

Avances en la predicción analítica de daños en edificios producidos por la tunelación



Carles Camós

Doctor ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Deutsche Bahn Netz AG



Climent Molins

Doctor ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Universitat Politècnica de Catalunya

Resumen

La perforación de túneles urbanos conlleva la generación de asentamientos diferenciales del terreno que pueden dañar las edificaciones situadas en área de influencia de la excavación. La predicción de dichos daños suele realizarse mediante la aplicación del método de la viga equivalente de Burland y Wroth en 2D, es decir, asumiendo edificios perpendiculares al eje del túnel y perfiles Gaussianos de asiento del terreno generados en su base. No obstante, para otras alineaciones deben utilizarse aproximaciones debido a la inexistencia de expresiones analíticas que permitan abordar estos casos. Los autores han obtenido una nueva ecuación para el cálculo de la deformación horizontal del terreno. Dicha ecuación permite la aplicación del método de la viga equivalente en 3D para edificios ubicados en cualquier posición con respecto al eje del túnel. Además, el método permite tener en cuenta la posición del frente de excavación y, en consecuencia, el efecto del perfil longitudinal de asentamientos, aumentando así el realismo del campo de desplazamientos del terreno. El método se aplica a un caso real de edificios afectados por la excavación del túnel de la L9 de Metro en Barcelona mediante EPB (*Earth Pressure Balance*). Esta aplicación permite observar diferencias sustanciales en la predicción de daños según la alineación del edificio. Los resultados se comparan posteriormente con los obtenidos mediante el método tradicional y con el levantamiento de daños.

Palabras clave

Tunelación, asentamientos, daños en edificios, viga equivalente, alineación, 3D, predicción analítica

Abstract

*Tunnel excavation entails the generation of ground settlements, which can endanger the adjacent buildings. The prediction of damages is usually performed with the equivalent beam method from Burland and Wroth in 2D by assuming perpendicular buildings to the tunnel axis and Gaussian settlement profiles generated in their base. However, approximations must be done for other building alignments due to the inexistence of analytical expressions that deal with these cases. The authors have developed a new equation for the determination of the horizontal ground strain. This equation allows applying the equivalent beam method in 3D for buildings placed in whichever position with respect to the tunnel axis. Moreover, the method allows considering the modeling of the tunnel advance and hence, the effect of the longitudinal settlement profile. The method is applied to a real group of buildings affected by the construction of the L9 Metro line tunnel in Barcelona by means of EPB (*Earth Pressure Balance*). The application of the novel method reveals significant variations of the estimated damage depending on the building alignment. The results are further compared with the application of the classical method and the damage survey.*

Keywords

Tunneling, settlements, building damage, equivalent beam, alignment, 3D, analytical prediction

1. Introducción

El diseño de túneles requiere la predicción de los posibles daños en edificios adyacentes producidos por los asentamientos del terreno derivados de la tunelación. Las predicciones preliminares se llevan a cabo actualmente mediante el conocido método de la viga equivalente (Burland y Wroth, 1974; Boscardin y Cording, 1989). Este método modela las paredes de los edificios mediante vigas elásticas lineales

sin peso sujetas a una deflexión impuesta en su base. La deformación resultante en la viga es debida a la propia deflexión de la misma y a la deformación horizontal de la superficie del terreno. La distribución de dicha deformación depende del modo de deformación que resulta ser una combinación de flexión y cortante. Por ello, las predicciones se realizan considerando dos modos extremos de deformación, flexión pura y cortante puro, para determinar

cuál es el crítico. Las máximas deformaciones de tracción en la viga debidas a flexión pura (ϵ_{br}) y a cortante puro (ϵ_{dr}) pueden determinarse con las siguientes expresiones derivadas de la teoría de vigas elásticas lineales:

$$\epsilon_{br} = (\epsilon_{bmax} + \epsilon_h) \tag{1}$$

$$\epsilon_{dr} = \epsilon_h \left(1 - \frac{E}{4G} \right) + \sqrt{\frac{\epsilon_h^2 \left(\frac{E}{G} \right)^2}{16} + \epsilon_{dmax}^2} \tag{2}$$

donde E/G es la relación entre los módulos elástico y de cortante del material, ϵ_{bmax} y ϵ_{dmax} son las deformaciones máximas debidas a la deflexión de la viga en los modos de flexión y cortante puros (ver apartado 3) y ϵ_h es el valor de la deformación horizontal del terreno en la base del edificio que depende de la forma del campo de asientos y de la posición de la pared (figura 1). Esta posición viene definida por la proximidad y la alineación con respecto al eje del túnel. La máxima tensión de tracción ϵ_{max} corresponde al máximo valor entre ϵ_{br} y ϵ_{dr} en la viga. Posteriormente, el

valor de ϵ_{max} es comparado con umbrales ϵ_{lim} que definen diferentes categorías de daño según la severidad de la afección y el daño típico asociado (tabla 1, Burland (1977)).

La determinación de ϵ_{max} representa un problema tridimensional que depende de (a) la naturaleza del terreno, (b) la geometría del edificio, (c) la geometría del túnel, (d) la posición del edificio con respecto al eje del túnel, (e) la posición del frente de excavación y (f) el método constructivo. Sin embargo, el modelo de la viga equivalente se aplica en 2D, es decir, asumiendo paredes perpendiculares o longitudinales al eje del túnel y perfiles Gaussianos de asiento del terreno generados en su base. Los datos recogidos en casos reales de construcción de túneles demuestran que el perfil transversal (dirección x) de asientos S puede aproximarse con una función de distribución de probabilidad Gaussiana (Peck, 1969). En la dirección longitudinal (dirección y) puede utilizarse en cambio una función de distribución acumulada (Attewell & Woodman, 1982). Ambos perfiles se muestran en la figura 1.

Categoría de daño	Grado de afección	Descripción del daño	Deformación de tracción ϵ_{max} (%)	ϵ_{lim} (%)
0	Inapreciables	Fisuras casi imperceptibles (<0,1 mm)	0-0,050	0,050
1	Muy ligeros	Grietas finas fácilmente reparables (<1 mm)	0,050-0,075	0,075
2	Ligeros	Grietas que se pueden rellenar sin problemas (<5 mm)	0,075-0,150	0,150
3	Moderados	La reparación de las grietas requiere trabajos importantes (<5 a 15 mm)	0,150-0,300	0,300
4	Severos	Intensas reparaciones en los paredes (15 a 25 mm)	> 0,300	-
5	Muy severos	Reconstrucción parcial o total del edificios. (> 25 mm)	-	-

Tabla 1. Clasificación del daño (Burland et al., 1977)

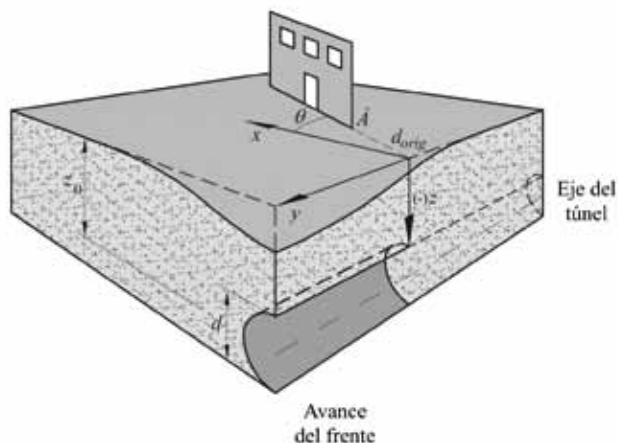


Fig. 1. Campo de asientos generado durante el avance del frente y parámetros descriptivos

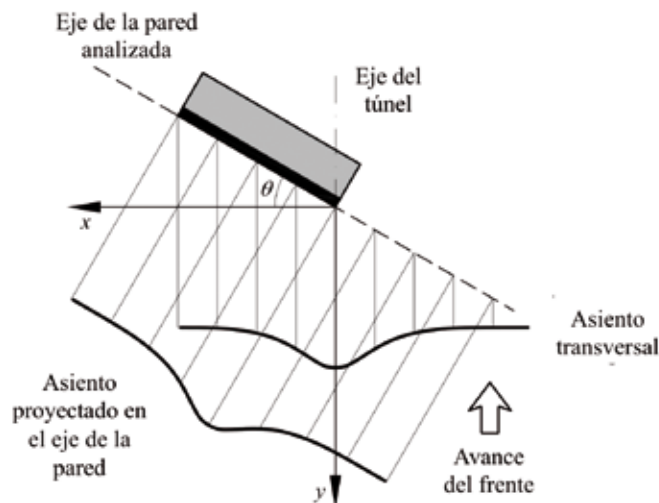


Fig. 2. Proyección del perfil de asientos en caso de edificios no perpendiculares al eje del túnel (Kappen, 2012)

Los desplazamientos horizontales del terreno en las direcciones transversal $U_x(x)$ y longitudinal $U_y(y)$ vienen dados por las expresiones de O'Reilly & New (1982) (ver sección 2), donde se asume que las partículas del terreno tienden a desplazarse en dirección al eje del túnel. La deformación horizontal del terreno ϵ_h en las direcciones transversal $\epsilon_{h,xx}(x)$ y longitudinal $\epsilon_{h,yy}(y)$ viene dada directamente por derivación del campo de desplazamientos horizontales $U_x(x)$ y $U_y(y)$:

$$\epsilon_{h,xx}(x) = \frac{dU_x(x)}{dx} \quad (3)$$

$$\epsilon_{h,yy}(y) = \frac{dU_y(y)}{dy} \quad (4)$$

Los edificios alineados transversal y longitudinalmente con respecto al eje del túnel son estadísticamente representativos, ya que muchos siguen las trazas de calles y avenidas. No obstante, existe una gran cantidad de edificios alineados arbitrariamente con el eje del túnel, especialmente cuando la tunelación se lleva a cabo mediante tuneladoras TBM (Tunnel Boring Machine). La predicción de daños en dichos casos se aborda con la proyección del perfil transversal o longitudinal de asientos (el más próximo) a lo largo del eje de la pared analizada, tal y como se representa en la figura 2 (Kappen, 2012). Sin

embargo, este método puede conllevar una alta inexactitud en la determinación de ϵ_h en situaciones alejadas de estos dos casos y con ello, una sensible desviación en las predicciones de daños.

Como solución al problema, los modelos de Peck (1969), Attewell & Woodman (1982) y O'Reilly & New (1982) pueden extenderse en 3D para obtener las ecuaciones del campo de asientos, $S(x,y,z)$ y de los desplazamientos horizontales en las direcciones transversal y longitudinal, $U_x(x,y,z)$ y $U_y(x,y,z)$. Por derivación pueden también obtenerse las deformaciones horizontales del terreno, $\epsilon_{h,xx}(x,y,z)$ y $\epsilon_{h,yy}(x,y,z)$. No obstante, para alineaciones intermedias deben utilizarse aproximaciones debido a la inexistencia de expresiones analíticas que permitan abordar estos casos.

En el presente artículo se muestran los avances aportados por los autores con el desarrollo de una nueva ecuación para el cálculo de la deformación horizontal del terreno. Dicha ecuación permite la aplicación del método de la viga equivalente en 3D para edificios ubicados en cualquier posición con respecto al eje del túnel. Además, el método permite tener en cuenta la posición del frente de excavación y en consecuencia, el efecto del perfil longitudinal de asientos con respecto a la traza del túnel, aumentando así el realismo del campo de asientos considerado. El método se aplica a un caso real de edificios afectados por la excavación del túnel de la L9 de Metro en Barcelona

mediante EPB (Earth Pressure Balance). La aplicación permite observar diferencias en la predicción según la alineación del edificio. Los resultados se comparan con los obtenidos mediante el método tradicional y con el levantamiento de daños.

2. Ecuación para la determinación de la deformación horizontal del terreno ϵ_h en 3D

Parámetros descriptivos de la posición de una pared de un edificio

En la figura 3 se representa el avance del frente de un túnel hacia a un edificio con una pared de longitud l_{build} (nótese que los parámetros descriptivos se mantienen en inglés por coherencia con las publicaciones de Camós (2015) y Camós y Molins, (2015)). El eje y corresponde al eje longitudinal del túnel, mientras que el x representa la intersección del plano perpendicular al eje del túnel y la superficie del terreno. El origen de coordenadas se sitúa en la intersección entre los ejes x e y . Por este motivo, el sistema se refiere a una pared particular y debe modificarse en caso de analizar otras paredes del mismo edificio.

El frente de excavación se sitúa en la coordenada y_s y avanza en dirección $y = -\infty$, siguiendo el criterio propuesto por Attewell et al. (1986). y_f representa la coordenada del portal del túnel, y generalmente se considera ubicado a $y = +\infty$.

La pared se encuentra alineada con un ángulo θ con respecto al eje x . Las alineaciones en sentido anti-horario se consideran positivas ($\theta > 0$). La distancia entre el punto \hat{A} de referencia de la pared y el origen de coordenadas se designa como d_{orig} . Por conveniencia, esta distancia puede ser también negativa.

Con este sistema es posible describir todas las posiciones de la pared en un rango de $\theta = [-90^\circ, +90^\circ]$ y $d_{orig} = (-\infty, +\infty)$. El caso de paredes paralelas al eje del túnel puede también abordarse con una ligera variación del método (ver Camós, (2015)).

Descripción del campo Gaussiano de asientos del terreno en 3D

El asiento del terreno en [mm] en un punto descrito por la coordenadas x, y, z en [m] puede determinarse mediante la siguiente expresión (Peck, 1969; Attewell & Woodman, 1982; O'Reilly & New, 1982):

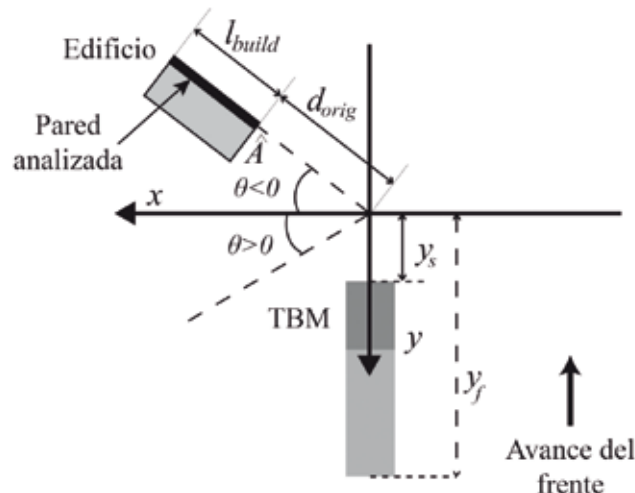


Fig. 3. Parámetros descriptivos de la posición del frente del túnel y de la pared del edificio

$$S = -1000 \cdot S_{max} \cdot \exp \left[-\frac{x^2}{2 \cdot K_x^2 \cdot (z_0 - z)^2} \right] \cdot \left[\Phi \left(\frac{y - (y_s + y_0)}{K_y \cdot (z_0 - z)} \right) - \Phi \left(\frac{y - y_f}{K_y \cdot (z_0 - z)} \right) \right] \quad (5)$$

donde S_{max} es el máximo valor absoluto de asiento generado en puntos alejados del frente de excavación, donde la deformación del terreno esté ya completada. Puede calcularse mediante:

$$S_{max} = \frac{V_L \cdot \pi \cdot d^2}{\sqrt{2\pi} \cdot K_x \cdot (z_0 - z) \cdot 4} \quad (6)$$

d y z_0 representan el diámetro y la profundidad del eje del túnel en [m], respectivamente, con z y z_0 positivos en profundidad. $\Phi(\cdot)$ es la función de distribución acumulada normal estándar. Nótese que el término de $\Phi(\cdot)$ que contiene y_f se reduce a 0 si $y_f = +\infty$. V_L es la pérdida volumétrica unitaria del terreno, K_x y K_y son parámetros de forma adimensionales que describen las curvas Gaussianas de asiento en las direcciones transversal y longitudinal respectivamente. K_x y K_y dependen del tipo del terreno: valores altos indican perfiles anchos y llanos, mientras que valores bajos conllevan perfiles estrechos y apuntados. El producto de $K_x \cdot z_0$ y $K_y \cdot z_0$ determina la posición respecto

el origen de los puntos de inflexión $i_x = i_y = i$ de los perfiles. Un nuevo parámetro y_0 fue introducido en la ecuación original para modelar el desplazamiento del perfil longitudinal de asientos con respecto a la posición del frente de excavación, especialmente en casos de terrenos blandos (Nomoto et al. 1995, Fagnoli et al. 2013, Camós, 2015):

$$y_0 = -\Phi^{-1}(\delta) \cdot K_y \cdot z_0 \quad (7)$$

donde δ es la relación entre el asiento en superficie en la posición del frente de excavación y el asiento máximo S_{max} a distancia infinita del frente:

$$\delta = \frac{|S(x = z = 0, y = y_s)|}{|S(x = z = 0, y = +\infty)|} = \frac{|S(x = z = 0, y = y_s)|}{S_{max}} \quad (8)$$

El caso típico corresponde a $\delta = 0,5$ y $y_0 = 0$.

Nótese que los asientos S en la ecuación (5) resultan negativos a lo largo del eje z , aunque el valor de S_{max} es positivo. Es importante mantener este convenio de signos para la correcta aplicación posterior de las ecuaciones relacionadas con los desplazamientos horizontales y la deformación del terreno. Sin embargo, cuando se citen o

analicen valores de asiento a lo largo del artículo, estos serán expresados en términos absolutos.

Desplazamiento horizontal del terreno

El desplazamiento horizontal del terreno en [mm] en la dirección transversal (U_x) y longitudinal (U_y) con respecto al eje del túnel en un punto con coordenadas x, y, z en [m] viene dado por las siguientes expresiones (O'Reilly & New, 1982):

$$U_x = \frac{x}{z_0 - z} \cdot S \quad (9)$$

$$U_y = 1000 \cdot \frac{V_L \cdot d^2}{8 \cdot (z_0 - z)} \cdot \left[\exp\left(\frac{-(y - (y_s + y_0))^2 - x^2}{2 \cdot K_y^2 \cdot (z_0 - z)^2}\right) - \exp\left(\frac{-(y - (y_f))^2 - x^2}{2 \cdot K_y^2 \cdot (z_0 - z)^2}\right) \right] \quad (10)$$

donde S puede determinarse con la ecuación (5).

Deformación horizontal del terreno

La deformación horizontal unitaria en las direcciones transversal ($\varepsilon_{h,xx}$) y longitudinal ($\varepsilon_{h,yy}$) puede calcularse por derivación directa del campo de desplazamientos horizontales:

$$\varepsilon_{h,xx} = \frac{\partial U_x}{\partial x} = \frac{S}{z_0 - z} \cdot \left(1 - \left(\frac{x^2}{K_x^2 \cdot (z_0 - z)^2} \right) \right) \quad (11)$$

$$\varepsilon_{h,yy} = \frac{\partial U_y}{\partial y} = \frac{V_L \cdot d^2}{8 \cdot (z_0 - z)} \cdot \left[\left(\frac{-2y + 2(y_s + y_0)}{2 \cdot K_y^2 \cdot (z_0 - z)^2} \right) \cdot \exp\left(\frac{-(y - (y_s + y_0))^2 - x^2}{2 \cdot K_y^2 \cdot (z_0 - z)^2}\right) - \left(\frac{-2y + 2(y_f)}{2 \cdot K_y^2 \cdot (z_0 - z)^2} \right) \cdot \exp\left(\frac{-(y - (y_f))^2 - x^2}{2 \cdot K_y^2 \cdot (z_0 - z)^2}\right) \right] \quad (12)$$

No obstante, la resultante de ε_h a lo largo de una determinada alineación de pared θ en un rango $(-90^\circ, 0^\circ) \cup (0^\circ, 90^\circ)$ no viene dada directamente por las ecuaciones (11) y (12). Aplicando un cambio de base al tensor infinitesimal de deformación puede hallarse dicha resultante $\hat{\varepsilon}_{h,\hat{x}\hat{x}}$ en la dirección \hat{x} coincidente con la dirección descrita por θ (Camós, 2015):

$$\varepsilon_h \equiv \hat{\varepsilon}_{h,\hat{x}\hat{x}} = \cos^2 \theta \cdot \varepsilon_{h,xx} + \sin^2 \theta \cdot \varepsilon_{h,yy} + 2 \cdot \cos \theta \sin \theta \cdot \varepsilon_{h,xy} \quad (13)$$

Nótese que si la pared es perpendicular al eje del túnel (i.e. $\theta = 0^\circ$), la ecuación (13) se reduce a $\varepsilon_h = \varepsilon_{h,xx}$, mientras que si la pared está alineada con el eje del túnel (i.e. $\theta = \pm 90^\circ$), la ecuación (13) se reduce a $\varepsilon_h = \varepsilon_{h,yy}$. Por definición del tensor infinitesimal de deformación, el término $\varepsilon_{h,xy}$ viene dado por:

$$\varepsilon_{h,xy} = \varepsilon_{h,yx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_x}{\partial y} + \frac{\partial U_y}{\partial x} \right) \quad (14)$$

Las expresiones de $\frac{\partial U_x}{\partial y}$ y $\frac{\partial U_y}{\partial x}$ de la ecuación (14) pueden determinarse mediante la derivación de las ecuaciones (9) y (10) (véase Camós (2015) para el desarrollo completo):

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_x}{\partial y} &= \frac{x}{z_0 - z} \cdot (-S_{max}) \cdot \left(\exp \left(-\frac{x^2}{2 \cdot K_x^2 \cdot (z_0 - z)^2} \right) \right) \cdot \\ &\cdot \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y - (y_s + y_0))^2}{2 \cdot K_y \cdot (z_0 - z)}} \cdot \left(\frac{1}{K_y \cdot (z_0 - z)} \right) - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y - y_f)^2}{2 \cdot K_y \cdot (z_0 - z)}} \cdot \left(\frac{1}{K_y \cdot (z_0 - z)} \right) \right) \end{aligned} \quad (15)$$

Y,

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_y}{\partial x} &= \frac{V_L \cdot d^2}{8 \cdot (z_0 - z)} \cdot \\ &\cdot \frac{(-2x)}{2 \cdot K_y^2 \cdot (z_0 - z)^2} \left[\exp \left(\frac{-(y - (y_s + y_0))^2 - x^2}{2 \cdot K_y^2 \cdot (z_0 - z)^2} \right) - \exp \left(\frac{-(y - (y_f))^2 - x^2}{2 \cdot K_y^2 \cdot (z_0 - z)^2} \right) \right] \end{aligned} \quad (16)$$

La naturaleza de la deformación horizontal del terreno ε_h (compresión o tracción) viene definida por la curvatura o concavidad del perfil de asientos y tiene implicaciones en la predicción de daños.

En las zonas de deflexión de arrufo (*sagging*) (ver figura 4) se generan deformaciones de compresión ($\varepsilon_h < 0$) y en consecuencia, una contribución favorable a la reducción del daño, aunque a menudo suele despreciarse. En las zonas de deflexión de quebranto (*hogging*) las deformaciones generadas son de tracción ($\varepsilon_h > 0$) y por ello tienden a incrementar el daño en el edificio (Burland, 2008).

En el resto del artículo se utilizarán los nombres ingleses de dichos modos de deflexión debido a su uso generalizado.

3. Aplicación del método de la viga equivalente en 3D

Las máximas deformaciones de tracción en la viga debidas a flexión pura (ε_{br}) y cortante puro (ε_{dr}) –ecuaciones (1) y (2)– requieren del cálculo de las máximas deformaciones debidas a la deflexión de la viga en flexión pura, ε_{bmax} , y cortante puro, ε_{dmax} , dadas por las expresiones de Burland y Wroth (1974):



**FUNDACIÓN
CAMINOS**

**FUNDACIÓN
CAMINOS**

**FUNDACIÓN
CAMINOS**

**FUNDACIÓN
CAMINOS**

**FUNDACIÓN
CAMINOS**

La fuerza de los ingenieros de Caminos

El Think Tank que proyecta la profesión en la sociedad

FUNDACIÓN CAMINOS



**FUNDACIÓN
CAMINOS**

**FUNDACIÓN
CAMINOS**

**FUNDACIÓN
CAMINOS**

**FUNDACIÓN
CAMINOS**

**FUNDACIÓN
CAMINOS**

$$\epsilon_{bmax} = \frac{\frac{\Delta}{l}}{\left(\frac{l}{12t} + \frac{3I}{2aH} \frac{E}{G}\right)} \quad (17)$$

$$\epsilon_{dmax} = \frac{\frac{\Delta}{l}}{\left(1 + \frac{HI^2}{18I} \frac{G}{E}\right)} \quad (18)$$

donde H es la altura de la viga, I es la inercia por unidad de longitud en profundidad de la pared (equivalente a $H^3/12$), t es la altura de la fibra neutra y a la altura de la fibra donde se determina la deformación deseada. Por ejemplo, en caso de deflexión de sagging, la fibra neutra se considera a media altura de la pared ($t = H/2$). En caso de deflexión de hogging, la fibra neutra se considera ubicada en la fibra superior ($t = H$). Las deformaciones se calculan en la posición más crítica de la fibra neutra, por ello $a = t$ en ambos casos.

Δ/l son los respectivos ratios de deflexión máximos en cada zona: l es la distancia horizontal entre dos puntos de referencia y Δ es la deflexión relativa entre esos dos puntos. Δ viene dada en cada punto por la diferencia entre el perfil de asientos y una línea recta conectando los asientos en los extremos del edificio y en los puntos de inflexión (figura 4). Sin embargo, en casos de edificios muy largos, este criterio puede conllevar sobreestimaciones de

Δ , especialmente en las zonas de *hogging*. Para ello, en Mair et al. (1996) se propuso delimitar el área de influencia del túnel a aquellas zonas donde el asiento fuera $|S| \geq 1$ mm y consecuentemente, determinar las deflexiones Δ y la deformación ϵ_h teniendo en cuenta sólo la parte del edificio situada dentro de dicha área.

El cálculo de las ecuaciones (1)-(2) y (17)-(18) se realiza separadamente en las zonas de *sagging* y *hogging* y se determina el caso crítico (Mair et al., 1996). Dado que el campo 3D de asientos se describe mediante curvas Gaussianas, el número de puntos de inflexión a lo largo de una pared del edificio será 0, 1 o 2, dependiendo de su longitud l_{build} , de la distancia del punto de referencia \hat{A} al origen de coordenadas y de la alineación θ . Por eso, la longitud l_{build} puede dividirse en tres partes: l_{hog1} , l_{hog2} y l_{sag} (figura 4), dando así lugar a tres ratios de deflexión diferentes: Δ_{hog1}/l_{hog1} , Δ_{hog2}/l_{hog2} y Δ_{sag}/l_{sag} . El valor de ϵ_h en las ecuaciones (1)-(2) también se determina separadamente según la zona de deflexión.

En consecuencia, el daño en la pared se determina con el máximo valor de deformación ϵ_{max} entre:

$$\epsilon_{max} = \max [\epsilon_{br}^{sag}, \epsilon_{dr}^{sag}, \epsilon_{br}^{hog,1}, \epsilon_{dr}^{hog,1}, \epsilon_{br}^{hog,2}, \epsilon_{dr}^{hog,2}] \quad (19)$$

donde ϵ_{br}^{sag} , $\epsilon_{br}^{hog,1}$ y $\epsilon_{br}^{hog,2}$ se obtienen mediante la ecuación (17) y ϵ_{dr}^{sag} , $\epsilon_{dr}^{hog,1}$ y $\epsilon_{dr}^{hog,2}$ mediante ecuación (18).

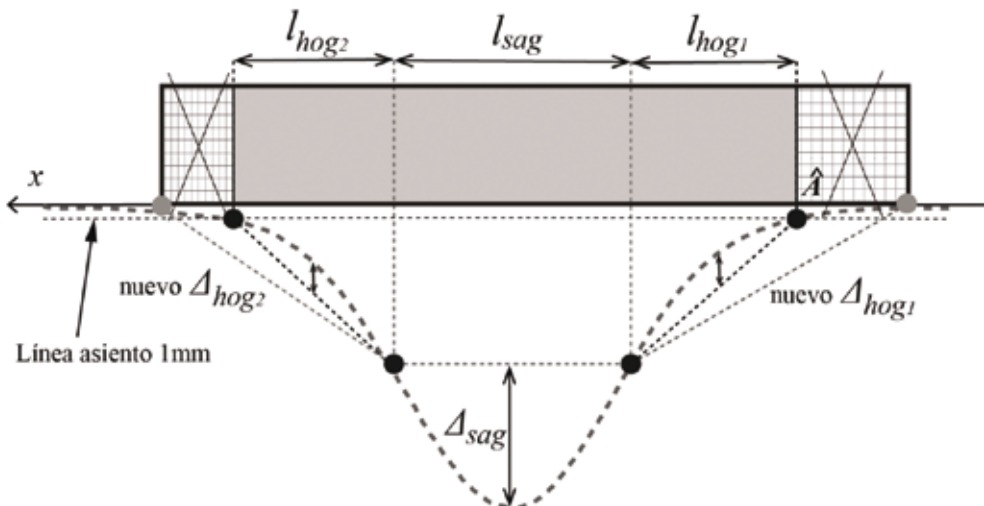


Fig. 4. Parámetros relevantes del método de la viga equivalente

El valor de ε_{max} es posteriormente comparado con umbrales los ε_{lim} de la tabla 1.

4. Aplicación del método de la viga equivalente en 3D a un caso real

Predicción de los daños

A continuación, se muestra la aplicación del método presentado a un grupo de edificaciones afectado por la construcción del túnel de la línea L9 del Metro de Barcelona. Los edificios, ubicados en el barrio del Bon Pastor, representan una tipología común de finales de los años 1920. El análisis se lleva a cabo en la fachada de un grupo de seis casas situadas en la calle Sanet. La selección de dichos edificios se justifica por su proximidad al eje del túnel y por la elevada subsidencia acaecida durante la excavación, en parte debida a la relativa baja profundidad del túnel (23 m al eje del túnel), su gran diámetro (12 m) y la poca capacidad portante del terreno. El asiento máximo encima del eje del túnel fue de 41 mm, incrementándose hasta 54 mm durante los meses posteriores al paso de la tuneladora a causa de la consolidación del terreno.

El terreno en la zona de estudio es claramente sedimentario y presenta una gran variedad de arenas, gravas y bloques en matriz arenosa, debido a la proximidad del río Besòs. Para este tipo de terreno se asume un valor del parámetro de forma del asiento K igual a 0,3 (Burland, 2008). Los valores típicos de la pérdida de volumen del terreno en excavaciones mediante TBM-EPB (*Earth Pressure Balance*) suelen asumirse entre 0,3 % y 0,6 % con valores máximos del 1,0 % (Gatti y Cassani, 2007). En suelos granulares como el presente, los valores pueden ser ligeramente superiores, especialmente cuando la excavación discurre por debajo del nivel freático. Por este motivo se considera una pérdida del 0,7 %.

La fachada tiene una longitud de $l_{build} = 46$ m y está alineada $\theta = +26^\circ$ con respecto al eje del túnel. La altura de la fachada es $H = 3$ m y con ello la inercia por unidad de longitud es $I = 2,25m^4/m$. Se asume una relación $E/G = 2,5$ típica para estructuras elásticas lineales, isótropas, homogéneas y con valores de Poisson entre 0,2 y 0,3 (Devriendt, 2003).

En las figuras 5 y 6 se representan los valores de ε_{max} para diferentes posiciones del frente de excavación desde $y_s = +90$ m hasta $y_s = -30$ m y para varias alineaciones θ de

la fachada. Puede observarse una notable variabilidad en la predicción del daño θ según la alineación considerada. El daño predicho para la alineación real ($\theta = +26^\circ$) es $\varepsilon_{max} = 0,160$ %. La mayor afección se daría para el caso transversal ($\theta = 0^\circ$), mientras que para el caso $\theta = +60^\circ$, ε_{max} se reduciría un 70 % ($\varepsilon_{max} = 0,053$ %) con respecto al caso transversal. Es especialmente interesante ver la diferencia del daño predicho entre los casos $\theta = +60^\circ$ y $\theta = -60^\circ$, siendo éste último mucho más desfavorable, con incremento de ε_{max} del 130 %. Así, las posibles estimaciones de los daños según la alineación variarían entre las categorías 1 y 3 de la clasificación de la tabla 1.

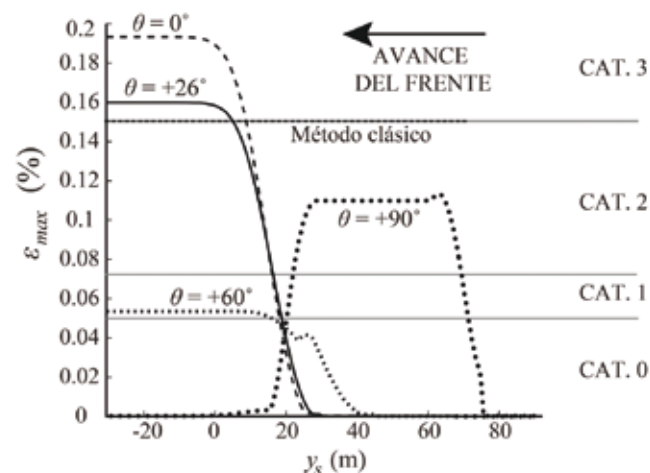


Fig. 5. Evolución de ε_{max} según la posición de la tuneladora y_s y la alineación θ de la fachada para $\theta = 0^\circ, 26^\circ, 60^\circ$ y 90°

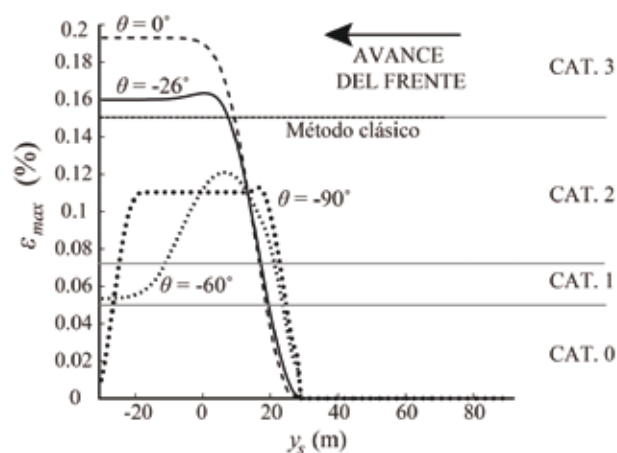


Fig. 6. Evolución de ε_{max} según la posición de la tuneladora y_s y la orientación θ de la fachada para $\theta = 0^\circ, 26^\circ, 60^\circ$ y 90°



Fig. 7. Proyección del perfil de asentamientos transversal al túnel (sección A-A') en el plano de la fachada (sección B-B')

Comparación de resultados con la predicción del método clásico y con el levantamiento de daños

Como se ha mencionado en la Sección 1, la predicción de daños en casos de edificios no transversales al eje del túnel se aborda con la proyección del perfil de asentamientos a lo largo del eje de la pared analizada. En la figura 7 puede verse dicha proyección (por ejemplo entre los puntos a y b), así como la posición de la fachada (sección B-B'), el eje del túnel (traza discontinua) y las líneas que unen los puntos con igual valor de asiento generado, siendo éstas paralelas al eje del túnel.

Asumiendo un radio de curvatura grande de la traza, puede proyectarse el perfil de asentamientos transversal en el plano de la fachada mediante la siguiente expresión:

$$S = S_{max} \cdot \exp\left(-\frac{m^2}{2i^2}\right) \tag{20}$$

Donde:

$$m = \frac{x}{\cos\theta} \tag{21}$$

En la figura 7 y la tabla 2 se muestra la comparación de resultados obtenida con el nuevo método analítico 3D y el

		$\epsilon_{h,mean}$	$\epsilon_{b,max}$	$\epsilon_{d,max}$	ϵ_{br}	ϵ_{dr}	Categoría estimada de daños
Método analítico 3D	<i>Sagging</i>	0,000 % (*)	(+) 0,071 %	(+) 0,017 %	(+) 0,071 %	(+) 0,017 %	Muy ligeros (CAT. 1)
	<i>Hogging</i>	(+) 0,050 %	(+) 0,110 %	(+) 0,008 %	(+) 0,160 %	(+) 0,051 %	Moderados (CAT. 3)
Método tradicional	<i>Sagging</i>	0,000 % (*)	(+) 0,075 %	(+) 0,019 %	(+) 0,075 %	(+) 0,019 %	Muy ligeros (CAT. 1)
	<i>Hogging</i>	(+) 0,052 %	(+) 0,103 %	(+) 0,005 %	(+) 0,150 %	(+) 0,047 %	Moderados (CAT. 3)

Tabla 2. Comparación de resultados entre el método analítico 3D y el método clásico (*se desprecia la contribución de la deformación horizontal del terreno en las zonas de sagging)



Fig. 8. Fisuras generadas en la fachada de las casas más próximas al eje del túnel

método clásico de proyección. La diferencia en el valor de ε_{max} en ambos casos es de sólo un 7 %, con una categoría estimada de daños ‘moderada’ (categoría 3). Esta baja diferencia en la predicción de ε_{max} se debe a la proximidad del caso analizado ($\theta = +26^\circ$) al caso transversal. No obstante, las estimaciones de los daños a partir de valores de $\theta > +30^\circ$ podrían ser sensiblemente distintas.

El levantamiento de daños disponible muestra la aparición de varias fisuras iniciadas en los ángulos de ventanas y puertas y que se prolongan hasta la marquesina de la fachada (figura 8). La apertura de fisuras podría estimarse entre 1 y 3 mm, clasificándose como ‘daños ligeros’ (categoría 2). Así pues, las predicciones obtenidas tanto con el método 3D como con el método clásico serían conservadoras.

Importancia del área de influencia del túnel

Una predicción más realista de los daños se obtuvo en Camós y Molins (2014) también con el método clásico, proyectando el perfil de asientos y considerando los mismos valores de los parámetros descriptivos, siendo pero la categoría estimada ‘daños ligeros’ (categoría 2). La razón de dicha diferencia se explica en el cálculo de las deflexiones, ya que para ello se consideró la longitud total del edificio, es decir, no se aplicó el criterio de Mair et al. (1996) que descarta las partes del edificio sujetas a asientos inferiores a 1 mm.

Para el cálculo de la deformación horizontal del terreno ε_h en cambio sólo se consideró la parte más crítica de la fachada, descartando así una longitud de 20 m de pared y evitando una subestimación de ε_h que condujera a predicciones irrealistas de los daños. Este hecho refleja la importancia de la definición del área de influencia del túnel. En el caso analizado adquiere una especial relevancia debido a la larga longitud de pared ($l_{build} = 46$ m) y al perfil apuntado de asientos generado ($K = 0,3$). Esto provoca una concentración de desplazamientos verticales de la fachada en su parte más próxima al túnel y deja la otra parte sometida a asientos prácticamente nulos. Por eso, el cálculo de las deflexiones Δ y de la deformación ε_h puede presentar diferencias substanciales según la longitud de edificio considerada, la cual debe siempre escogerse bajo criterio ingenieril.

Conclusiones

En el presente artículo se ha presentado el desarrollo de una nueva ecuación para el cálculo de la deformación horizontal del terreno que permite la aplicación del método de la viga equivalente de Burland y Wroth en 3D para edificios ubicados en cualquier posición con respecto al eje del túnel.

El método presentado se ha aplicado a un caso real de edificios afectados por la excavación del túnel de la L9 de Metro en Barcelona. La daños estimados han resultado ser

‘moderados’, lo que corresponde a una categoría 3 según la clasificación de Burland. En el artículo se muestra cómo el valor estimado de la máxima deformación de tracción en la pared considerada puede variar notoriamente según su alineación con respecto del eje del túnel, con reducciones de hasta el 70 %. El caso más desfavorable corresponde a la pared alineada transversalmente con respecto al eje del túnel.

Los resultados obtenidos se han comparado con el método clásico de predicción, donde se aplica la proyección del perfil transversal de asientos a lo largo del eje de la pared analizada (desviada en este caso 26°). Debido a la semejanza del caso analizado al caso transversal, la diferencia en el valor predicho de la máxima deformación de tracción en la pared es de tan sólo un 7 %. A su vez, se demuestra como dicha diferencia podría ser notoriamente superior para alineaciones de pared alejadas del caso transversal.

Las estimaciones de ambos métodos han resultado ser conservadoras con respecto a los daños reales, ya que el levantamiento de daños sugiere su clasificación como ‘ligeros’ (correspondientes a la categoría 2 en la escala de Burland). En ese sentido, el presente estudio enfatiza

la importancia de la definición del área de influencia del túnel. Ésta define la longitud de edificio a considerar para el cálculo de las deflexiones y de la deformación horizontal del terreno. Debido a la larga longitud de pared y al apuntado perfil de asientos del caso estudiado, dicha definición ha resultado ser especialmente determinante.

Agradecimientos

Los autores agradecen el soporte del Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) y del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) en el desarrollo de este trabajo dentro del marco del proyecto SUBTIS (“*Study of the Sensitivity of Urban Tunnels to Tunneling Induced Settlements*” – BIA-2009-13233) y la beca predoctoral FPI – BES-2010-030132. **ROP**

Referencias

- Attewell, P. B. y Woodman, J. P. (1982) *Predicting the dynamics of ground settlement and its derivatives caused by tunnelling in soil*. *Ground Engineering*, 15 (7), 13-22 & 36.
- Attewell, P.B., Yeates, J. y Selby, A.R. (1986) *Soil movements induced by tunneling and their effects on pipelines and structures*. Blackie Academic & Professional, Glasgow .
- Boscardin, M.D. y Cording, E.J. (1989) *Building response to excavation-induced settlement*. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE , 115(1), 1-21.
- Burland, J.B. (2008) *The assessment of the risk of damage to buildings due to tunnelling and excavations*. Jornada Técnica Payma Cotas: Movimiento de edificios inducidos por excavaciones. pp. 3.
- Burland, J.B., Broms, B. y De Mello, V.F.B. (1977) *Behaviour of foundations and structures*. *Proc. 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundations Eng.*, 2, 495-546.
- Burland, J.B. y Wroth, C.P., (1974). *Settlement of buildings and associated damage*. London: Pentech Press.
- Camós, C., Molins, C. y Arnau, O. (2014). *A case study of damage on masonry buildings produced by tunneling induced settlements*. *International Journal of Architectural Heritage*, 8, 602-625.
- Camós, C. y Molins, C. (2015). *3D Analytical Prediction of Building Damage Produced by Tunneling Subsidence*. Enviado a *Tunnelling and Underground Space Technology Journal*.
- Camós, C. (2015). *Sensitivity of Urban Tunnels to Tunneling Induced Settlements*. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. (Enlace: <http://hdl.handle.net/10803/287981>).
- Fargnoli, V., Boldini, D., Amorosi, A. (2013). *TBM tunnelling-induced settlements in coarse-grained soils: The case of the new Milan underground line 5*. *Tunnelling and Underground Space Technology* 38: 336–347.
- Kappen, J.M.J. (2012). *Three-dimensional numerical analysis of tunnelling induced damage: the influence of masonry building geometry and location*. *Master Thesis, Delft University of Technology* (The Netherlands).
- Nomoto, T., Mori, H., Matsumoto, M., 1995. *Overview on ground movements during shield tunnelling – a survey on Japanese shield tunnelling*. In: *Proc. Int. Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, Balkema, pp. 345–35.
- O'Reilly, M. P. y New, M. 1982. *Settlements above tunnels in the United Kingdom—Their magnitude and prediction*. In *Proceedings of Tunnelling '82*. London, UK: Institution of Mining and Metallurgy, 173–181.
- Peck, R.B. (1969) *Deep excavations and tunneling in soft ground*. SOA Report, 7th Int. Conf. SM&FE.