

# MARCOS METÁLICOS TUBULARES PARA EL SOPORTE DE TÚNELES

## TUBULAR STEEL RIBS OF SUPPORT FOR THE TUNNELS

**Gianfranco Perri**

Profesor de Túneles en la Universidad Central de Venezuela [gianfrancoperri@gmail.com](mailto:gianfrancoperri@gmail.com)

**Carla L. Zenti**

Coordinadora técnica de Elas Geotecnica Italia [carla.zenti@elasgeotecnica.it](mailto:carla.zenti@elasgeotecnica.it)

### RESUMEN

Un interesante y novedoso desarrollo de marcos metálicos tubulares ha proporcionado nuevas opciones estructuralmente satisfactorias para el soporte de túneles excavados convencionalmente, ya que permite una buena flexibilidad en el diseño y ofrece una interesante rentabilidad en la construcción, eliminando al mismo tiempo la mayor parte de los inconvenientes prácticos que eran propios de los tradicionales marcos metálicos conformados con perfiles laminados. Se trata de perfiles tubulares que luego de ensamblados y colocados en obra, se rellenan de concreto dando lugar finalmente a un elemento estructuralmente muy eficiente. En efectos, los perfiles tradicionales abiertos, también los que tienen buena forma y buenas propiedades mecánicas, puede mostrar limitaciones debido al hecho que las propiedades estáticas son fuertemente penalizadas para las solicitaciones que se desarrollan en un plano diferente al teórico previsto, lo cual en la práctica tunelera es en cambio muy frecuente que se produzca. Por el contrario, un perfil circular cerrado, cual es el tubular, se caracteriza por poseer una sección con simetría axial completa, lo que asegura a la sección resistente, la capacidad de hacerse cargo de las cargas axiales y excéntricas que actúan en cualquier dirección respecto a la sección del túnel. En el artículo se describe esta novedosa tecnología, sus peculiaridades prácticas de fabricación y de instalación dentro del túnel, sus principios conceptuales y algunos de sus resultados experimentales.

### ABSTRACT

An interesting and novel development of tubular metallic ribs has provided new options structurally satisfactory for supporting conventional tunnels, allowing good flexibility in design and offers an interesting performance in construction, while are eliminated most of the practical problems were typical of traditional metal frames with rolled formed. These tubular assemblies and then placed in work, filled with concrete leading finally to a very efficient structural element. In effect, the traditional open profiles, which also have good form and good mechanical properties, can show limitations due to the fact that the static properties are heavily penalized for the stresses that develop in a different plane than the theoretical expected, which in tunneling practice is instead very common occurrence. By contrast, a closed circular profile, which is tubular, is characterized by a complete section with axial symmetry, which ensures a resilient section, the ability to take over and eccentric axial loads acting in any direction and regarding the section of the tunnel. The article describes this new technology, its peculiarities manufacturing practices and installation in the tunnel, its conceptual principles and some of his experimental results.

## INTRODUCCION

En la excavación de un túnel, la instalación del soporte primario es la operación que se ejecuta inmediatamente después de efectuar la excavación, ya que su actuación es necesaria para soportar la excavación hasta tanto sea eventualmente construido el revestimiento final del túnel.

La práctica tunelera de las excavaciones convencionales, prevé que en muchas de las clases de comportamiento de la excavación es indispensable, y en otras es solo conveniente, recurrir al uso de los marcos metálicos para conformar el soporte, integrándolos con el concreto proyectado y con otros eventuales elementos complementarios.

Tales marcos o costillas metálicas están conformados, tradicionalmente y por lo general, mediante el calandrado y el ensamblaje de perfiles estructurales abiertos del tipo IPE, HE, IPN y otros, los cuales se caracterizan estructuralmente por presentar una resistencia fuertemente anisotrópica con lo cual en cualquier dirección diferente a su dirección teórica de trabajo, las propiedades estáticas resistentes resultan muy penalizadas.

Basado en tal consideración, y en atención a las dificultades prácticas de poder garantizar en el subterráneo la perfecta centralidad geométrica de las solicitaciones que terminan actuando sobre los marcos empleados para soportar los túneles, se han analizado y luego experimentado las posibilidades y las ventajas de poder utilizar en alternativa, unos perfiles metálicos tubulares (Figura 1), los cuales después de posicionados in situ son fácilmente rellenos de concreto, incrementado así aún más su capacidad estructural y mejorando su performance general.



Figura 1: Configuración geométrica típica de dos marcos metálicos tubulares consecutivos

Los resultados de los análisis teóricos y de las experimentaciones de laboratorio y en campo, que se han llevado a cabo durante algunos años (ver más adelante), han permitido comprobar toda una serie de ventajas comparativas de los perfiles tubulares sobre los abiertos, ventajas no solamente en cuanto a la teórica eficiencia estructural, sino también en cuanto a varios aspectos prácticos operativos y de confiabilidad del soporte así construido.

En cuanto a la eficiencia estructural es intuitivo que con una sección axial simétrica se obtiene una distribución del metal resistente que garantiza la misma sección resistente tanto centralmente cuanto excéntricamente en cualquier dirección y además, el mismo metal resistente es explotado estructuralmente todo por igual, no solo a compresión o tracción puras, sino también a flexión.

También existen varios otros detalles operativos interesantes que resultan ventajosos con el uso de los perfiles tubulares y que están ligados a las tecnologías y metodologías constructivas de las obras.

Es por ejemplo sabido que en las modernas metodologías constructivas, en algunas ocasiones los marcos metálicos son transportados hasta el subterráneo después de haber sido pre-ensamblados con las piezas componentes unidas por un sistema de bisagras, mientras más frecuentemente el ensamblaje se realiza por completo en el interior del túnel a partir de las varias, 2, 3 o 4, piezas que los conforman. El posicionado en la puesta en obra de elementos estructurales tan grandes como los descritos, cuando estos están conformados con perfiles abiertos, encuentra no pocas dificultades en túneles con secciones de excavación con dimensiones relativamente elevadas, a causa de los inevitables e imprevisibles fenómenos de pandeo que se manifiestan peligrosamente y continuamente. Mientras con los perfiles tubulares, debido a su elevada rigidez, se minimiza el riesgo de las torsiones y pandeos durante su movilización y posicionamiento en el túnel y estas operaciones tienen por lo tanto lugar en condiciones de seguridad.

Además, a pesar de la elevada rigidez, el perfil tubular a igualdad de rendimiento mecánico resulta ser más ligero en comparación con los perfiles abiertos generalmente utilizados.

Adicionalmente puede observarse que las inconvenientes discontinuidades estructurales que en los marcos metálicos son generadas por las placas de unión entre las varias piezas que los conforman, en el caso de los marcos tubulares ya no existen, ya que el llenado con hormigón de los tubos permite formar un arco absolutamente continuo de hormigón. Tal circunstancia además, garantiza la plena cooperación entre el acero y el relleno, proporcionando una mayor resistencia y estabilidad a todo el sistema.

Otras ventajas comparativas se encuentran por ejemplo en las condiciones de contacto entre marcos y terreno, las cuales con los perfiles de ala no son homogéneas, así como igualmente ocurre para las condiciones de contacto entre los perfiles abiertos y el concreto proyectado que los debe englobar.

En las fotos y en esquema de la Figura 2 pueden observarse algunos detalles constructivos de interés de los marcos metálicos tubulares, los cuales explican los siguientes aspectos:

- Las placas de unión entre las piezas que conforman el marco no dan lugar a ninguna discontinuidad en la geometría cilíndrica el concreto que rellena el tubo.
- Los agujeros desde los cuales se inyecta el concreto de relleno del tubo no constituyen debilitamiento para la estructura y la solución diseñada resulta ser fácil de usar. La solidez de

la placa de apoyo en los pies del arco del marco garantiza una buena estabilidad y sustancialmente difiere poco de las de la costilla tradicional.

- Las cadenas, ganchos metálicos de unión entre marcos adyacentes, aunque son similares a los tradicionales, se aplican siempre cruzados en pares, incrementando notablemente la eficiencia estructural del soporte en su conjunto.

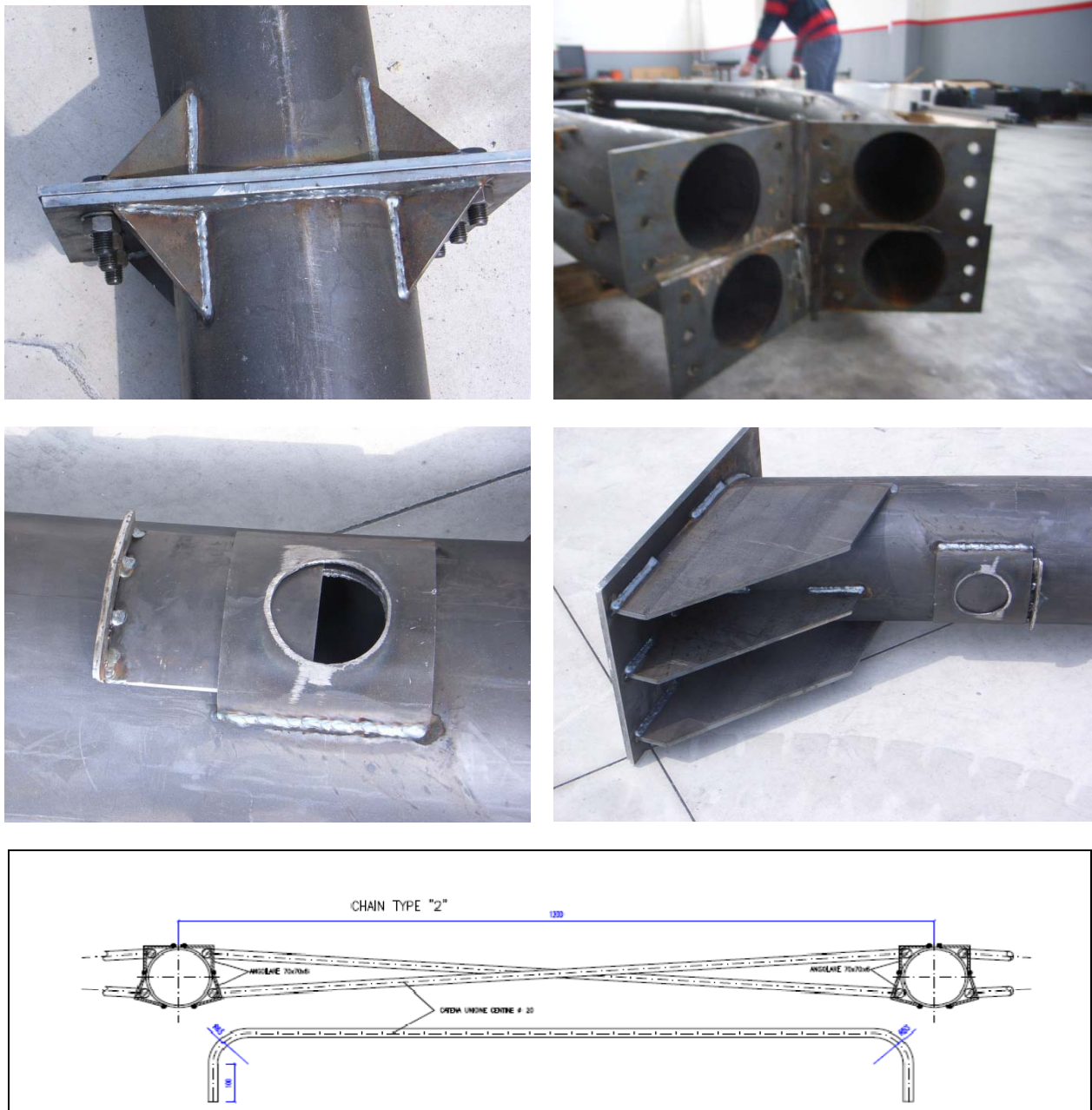


Figura 2: Algunos detalles de los marcos tubulares metálicos

### ASPECTOS TEORICOS Y ESPERIMENTALES

Previamente a las experimentaciones y para mejor seleccionar los perfiles a ensayar, se efectuaron análisis numéricos teóricos comparando la capacidad estructural entre los perfiles metálicos abiertos y los tubulares que luego se experimentarían. Para ello, los diferentes perfiles a ser seleccionados con resistencias similares, fueron evaluados considerando el comportamiento de su sección compuesta, acero-concreto, en términos de diagramas de interacción a resistencia de preso-flexión N-M, o sea fuerza axial y momento flector.

Lo anterior porque es sabido que una de las causas más importantes de la inestabilidad de una costilla empleada en el soporte de un túnel, es el desarrollo de cargas globalmente excéntricas en su sección, causadas por las componentes transversales a su sección de las cargas inducidas por el terreno. Este hecho genera finalmente altos momentos de flexión que la sección de las costillas de perfiles abiertos no es capaz de soportar eficientemente, obligando al uso de perfiles pesados.

En la (Figura 3) se presentan los diagramas teóricos de interacción obtenidos numéricamente para el perfil abierto considerado (2-IPN180) en ambas direcciones y los obtenidos para los dos perfiles tubulares considerados ( $\Phi$  244,5-6 y  $\Phi$  244,5-5). El perfil abierto está conformado por dos perfiles IPN180 conectados a 25 cm entre ejes y los perfiles tubulares de 244,5 mm de diámetro externo difieren entre sí por el espesor, de 5 mm e un caso y de 6 mm en el otro. Se observa que los perfiles tubulares en práctica envuelven los dominios resistentes de los abiertos.

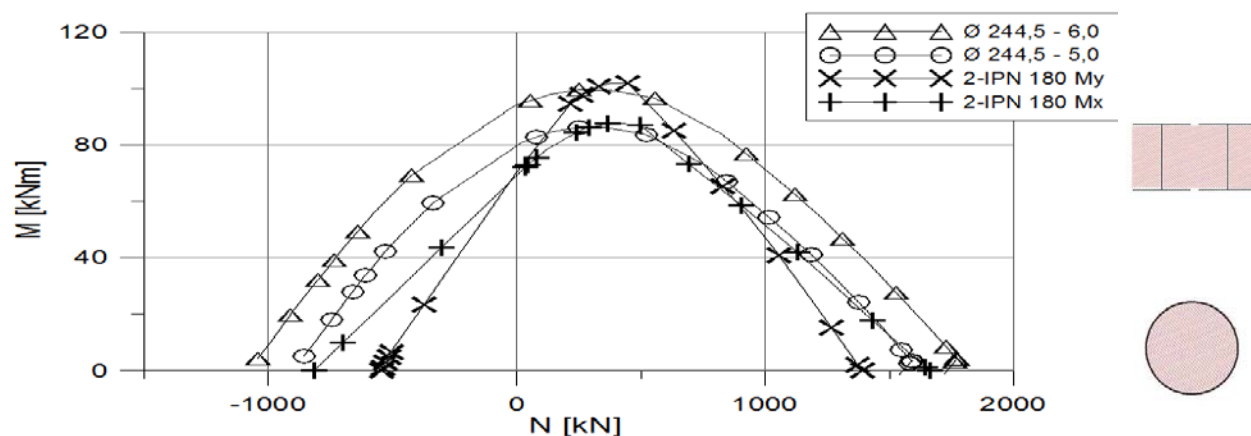


Figura 3: Diagramas de las secciones mixtas acero-concreto de los perfiles comparados

Con el fin de comparar la respuesta estructural real de los dos tipos de marcos, el estándar y el tubular, y comprobar que este último tuviera un comportamiento igual o mejor del correspondiente abierto, el trabajo experimental se llevó a cabo en dos fases: la primera en el laboratorio del Politécnico de Milano con el fin de validar el análisis numérico y la segunda en el túnel Varano en fase de excavación en los montes Apeninos hacia el centro de Italia.

En el laboratorio, para cada tipo de marco se prepararon 4 muestras, 2 para ser ensayadas a las 24 horas y dos para ser ensayadas a las 48 horas después de proyectado el concreto, simulando así las condiciones de los soportes apenas instalados en proximidad del frente de excavación.

La figura 4 muestra unas fotos y el esquema estático de las pruebas de laboratorio, el cual evidentemente simula la condición de carga ideal para los perfiles abiertos, aquella o sea para la cual se obtiene el máximo rendimiento estructural de tales perfiles, aunque se sabe que es suficiente una pequeña excentricidad en la carga para causar la inestabilidad de la costilla tradicional, mientras que en el caso de la tubular no se causaría ningún efecto negativo.

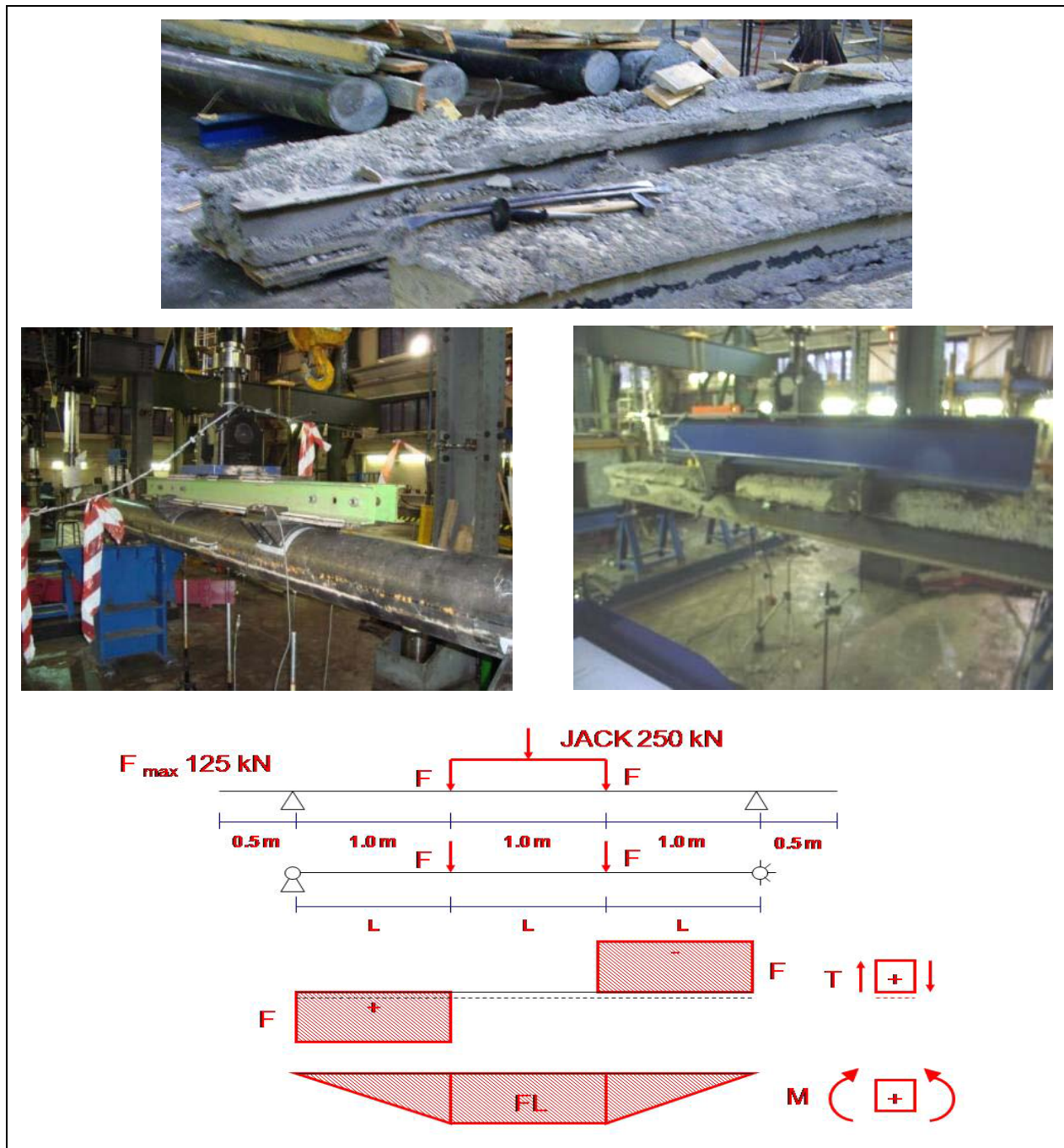
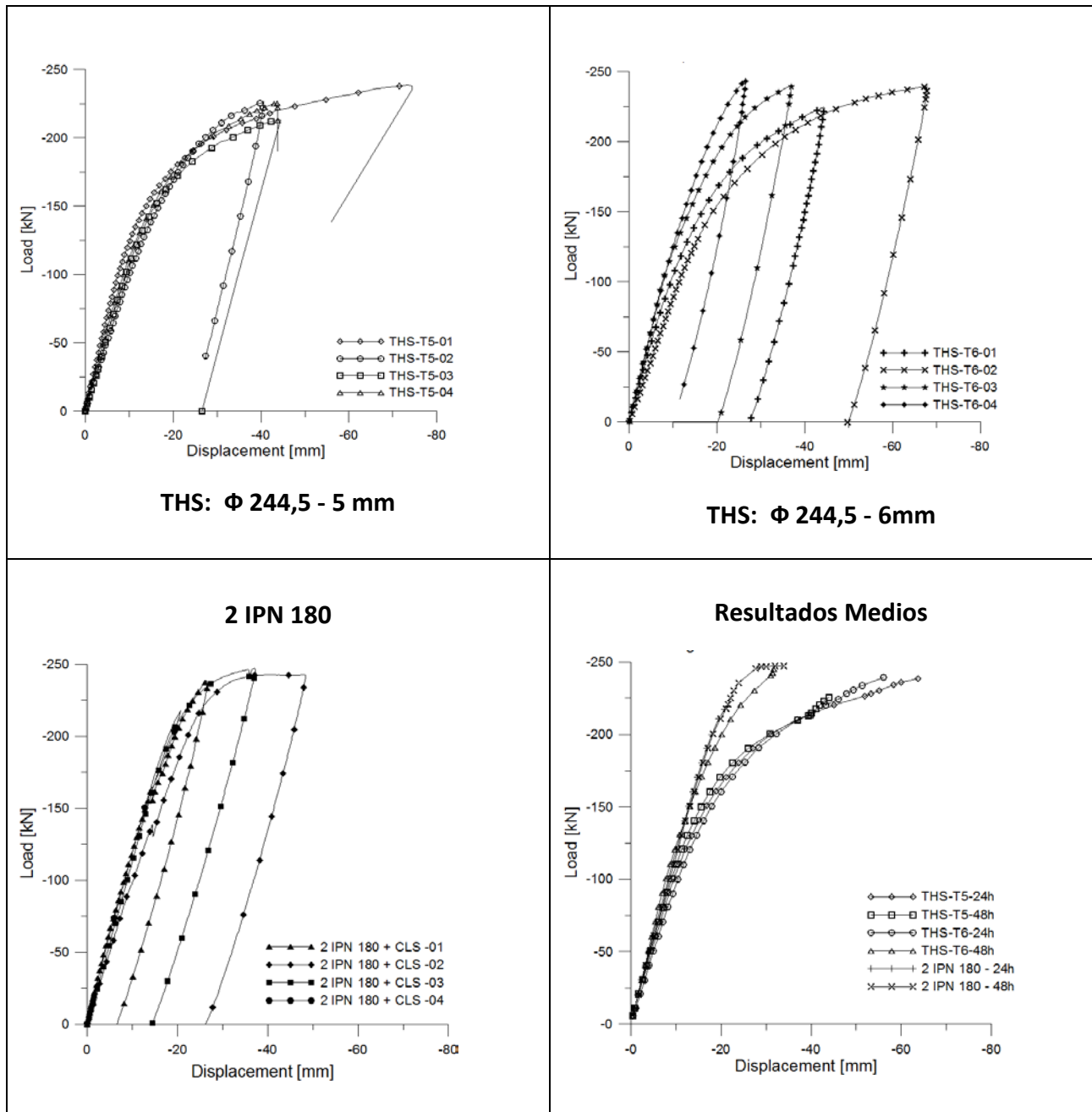


Figura 4: Esquema de carga de los ensayos de laboratorio para los dos tipos de perfiles

La Figura 5 resume los resultados de las pruebas de laboratorio y los mismos evidencian como los perfiles tubulares ensayados confirman capacidades del mismo orden de las máximas teóricas de los perfiles abiertos, y además que estos últimos se caracterizan por un comportamiento elasto-plástico casi perfecto, mientras que los tubulares muestran un comportamiento elasto-plástico con endurecimiento, lo cual representa e implica otra evidente ventaja de su comportamiento real.



CLS-01 e CLS-02 se refieren a las pruebas a 24h y a 48h respectivamente

Figura 5: Resultados de laboratorio - carga Vs. flecha -

En el campo, además que para confirmar los resultados de las pruebas de laboratorio en cuanto a la eficiencia estática de las costillas tubulares, la prueba se realizó también para constatar las reales ventajas de la costilla tubular en los aspectos operativos de los trabajos subterráneos.

La experimentación se llevó a cabo en el túnel vial Varano (ver la foto de la Figura 8), en construcción dentro de un macizo rocoso alterado pertenece a la Formación Maiolica en los Apeninos Centrales de la península italiana.

El soporte previsto en el tramo en cuestión del túnel por el diseño original, preveía 20 cm de concreto proyectado y costillas estándares HEB 140 instaladas cada 1,50 m. Las costillas tubulares, seleccionadas para la prueba con el objeto de caracterizarse por una resistencia estructural similar a la teórica del perfil HEB, fueron de 193,7 mm de diámetro y 5 mm espesor (ver los correspondientes diagramas característicos resistentes en la Figura 6).

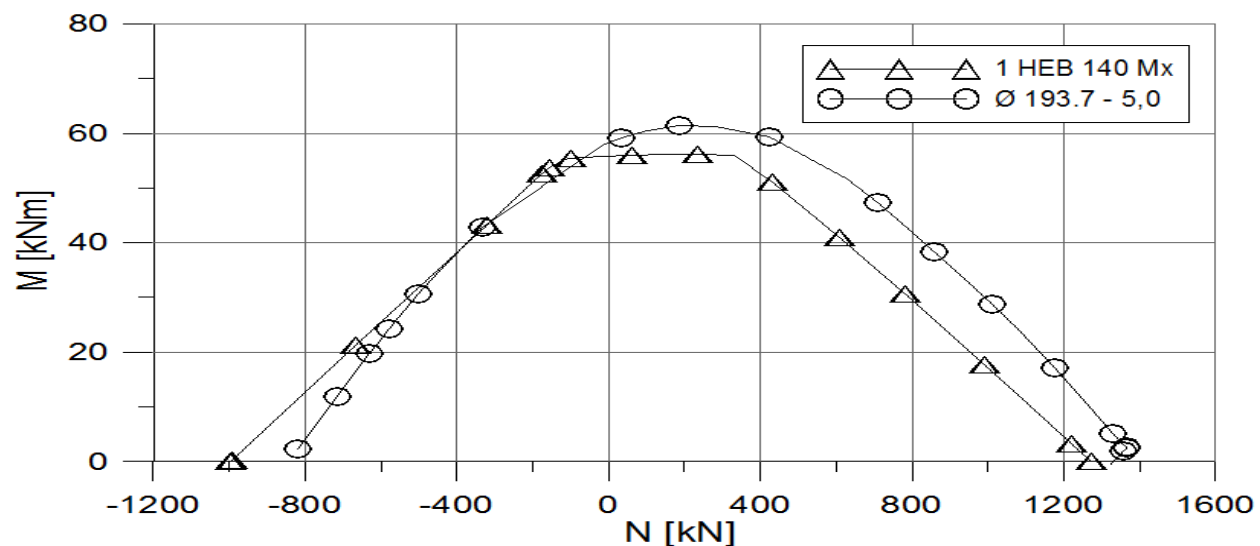


Figura 6: Diagramas de las secciones mixtas acero-concreto de los perfiles comparados en campo

Con el fin de analizar el comportamiento real de las costillas tubulares y compararlas en términos de respuesta tenso-deformativa con las costillas abiertas HEB 140, fueron monitoreadas 3 secciones del túnel, cuyas características se enumeran a continuación:

- Sección 1:* 28,5 m de longitud aproximadamente con costillas tubulares instaladas cada 1,50 m.
- Sección 2:* 28,5 m de longitud aproximadamente con costillas estándares instaladas cada 1,50 m.
- Sección 3:* 28,8 m de longitud aproximadamente con costillas tubulares instaladas cada 1,80 m.

Dentro del tramo del túnel en experimentación, que resultó homogéneo a lo largo de sus 86 m, se efectuaron 8 levantamientos geológico-geomecánicos del frente de excavación, uno cada 10 a 15 m de avance, luego se instalaron 8 estaciones topográficas de monitoreo de las convergencias y 3 estaciones de monitoreo de las solicitaciones, una para cada una de las tres secciones de experimentación indicadas: en cada estación 2 celdas de carga colocadas a cada pié de costilla y 5 pares de strain-gauges colocados en el intradós y el extradós de cada costilla, en hastiales y clave.

La respuesta deformatoria registrada en cada sección monitoreada se mantuvo siempre dentro del rango elástico, con valores de desplazamientos y de convergencias por debajo de 0,5 cm y con una estabilización bastante rápida. En cuanto a las sollicitaciones registradas, en la Figura 7 se resumen los resultados obtenidos del monitoreo en cada una de las tres costillas instrumentadas.

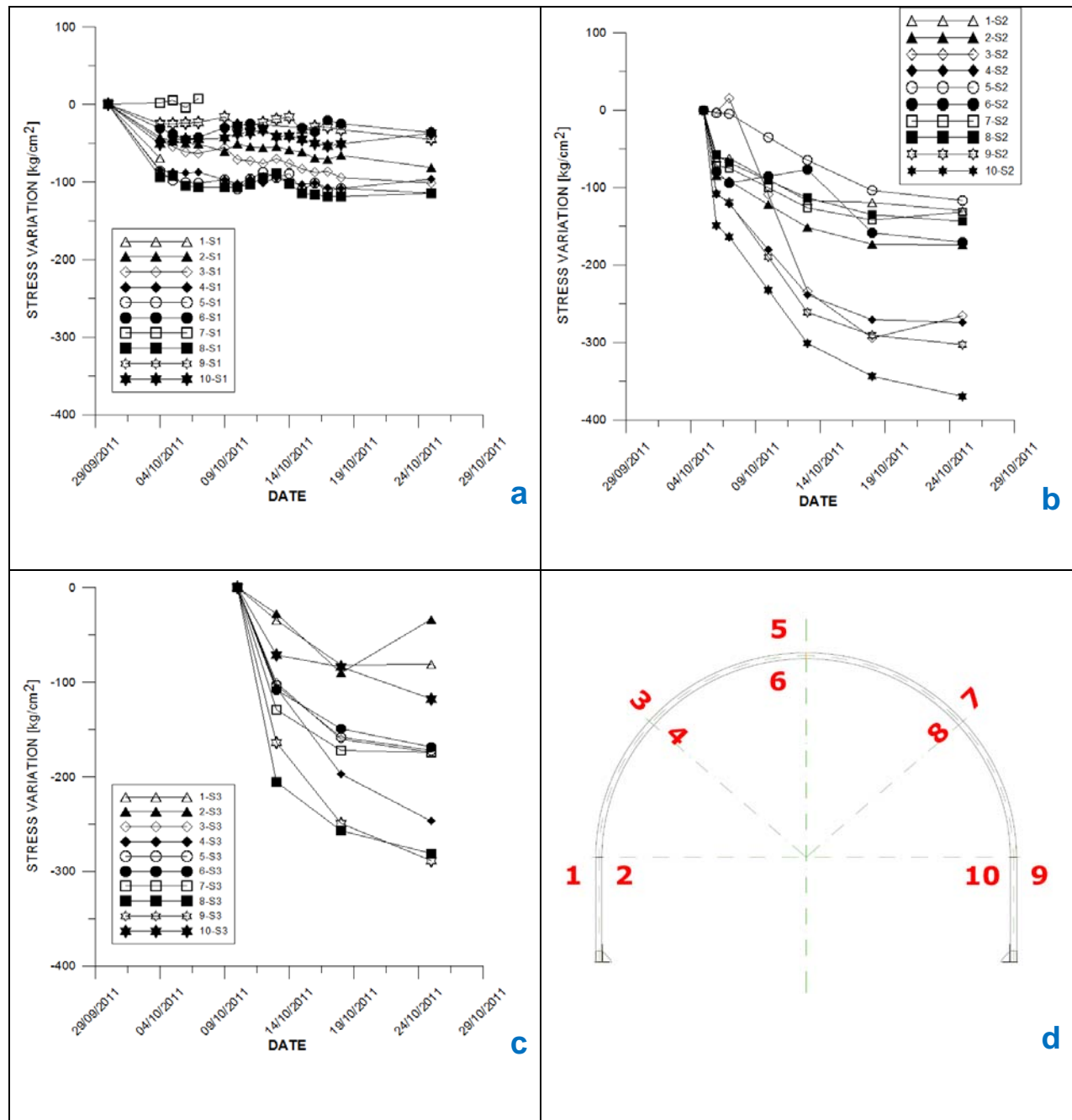


Figura 7: **a:** Sección 1 – **b:** Sección 2 – **c:** Sección 3 - **d:** Puntos de monitoreo

Puede observarse claramente como las solicitaciones que afectan a las dos costillas tubulares son más bajas que las correspondientes a la costilla estándar. Esto es particularmente evidente si se comparan los esfuerzos de tracción medidos en la costilla tubular en la Sección 1 con los de la costilla estándar de la Sección 2, ambas colocadas en campo con la misma separación de 1,50 m. Sin embargo también en la Sección 3, correspondiente a la costilla tubular colocada con una mayor separación, de 1,8 m, las solicitaciones aún se mantienen por debajo de las correspondientes medidas en la costilla estándar con un paso de la instalación de 1,5 m.



Figura 8: Marcos tubulares instalados para la experimentación de campo en el túnel Varano

## CONCLUSIONES

Utilizar perfiles tubulares en lugar de perfiles abiertos para construir los marcos metálicos que conforman los soportes de los túneles excavados convencionalmente, implica obtener, a igualdad de capacidades estructurales teóricas de las secciones resistentes, un conjunto de ventajas comparativas operativas, resistentes, y en consecuencia también económicas, a favor de los marcos contruidos con perfiles tubulares. Ventajas que se resumen a continuación:

- La resistencia estructural del soporte no disminuye en presencia de las inevitables cargas actuantes in dirección diversa de la teórica.
- El contacto costilla-terreno y costilla-concreto proyectado es continuo y uniforme.
- Las discontinuidades físicas entre las distintas piezas que conforman las costillas, no constituyen discontinuidades estructurales muy marcadas.
- La incrementada rigidez del marco facilita su manejo en las etapas de movilización y posicionado.
- Para alcanzar una determinada capacidad resistente teórica, inclusive con una confiabilidad notablemente superior, se requiere un menor peso metálico por cada costilla, o alternativamente, manteniendo el mismo peso se puede alcanzar una mayor separación entre costillas.

## REFERENCIAS

PERRI G. (2012) “Tópicos de ingeniería de túneles” 500 páginas  
[http://issuu.com/gianfrancoperri/docs/topicos\\_de\\_ingenieria\\_de\\_tuneles](http://issuu.com/gianfrancoperri/docs/topicos_de_ingenieria_de_tuneles)

ZENTI C.L., LUNARDI G., ROSSI B., GALLOVICH A. (2012) “A new approach in the design of first lining steel rib” Proc. World Tunnel Congress, WTC 2012, Bangkok, Thailand, 18-24 Maggio 2012.

ELAS GEOTECNICA (2011) “B. Zero tondo: Relazione tecnica”

LUNARDI P. (2008) “Design and construction of tunnels, analysis of controlled deformations in rock and soils (ADECO-RS)” Springer, Belin, p.576.