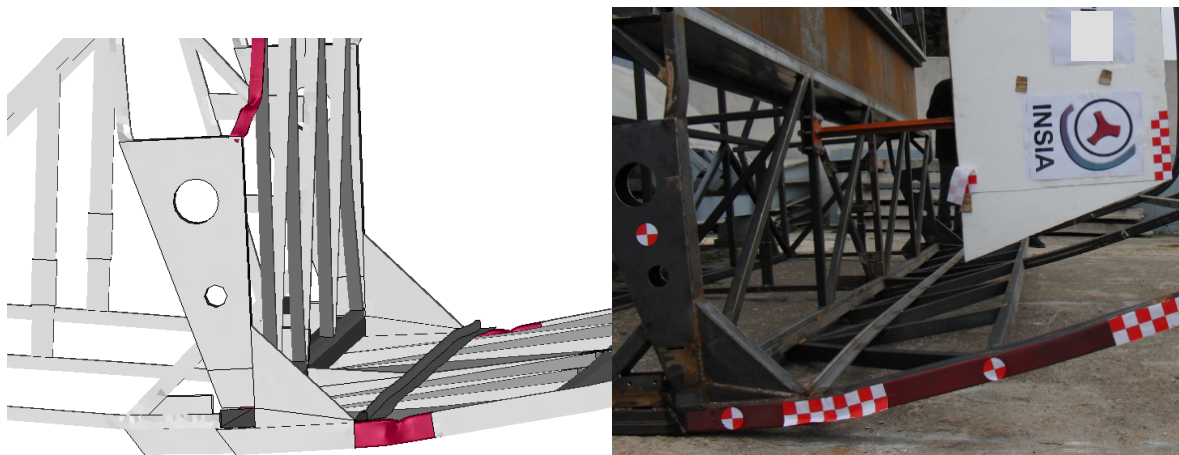


Figura 152. Rótula plástica en montante y travesaño. Modelo M.E.F. y ensayo.

En segundo lugar, se comparan las trayectorias de los seis puntos escogidos en el apartado 9.1.1. Para ello se muestran los desplazamientos en X e Y de cada punto en una gráfica independiente, si bien en cada una se incluyen los resultados del modelo y del ensayo.

Todas las gráficas se incluyen en la Figura 153. La correlación entre ensayo y modelo es muy alta en todos los puntos, por lo que tanto la zona deformable como el punto A perteneciente a la zona no deformable se desplazan de forma idéntica durante toda la deformación. El resultado es el ya comentado anteriormente: la deformada de la estructura ensayada y simulada es la misma, y lo es durante todo el proceso de deformación, por lo que para energías de impacto inferiores el modelo también sería predictivo.

El uso de un criterio de fallo por alargamiento de 0.7, a priori elevado pues es superior al límite que presentan los aceros de alto límite elástico, entre 0.1 y 0.15, es sin embargo conservador, pues las grietas producidas son algo mayores que las que aparecen en el

ensayo. Por tanto, introducir en modelos de elementos finitos con tipología placa o *SHELL* el valor del alargamiento máximo a rotura como criterio de fallo es demasiado conservador.

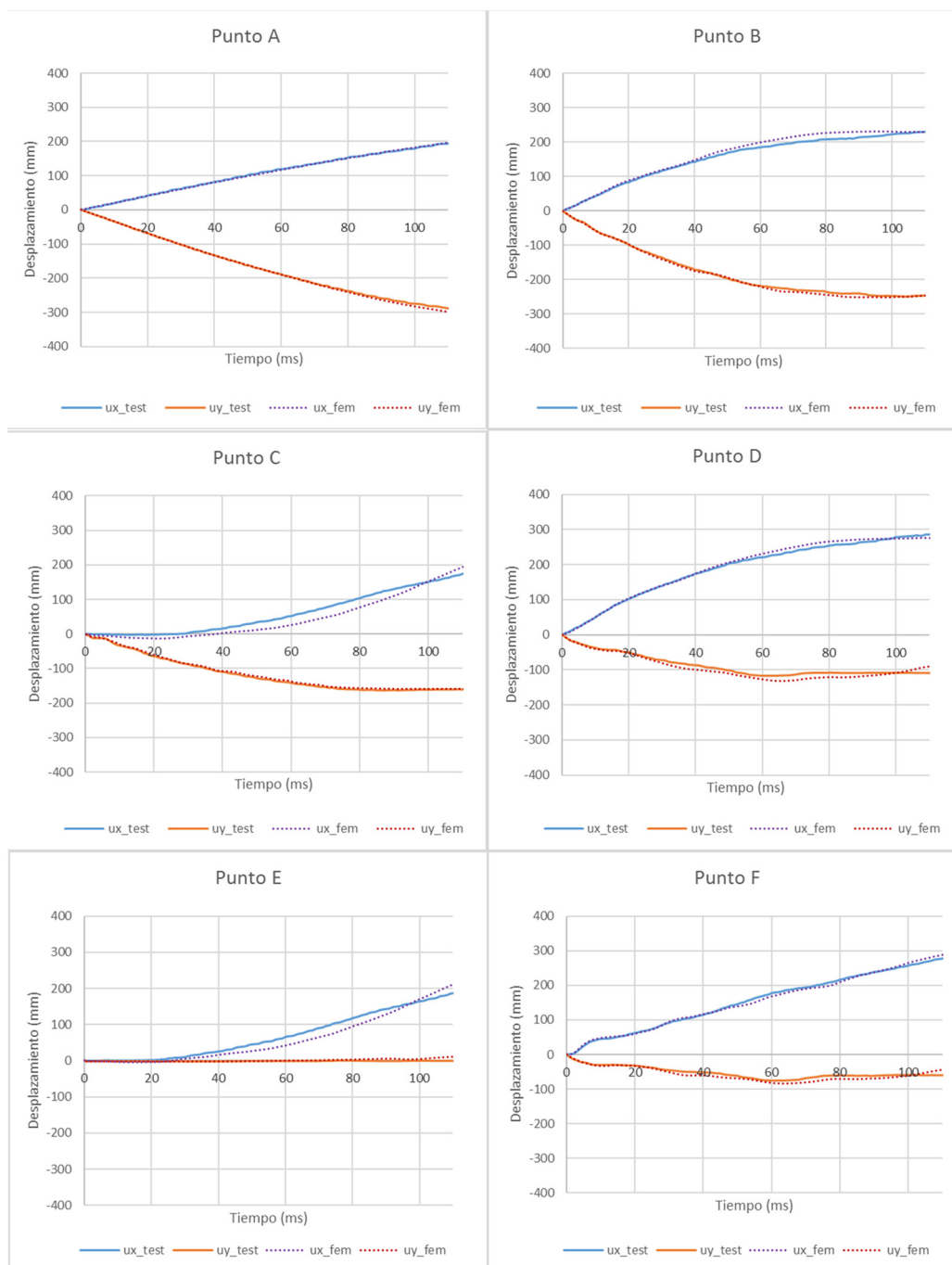


Figura 153. Trayectoria de los puntos A, B, C, D, E y F. Modelo M.E.F. y ensayo. Vuelco 1.

La metodología de cálculo propuesta en este trabajo se considera adecuada para el alcance establecido, ya que se alcanza deformación hasta el espacio de supervivencia, siendo esta la máxima permitida. Además, se han reproducido las grietas en los perfiles que aparecen en el ensayo y de forma más agresiva, por lo que el modelo es más restrictivo.

La comparación entre deformada de ensayo y cálculo proporciona una correlación elevada tal y como se ve en los seis puntos escogidos a lo largo de la estructura, además de predecir la aparición de roturas en los mismos puntos.

9.3 Segunda deformación.

El segundo vuelco se realiza con la estructura tras el ensayo vuelco 1. Para ello se levanta la estructura mediante un puente grúa y eslingas hasta volver a posicionar el módulo en la plataforma de vuelco. Además, se gira la estructura 180° sobre un eje vertical que pasa por su centro geométrico, de manera que el lateral a impactar con el suelo es en este caso el contrario al vuelco 1.

Para minorar la energía a absorber hasta un 75% del vuelco 1, hay que dejar caer el módulo desde una posición posterior a la de equilibrio inestable. Se utiliza un mosquetón driza como el de la Figura 154a, engancho mediante un cable de acero el anillo superior al puente grúa, y el anillo inferior mediante una eslinga a la esquina superior del módulo (Figura 154b). Desde la posición de equilibrio inestable se controla la caída del módulo hasta la posición deseada de manera cuasiestática, donde se deja fijo hasta el lanzamiento. Para soltar el módulo hay que tirar de la anilla como muestra la Figura 154a.

La posición de lanzamiento para el vuelco 2 se ha calculado gráficamente, dando lugar a un ángulo de 52° con respecto a la horizontal. La Figura 155a muestra el módulo ya posicionado sobre la plataforma y la Figura 155b el módulo en la posición inicial del vuelco, a 52° de la horizontal.

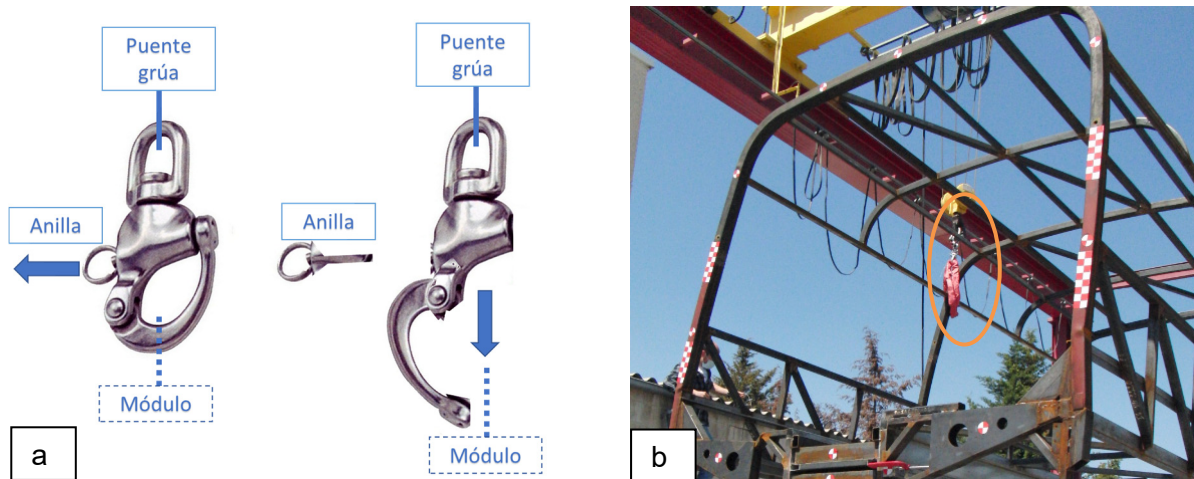


Figura 154. Mecanismo para posicionar la estructura. Mosquetón driza (a). Sujeción del módulo (b).

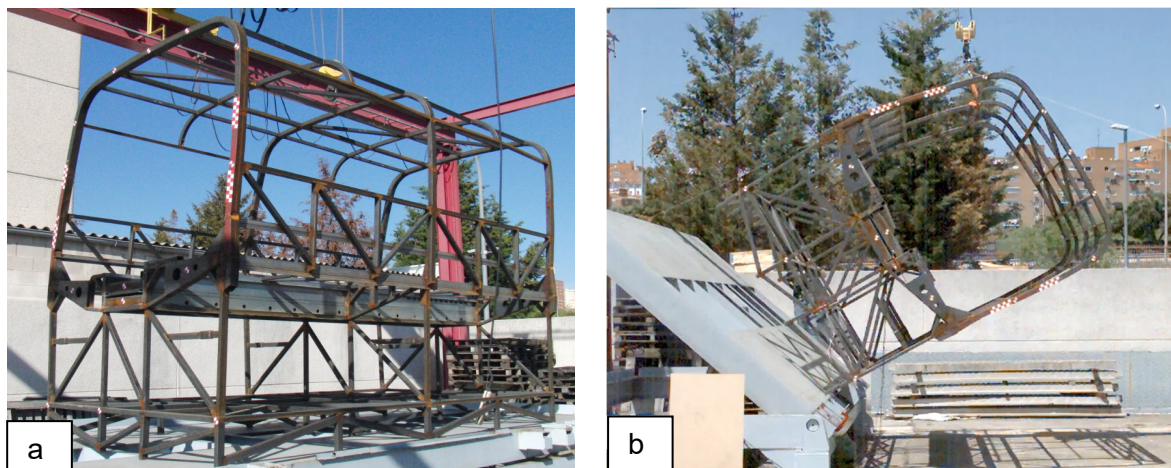


Figura 155. Estructura sobre plataforma para el vuelco 2 (a) y en la posición de lanzamiento (b).

En el modelo se parte de la estructura deformada y en el estado tensional tras el vuelco 1. Para ello, se extiende la simulación del vuelco 1 hasta la recuperación elástica de la estructura mediante un “*restart*” a partir de la deformación máxima del vuelco 1 en $t=110$ ms. Mediante otro “*restart*” se posiciona la plataforma de vuelco de manera que la estructura deformada apoye las patas en el bordillo y esté en contacto con el suelo. Se genera un nuevo sistema de coordenadas orientado con el eje Y perpendicular al suelo y el eje x paralelo al suelo. Se impone la gravedad según este nuevo eje Y y una velocidad angular al conjunto de 2.11 rad/s en el mismo punto que en el vuelco 1, es decir, en el contacto entre las patas y el bordillo de la plataforma.

En la Figura 156 se representa el módulo en la plataforma de vuelco en el instante inicial de la simulación, coincidente con el instante de primer impacto contra el suelo.

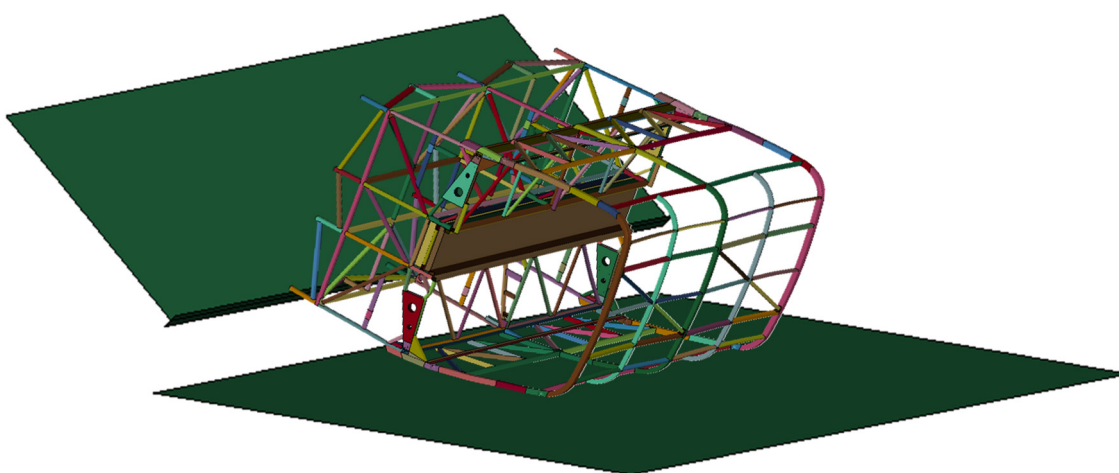


Figura 156. Modelo M.E.F. del módulo en el instante del primer impacto contra el suelo. Vuelco 2.

La Figura 157 compara la estructura deformada en el instante de máxima deformación con el resultado de la simulación. Se puede ver como ambas deformadas son similares tanto en magnitud como en la posición de las rótulas plásticas.

Las rótulas plásticas se forman en los montantes a la altura del piso, concretamente en el carril de butacas, y en el techo aparecen en la zona curvada. Todas las rótulas aparecen en los mismos puntos que en el vuelco 1 (Figura 158).

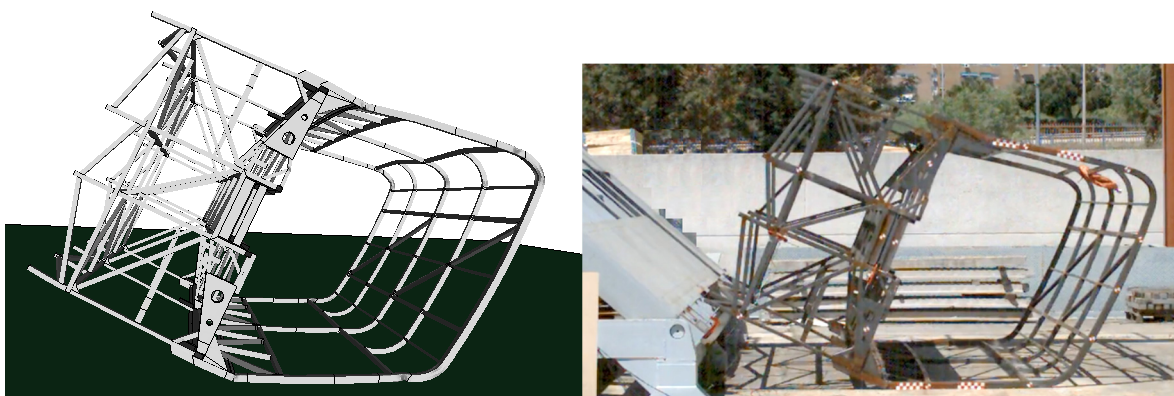


Figura 157. Instante de máxima deformación. Modelo M.E.F. y ensayo. Vuelco 2.



Figura 158. Estructura general en el instante final. Modelo M.E.F. y ensayo. Vuelco 2.

Un ejemplo de deformación a nivel de piso se puede ver en la Figura 159. En esta zona aparecen grietas en los redondeos del perfil, tal y como se predice en el modelo.

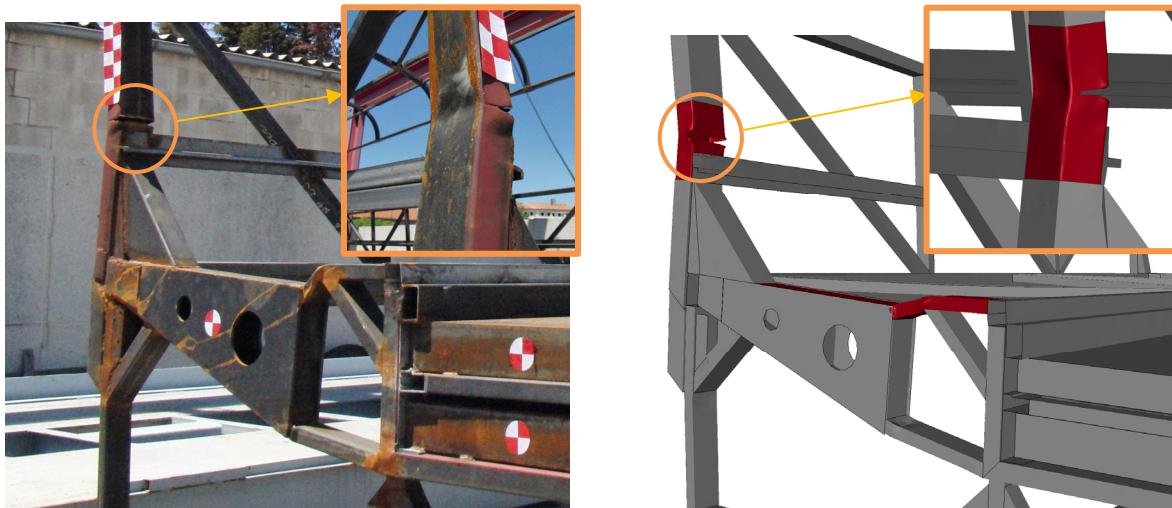


Figura 159. Grieta en montante zona de piso. Modelo M.E.F. y ensayo.

Los resultados muestran una gran correlación con el ensayo de manera cualitativa, ya que tanto deformaciones como grietas se producen en la misma zona, si bien las grietas producidas son algo mayores en el modelo o bien aparecen en puntos donde no se formaron en el ensayo (Figura 160). Este caso ocurre debido a que durante el vuelco 1 se formó una pequeña grieta (eliminación de 1 elemento), y al cambiar la dirección del vuelco la grieta se queda en el flanco a tracción y produciendo por tanto rotura total del flanco. Es

decir, una pequeña desviación en el vuelco 1 puede derivar en una desviación mayor en el vuelco 2.



Figura 160. Grieta en montante zona de piso. Modelo M.E.F. y ensayo.

Se analiza de manera cuantitativa modelo y ensayo, mediante la comparación de las trayectorias de los seis puntos escogidos en el apartado 9.1.1. Para ello se muestran los desplazamientos en X e Y de cada punto en una gráfica independiente, si bien en cada una se incluyen los resultados del modelo y del ensayo. Estos puntos son idénticos a los escogidos para el vuelco 1, pero en el frontal contrario del módulo puesto que se ha rotado 180° con respecto al vuelco 1.

Todas las gráficas se incluyen en la Figura 161. La correlación entre ensayo y modelo es muy alta en todos los puntos, por lo que tanto la zona deformable como el punto A perteneciente a la zona no deformable se desplazan de forma idéntica durante toda la deformación. El resultado es el ya comentado anteriormente: la deformada de la estructura ensayada y simulada es la misma, y lo es durante todo el proceso de deformación. En este vuelco, sin embargo, hay divergencia en la dirección X de todos los puntos. La deformación se produce principalmente en la dirección Y que es la normal al plano, siendo el desplazamiento en X debido en mayor parte al desplazamiento como sólido rígido. Por esta razón se considera que la correlación sigue siendo alta.

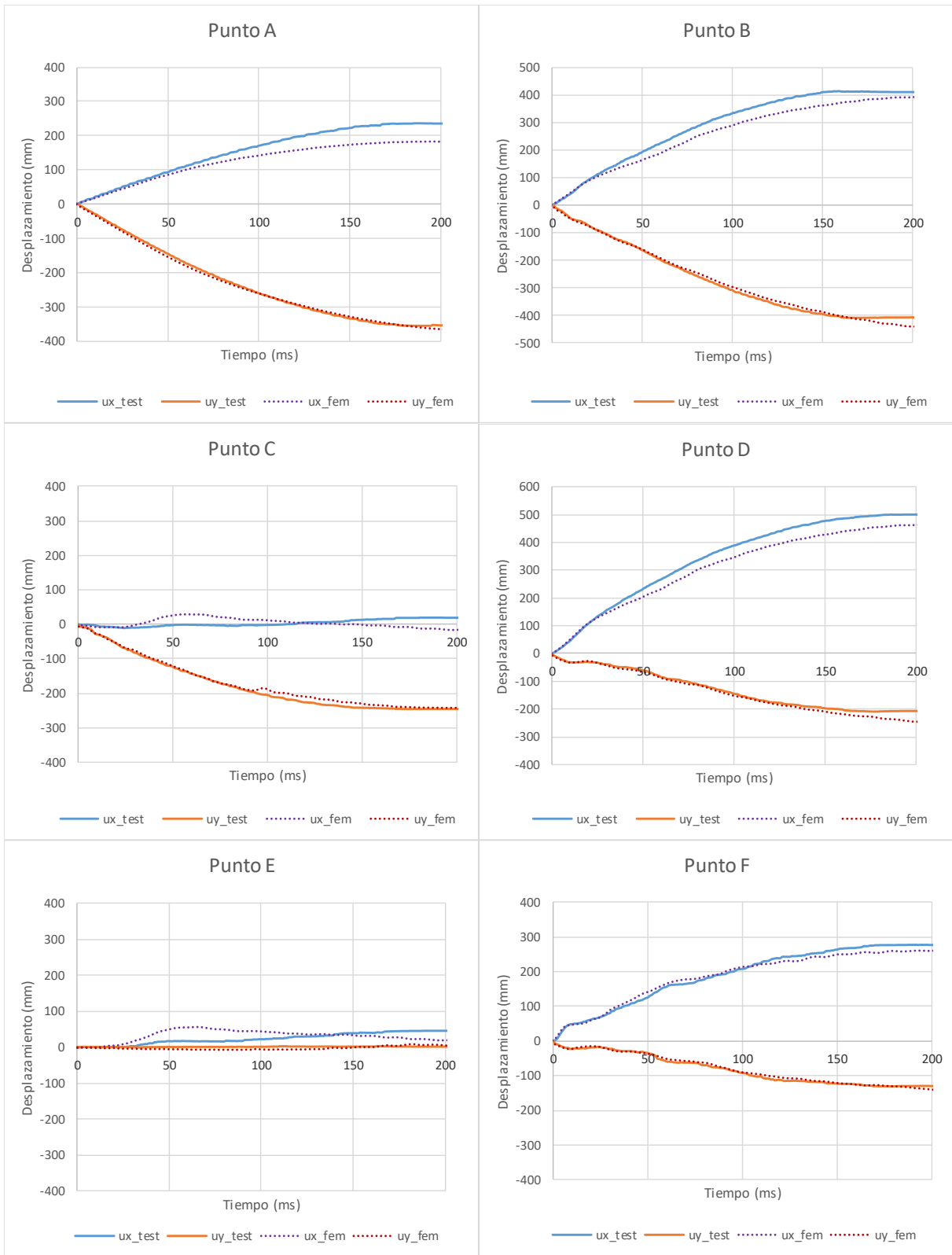


Figura 161. Trayectoria de los puntos A, B, C, D, E y F. Modelo M.E.F. y ensayo. Vuelco 2.

9.4 Tercera deformación.

El tercer vuelco se realiza con la estructura tras el ensayo vuelco 2. Para ello se levanta la estructura mediante un puente grúa y eslingas hasta volver a posicionar el módulo en la plataforma de vuelco. Además, se gira la estructura 180° sobre un eje vertical que pasa por su centro geométrico, de manera que el lateral a impactar con el suelo es en este caso el contrario al vuelco 2 y el mismo del vuelco 1.

No se minora la energía a absorber y es, por tanto, la misma a la del vuelco 1. El ensayo se realiza elevando la plataforma hasta el instante de equilibrio inestable donde el módulo empieza a caer por acción de la gravedad.

La Figura 162a muestra el módulo ya posicionado sobre la plataforma y la Figura 162b el módulo en la posición inicial del vuelco, a 52° de la horizontal.

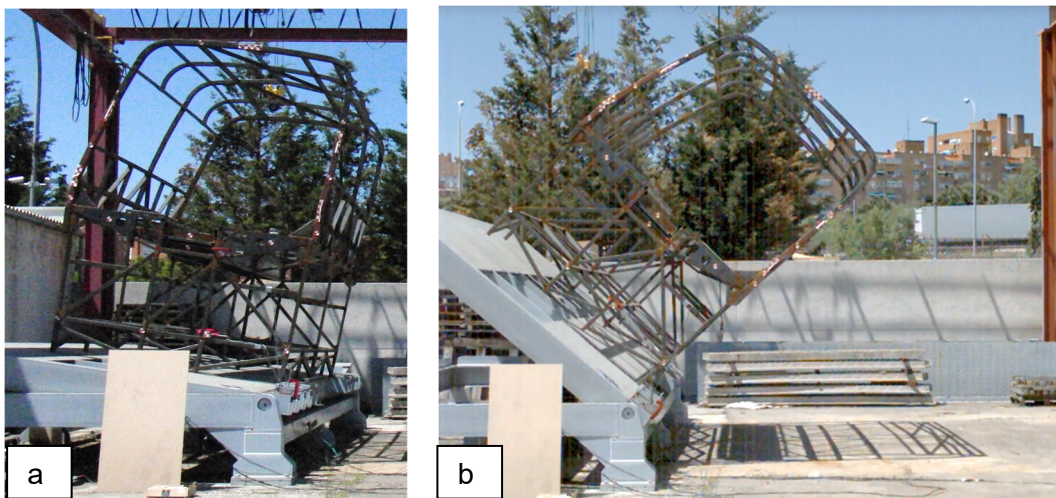


Figura 162. Estructura sobre plataforma para el vuelco 3 (a) y en la posición de lanzamiento (b).

En cuanto a los puntos para la realización del “tracking”, varían con respecto al vuelco 1 pese a ser el mismo frontal del módulo: el punto D se sustituye por el punto D' y se elimina el punto E, en ambos casos por la imposibilidad del seguimiento en dichos puntos. La Figura 163 muestra los puntos seguidos en los vuelcos 1 y 3.

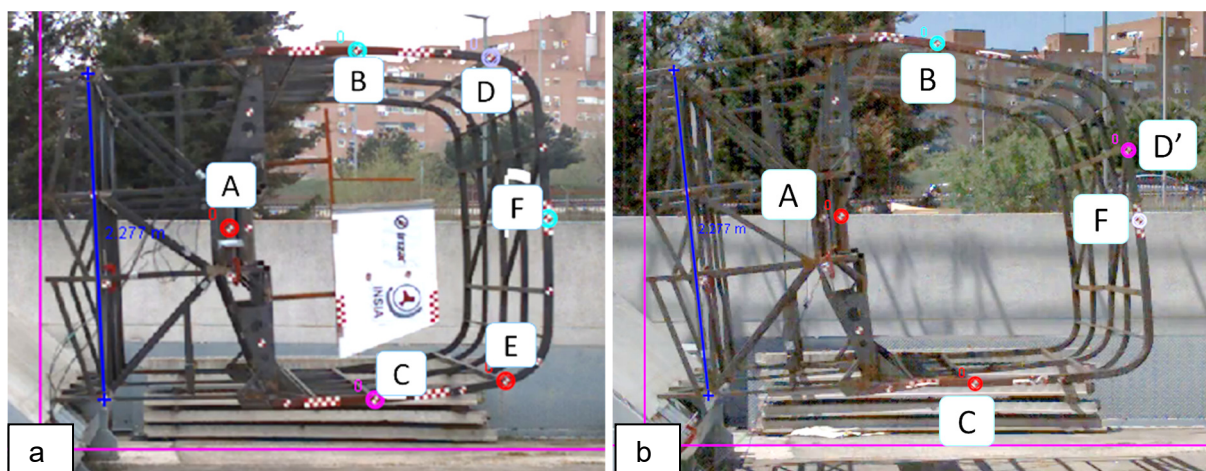


Figura 163. Puntos de seguimiento en la estructura para el vuelco 1 (a) y el vuelco 3 (b).

En el modelo se parte de la estructura deformada y del estado tensional tras el vuelco 2. Para ello, se extiende la simulación del vuelco 2 hasta la recuperación elástica de la estructura mediante un “*restart*” a partir de la deformación máxima del vuelco 2. Mediante otro “*restart*” se posiciona la plataforma de vuelco de manera que la estructura deformada apoye las patas en el bordillo y esté en contacto con el suelo. Se genera un nuevo sistema de coordenadas orientado con el eje Y perpendicular al suelo y el eje x paralelo al suelo. Se impone la gravedad según este nuevo eje Y y una velocidad angular al conjunto de 2.24 rad/s en el mismo punto que en el vuelco 1, es decir, en el contacto entre las patas y el bordillo de la plataforma.

En la Figura 164 se representa el módulo en la plataforma de vuelco en el instante inicial de la simulación, coincidente con el instante de primer impacto contra el suelo.

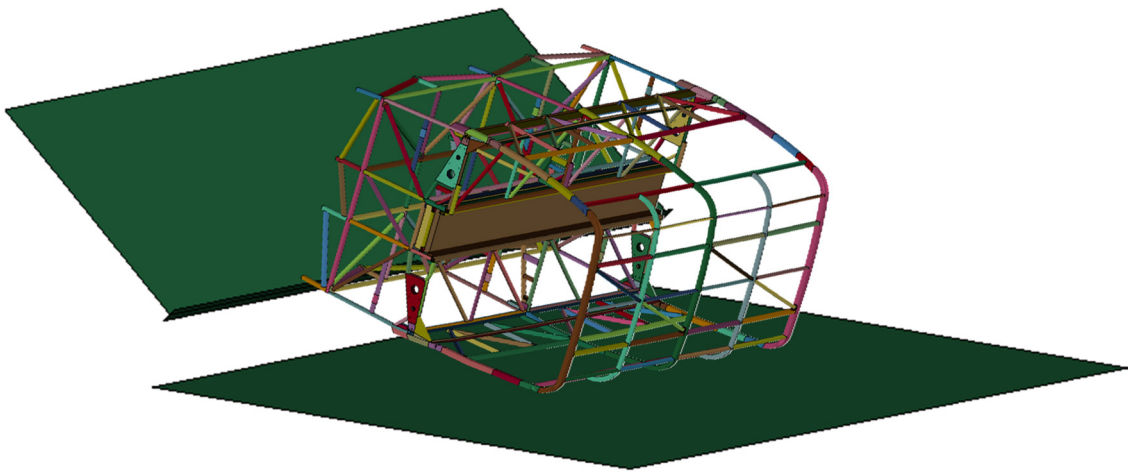


Figura 164. Modelo M.E.F. del módulo en el instante del primer impacto contra el suelo. Vuelco 3.

La Figura 165 compara la estructura deformada en el instante de máxima deformación con el resultado de la simulación. Se puede ver como ambas deformadas son similares tanto en magnitud como en la posición de las rótulas plásticas.

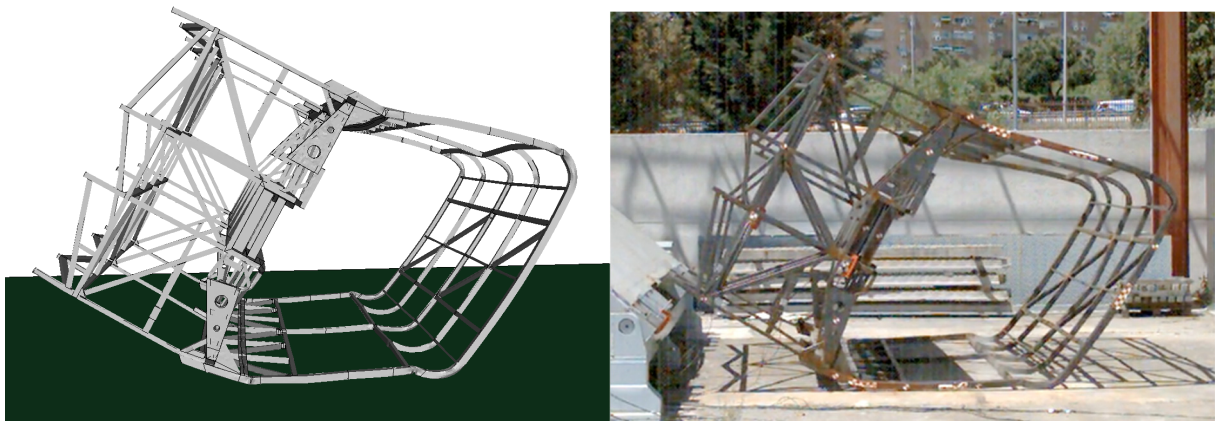


Figura 165. Instante de máxima deformación. Modelo M.E.F. y ensayo. Vuelco 3.

Las rótulas plásticas se forman en los montantes a la altura del piso, concretamente en el carril de butacas, y en el techo aparecen en la zona curvada. Todas las rótulas aparecen en los mismos puntos que en los vuelcos 1 y 2 (Figura 166).

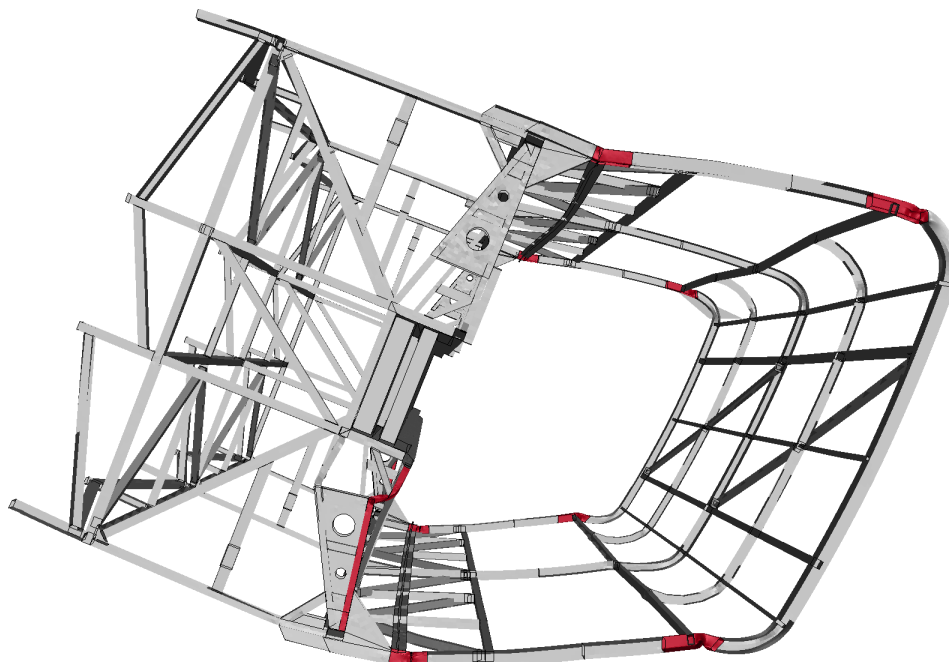


Figura 166. Estructura general en el instante final. Modelo M.E.F. y ensayo. Vuelco 2.

Al ser el último vuelco, se procede a realizar una comparación más exhaustiva y detallada de todas las zonas deformadas. Para ello se comparan la misma zona en modelo y ensayo, y se añade una imagen en miniatura de la estructura original con la zona detallada señalada. Las imágenes que comparan la estructura se muestran a continuación: desde la Figura 167 a la Figura 170 para la zona de piso y desde la Figura 171 a la Figura 174 para la zona de techo.

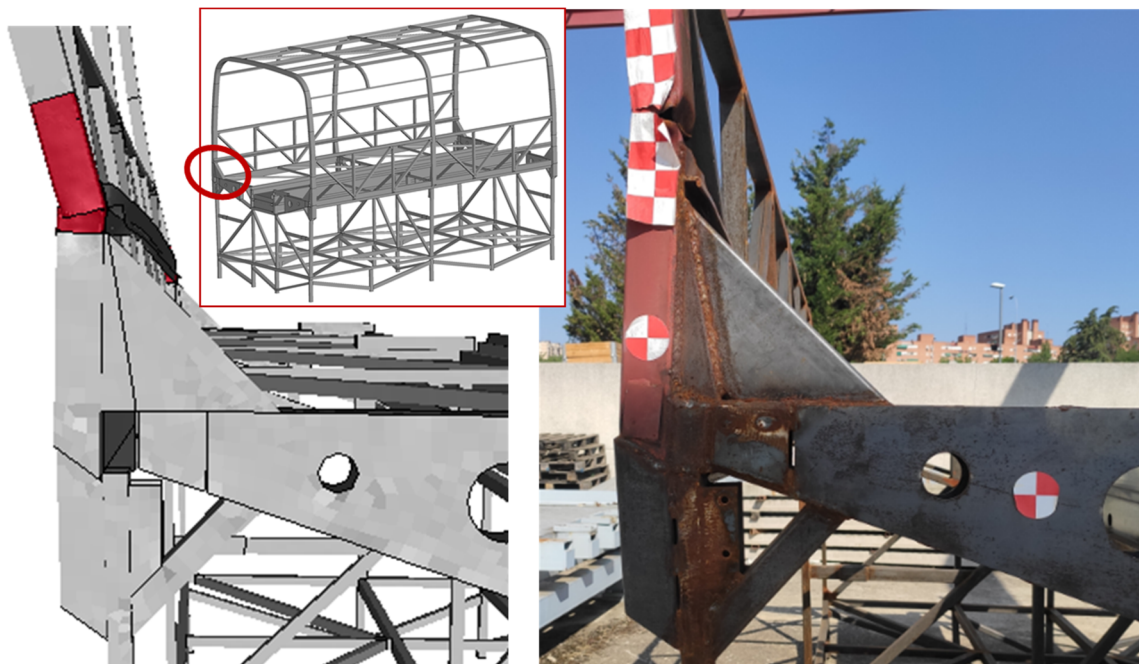


Figura 167. Montante delantero derecho en piso. Modelo M.E.F. y ensayo. Vuelco 3.

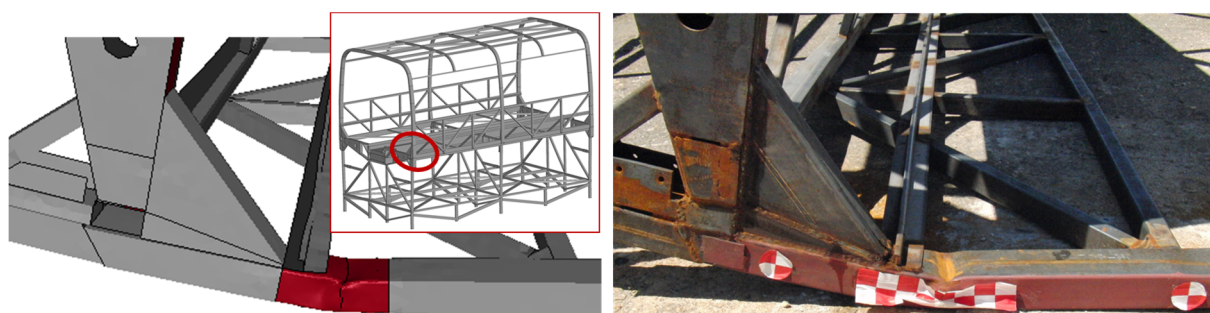


Figura 168. Montante delantero izquierdo en piso. Modelo M.E.F. y ensayo. Vuelco 3.

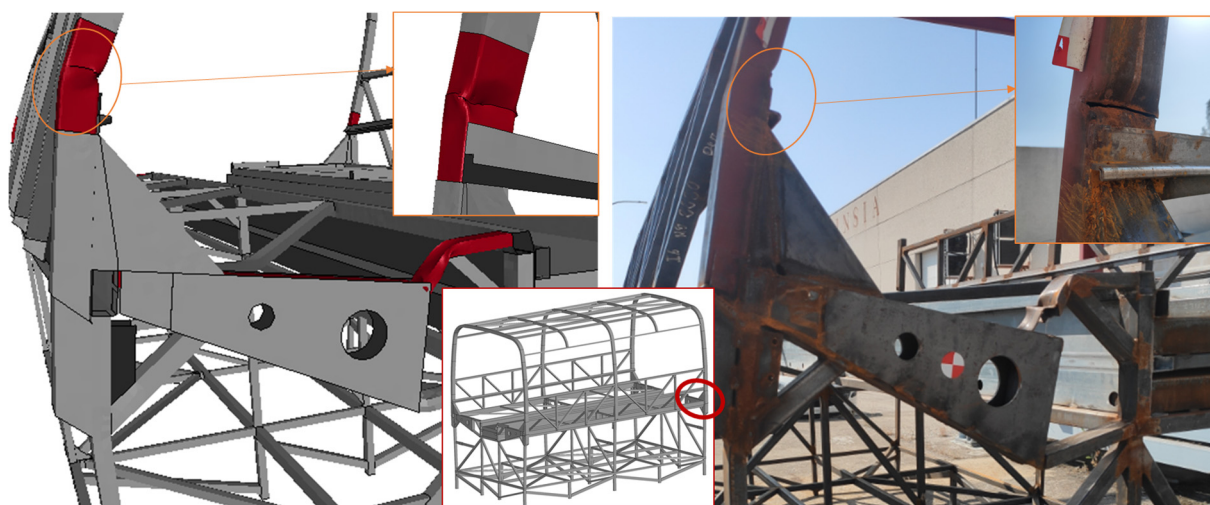


Figura 169. Montante trasero izquierdo en piso. Modelo M.E.F. y ensayo. Vuelco 3.

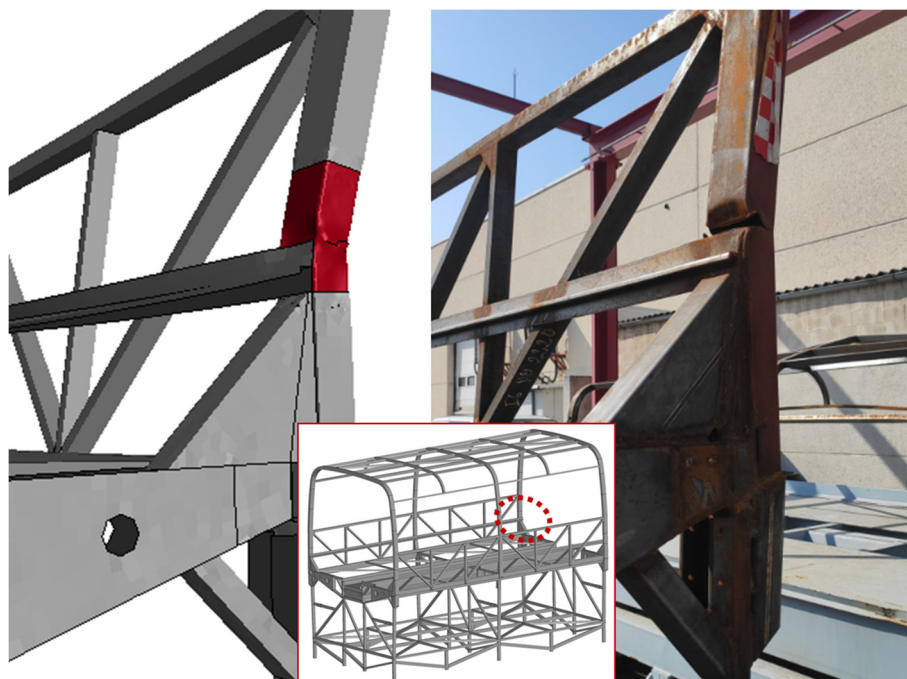


Figura 170. Montante trasero derecho en piso. Modelo M.E.F. y ensayo. Vuelco 3.

Las cuatro rótulas de piso se han formado en los montantes de los anillos delantero y trasero, no habiéndose formado en el anillo intermedio por ser una sección menos resistente (80.60.3 en los extremos y 70.50.3 en el intermedio). En el modelo aparecen grietas en las cuatro rótulas, mientras que en el ensayo sólo aparecen en tres, de las cuales dos se producen en el flanco contrario al modelo (Figura 167 y Figura 170). Sólo en el caso del montante trasero izquierdo se producen en el mismo flanco (Figura 169). La rotura en el perfil no es fácilmente predecible pues cualquier variación en la composición de la zona concreta o imperfección debido al conformado y a las soldaduras pueden provocar una fisura que derive en la rotura del perfil en ese flanco y, por tanto, no produciéndose en el contrario.

A continuación, se muestra la deformación de la zona de techo:

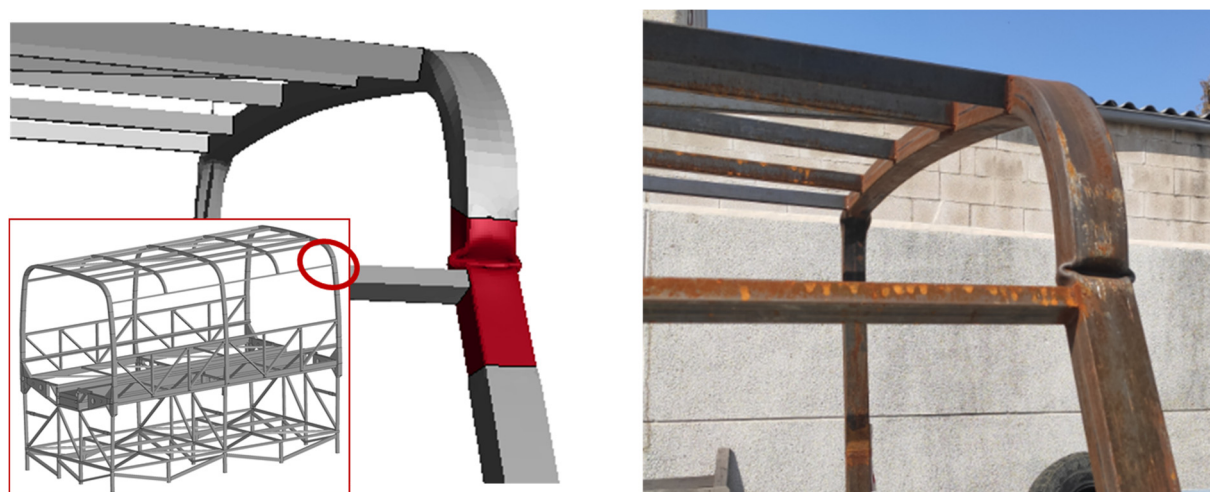


Figura 171. Cercha trasera izquierda. Modelo M.E.F. y ensayo. Vuelco 3.

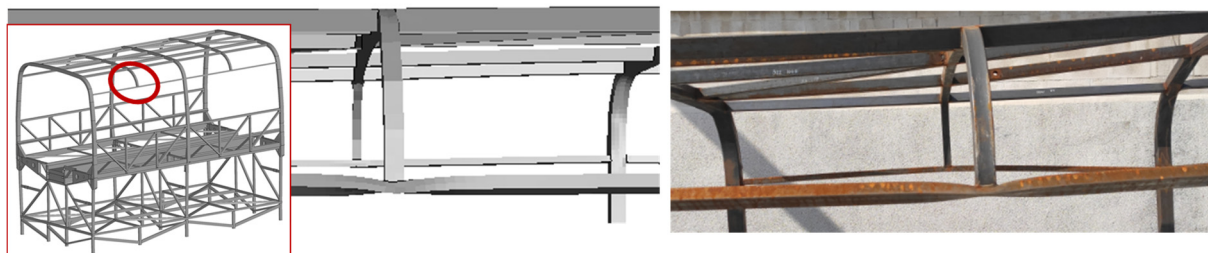


Figura 172. Cercha intermedia izquierda. Modelo M.E.F. y ensayo. Vuelco 3.

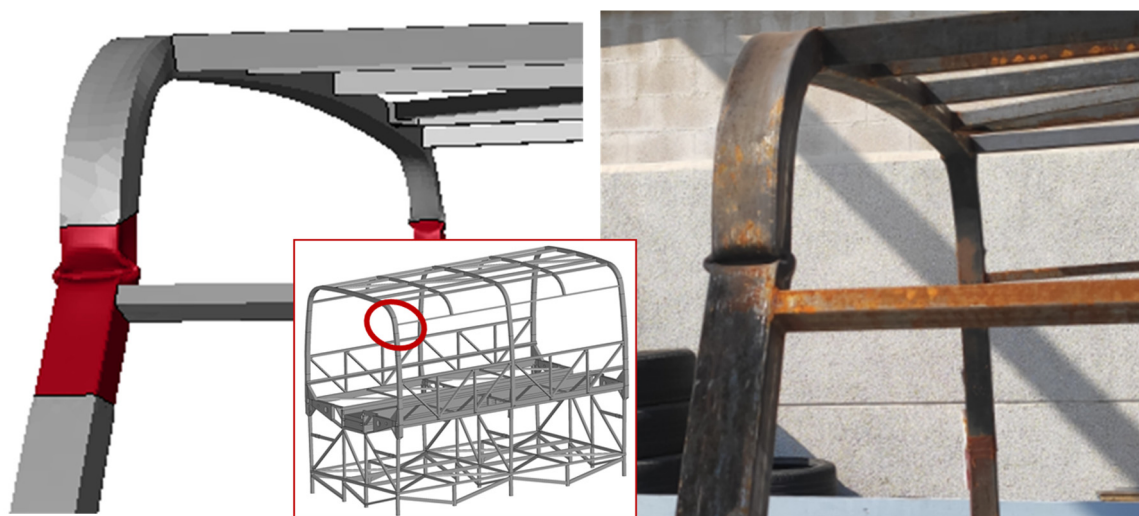


Figura 173. Cercha delantera izquierda. Modelo M.E.F. y ensayo. Vuelco 3.

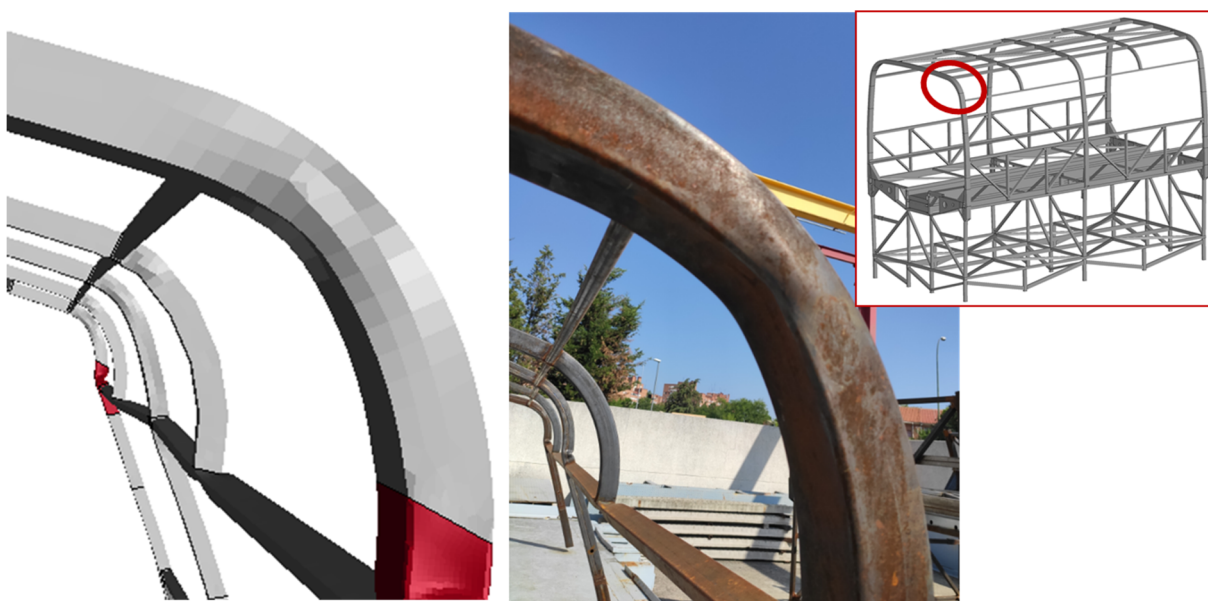


Figura 174. Cercha delantera izquierda. Modelo M.E.F. y ensayo. Vuelco 3.

Las rótulas se forman en los anillos delantero y trasero, tal y como ocurre en la zona de piso, y por encima del larguero superior de ventana (Figura 171 y Figura 173). En estos casos no

hay rotura en el modelo pues no se incluye para el material s355 criterio de fallo alguno, pues no es habitual que ocurra para los ángulos girados en este tipo de ensayo, inferiores a 30°. El larguero superior de ventana también sufre un colapso, diferente a la rótula plástica, en la unión con las cerchas intermedias (Figura 172). También aparece deformación en la zona de la curvatura de la cercha, como se puede ver en la Figura 174.

Los resultados muestran una gran correlación con el ensayo de manera cualitativa, ya que tanto deformaciones como grietas se producen en la misma zona, si bien las grietas producidas son algo mayores en el modelo o bien aparecen en puntos donde no se formaron en el ensayo.

A continuación, se analiza de manera cuantitativa modelo y ensayo, mediante la comparación de las trayectorias de los cinco puntos escogidos. Para ello se muestran los desplazamientos en X e Y de cada punto en una gráfica independiente, si bien en cada una se incluyen los resultados del modelo y del ensayo. Como se ha explicado al inicio del apartado, el punto D difiere del punto D del vuelco 1, por lo que se ha denominado D'; además, el punto E no se ha podido obtener por lo que dicha gráfica no aparece. Las gráficas se han obtenido hasta $t=250$ ms, que es el tiempo que tarda en alcanzarse la deformación máxima.

Todas las gráficas se incluyen en la Figura 175. La correlación entre ensayo y modelo es muy alta en todos los puntos, por lo que tanto la zona deformable como el punto A perteneciente a la zona no deformable se desplazan de forma idéntica durante toda la deformación. El resultado es el ya comentado anteriormente: la deformada de la estructura ensayada y simulada es muy similar, y lo es durante todo el proceso de deformación.

En este vuelco, sin embargo, hay divergencia en la dirección Y de los puntos A y C, debidos a la formación en el modelo de grietas en el montante entre dichos puntos, que no aparece en el ensayo real: esta grieta disminuye la resistencia del perfil y aumenta el ángulo girado, aumentando a su vez el desplazamiento vertical en los puntos A y C.

9. DESARROLLO DE MODELOS MEF DE ESTRUCTURAS REPARADAS DE AUTOBUSES.

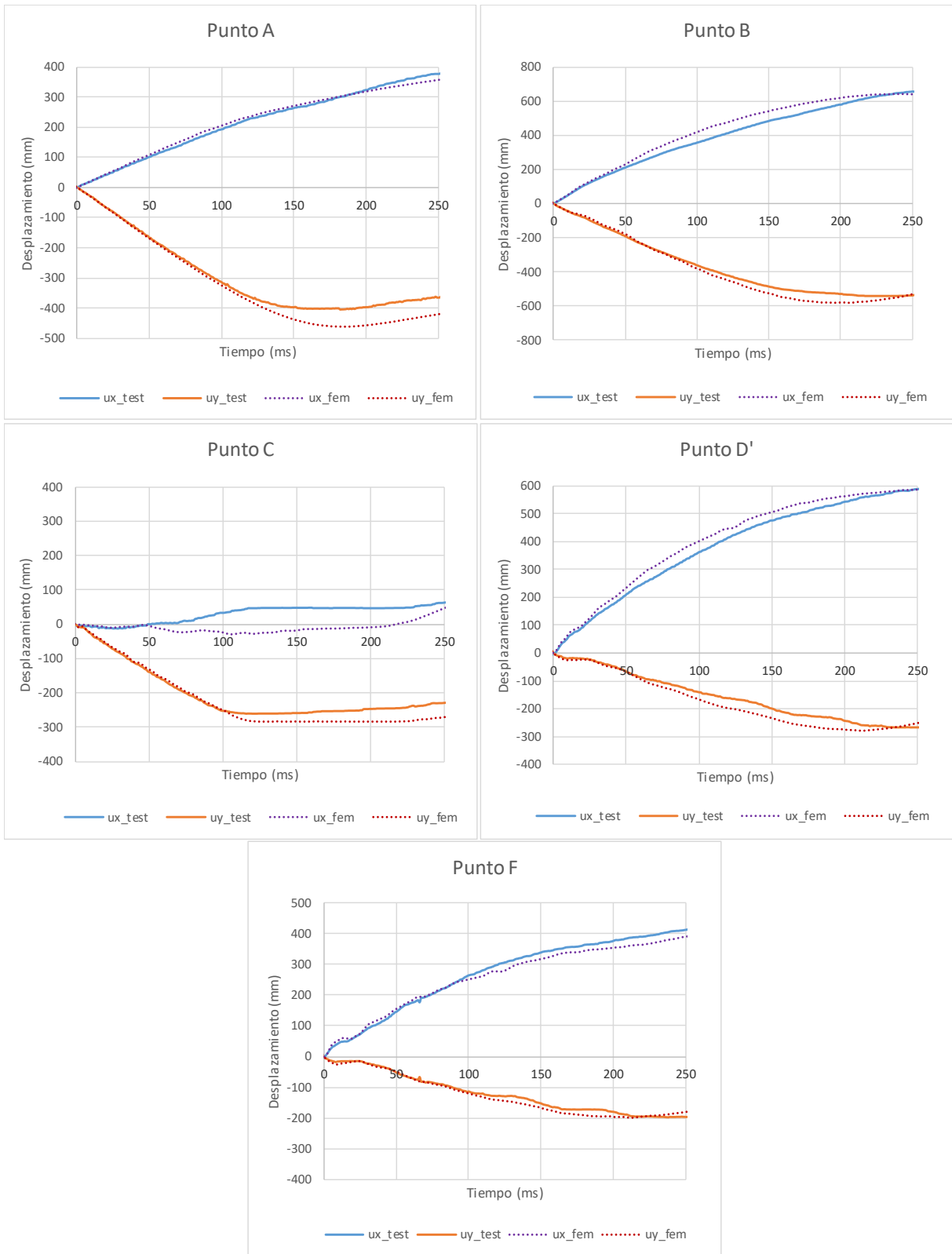


Figura 175. Trayectoria de los puntos A, B, C, D, E y F. Modelo M.E.F. y ensayo. Vuelco 3.

9.5 Conclusiones.

Se ha realizado un ciclo de tres ensayos de vuelco de una sección representativa de autobús, así como la simulación por cálculo explícito de la misma estructura mediante el software LS-DYNA. El primer vuelco del ciclo es representativo del ensayo de vuelco del Reglamento 66; mientras que las dos simulaciones posteriores reproducen la aplicación de dicho ensayo a estructuras con daños permanentes.

Este apartado presenta una metodología de cálculo de modelos de simulación según el Reglamento CEPE/ONU 66 que permite establecer el grado de correlación con los del ensayo de referencia mediante vuelco real, utilizando para ello la comparación de las trayectorias de varios puntos de la sección transversal mediante “*tracking*” de video.

La metodología propuesta utiliza tipología de elemento SHELL, modelo de material bilineal con una meseta de tensión constante a partir del alargamiento máximo teórico, más un criterio de fallo por alargamiento unitario máximo. Tanto el criterio de fallo como la curva de tensión-deformación pueden minorarse utilizando los valores mínimos de norma, obteniendo un modelo más crítico que la estructura real. Esta solución puede ser implementada para cálculos cuyo objeto sea la obtención de la contraseña de homologación.

Sin embargo, en un proyecto de investigación y con el objetivo de mejorar la correlación con los resultados de ensayo, se propone realizar dos submodelos de manera adicional: el criterio de fallo se obtiene de un submodelo de ensayo de tracción de una probeta utilizando la formulación de elemento y tamaño de malla que el modelo de la estructura en las zonas de formación de rótula plástica; la curva tensión-deformación se obtiene del submodelo de un cálculo a flexión del montante, ajustando de manera iterativa los valores de la curva de material para ajustar la curva Momento-Ángulo del modelo a la de un ensayo físico. Los resultados obtenidos demuestran la validez del método y la capacidad de este de predecir las zonas de formación de rótula plástica y fallos locales.

La extensión de la metodología propuesta a tres simulaciones de vuelco consecutivas permite verificar la eficacia del método para estructuras con deformaciones permanentes, incluyendo fallos locales y roturas de material.

La deformación de la estructura hasta la invasión del espacio de supervivencia en el primer vuelco, y superior en los vuelcos 2 y 3, garantizan el rango de aplicación a grandes deformaciones de la estructura.

Por todo lo expuesto, se considera que la metodología propuesta tiene gran correlación con los ensayos y puede ser utilizada tanto para cálculos de homologación como de investigación, incluyendo en el alcance la aplicación a estructuras accidentadas y reparadas.

Capítulo 10:

Propuesta de Valoración de Vehículos Accidentados y Verificación de Reglamento 66.

Caso de Estudio.

10 PROPUESTA DE VALORACIÓN DE VEHÍCULOS ACCIDENTADOS Y VERIFICACIÓN DE REGLAMENTO 66. CASO DE ESTUDIO.

Las hipótesis y los métodos utilizados en los capítulos anteriores pueden aplicarse en la industria del automóvil para mejorar y verificar las propuestas de reparación de un autobús, así como el cumplimiento de los requerimientos estructurales impuestos por el Reglamento 66.

En este apartado se presenta una propuesta de verificación del cumplimiento del reglamento 66 de un vehículo reparado, y se aplica a un caso de estudio de un vehículo accidentado en la localidad de Silla (Valencia) en 2022. Este vehículo no ha sido dañado en un accidente a vuelco, sino por un colapso del techo al introducirse en marcha por un túnel cuya altura máxima permitida es inferior a la altura del vehículo. Sin embargo, la similitud de la deformación de la estructura con la deformación producida por vuelco lateral permite utilizar este caso como ejemplo, demostrando además la aplicabilidad de la propuesta de este apartado de una manera más genérica a diversos accidentes de este tipo de vehículos.

10.1 Objetivo

El objetivo del apartado es proponer una metodología para la verificación de la capacidad de una estructura de autobús reparada de cumplir el Reglamento 66.

Para ello se realiza un estudio consistente en analizar el proceso de deformación debida al accidente y su reparación, así como las repercusiones en la estructura final.

Algunas características del vehículo estudiado en el caso de ejemplo se recogen en la Tabla 32. Otras, como el modelo y el carrocerero, son confidenciales.

Tabla 32. Características del vehículo accidentado.

Características geométricas	
Clase	Urbano / Clase II
Longitud	12.135 m
Altura	3.170 m
Masa en vacío	12380 kg
Masa en carga para R66	13774 kg
Nº de pasajeros máximo	41

10.2 Propuesta de valoración y verificación

La “Propuesta de valoración y verificación”, en adelante PVV, utiliza una metodología analítica-experimental en tres pasos expuesta a continuación:

1) Diagnóstico inicial de la estructura deformada.

Se realizan mediciones de todos los puntos deformados en la superestructura del vehículo, en forma de ángulo y posición de las rótulas plásticas. Se utiliza para ello una plantilla con las diferentes secciones transversales del vehículo, anotando los valores para cada elemento de cada anillo.

Se realiza además un reportaje fotográfico de cada elemento deformado, anotando el anillo al que pertenece y la posición que ocupa.

2) Proceso de reparación.

Se estudia el proceso de reparación propuesto, que será una combinación de enderezado, sustitución y adición de los elementos estructurales, en cuanto a las consecuencias para la resistencia estructural a vuelco.

Se realizan ensayos de las uniones que se ven modificadas con respecto al vehículo original.

3) Análisis de la estructura reparada.

Se cuantifica la pérdida de capacidad de absorción de energía de los perfiles enderezados mediante modelos validados de elementos finitos. Se cuantifica la pérdida de capacidad de absorción de energía de los perfiles que hayan sido modificados y, por tanto, ensayados en el paso anterior

Se estima la energía total capaz de absorber la estructura reparada en base a los valores obtenidos de pérdida de capacidad de absorción de energía y al modelo de elementos finitos de la estructura completa realizado por el laboratorio de ensayo en el momento de la expedición de la contraseña de homologación del vehículo original.

Se verifica que el valor de energía obtenido es superior al valor de energía a absorber de acuerdo con el Reglamento 66.

El paso tres puede sustituirse por la realización de un modelo según lo expuesto en el capítulo 9, si se considera necesario.

En el apartado siguiente se aplica la PVV paso a paso, detallando mediante un ejemplo cada parte del proceso.

10.3 Aplicación de la PVV. Caso de ejemplo.

A lo largo de los subapartados se desarrolla la aplicación de la PVV al caso de estudio mencionado. Esta aplicación tiene como objetivo servir de ejemplo y por tanto está redactada como un informe técnico. Los métodos utilizados son los desarrollados a lo largo de la tesis y se encuentran completamente explicados en este documento.

10.3.1 Diagnóstico inicial de la estructura accidentada

Observación: La estructura tiene deformación permanente en la zona del techo y hasta media altura de la ventana principalmente, con alguna deformación a nivel de piso en el lateral derecho. La zona delantera, desde la puerta del conductor hasta el parabrisas, así como el anillo trasero, están intactos.

A continuación, se muestran imágenes de la estructura deformada y se analiza en detalle la posición de las rótulas plásticas.



Figura 176. Vehículo recuperado tras el accidente.

Zonas dañadas por anillo:

Cada anillo está formado por los dos montantes laterales y la cercha en el techo. La denominación de los anillos se muestra en la Figura 177.

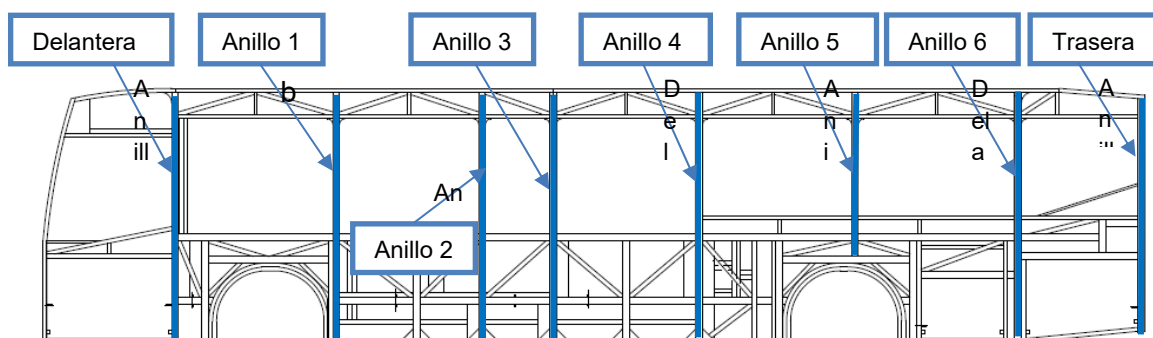


Figura 177. Designación de anillos.

La estructura delantera, así como el anillo trasero, no se incluyen en el análisis de la estructura ya que la deformada es nula. Por tanto, únicamente los anillos intermedios, numerados del 1 al 6, se contemplan en el análisis.

El análisis se encuentra en la Figura 178, con las siguientes consideraciones:

- La posición de las rótulas plásticas se mide en vertical con respecto al larguero inferior de ventana. La curvatura del techo no está acotada al no haber podido ser medida, por lo que se estima en base a la posición de las escuadras.
- Los números de los globos marcan las zonas de interés para futura referencia. Se ha representado la estructura deformada en color rojo sobre la estructura sin deformar obtenida del plano, para cada uno de los anillos. Los primeros cuatro anillos delimitan la zona de la estructura con piso bajo, mientras que la zona delimitada entre los anillos 4 a 6 delimitan la zona de piso elevado.

Conclusiones.

- La estructura no muestra deformación en la estructura delantera, siendo el anillo 1 la primera zona en aparecer deformación permanente. Así mismo, no hay deformación entre el anillo 6 y el anillo trasero. Por tanto, la zona con deformación está delimitada entre el anillo delantero y el anillo 6, ambos intactos.
- Las deformaciones son más severas en la zona del techo; a nivel de piso sólo hay deformación en los montantes del lateral derecho de los anillos 1 y 2, siendo en ambos casos de 5 grados con giro hacia el exterior del vehículo.
- Las rótulas plásticas aparecen en los montantes entre 770 mm por encima del larguero inferior de ventana y la altura del refuerzo.
- En las cerchas de techo no aparecen rótulas plásticas sino un pandeo generalizado del perfil.
- En los anillos 2, 3, 4 y 5 aparecen rótulas plásticas adicionalmente en los perfiles de refuerzo de la unión de techo, y únicamente en el lateral derecho.

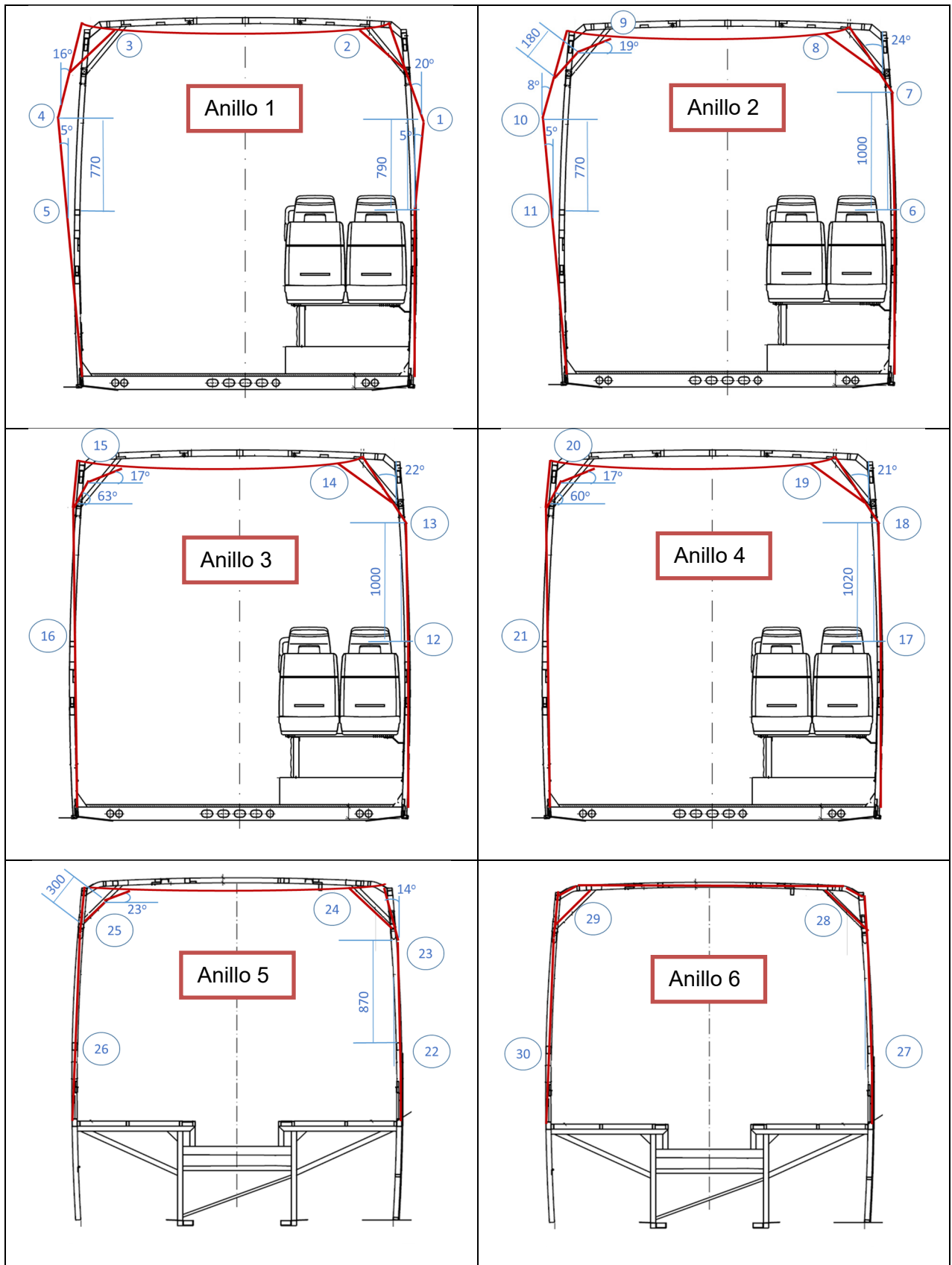


Figura 178. Estructura deformada tras el accidente y posición de las rótulas plásticas.

➤ Montaje.

Los ensayos se realizan sobre una bancada de ensayos, fijando las probetas mediante placas de acero y pernos, dejando libre el montante y el refuerzo para la formación de la rótula plástica. La Figura 180 muestra dicho montaje.



Figura 180. Montaje de la unión sobre la bancada de ensayo.

➤ Resultados.

La Figura 181 muestra las probetas tras ambos ensayos, comprobando la correcta formación de la rótula plástica en el nudo de unión entre montante y refuerzo.



Figura 181. Unión ensayada. Ensayo cerrando (izquierda); ensayo abriendo (derecha).

Las curvas de comportamiento Momento-Ángulo se encuentran dentro del corredor para el perfil 70.40.4 s275 según el modelo teórico de Kecman, tal y como se puede comprobar en la Figura 182 y la Figura 183 para los ensayos abriendo y cerrando, respectivamente. También el valor de la energía absorbida está por encima del mínimo teórico.

Se considera que la unión funciona correctamente y, por tanto, la estructura reparada no plantea ningún problema para responder al vuelco con un mecanismo de deformación correcto.

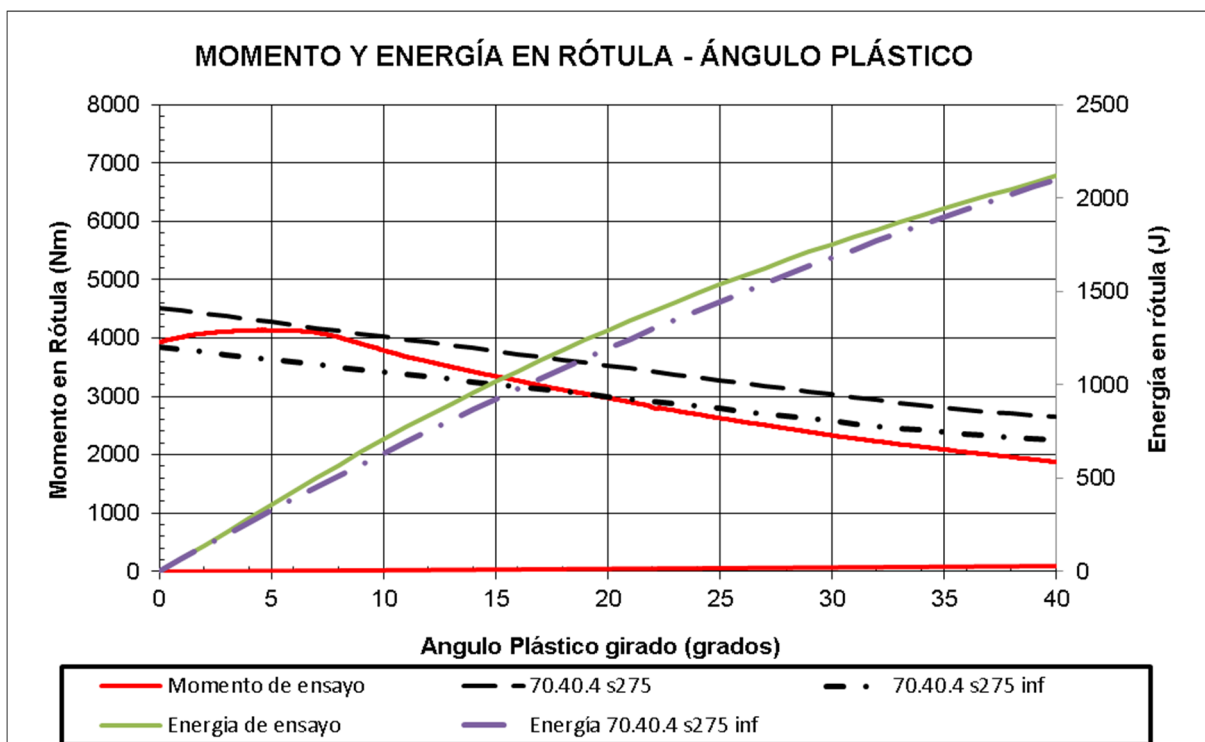


Figura 182. Curva Momento-Ángulo y Energía-Ángulo de ensayo y teórica. Ensayo abriendo.

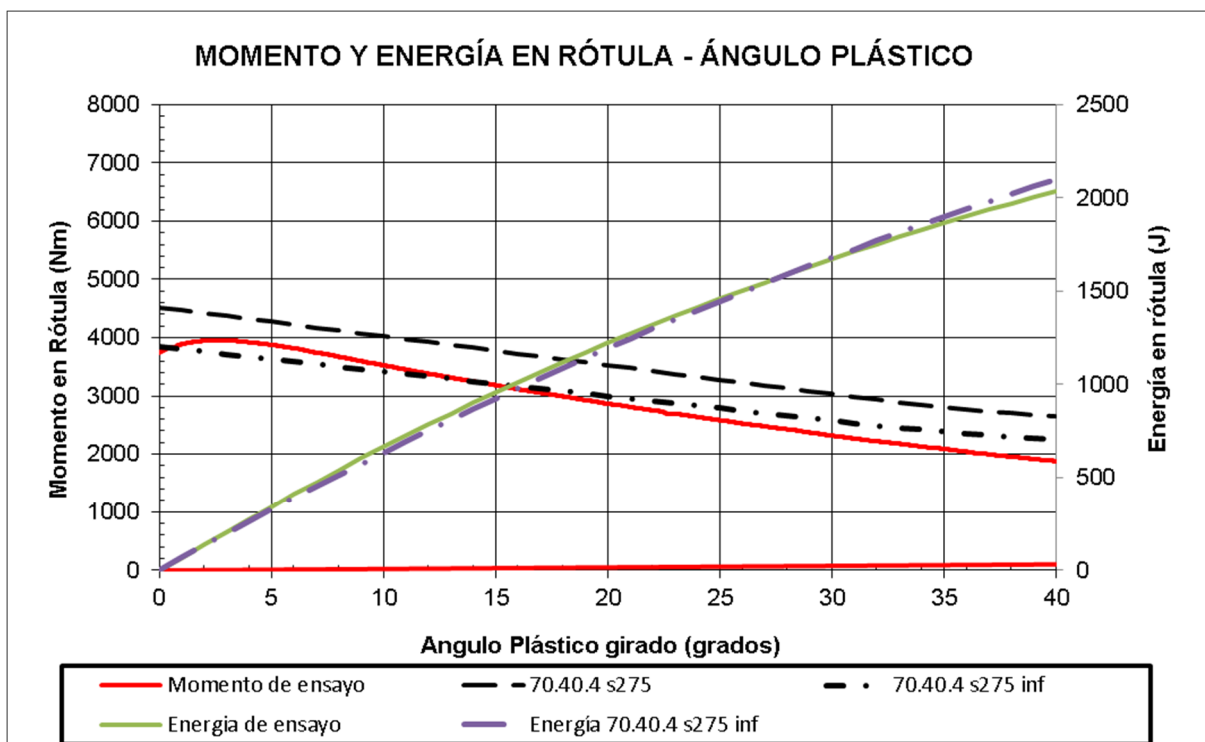


Figura 183. Curva Momento-Ángulo y Energía-Ángulo de ensayo y teórica. Ensayo cerrando.

10.3.3 Análisis de la estructura reparada

Tras determinar el correcto funcionamiento de la estructura reparada, queda por determinar si la energía capaz de absorber la estructura es suficiente según el Reglamento 66, y para ello hay que analizar en primer lugar los elementos de la reparación que pueden perjudicar a la capacidad de absorción de energía.

Análisis de elementos perjudiciales.

Listado de elementos perjudiciales:

- Proceso de enderezado. El único elemento de la reparación propuesta que puede afectar a la capacidad de absorción de energía es el enderezamiento en frío de los dos montantes con deformación permanente de 5 grados.

Para enderezar los montantes del lateral derecho de los anillos 1 y 2 se realiza un enderezamiento mecánico en frío. Ambos montantes tienen una deformación permanente de 5°. En este apartado se va a calcular mediante modelos de elementos finitos la pérdida de capacidad de absorción de energía debida al proceso de reparación. Para ello, se utiliza la metodología presentada en el capítulo 4.1.4 y validada experimentalmente en el capítulo 5.

El perfil del vehículo reparado es un 70x40x4 s275. Este perfil se ha modelado en Ansys Workbench 2021 R1, y se le ha sometido a un proceso de deformación inicial-reparación-2ª deformación. La primera deformación se corresponde con la producida durante el accidente, es decir, hasta 5° de deformación permanente; la reparación consiste en el enderezamiento hasta posicionar el perfil de nuevo a 0°; en la segunda deformación se deforma el perfil hasta 40°.

Finalmente se compara el comportamiento entre el perfil inicial y la segunda deformación de un perfil reparado, girando 40° en el mismo sentido que la primera deformación y en el sentido contrario.

La Figura 184 muestra las curvas de comportamiento Momento-Ángulo para el perfil inicial, el perfil reparado tras una deformación de 5° y deformado en el mismo sentido (5_M), y en sentido contrario (5_O). La Figura 185 muestra la energía absorbida durante la deformación.

El análisis de los resultados demuestra que la variación de comportamiento en la curva Momento-Ángulo no es importante, tal y como se comprueba en las curvas de energía absorbida, por lo que la reparación mediante enderezado de una pre-deformación de 5° no produce grandes pérdidas (Figura 186).

Estas pérdidas son inferiores al 10% para una deformación del perfil reparado de 15°, y va disminuyendo hasta los 30° de deformación. La pérdida en los primeros 10° se encuentra entre el 21% y el 11% debido a la forma de la curva al inicio de la deformación previo al colapso, tal y como puede verse en las curvas Momento-Ángulo. El proceso de deformación del perfil 70.40.4 no produce rótula plástica hasta alcanzar los 7° de deformación plástica, instante en el que el momento empieza a descender a medida que progresa la formación de la rótula plástica. Esto explica que deformaciones como las aparecidas en la estructura estudiada por debajo de ese valor crítico no resultan en grandes pérdidas de energía.

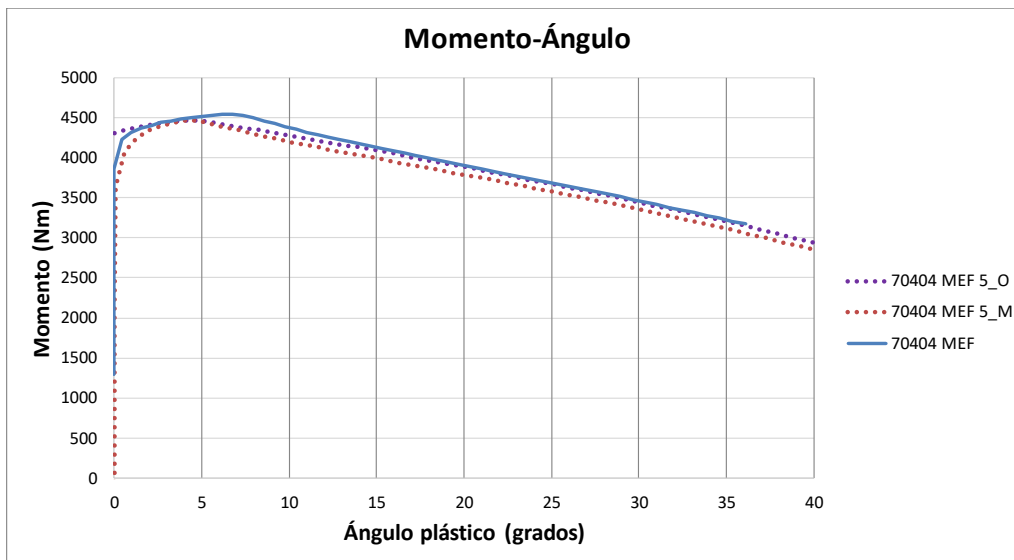


Figura 184. Curvas Momento-Ángulo 70.40.4 s275 de perfil original y reparado.

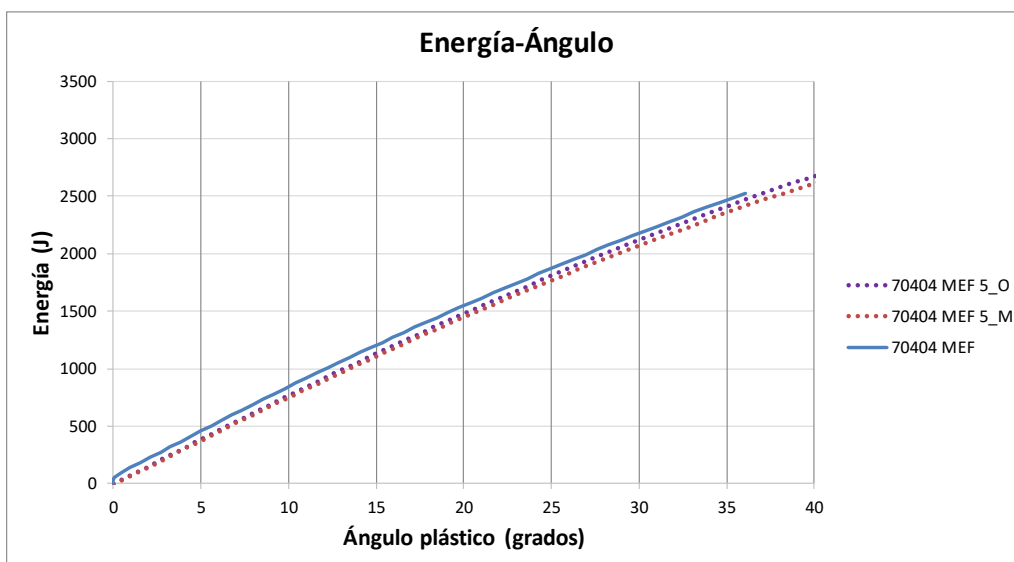


Figura 185. Curvas Energía-Ángulo 70.40.4 s275 de perfil original y reparado.

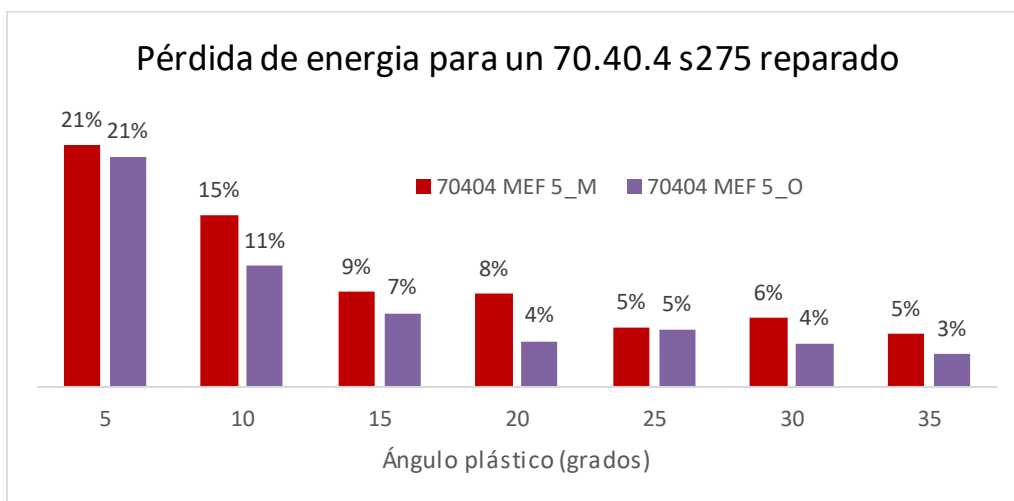


Figura 186. Pérdida de energía de un 70.40.4 s275 reparado.

Energía absorbida por la estructura para R66.

La energía requerida por el vehículo de acuerdo con el Reglamento 66 en su revisión 02 es 84722 J.

La estructura de este vehículo según el cálculo realizado en base al Anexo 8 del reglamento es de 98551 J, según los datos del laboratorio de ensayo, por lo que supera el valor necesario para recibir la contraseña de homologación.

La Figura 187 muestra el modelo de elementos finitos realizado según el Anexo 8 del R66, al inicio de la simulación y en el instante de invasión. La deformación en el modelo para el instante de invasión es de 7° en los montantes de los anillos 1 y 2 del lateral derecho en la zona de piso.

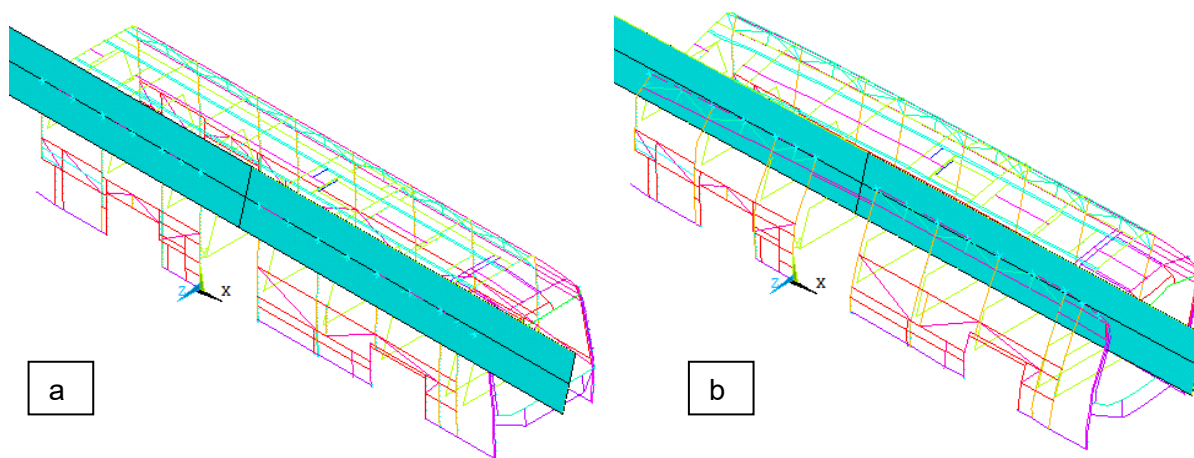


Figura 187. Modelo MEF según R66 Anexo 8. Instante inicial (a). Instante final (b).

Para calcular la energía capaz de absorber la estructura tras el proceso de reparación, se asume que la única zona con daño permanente son los montantes del lateral derecho de los anillos 1 y 2, enderezados de una deformación de 5°. Utilizando los datos de la Figura 186, la reparación del perfil tras 5° de deformación produce una pérdida del 18.6% de energía para un ángulo girado en la segunda deformación de 7°, en el caso más crítico donde la segunda deformación se diera en el mismo sentido que la primera.

La energía final del vehículo reparado se calcula restando un 18.6% a la energía absorbida por las rótulas de los anillos 1 y 2 del lateral derecho (Tabla 33). Para ello se debe obtener el valor de la energía absorbida por dichas rótulas del modelo de elementos finitos.

Tabla 33. Cálculo de la energía absorbida por la estructura reparada.

Energía absorbida por la rótula en el modelo original (para una deformación de 7°)	398 J
Pérdida de energía de un perfil reparado de 5° (para una deformación de 7°)	18.6 %
Energía absorbida por la rótula en el modelo reparado (para una deformación de 7°)	$398 \cdot (1 - 0.186) = 324 \text{ J}$
Diferencia de energía absorbida por rótula reparada (para una deformación de 7°)	$398 - 324 = 74 \text{ J}$
Energía absorbida por la estructura reparada	$98551 - (2 \cdot 74) = 98403 \text{ J}$

El valor de energía capaz de absorber la estructura reparada es de **98403 J**, un 0.15% inferior al valor de la estructura original. El vehículo reparado sigue cumpliendo el requerimiento energético del Reglamento 66 al ser superior a la energía requerida (**84722 J**).

10.4 Conclusiones

Se ha desarrollado una propuesta de valoración y verificación del R66 para autobuses reparados basada en los métodos validados en esta tesis, por lo que se considera una propuesta robusta a nivel técnico.

Es una propuesta basada en tres pasos: observación y medición de las rótulas plásticas formadas durante el accidente; verificación del buen funcionamiento del mecanismo de deformación de la unión en caso de verse modificado por adición de nuevos elementos estructurales con respecto a la unión original; en caso de existir enderezamiento, cálculo de la pérdida de energía. Si bien el primer paso es obligatorio, el segundo y el tercero dependen de la reparación llevada a cabo.

En el caso de estudio, al haber sido la estructura deformada reemplazada prácticamente en su totalidad, la capacidad de absorción de energía del vehículo reparado es muy similar al vehículo original. Una estructura con mayores daños en la zona de piso o con menos reemplazos podría ser verificada de la misma forma, pero con un resultado más negativo.

Esta propuesta puede realizarse para varias soluciones de reparación diferentes, de manera que el carrocerero pueda conocer el resultado previo a la implementación de la reparación.

Aunque la PVV está originalmente pensada para accidentes de vuelco, puede generalizarse para otros accidentes que produzcan un mecanismo de deformación similar, tal y como ocurre en el caso de estudio utilizado.

Capítulo 11:

Conclusiones y Futuras Líneas de Investigación.

11 CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.

A continuación se presentan las conclusiones sobre el estudio realizado en la tesis, si bien las conclusiones más detalladas sobre cada capítulo se han desarrollado en el último apartado de cada uno de ellos.

Por último, se proponen líneas de investigación que pueden ser desarrolladas a partir de los resultados obtenidos para profundizar en temas que quedan fuera del alcance.

11.1 Conclusiones.

El estudio sobre la reparabilidad de estructuras de autobuses y autocares se puede abordar desde varios puntos de vista, como el científico, técnico o el reglamentario, por lo que resulta complejo abarcar todo el concepto. Esta tesis realiza la labor de iniciar el proceso de aprendizaje sobre el efecto de la reparación y su modelización matemática, y finaliza proponiendo metodologías de verificación de la estructura reparada para su uso por parte del servicio técnico o laboratorio de homologación.

Teniendo en cuenta el desconocimiento actual de este tema por parte tanto del público general, como de la comunidad científica y de las entidades legisladoras, así como la repercusión en la que esta falta de conocimiento puede derivar, se considera que la aportación de la tesis adquiere importancia no solo a nivel científico, sino a un nivel global y humano.

Esta aportación contesta a los objetivos marcados al inicio del proyecto y que acotaban el alcance finalmente establecido:

- Objetivo 1: Caracterizar el comportamiento y la pérdida de capacidad de absorción de energía en perfiles reparados por enderezado mecánico en frío.

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 y posterior deformación simulando un segundo accidente. En base a estos ensayos se ha calculado la pérdida en la capacidad de absorción de energía y se han obtenido muestras para la realización de micrografías que permiten observar cómo afectan las grandes deformaciones a la microestructura.

La pérdida de absorción de energía calculada con los datos procedentes de los ensayos es significativa a partir de los 10 grados de deformación permanente, que alcanza valores superiores al 15 % 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. A partir de deformaciones previas entre 25-30° la pérdida de energía se estabiliza en valores entre el 30-35%.

Pérdidas del 15% de capacidad de absorción de energía por una estructura supone que un 50% de los vehículos homologados dejarían de cumplir el R66, en los casos estudiados.

Para autobuses accidentados con deformaciones permanentes de más de 20°, la probabilidad de no cumplir la homologación tras ser reparados aumenta hasta un 80-100%.

Por último, el estudio metalográfico del material sugiere que 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. Esta alteración en la geometría es cuantificable y apreciable simplemente mediante inspección visual. La caracterización de dicha alteración en la estructura deformada puede aportar información sobre el daño del perfil y servir como parámetro de entrada para modelos matemáticos de perfiles reparados.

Las conclusiones obtenidas ponen de manifiesto la magnitud de la pérdida de las capacidades de absorción de energía de los perfiles y, por tanto, de la superestructura de los autobuses y autocares. Los ensayos, las simulaciones y la caracterización metalográfica aportan, a su vez, un primer conocimiento de la aportación de cada variable al problema de la reparabilidad, necesario para los siguientes pasos.

- Objetivo 2: Desarrollar una metodología de simulación validada para perfiles de acero reparados y estructuras representativas de autobuses y autocares reparadas.

Los modelos analíticos actuales, como el modelo de Kecman, representativos del comportamiento a flexión de perfiles rectangulares de pequeño espesor no son adecuados para calcular la curva Momento-ángulo de perfiles enderezados, pues este caso no está considerado en las hipótesis de cálculo. Adicionalmente se comprueba que dicho modelo no es representativo del comportamiento de perfiles considerados de gran espesor, incluso para una primera deformación. Por tanto, se ha considerado necesario desarrollar un método para calcular la curva de comportamiento que incluya perfiles de grande y pequeño espesor, así como perfiles reparados.

En los capítulos 4 y 5 se ha propuesto una metodología para calcular mediante modelos M.E.F. la curva Momento-ángulo de perfiles tras una reparación. Esta metodología 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 mediante enderezamiento mecánico en frío.

Esta metodología se ha validado en un amplio rango de dimensiones de secciones rectangulares; dicho rango se ha medido mediante los ratios a/b , a/t y b/t , aunque finalmente se ha definido el índice Q como indicador único que engloba los anteriores ratios. La validación se ha realizado mediante la curva de comportamiento Momento-Ángulo y, por primera vez en la literatura consultada, mediante la geometría de la rótula plástica. Los parámetros geométricos para medir la deformación son el desplazamiento en dirección del eje de giro del punto con mayor desplazamiento (z_A según el modelo de Kecman), y el desplazamiento hacia el interior del perfil del punto con mayor desplazamiento del flanco a compresión (y_B según el modelo de Kecman).

Además, en el capítulo 8 se ha desarrollado una metodología de cálculo de modelos de simulación de secciones representativas del vehículo completo, según el Reglamento CEPE/ONU 66, que permite establecer el grado de correlación con los del ensayo de referencia mediante vuelco real, utilizando para ello la comparación de las trayectorias de varios puntos de la sección transversal mediante “*tracking*” de video.

Los resultados obtenidos demuestran la validez del método y la capacidad de este de predecir las zonas de formación de rótula plástica y fallos locales, como roturas o agrietamientos. La extensión de la metodología propuesta a tres simulaciones de vuelco consecutivas permite verificar la eficacia del método para estructuras con deformaciones permanentes, incluyendo fallos locales y roturas de material.

Se considera que las metodologías propuestas, tanto para modelos de perfiles como de secciones representativas, pueden ser utilizadas para cálculos de homologación e investigación, incluyendo en el alcance la aplicación a estructuras accidentadas y reparadas.

- Objetivo 3: Desarrollar un modelo teórico de flexión para perfiles reparados.

Se ha desarrollado un modelo teórico, basado en el propuesto por Kecman, que predice el comportamiento a flexión de perfiles reparados con una alta correlación en magnitud y forma, tanto para perfiles de pared delgada como de pared gruesa (índice Q mayor e inferior a 50, respectivamente).

El modelo propuesto se basa en el modelo teórico para una primera deformación, desarrollado en el capítulo 6, variando únicamente el cálculo del momento máximo y la geometría inicial de la rótula. Se introducen tres nuevos parámetros de entrada a los ya utilizados para predecir la primera deformación: el ángulo girado por el perfil en la primera deformación, y los parámetros de la geometría que definen dicha deformación, z_A e y_B , estos último obtenidos directamente del modelo para la primera deformación.

Este modelo ha sido validado mediante ensayos y comparado con los resultados de los modelos de elementos finitos, éstos a su vez validados mediante ensayos. Las secciones estudiadas abarcan todo el dominio utilizado para la fabricación de estructuras de autobuses y autocares, midiendo dicho dominio mediante el índice Q, así como reparaciones desde ángulos de 5 a 25 grados, pues deformaciones más elevadas se consideran demasiado severas como para realizar una reparación por enderezado. Por tanto, se considera que las conclusiones obtenidas proceden de los resultados de un estudio robusto.

La información que este modelo puede aportar a carroceros, fabricantes y laboratorios, es de vital importancia para la seguridad de los vehículos reparados y, previo a esta tesis, imposible de obtener o si quiera estimar.

- Objetivo 4: Proponer valoraciones en el tratamiento de vehículos accidentados, tanto para una inspección técnica como para incluirlos en el alcance del Reglamento 66.

Se ha desarrollado una propuesta de valoración y verificación (PVV), del R66 para autobuses reparados basada en la metodología validada experimentalmente en esta tesis, por lo que se considera una propuesta robusta a nivel técnico. Esta propuesta puede

realizarse para varias soluciones de reparación diferentes, de manera que el carrocerero pueda conocer el resultado previo a la implementación de la reparación.

La valoración de la pérdida de energía por parte de los perfiles permite conocer la energía total absorbida por la estructura reparada y, por tanto, si cumple el requerimiento energético del R66. De esta forma, los vehículos que entran en circulación tras su reparación mantienen el nivel de seguridad por encima del límite que se establece en dicho reglamento.

La propuesta está originalmente desarrollada para accidentes de vuelco, pero puede generalizarse para otros accidentes que produzcan un mecanismo de deformación similar. Finalmente, esta propuesta se ha aplicado con éxito a un caso real de reparación de un autobús accidentado.

11.2 Futuras líneas de investigación.

El trabajo realizado cumple con los objetivos marcados al inicio de la tesis, generando nuevo conocimiento sobre la reparación de estructuras de autobuses y autocares y su efecto en la capacidad de absorción de energía. Las aportaciones realizadas generan, a su vez, un nuevo punto de partida para futuras investigaciones en esta área. A continuación se exponen las más relevantes:

1. El modelo teórico propuesto para la obtención de la curva Momento-Ángulo de perfiles rectangulares disminuye el error del modelo anterior de Kecman. Sin embargo, el error cometido sigue siendo más elevado en perfiles de pared gruesa que en perfiles de pared delgada, por lo que la teoría tiene aún margen de mejora. Se considera que los parámetros que más pueden afectar a este error son: la predicción de la meseta elasto-plástica, el valor de la tensión media en las líneas plásticas y la propia geometría de la rótula. Como los perfiles de pared gruesa ($Q < 50$), son más habituales en su uso para los anillos estructurales de autobuses y autocares, la disminución en la predicción del comportamiento sigue siendo un aspecto importante de estudio. Además, mejorar esta predicción del comportamiento mejoraría, a su vez, la predicción en los perfiles reparados.
2. Los modelos propuestos para perfiles reparados consideran un comportamiento ideal a flexión durante todo el ciclo deformación-reparación-deformación, sin la posibilidad de la aparición de grietas. En el capítulo 8 se muestra el vuelco de un módulo de autobús en el cual aparecieron grietas en los perfiles en el flanco a compresión, que durante el enderezado rompieron dicho flanco completamente, alterando el comportamiento a flexión del perfil enderezado. En dicho capítulo sí se utilizó una metodología con buenos resultados en la predicción de grietas en los modelos de elementos finitos, pero dicha metodología no es aplicable en el modelo teórico del capítulo 7. Es posible que este problema solo aparezca en perfiles con materiales cuyo límite a rotura sea inferior al utilizado habitualmente del 20%, como en el caso comentado, donde el material es el acero s700 cuyo límite de rotura se sitúa en torno al 10%. Por tanto, la formación de grietas durante el enderezado es una limitación del modelo predictivo del comportamiento a flexión de los perfiles reparados mediante enderezado, siendo necesario ampliar el estudio sobre este aspecto.

3. Una forma de avanzar en las implicaciones de la reparación mediante enderezado sería tabular la pérdida de absorción de energía de los perfiles en función del ángulo girado y del índice Q, de manera que exista una forma gráfica de conocer la correlación existente entre los parámetros mencionados. Esto permitiría tomar decisiones sobre la elección del tipo de perfil en la fabricación del vehículo teniendo en cuenta posibles reparaciones, pudiendo incluso descartar algunas regiones del rango cuyas pérdidas ya sean elevadas para valores pequeños de deformación.
4. Los modelos propuestos, así como la metodología de valoración y verificación de estructuras, permiten conocer los efectos de la reparación. Actualmente no existe un método de reparación unificado para aquellos casos en los que la reparación mediante enderezado no pueda garantizar el cumplimiento del R66. Se propone continuar en esta línea y generar una propuesta de reparación estándar o varias, en función de la casuística encontrada. Por ejemplo, las deformaciones a nivel de piso o a nivel de ventana tienen claras diferencias entre sí, así como el tipo de perfil y el grado de deformación pueden generar casos con implicaciones diferentes. A priori, las soluciones pasarían por determinar, en primer lugar, si es necesaria la sustitución completa del perfil o la zona afectada, o bien la adición de un refuerzo local; en segundo lugar, habría que plantear cómo realizar dichas tareas de sustitución/adición.

A juicio del autor, estas cuatro líneas de investigación pueden generar impacto en la comunidad científica, si bien la 3 y la 4 tienen una orientación más aplicada a la ingeniería y al diseño.

Capítulo 12:

Difusión.

12 DIFUSIÓN.

En este capítulo se recogen las actividades de difusión en congresos, capítulos de libros o “*proceedings*” y artículos de revista, derivadas de los resultados de investigación hasta la fecha de publicación de la tesis.

12.1 Participación en congresos.

- ✓ E. Alcalá, D. Rincón, A. Furones, Á. Martín. “Theoretical and experimental study of the strength of post-accident coaches structures”. **FISITA 2016**.
- ✓ D. Rincón, Á. Martín, B. Valles, E. Alcalá. “Rollover Strength Assessment of Repaired Post-Collision Buses and Coaches”. **SIMPOSIO SEGVAUTO-TRIES-CM 2016**.
- ✓ D. Rincón, E. Alcalá. “Bending strength study of repaired coaches structures”. **Industriales Research Meeting 2017**.
- ✓ D. Rincón, E. Alcalá, J. Páez, A. Furones, Á. Martín. “Estudio mediante modelos MEF del comportamiento de la superestructura de un autocar reparado en un accidente de vuelco real”. **CIBIM 2017**.
- ✓ D. Rincón, E. Alcalá, V. Blázquez, Á. Martín. “Estudio experimental de la reparación de estructuras de autobuses tras accidente”. **CNIM 2018**.
- ✓ D. Rincón, E. Alcalá, B. Valles, Á. Martín, E. Capdepón. “Aplicación de la técnica de videocorrelación de imágenes en la validación de modelos de simulación de perfiles a flexión”. **CIBIM 2019**.
- ✓ D. Rincón, E. Alcalá. “Reflexiones relativas a la valoración de buses y autocares accidentados”. **SIMPOSIO SEGVAUTO 4.0-CM 2021**
- ✓ D. Rincón, E. Alcalá, Á. Martín, B. Valles, E. Capdepón, J. Valenzuela. “Modelos dinámicos de ensayo de vuelco de autobuses y autocares”. **CIBIM 2022**.

12.2 Capítulos de libros o “*Proceedings*”.

- ✓ D. Rincón, Á. Martín, B. Valles, E. Alcalá. “Rollover Strength Assessment of Repaired Post-Collision Buses and Coaches”. **Proceedings of the first symposium SEGVAUTO-TRIES-CM. Technologies for a safe, accessible and sustainable mobility. R&D+I in automotive: Results**. ISBN: 978-84-16397-46-4, pp 111-114. Noviembre 2016.
- ✓ D. Rincón, E. Alcalá. “Bending strength study of repaired coaches structures”. **Industriales Research Meeting 2017**. ISBN: 978-84-16397-58-7, Parte 3, pp 34. Mayo 2017.

12.3 Artículos en revistas.

- ✓ **“Estudio experimental de la reparación de estructuras de autobuses tras accidente”.**
David Rincón, Enrique Alcalá, Víctor Blázquez, Ángel Martín.
Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica, ISSN: 1137-2729. Vol. 22, N° 2, pp. 53-62, 2018.

- ✓ **“Theoretical-experimental study of the repair of bus structures after rollover”.**
David Rincón, Enrique Alcalá, Ángel Martín.
Journal of Constructional Steel Research, ISSN: 0143-974X, Vol: 162, Page: 105734. 2019.
JCI Rank: 30/172 (Q1). 2019.
Citado por: 3.

- ✓ **“Theoretical-experimental study of the bending behavior of thin-walled rectangular tubes”.**
David Rincón, Enrique Alcalá, Ángel Martín.
Thin-Walled Structures, ISSN: 0263-8231, Vol: 173, Page: 109009. 2022.
JCI Rank: 11/178 (Q1). 2022.
Citado por: 7.

Capítulo 13:

Bibliografía.

13 BIBLIOGRAFÍA.

1. Dirección General de Tráfico. Las principales cifras de la seguridad vial. España 2019.; 2020.
2. UNECE Regulation N° 66 00 Series Uniform technical prescriptions concerning the approval of large passenger vehicles with regard to the strength of their superstructure, (1986).
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, (2005).
4. Matolcsy M. The severity of bus rollover accidents. Scientific Society of Mechanical Engineers. 2007.
5. Gracia AG, Corral TV, Lozano MS. Impact of the use of safety belts on the structural requirements under rollover of coaches. International Journal of Heavy Vehicle Systems. 2006;13(3):163-79.
6. Kecman D. Bending collapse of rectangular steel tubes in relation to the bus rollover problem.[dissertation]. Cranfield Institute of Technology; 1979.
7. Kecman D. Bending collapse of rectangular and square section tubes. International Journal of Mechanical Sciences. 1983;25(9):623-36.
8. Corona E, Vaze SP. Buckling of elastic—plastic square tubes under bending. International Journal of Mechanical Sciences. 1996;38(7):753-75.
9. Kim HS, Wierzbicki T. Numerical and analytical study on deep biaxial bending collapse of thin-walled beams. Int J Mech Sci. 2000 OCT;42(10):1947-70.
10. Kim TH, Reid SR. Multiaxial softening hinge model for tubular vehicle roll-over protective structures. Int J Mech Sci. 2001 SEP;43(9):2147-70.
11. Guerrero N, Marante ME, Picón R, Flórez-López J. Model of local buckling in steel hollow structural elements subjected to biaxial bending. Journal of Constructional Steel Research. 2007;63(6):779-90.
12. Zhang X, Zhang H. Crush resistance of square tubes with various thickness configurations. International Journal of Mechanical Sciences. 2016;107(Supplement C):58-68.
13. Wang W, Qiu X. An analytical study for global buckling of circular tubes under axial and oblique compression. International Journal of Mechanical Sciences. 2017;126(Supplement C):120-9.
14. Han DC, Park SH. Collapse behavior of square thin-walled columns subjected to oblique loads. Thin-Walled Structures. 1999;35(3):167-84.

15. Cazzola GJ, Alcalá Fazio E, Aparicio Izquierdo F. Study of the bending response of metal foam-filled beams applied to enhance the rollover behaviour of coach structures. *International Journal of Crashworthiness*. 2013 DEC 1;18(6):620-32.
16. Zhang X, Zhang H, Wang Z. Bending collapse of square tubes with variable thickness. *Int J Mech Sci*. 2016;106:107-16.
17. Wang Z, Zhang X, Li Z. Bending collapse of multi-cell tubes. *Int J Mech Sci*. 2017;134:445-59.
18. Lavayen-Farfan D, Boada MJL, Rodríguez-Hernández JA. Bending collapse analysis for thin and medium-thin-walled square and rectangular hollow shapes. *Thin-Walled Structures*. 2021;165:107934.
19. Kim TH, Reid SR. Bending collapse of thin-walled rectangular section columns. *Comput Struct*. 2001;79(20–21):1897-911.
20. Huang Z, Zhang X. Three-point bending collapse of thin-walled rectangular beams. *Int J Mech Sci*. 2018 AUG;144:461-79.
21. Pérez Fernández JÁ, Coppieters S, Debruyne D. Application of digital image correlation for the study of strain concentrations due to change in geometry in weld beads: parent interface of structural steel welds. *Science & Technology of Welding & Joining*. 2016;21(8):670-9.
22. Choi I, Kang Y, Hong KM, Ko K, Kim S. Study on the Development of the Digital Image Correlation Measurements Program for Measuring the 3-Point Bending Test. *KSPE*. 2014;31(10):889.
23. Ellison MS, Corona E. Buckling of T-beams under cyclic bending. *International Journal of Mechanical Sciences*. 1998;40(9):835-55.
24. Zeinoddini M, Mo'tamedi M, Zandi AP, Talebi M, Shariati M, Ezzati M. On the ratcheting of defective low-alloy, high-strength steel pipes (API-5L X80) under cyclic bending: An experimental study. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2017;130(Supplement C):518-33.
25. Chang K, Pan W, Lee K. Mean moment effect on circular thin-walled tubes under cyclic bending. *Struct Eng Mech*. 2008 MAR 30;28(5):495-514.
26. Chaboche JL. Time-independent constitutive theories for cyclic plasticity. *International Journal of Plasticity*. 1986;2(2):149-88.
27. CHABOCHE JL. CONSTITUTIVE-EQUATIONS FOR CYCLIC PLASTICITY AND CYCLIC VISCOPLASTICITY. *Int J Plast*. 1989;5(3):247-302.
28. Chaboche JL. A review of some plasticity and viscoplasticity constitutive theories. *Int J Plast*. 2008;24(10):1642-93.
29. Cowper GR, Symonds PS. No title. Strain-hardening and strain-rate effects in the impact loading of cantilever beams. 1957.

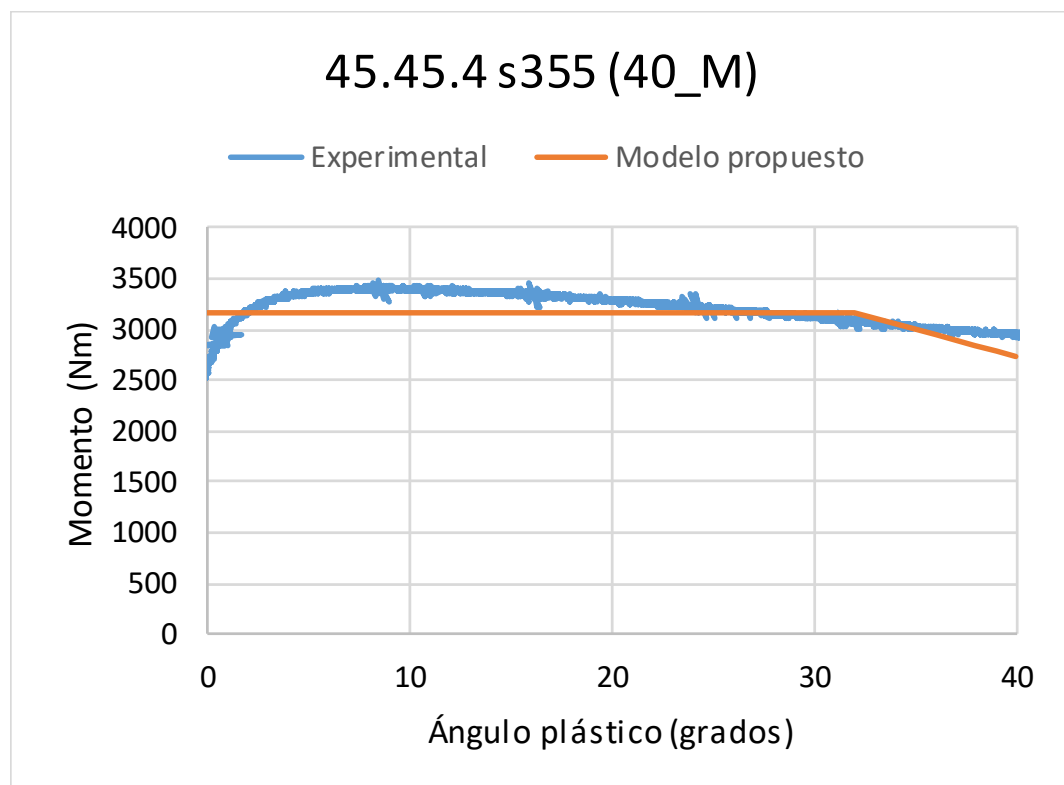
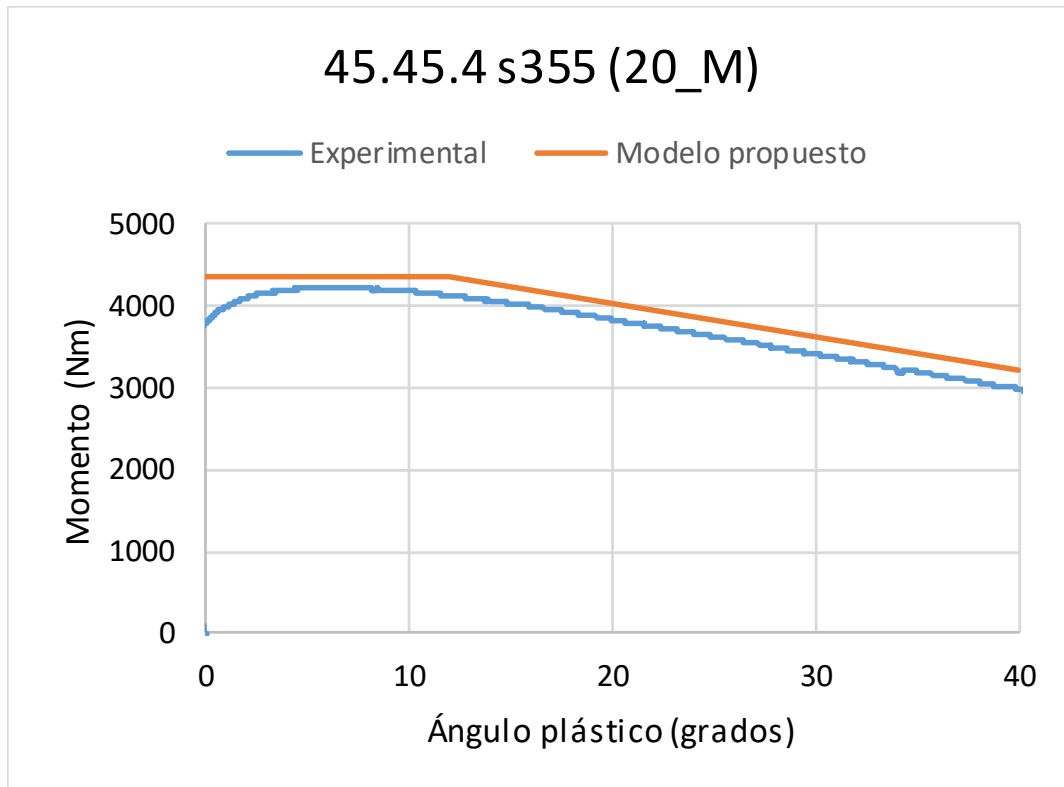
30. Johnson GR, Cook WH. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. *Eng Fract Mech.* 1985;21(1):31-48.
31. ANSYS I. Ansys - Theory Reference.
32. Correlated Solutions. Vic-3d Software Manual.
33. Cimpoeru SJ, Murray NW. The Large-Deflection Pure Bending Properties of a Square Thin-Walled Tube. *Int J Mech Sci.* 1993;35(3-4):247-56.
34. Avalle M, Belingardi G, Montanini R. Strain field measurements in the bending collapse of thin-walled tubes. Allison IM, editor. ; 1998.
35. Reyes A, Langseth M, Hopperstad OS. Crashworthiness of aluminum extrusions subjected to oblique loading: experiments and numerical analyses. *International Journal of Mechanical Sciences.* 2002;44(9):1965-84.
36. Belingardi G, Peroni L. Experimental investigation of plastic collapse of aluminium extrusions in biaxial bending. *Int J Mech Sci.* 2007;49(5):554-66.
37. Zhang X, Zhang H, Ren W. Bending collapse of folded tubes. *International Journal of Mechanical Sciences.* 2016;117(Supplement C):67-78.
38. 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 [dissertation]. Universidad Politécnica de Madrid; 1990.
39. Sprague MA, Geers IL. A spectral-element method for modelling cavitation in transient fluid-structure interaction. *Int J Numer Methods Eng.* 2004 AUG 21;60(15):2467-99.
40. Gehre C. Objective rating of signals using test and simulation responses. 21st ESV Conference; Stuttgart, Germany. ; 2009.
41. Vavalle NA, Jelen BC, Moreno DP, Stitzel JD, Gayzik FS. An Evaluation of Objective Rating Methods for Full-Body Finite Element Model Comparison to PMHS Tests. *Traffic Inj Prev.* 2013 NOV 22;14:S87-94.
42. Kecman D. Bending collapse of rectangular steel tubes in relation to the bus rollover problem.[dissertation]. Cranfield Institute of Technology; 1979.
43. EN 10210-1:2006. Hot finished structural hollow sections of non-alloy and fine grain steels — Part 1: Technical delivery conditions. BSI, London, U, 2006).
44. Forni D, Chiaia B, Cadoni E. Strain rate behaviour in tension of S355 steel: Base for progressive collapse analysis. *Eng Struct.* 2016;119:164-73.
45. Yang X, Yang H, Zhang S. Rate-dependent constitutive models of S690 high-strength structural steel. *Constr Build Mater.* 2019;198:597-607.
46. Yang F, Veljkovic M. DAMAGE MODEL CALIBRATION FOR S275 AND S690 STEELS. *ce/papers.* 2019;3(5-6):262-71.

Anexo 1:

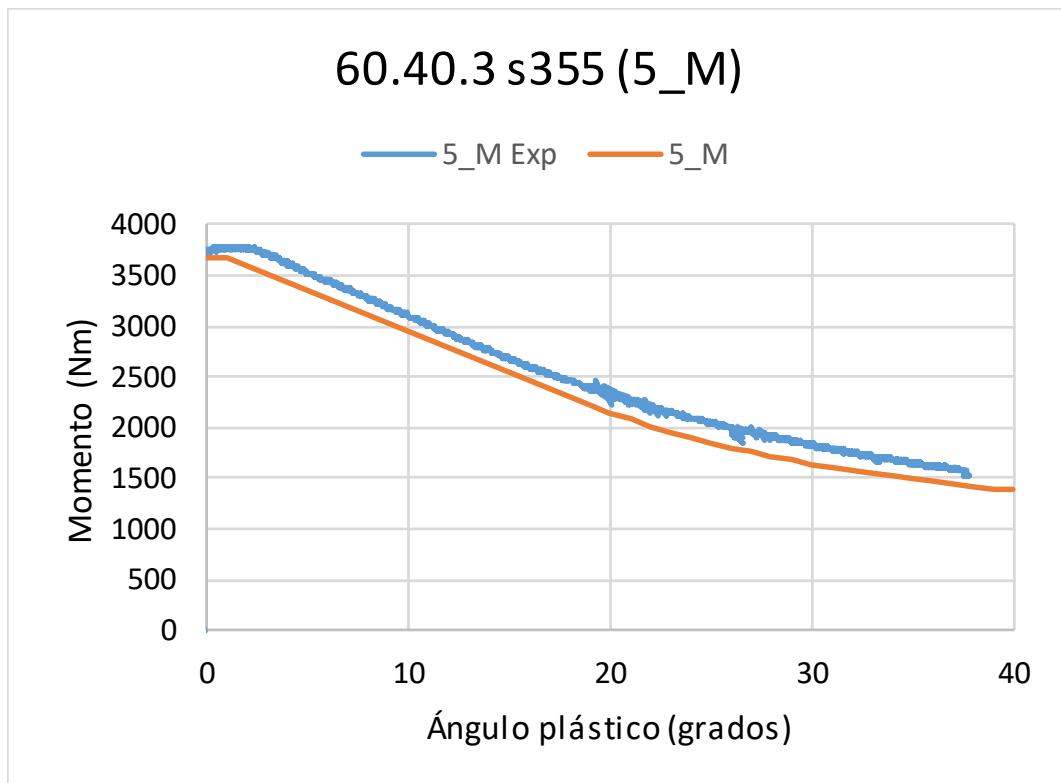
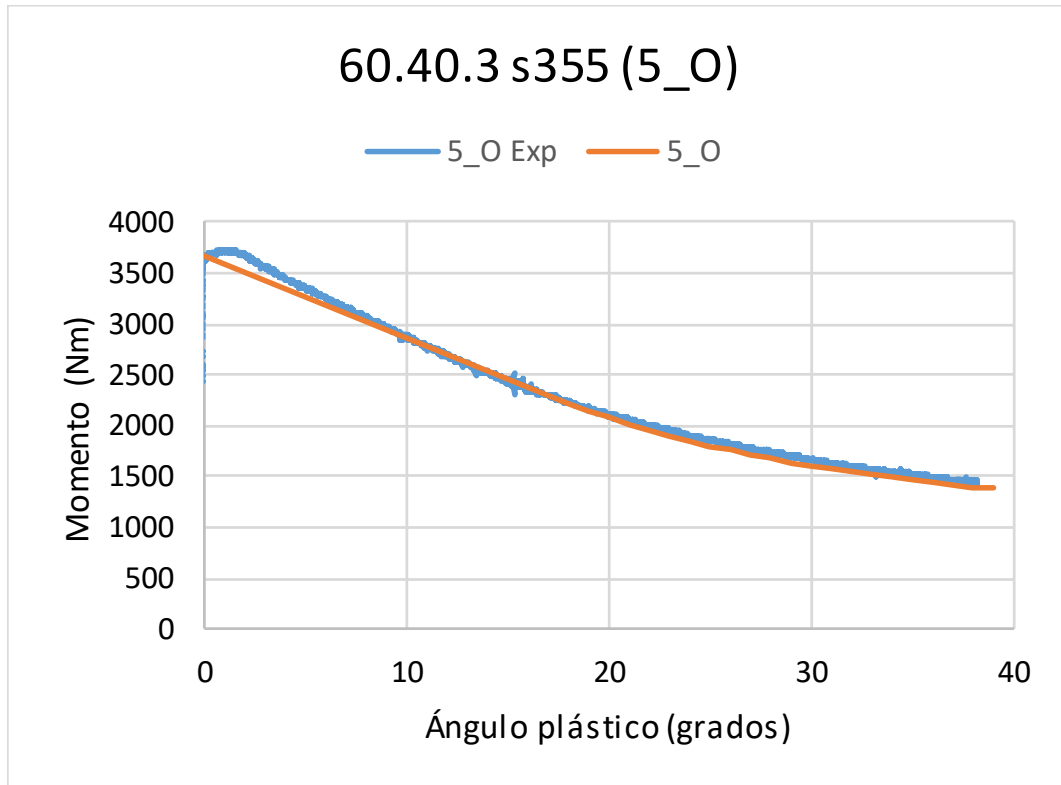
Comparativa entre ensayos de
perfiles reparados y el modelo
propuesto.

ANEXO 1. COMPARATIVA ENTRE ENSAYOS DE PERFILES REPARADOS Y EL MODELO PROPUESTO

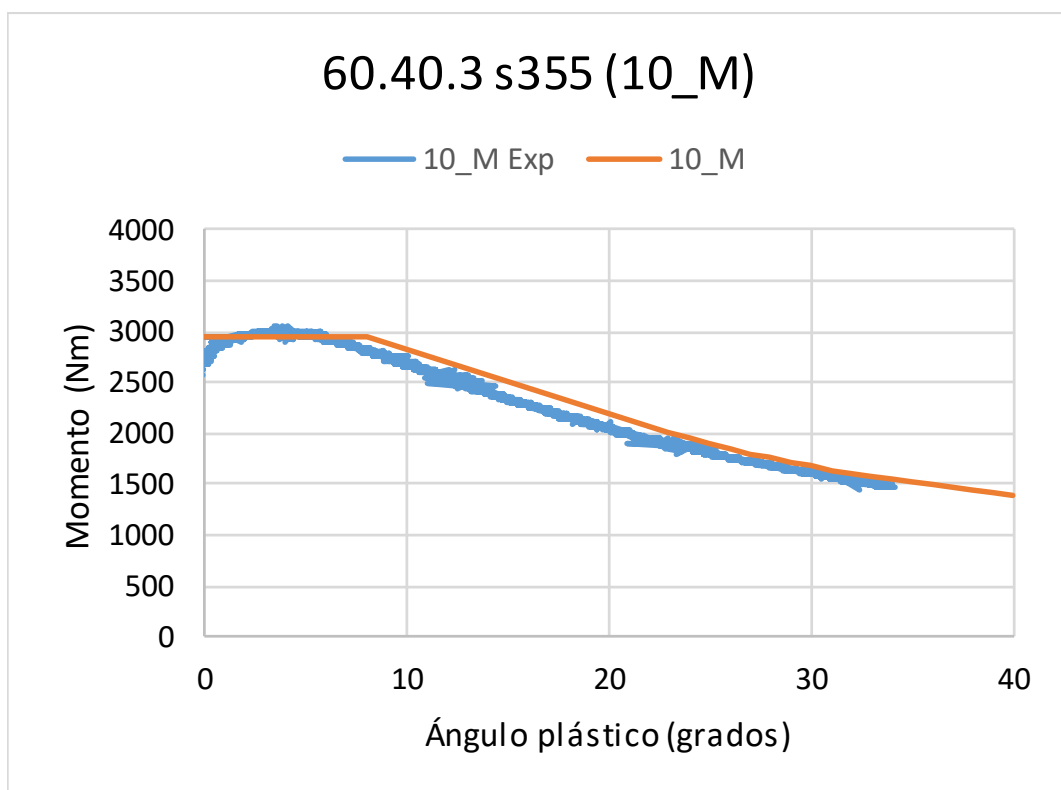
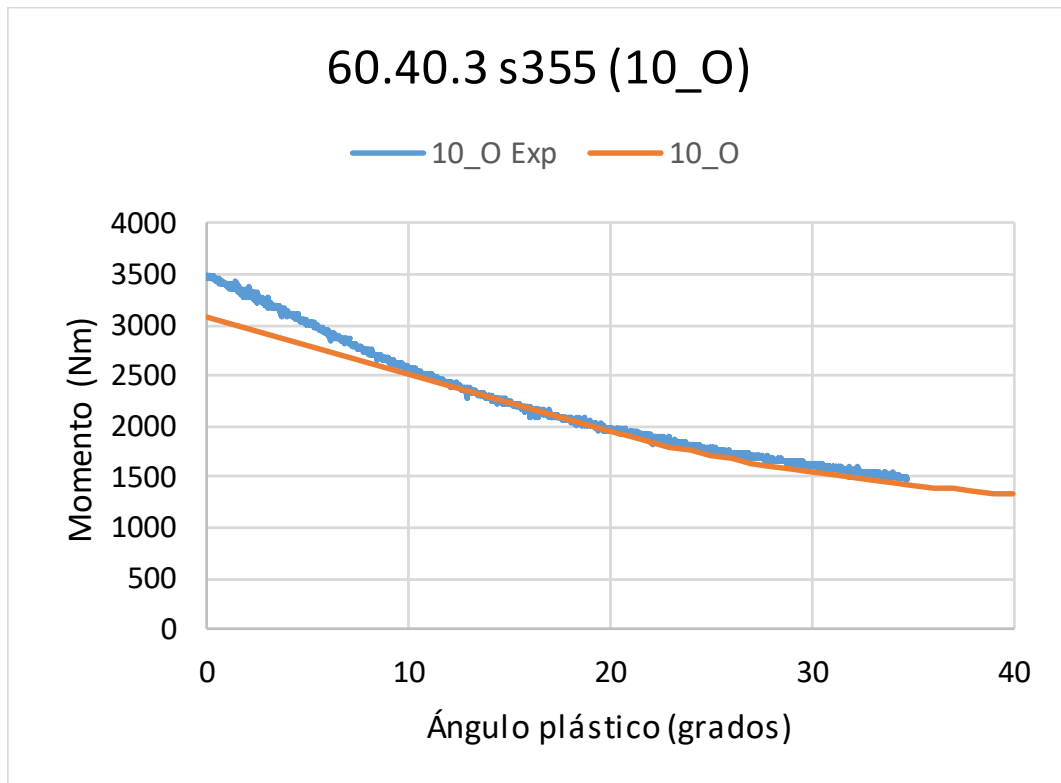
Perfil 45.45.3 s355 - índice Q=18



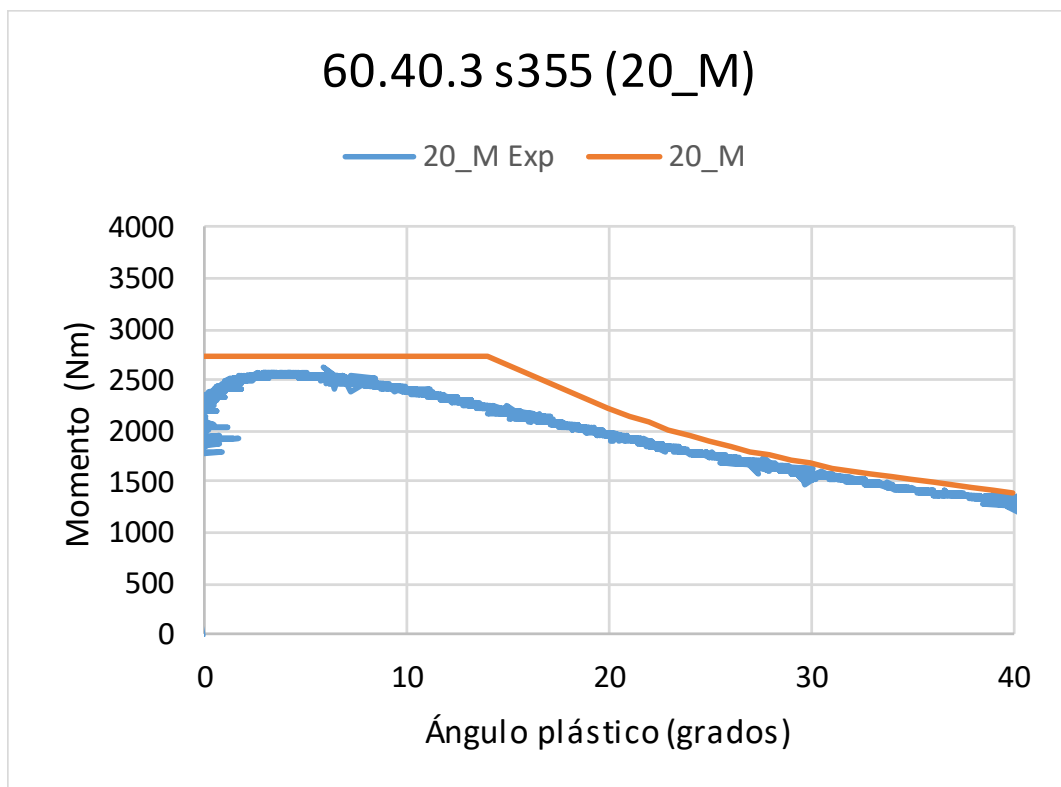
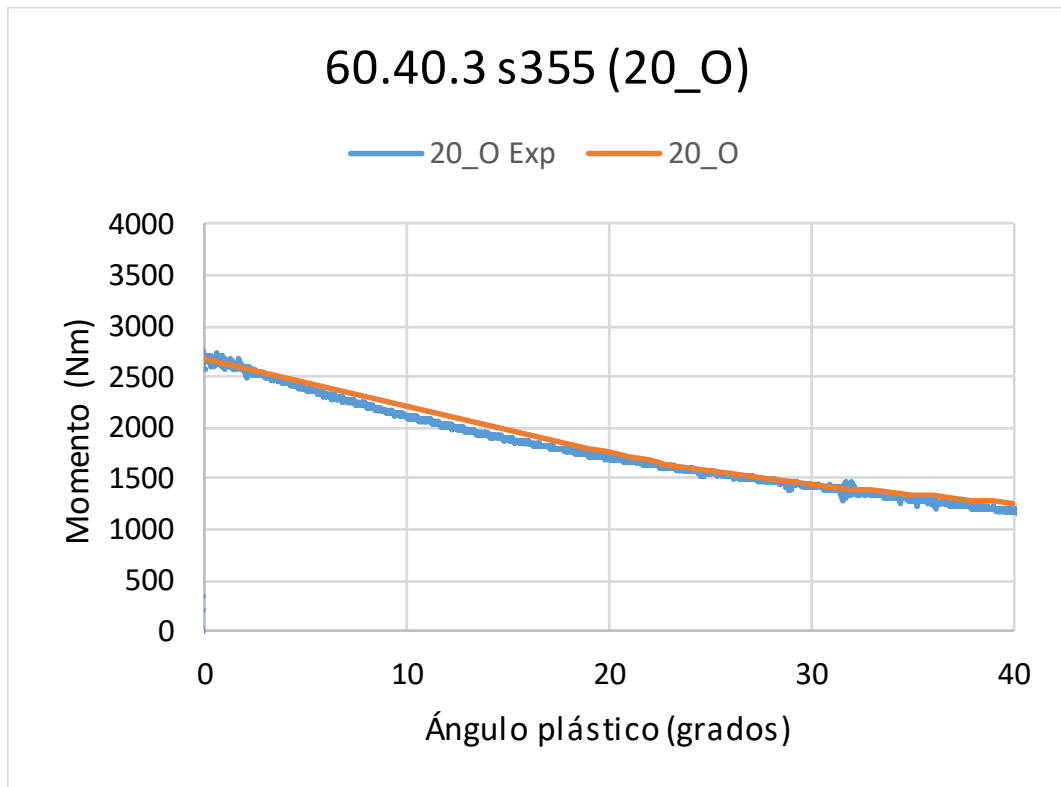
Perfil 60.40.3 s355 - índice Q=42



Perfil 60.40.3 s355 - índice Q=42



Perfil 60.40.3 s355 - índice Q=42

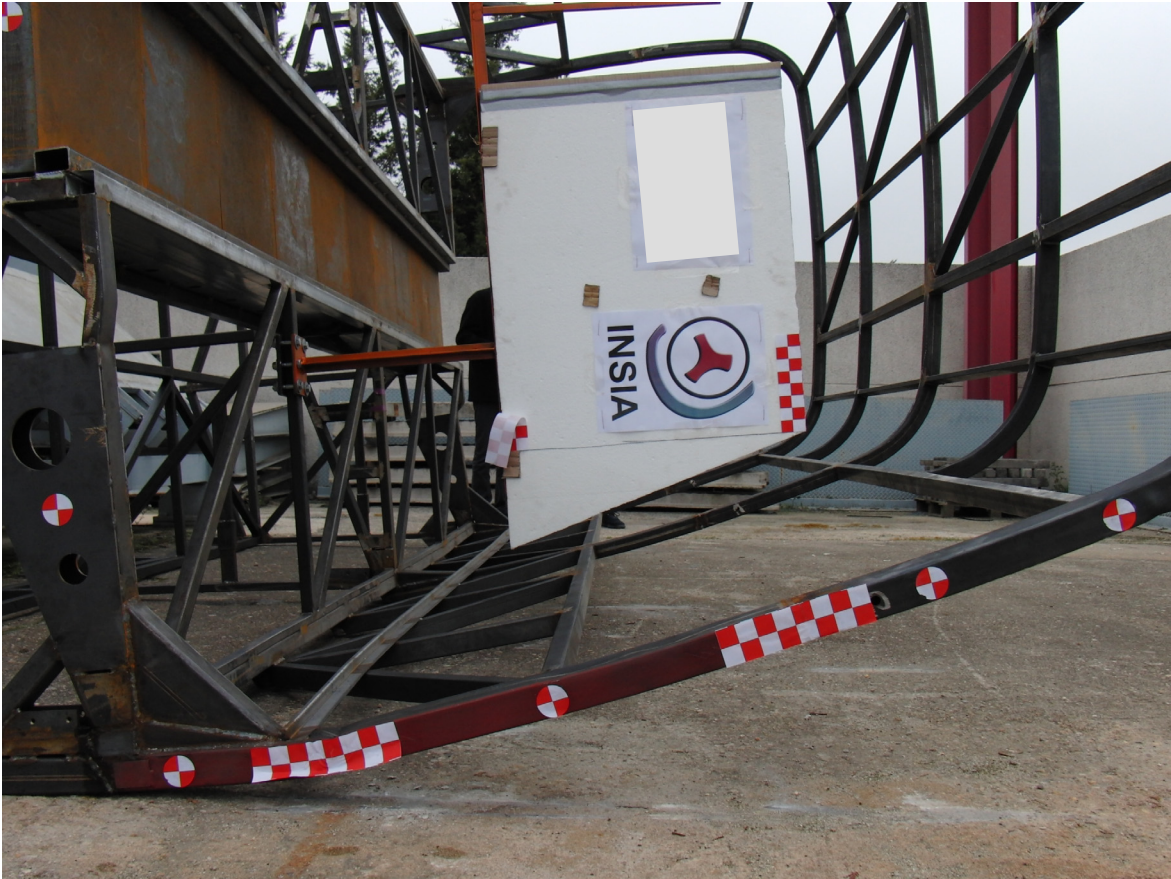


Anexo 2a:

Imágenes del vuelco del módulo
estructural. Ensayo 1.

ANEXO 2A. IMÁGENES DEL VUELCO DEL MÓDULO ESTRUCTURAL. ENSAYO 1





Anexo 2b:

Imágenes del vuelco del módulo
estructural. Ensayo 2.

ANEXO 2B. IMÁGENES DEL VUELCO DEL MÓDULO ESTRUCTURAL. ENSAYO 2





Anexo 2c:

Imágenes del vuelco del módulo
estructural. Ensayo 3.

ANEXO 2C. IMÁGENES DEL VUELCO DEL MÓDULO ESTRUCTURAL. ENSAYO 3.





