

DEGRADACIÓN DEL COMPORTAMIENTO A FLEXIÓN DE PERFILES TUBULARES DE ACERO EXPUESTOS A LA INTEMPERIE UTILIZADOS COMO PROTECCIONES COLECTIVAS Y MEDIOS AUXILIARES EN EDIFICACIÓN

¹Sara Martín López; ^{2*} Dr. Alfonso Cobo Escamilla; ^{3*} Dra. María de las Nieves González García

¹ Arquitecto Técnico, sara.mlopz@gmail.com

^{2*} Doctor Ingeniero Industrial, Arquitecto, Arquitecto Técnico. Departamento de Tecnología de la Edificación, alfonso.cobo@upm.es

^{3*} Doctora por la UPM, Arquitecto Técnico. Técnico Superior en Prevención de Riesgos Laborales. Departamento de Construcciones Arquitectónicas y su Control, mariadelasnieves.gonzalez@upm.es

*Grupo de Investigación UPM: Patología de Estructuras, Protecciones Colectivas y Medios Auxiliares de Edificación

Palabras Clave: Perfiles Tubulares de Acero, Flexión, Seguridad, Construcción.

Resumen

Los perfiles tubulares de acero (PTA) son más habitualmente empleados en el ámbito de las protecciones colectivas (PC) y medios auxiliares de edificación (MAE), al ser usados en ámbitos de seguridad, adquieren una importancia tal que motiva el estudio de la fiabilidad de su comportamiento mecánico. Por ello se motiva este trabajo estudiando a flexión PTA con las mismas calidades que los que habitualmente se emplean en PC y MAE.

Han sido ensayadas a flexión un total de 150 secciones de PTA, utilizando como variables la velocidad del ensayo, la distancia entre los apoyos, la influencia del dispositivo de apoyo y la comparativa entre el comportamiento de PTA expuestos a la intemperie durante 3 años en la Sierra de Guadarrama (en servicio como postes en sistemas de protección de borde) con PTA adquiridos. En este trabajo se ha evaluado en todos los casos las diferencias existentes entre los espesores de cada PTA medido con calibre, su espesor nominal y su espesor medio de cada tubo. El esquema de solicitaciones y tensiones resultante del ensayo de flexión es muy similar en la mayoría de los casos a los esquemas de solicitaciones y tensiones reales a los que trabajan los PTA utilizados como PC y MAE. En este caso, la sección más desfavorable está solicitada por el máximo momento flector y el máximo cortante y la variación del flector a lo largo de las barras es lineal.

Documentos técnicos como el CTE-SE-A o el EC3, establecen una clasificación para determinar el método de cálculo de las secciones de acero, y en la que la mayoría de las secciones de los PTA son clase 1 (aquella que permite la formación de una rótula plástica con capacidad de rotación suficiente para la redistribución de momentos) con lo que es posible utilizar el cálculo plástico o el elástico para la determinación de las solicitaciones. Esta clasificación indica directamente la capacidad de aprovechamiento de la sección antes de que se produzca la abolladura y depende de las dimensiones de las secciones de los PTA. Estudios anteriores desvelan que los PTA no llegan a plastificarse ya que antes de que se produzca este fenómeno se abollan, lo que motiva el colapso. Como resultado de este trabajo de investigación se pretende estudiar, como ya predijo en su tesis González García, M.N. [1] que la clasificación de secciones indicada por EC3 o CTE para PTA queda del lado de la inseguridad porque

predice comportamientos plásticos en secciones que no tienen posibilidad de plastificación.

Introducción

Como fundamentales objetivos que se pretenden obtener de este trabajo son:

- Estudiar el comportamiento a flexión de PTA empleados usualmente en PC y MAE.
- Estudiar la influencia de la velocidad de carga, la esbeltez y el dispositivo de apoyo durante la ejecución de los ensayos en el comportamiento a flexión PTA.



Figura 1: Ensayos con distintos dispositivos de apoyo

- Comprobar la modificación del comportamiento a flexión de PTA debido a su degradación.
- Comprobar si la clasificación de secciones indicada por el Eurocódigo 3 [2] o CTE DB SE-EA [3] es válida para los PTA empleados usualmente en PC y MAE.

Materiales y técnicas empleadas

Para dar respuesta a los objetivos de este trabajo, se han estudiado PTA S235, conformados en frío, de sección circular y cuadrada, todos ellos de 1,20 m de longitud facilitados por la empresa SAFENET. Las secciones circulares estudiadas han sido la Ø40·2 y la Ø30·2.

Este tipo de perfiles se emplea usualmente en PC y MAE como por ejemplo elementos de sistemas provisionales de protección de borde, plataformas de descarga o andamios.

Para estudiar la degradación se ha trabajado sobre PTA de sección circular Ø40·2, que han estado en servicio de forma interrumpida durante 3 años en la sierra de Guadarrama expuestos a la intemperie como postes de sistemas de protección de borde.

Dispositivo Experimental

El comportamiento a flexión se ha estudiado ensayando PTA en tres puntos a lo largo de su longitud, de este modo los elementos han estado sometidos simultáneamente a flexión y cortante, tal como es usual cuando forman parte de PC y MAE.

Los ensayos [4] se han realizado en el laboratorio de Materiales de Construcción de la Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica (EUATM) perteneciente a la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), utilizando una máquina universal de ensayos marca IBERTEST, modelo MIB-60/AM que utiliza el software Wintest 32. El control del ensayo en todos los casos ha sido por carrera.

Para estudiar la posible influencia de la velocidad de carga en el comportamiento a flexión, se han utilizado en todos los tipos de perfiles tres velocidades distintas de carga: 300 milímetros por minuto (mm/min) 150 mm/min y 30 mm/min.

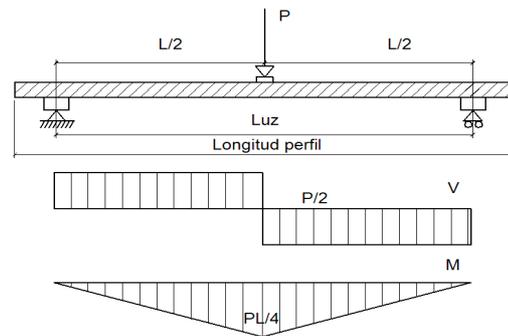
Para estudiar la influencia de la esbeltez de la pieza en el comportamiento a flexión, los ensayos se han realizado con distintas relaciones luz entre apoyos y canto de la sección (esbeltez). Se han utilizado en todos los tipos de perfil luces entre apoyos de 1000mm, 400mm y 200mm. Como resultado del ensayo a flexión se han podido obtener los siguientes datos:

- Carga en el límite elástico, carga de rotura, desplazamiento en el límite elástico, desplazamiento para la carga máxima, desplazamiento último, energía hasta la carga máxima y energía total y el diagrama carga-desplazamiento permite indicar si la forma de rotura es frágil o dúctil y las posibilidades de plastificación.

Trabajo Analítico realizado

El modelo de cálculo se puede idealizar para los ensayos a flexión realizados según muestra en el esquema 1.

Todos los PTA ensayados, la sección sometida simultáneamente al máximo momento flector ($PL/4$) y al máximo cortante ($P/2$) es la más solicitada. Siendo I la inercia del perfil y E el modulo de elasticidad longitudinal del metal que se adoptará 200.000 N/mm^2 .



Esquema 1: Modelo de cálculo.

El EC3 y CTE admiten que para secciones tipo 1 y 2 (Plástica y compacta) la determinación de la resistencia de las mediante el cálculo plástico mientras que para las secciones tipo 3 (Elástica) el método de cálculo será el elástico.

Tabla 1 - Clasificación de las secciones

Clase	1 y 2	3	4
W	Plástico (W_{pl})	Elástico (W_e)	Elástico eficaz (W_{eff})

La clasificación de secciones para PTA circulares se establece comparando el cociente entre el diámetro exterior d y el espesor del tubo t con el parámetro de abolladura, de manera análoga para

secciones rectangulares, se compara el cociente entre su lado y el espesor del tubo t también con el parámetro ϵ cuya expresión viene definida por la siguiente expresión:

Siendo, f_y el límite elástico del acero empleado, en N/mm^2 . En la tabla 2 se establecen las

$$\epsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (1)$$

Tabla 2 - Comparación de las secciones

	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Tipo de perfil
$d/t \leq$	$50 \epsilon^2$	$70 \epsilon^2$	$90 \epsilon^2$	Circular
	$72 \epsilon^2$	$83 \epsilon^2$	124	Rectangular

comparaciones a realizar con el parámetro de abolladura para la clasificación de las secciones. Después de realizar todos los cálculos pertinentes para cada ensayo y luz, todos los PTA estudiados en este trabajo pertenecen a la clase 1.

Resultados experimentales

En su totalidad se han realizado 150 ensayos a flexión, de los cuales 108 han sido realizados sobre 36 PTA de sección cuadrada y circular, siendo 27 ensayos sobre cada tipo de dimensiones (40•40•2; 35•35•2; Ø40•2 y Ø30•2) variando la velocidad de carga y la luz de las piezas.

Se han hecho 6 ensayos sobre 6 PTA (35•35•2) para evaluar los distintos dispositivos de apoyo durante el ensayo. Se han ejecutado 36 ensayos a flexión, sobre 12 PTA expuestos durante 3 años a la intemperie, de sección circular Ø40•2, variando la velocidad de carga y la luz de las piezas.

Una vez finalizados todas las series de ensayos a flexión para las distintas secciones de PTA se ha procedido a representar (figura 2, 3 y 4) los resultados obtenidos en la sección cuadrada (adquiridos) 40•40•2mm,

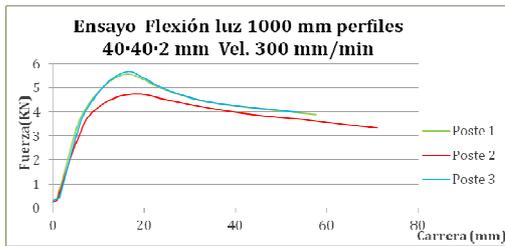


Figura 2: Diagrama carga-desplazamiento para luz de 1000mm y velocidad 300 mm/min.

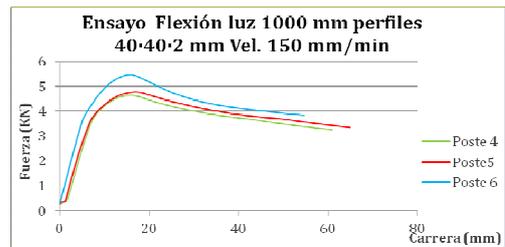


Figura 3: Diagrama carga-desplazamiento para luz de 1000mm y velocidad 150 mm/min.

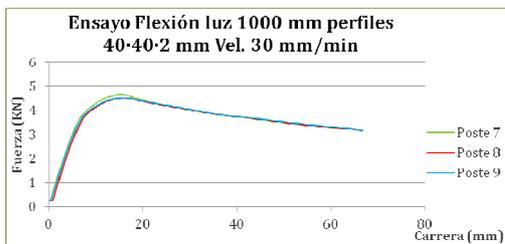


Figura 4: Diagrama carga-desplazamiento para luz de 1000mm y velocidad 30 mm/min.

cuando la separación entre apoyos es 1000 mm y la velocidad del ensayo es 300, 150 y 30mm/min.

A continuación se muestran en las figuras 5, 6 y 7 los diagramas carga-desplazamiento para los PTA que se encontraban expuestos a la intemperie (Ø40•2), para luces igualmente de 1000mm y velocidades de ensayo de 300, 150 y 30mm/min, en la que se aprecian diferencias significativas entre los propios perfiles a la intemperie.

Debida a la extensión de este trabajo, solo se presentan los diagramas carga-desplazamiento de 2 tipos de secciones ensayadas con una luz de 1000mm y con el dispositivo de apoyo que originalmente incorpora la máquina, el resto de secciones de PTA, luces y velocidades ensayadas presentan un aspecto similar. En función de los datos obtenidos en los diagramas se confeccionan las siguientes tablas.

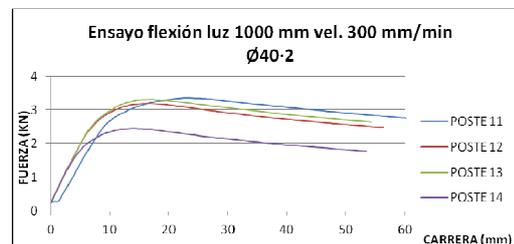


Figura 5: Diagrama carga-desplazamiento para luz de 1000mm y velocidad 300 mm/min.

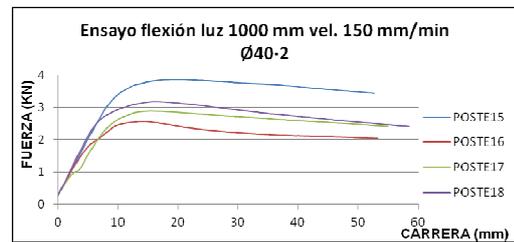


Figura 6: Diagrama carga-desplazamiento para luz de 1000mm y velocidad 150 mm/min.

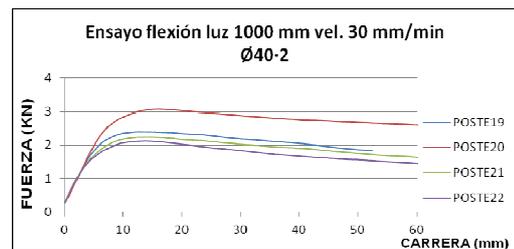


Figura 7: Diagrama carga-desplazamiento para luz de 1000mm y velocidad 300 mm/min.

Resultados analíticos

Tabla 3: Métodos de Cálculo de Momento último.

CÁLCULO EXPERIMENTAL		CÁLCULO ANALÍTICO
ELÁSTICO	$M_{ue} = \frac{(P_e \cdot L)}{4}$	$M_{ue} = W_e \cdot f_y$
PLÁSTICO	$M_{up} = \frac{(P_{pl} \cdot L)}{4}$	$M_{up} = W_{pl} \cdot f_y$

Como método de cálculo se realiza el que muestra el EC3 y el CTE-DB-A. Los métodos a emplear para el cálculo de cada momento último (tabla3) [5]. De todos los tipos de PTA, aquí se presentan los resultados obtenidos de manera experimental y calculados analíticamente para su posterior comparación, de la sección rectangular 40•40•2 mm para una luz de 1000 mm. El resto de cálculos para las demás secciones se realizan de la misma manera.

Tabla 4 – Resultados para 40•40•2 mm una luz de 1000mm y vel de 300,150 y 30 mm/min

Vel.	Tubo	EXPERIM		ANALÍTICO			EXPERIM		ANALÍTICO		
		Pe (KN)	Pe(KN) esp real	%	Pe (KN) esp nominal	%	Pmax (kN)	Pmax(K N) esp real	%	Pmax esp nominal	%
300 mm/min	P1	3,66	2,83	-29,4	3,44	6,09	5,57	3,09	-80,26	4,08	-36,55
	P2	3,66	2,89	-26,6	3,44	-6,09	5,67	2,87	-97,56	4,08	-39,14
	P3	3,66	2,81	-30,1	3,44	-6,15	4,75	2,87	-65,51	4,08	-16,52
150 mm/min	P4	3,61	2,86	-26,3	3,44	-4,56	4,64	3,35	-38,51	4,08	-13,95
	P5	3,53	2,89	-22,1	3,44	-2,27	4,79	3,39	-41,30	4,08	-17,5
	P6	3,75	2,83	-32,6	3,44	-8,86	5,48	3,31	-65,56	4,08	-34,51
30 mm/min	P7	3,18	3,09	-2,9	3,44	7,64	4,65	3,63	-28,10	4,08	-14,21
	P8	3,17	2,87	-10,3	3,44	7,99	4,53	3,37	-34,42	4,08	-11,03
	P9	3,56	2,87	-23,8	3,44	-3,28	4,53	3,37	-34,42	4,08	-11,03
				-22,7		-2,41					-21,6

Conclusiones

Los diagramas carga desplazamiento obtenidos presentan el mismo aspecto: un primer tramo lineal seguido de desplazamientos no lineales hasta alcanzar la carga máxima y a continuación el valor de la carga necesario para seguir aumentando el desplazamiento ha disminuido progresivamente hasta producirse el colapso. Una vez alcanzada la carga máxima el perfil se abolla.

- Los PTA no poseen un comportamiento elastoplástico como se deduciría a partir de la clasificación de su sección según EC3 o CTE, con los que su clasificación no es correcta y queda del lado de la inseguridad.
- Para ensayos de las mismas características se obtienen diferencias significativas en los valores de carga máxima alcanzada, sin embargo la pendiente de las gráficas en el tramo correspondiente al comportamiento lineal se mantiene similar en la mayoría de los PTA ensayados. Las mayores diferencias se aprecian en los PTA conservados a la intemperie.
- Las diferencias alcanzadas en los valores de carga última, se deben a la irregularidad que presentan los PTA a lo largo de su espesor. Existen diferencias entre el espesor medido experimentalmente con calibre y el espesor medio analítico en valores medios de un 16,96%.
- Con los datos obtenidos se puede asegurar que a menores velocidades de ensayo se obtienen cargas y momentos menores.

- Los momentos flectores en régimen elástico obtenidos experimentalmente es superior al obtenido analíticamente cuando la velocidad de carga es 300 o 150 mm/min. Para velocidades de 30 mm/min sucede lo contrario. Como conclusión se aprecia que a menor luz de ensayo, es menos probable que el momento experimental supere a los valores de los momentos analíticos calculados.

En el caso de los perfiles conservados a la intemperie, ninguno de los perfiles supera los valores analíticos para luces de 400 mm y 200mm. Para comparar la diferencia de comportamiento entre los momentos últimos se procede a la comparación de los perfiles expuestos a la intemperie, con los PTA adquiridos de sección Ø40.2 mm, ya que son de las mismas medidas.

Como principales resultados obtenidos se muestra la tabla 5 en la que se expresan los porcentajes de los momentos últimos experimentales elástico y plástico (signo negativo significa que está por encima de los valores analíticos). Podemos apreciar que para una luz de 400 mm en el caso de los perfiles nuevos, el momento último elástico experimental es en media un 6,284% por debajo del valor analítico, y para los perfiles a la intemperie dicho momento se encuentra 59,061% por debajo de su valor analítico.

Tabla 5: % diferencia de los momentos últimos experimentales respecto de los valores analíticos para perfiles nuevos y perfiles expuestos a la intemperie.

%	PERFILES NUEVOS		PERFILES INTEMPERIE	
	Mu elástico exp.	Mu plástico exp.	Mu elástico exp.	Mu plástico exp.
1000mm	-48,803	-28,889	-11,649	14,124
400mm	6,284	16,016	59,061	67,548
200mm	29,711	28,676	69,314	71,006

En vista de los datos, se puede concluir que, en valores medios los momentos últimos experimentales y las cargas de los perfiles expuestos a la intemperie son claramente inferiores que los de los perfiles nuevos, probablemente debido a la posible degradación.

Agradecimientos: Este trabajo forma parte del Trabajo Fin de Máster realizado para el Máster en Innovación Tecnológica en Edificación [6]. Agradecer permitirme el uso de las instalaciones del Laboratorio de Materiales de Construcción de la EUATM.

REFERENCIAS

- [1] González García, M.N.; (2010). "Consideraciones respecto a los sistemas provisionales de borde", Tesis Doctoral. UPM. Archivo digital UPM ID:5893
- [2] ENV 1993-1-1 Eurocódigo 3 (1993). Proyectos de Estructuras de Acero.
- [3] Código Técnico de la Edificación (2007b) D. Básico-SE-A. Ministerio de Fomento.
- [4] UNE-EN 10219-1: 2007. Perfiles huecos para construcción conformados en frío de acero no aleado y de grano fino. Parte 1, Madrid (AENOR).
- [5] Wardenier, J.; (2002) "Perfiles tubulares en aplicaciones estructurales" Instituto para la Construcción Tubular (I.C.T.) Depósito Legal: VI-294-02
- [6] Martín López, Sara.; (2011) "Estudio del Comportamiento a Flexión de Perfiles Tubulares de Acero utilizados en Protecciones Colectivas y Medios Auxiliares de Edificación" Máster. Archivo digital UPM ID:9103
- [7] Real Saládrigas, E.; (2001). "Aportaciones al estudio del comportamiento a flexión de estructuras de acero inoxidable", Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.