



CÁLCULO DE PLATAFORMAS FERROVIARIAS MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS

Pablo Mira Mc Williams; Manuel Pastor Pérez

Centro de estudios y técnicas aplicadas (CETA)

Centro de estudios y experimentación de obras públicas (CEDEX)

Ministerio de Fomento

Alfonso XII 3 y 5 - 28014 Madrid

Jorge Nasarre y de Goicoechea

Grupo de proyectos

Ministerio de Fomento-RENFE

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es presentar un procedimiento de cálculo por elementos finitos de plataformas ferroviarias que consiste en la obtención de una curva que relaciona tensiones dinámicas sobre la plataforma con el parámetro de dimensionamiento. En primer lugar se calcula el valor de la tensión dinámica admisible sobre la plataforma mediante la ley de Dormon que tiene en cuenta otros parámetros de proyecto tales como intensidades de tráfico y coeficientes de mantenimiento y con ayuda de la curva se obtiene el valor del parámetro de dimensionamiento. Se presenta un ejemplo de aplicación a la adaptación a tráfico de gran velocidad de la línea Valencia-Barcelona en su tramo Sagunto-Moncófar, en el que el parámetro de dimensionamiento es el espesor de subballasto añadido a la plataforma existente. Los puntos en que se apoya la estimación de la curva de dimensionamiento se obtienen mediante un cálculo realizado con elementos finitos.

1. INTRODUCCIÓN

En el segundo apartado se describe de forma detallada el procedimiento que se ha seguido en el cálculo.

Finalmente, en el tercer apartado se presenta la aplicación del procedimiento a la adaptación a tráfico de gran velocidad de la línea Valencia-Barcelona en su tramo Sagunto-Moncófar. Se detallan los parámetros geométricos y mecánicos del cálculo, concluyendo con la presentación y comentario de resultados.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO

El procedimiento de cálculo requiere la realización de una serie de labores previas, consistentes en la caracterización geomecánica de los materiales presentes en la zona de proyecto mediante ensayos geotécnicos y experiencia previa en terrenos similares., así como división de la zona en una serie de tramos de características geomecánicas aproximadamente homogéneas

El método que se presenta es general, pudiéndose aplicar a diferentes estrategias de proyecto como por ejemplo, caracterización de la mejora requerida en las propiedades geotécnicas de la plataforma, obtención del espesor necesario de la capa de subbalasto , obtención del espesor necesario de las capas adicionales para reforzar las ya existentes, etc.

Sin embargo, en este artículo y para concretar las ideas se supondrá que el objetivo es la determinación del espesor de la capa de subbalasto adicional a disponer en una vía existente para su mejora y adaptación a nuevas condiciones de tráfico, aunque como se ha comentado la metodología presentada es más general. Por lo tanto, dicho espesor será el único parámetro geométrico no conocido de la sección, debiendo ser fijos los restantes. El valor del espesor de subbalasto será función de la relación entre las tensiones dinámicas sobre la plataforma ferroviaria en la situación de referencia u original y dichas tensiones en la situación de proyecto.

Las tensiones dinámicas en la plataforma antes mencionadas se calcularán siguiendo el procedimiento que se detalla en [1]. Dicho cálculo requerirá la determinación previa de las tensiones y desplazamientos debidos a sollicitaciones estáticas.

Las relaciones anteriormente mencionadas vienen dadas por la llamada ley de Dormon, también tratada en [1]. y que en su versión más general relaciona las tensiones sobre la plataforma, las intensidades de tráfico y los coeficientes de mantenimiento de dos vías ferroviarias comparables (misma antigüedad, misma estrategia de mantenimiento) mediante la siguiente expresión :



$$\frac{\sigma}{\sigma'} = \left(\frac{T'}{T} \right)^{0.2} \left(\frac{k}{k'} \right)^{0.2} \quad (1)$$

donde:

- σ y σ' = Tensiones en cada plataforma
- T y T' = Tráficos en cada vía ferroviaria
- k y k' = Coeficientes de mantenimiento en cada vía ferroviaria
- k = Coeficiente de mantenimiento = I/I_m
- I = Número de intervenciones anuales de mantenimiento
- I_m = Número medio de intervenciones anuales de mantenimiento sobre vías comparables

Teniendo en cuenta lo anterior se obtendrá una curva para cada sección tipo que relacione tensión dinámica sobre la plataforma con espesor de subbalasto adicional. Dicha curva se obtendrá mediante tres puntos de la misma correspondientes a tres valores de espesor de subbalasto en cuyo rango se prevé estará la solución del problema.

De acuerdo con lo explicado hasta este punto, el procedimiento de cálculo se puede resumir en las siguientes etapas:

- 1ª) Obtención de las tensiones estáticas verticales en la plataforma y la rigidez estática mediante el método de los elementos finitos, para cada sección tipo, para la situación actual y para la situación de proyecto con cada uno de los espesores de subbalasto considerados. Se llama rigidez estática al cociente entre la sollicitación estática puntual sobre el carril correspondiente a un eje y el desplazamiento vertical bajo la misma. La situación de referencia será la que nos proporcionará las tensiones de referencia. Por lo tanto en esta primera etapa tendremos que llevar a cabo cuatro análisis de elementos finitos por cada sección tipo : tres de ellos para la curva que define la situación de proyecto y uno para la situación de referencia.
- 2ª) Suponiendo que la rigidez estática y la dinámica son iguales, se obtienen las sollicitaciones dinámicas $q_d = q_s + 2\sigma_q < 17$ t siguiendo el método presentado en [1]. Para ello se tendrán en cuenta las velocidades de proyecto.

- 3ª) A partir de aquí se obtienen las tensiones dinámicas mediante otros cuatro análisis de elementos finitos por sección, esta vez con las sollicitaciones dinámicas calculadas en el apartado anterior.
- 4ª) Obtención de las curvas que relacionan tensiones dinámicas con espesor de subbalasto adicional. Para ello se interpola mediante una expresión del tipo :

$$\sigma = a.e^2 + b.e + c \quad (2)$$

donde s y e son tensiones dinámicas y espesores respectivamente y los coeficientes a , b y c se obtienen a partir de los tres puntos de que se dispone para cada curva. De este modo se genera una curva para cada sección, todas ellas correspondientes a la situación de proyecto.

- 5ª) Conociendo los valores de la tensión dinámica σ_0 , del tráfico T_0 y del coeficiente de mantenimiento k_0 previos correspondientes a la situación actual, así como los de proyecto T y k se obtienen :

- 5.1) Las tensiones dinámicas σ en la situación de proyecto para lo cual se empleará la ley de Dormon :

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \left(\frac{T_0}{T} \right)^{0.2} \left(\frac{k}{k_0} \right)^{0.2} \quad (3)$$

- 5.2) Los espesores de subbalasto adicional requerido, empleando las curvas obtenidas en la 4ª etapa del cálculo.

3. EJEMPLO DE APLICACIÓN

3.1. INTRODUCCIÓN

El ejemplo de aplicación aquí presentado corresponde a la adaptación a tráfico de gran velocidad de la línea Valencia-Barcelona en su tramo Sagunto-Moncófar. En este caso, la situación de referencia es la situación actual de la línea. Los dos modelos básicos utilizados para el cálculo han sido por tanto los correspondientes a la situación de referencia y a la situación de proyecto. Las diferencias entre ambos son las siguientes :

- 1ª) El tipo de traviesa utilizada: bibloc RS para el primer caso y monobloc PR-90 para el segundo.



- 2ª) En la situación actual los carriles son de 54 kg/m mientras que en la situación de proyecto está previsto utilizar carriles de 60 kg/m.
- 3ª) Para cada una de estas tipologías de carriles se ha utilizado un tipo de placa de asiento distinta.
- 4ª) Se sustituyen los 25 cm de balasto antiguo por 30 cm de balasto nuevo.
- 5ª) Se introduce bajo el balasto una capa adicional de subbalasto cuyo espesor varía según la malla de cálculo de que se trate (0, 15 o 30 cm). Mediante la curva definida por estos tres espesores y el método presentado en la sección 2 se establecerá el valor concreto de ese espesor.
- 6ª) La velocidad de proyecto para la situación de referencia es de 160 km/h mientras que en la situación de proyecto es de 220 km/h.

A partir de estas características básicas se configurará cada malla de cálculo, según otros factores como la sección tipo y el espesor de subbalasto adicional.

En lo que sigue, los modelos de la situación preproyecto serán denominados Sibb00, donde i podrá ser 1,2,3 ó 4 según el número de la sección tipo de que se trate, el 00 se refiere a que no hay subbalasto adicional y el bb a las travесas bibloc, mientras que los modelos asociados a la situación de proyecto serán denominados Simbxx, donde xx son en cada caso los dígitos que representan el espesor de subbalasto adicional : 00,15 ó 30 cm, y mb alude a las travесas monobloc.

3.2. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

El tramo objeto de proyecto ha sido dividido a su vez en cuatro subtramos a cada uno de los cuales le corresponde una sección tipo. La distribución de espesores de las distintas capas para la situación preproyecto, para cada una de las secciones tipos queda esquematizada en la siguiente tabla:

S100bb Pk 30.0-32.8	S200bb Pk 32.8-35.0	S300bb Pk 35.0-40.3,40.5-45.0	S400bb Pk 40.3-40.5
Balasto (25 cm)	Balasto (25 cm)	Balasto (25 cm)	Balasto (25 cm)
Machaca (35 cm)	Machaca (0 cm)	Machaca (15 cm)	Machaca (30 cm)
Limos	Arcilla Plástica	Arcilla	Arcilla

Tabla 1

En la siguiente tabla se presenta el esquema de espesores para la situación de proyecto, donde xx corresponde al espesor de subbalasto en cm:

S1mbxx Pk 30.0-32.8	S2mbxx Pk 32.8-35.0	S3mbxx Pk 35.0-40.3,40.5-45.0	S4mbxx Pk 40.3-40.5
Balasto (30 cm)	Balasto (30 cm)	Balasto (30 cm)	Balasto (30 cm)
Subbalasto (xx cm)	Subbalasto (xx cm)	Subbalasto (xx cm)	Subbalasto (xx cm)
Machaca (35 cm)	Machaca (0 cm)	Machaca (15 cm)	Machaca (30 cm)
Limos	Arcilla Plástica	Arcilla	Arcilla

Tabla 2

El tipo de elemento utilizado en todas las mallas fue el paralelepípedo o “brick” de 20 nodos, cuadrático e isoparamétrico. Los criterios seguidos para construcción de las mallas de cálculo para cada sección tipo en las situaciones de proyecto y preproyecto han sido los que se detallan a continuación.

Dimensiones de la malla

En la dirección de la vía incluyeron en el modelo cuatro traviesas además de la traviesa cargada. En la dirección transversal a la vía la dimensión del modelo es de 3,70 m.

Como se puede observar en la tabla 2 no se ha especificado ningún valor para el espesor de la última capa, pues al tratarse del terreno natural se entiende de profundidad indefinida, al menos a efectos de cálculo. En las mallas de cálculo se ha tomado como valor tres metros. Por lo tanto las dimensiones de la malla en la dirección vertical en cada caso serán las correspondientes a la suma de los espesores de cada capa y los 3m que se asignan al terreno natural.

Modelización del raíl

Buscando representar mediante elementos de tipo “brick” cuadráticos lo más fielmente posible la resistencia a flexión del raíl, se ha tomado como dimensión horizontal de cada elemento en la dirección transversal a la vía la dimensión real de la base del patín y como dimensión vertical la necesaria para que la sección transversal del elemento tenga el mismo momento de inercia que el del raíl.

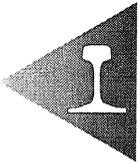
Modelización de placas de asiento

Tanto en la situación preproyecto como en la de proyecto hay placas de asiento situadas entre carril y traviesa. Las del primer caso son de 4.5 mm de espesor mientras que las del segundo son de 6 mm.



Modelización de las traviesas

Las traviesas serán de tipo bibloc RS para la situación preproyecto y monobloc PR-90 para la situación de proyecto. En ambos casos se modelan como paralelepípedos rectangulares de momento de inercia y superficie de apoyo equivalentes. Además en el caso de la traviesa bibloc se tiene en cuenta el efecto del perfil metálico mediante una restricción de desplazamientos en la dirección del mismo (la del eje x del modelo), para los puntos de la cara interior de los dos bloques que componen cada traviesa bibloc.



Modelización de interfaces traviesa-balasto

En el modelo se ha introducido una serie de acoplamientos en los nodos correspondientes a la interfaz entre traviesa y balasto. Estos acoplamientos consisten en que el nodo correspondiente a la interfaz se desdobra en dos nodos, uno correspondiente a cada material. Además se impone una restricción consistente en la igualdad del desplazamiento de ambos nodos en la dirección perpendicular al plano de la interfaz. Los restantes desplazamientos son independientes en cada nodo.

Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno validas para las dos mallas son las siguientes:

- 1º) $uz = 0$ para el plano vertical inferior ($z=0$)
- 2º) $ux = 0$ para los planos limítrofes de la malla perpendiculares al eje x
- 3º) $uy = 0$ para los planos limítrofes de la malla perpendiculares al eje y

3.3. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS

Para la modelización mecánica de carriles, placas de asiento y traviesas se ha utilizado el modelo elástico isótropo clásico. Para la modelización de los geomateriales restantes (balasto, subbalasto y terreno natural) se ha utilizado un modelo de tipo Drucker-Prager asociativo en su variante de deformación plana. La variante de deformación plana de Drucker-Prager también es conocida por el nombre de Drucker-interior pues corresponde al cono inscrito en la superficie de Mohr-Coulomb definida por el ángulo de rozamiento interno ϕ del material. Por lo tanto lo que se ha hecho es una aproximación de una superficie de rotura de Mohr-Coulomb mediante una superficie de tipo Drucker-Prager.

En base a la información procedente de los informes geotécnicos pertinentes, de informes técnicos con datos sobre las características mecánicas de traviesas y placas de asiento y de la experiencia de los ingenieros colaboradores en este proyecto las características geomecánicas atribuidas a los materiales son las que se presentan a continuación :

Material	E (kg/cm ²)	ν	c (kg/cm ²)	ϕ
Terreno Natural	60.0	0.35	0.15	25.0
Machaca	200.0	0.30	0.00	35.0
Subbalasto nuevo	1200.0	0.30	0.00	35.0
Balasto	1300.0	0.20	0.00	45.0
Traviesa bibloc	$3.0 \cdot 10^5$	0.25	-	-
Traviesa monobloc	$5.0 \cdot 10^5$	0.25	-	-
Placa de asiento bb	150 kN/mm	-	-	-
Placa de asiento mb	244 kN/mm	-	-	-
Acero carriles	$2.1 \cdot 10^6$	0.30	-	-

Tabla 3

3.4. RESULTADOS

Los resultados de los cálculos se presentan en las tablas 4 a 8, en el mismo orden en el que se han ido obteniendo a lo largo del proceso de cálculo detallado en la sección 2.

Como era de esperar las tensiones máximas son para la sección 2 que era la más desprotegida al encontrarse el balasto directamente sobre la plataforma. Esta será por tanto la que requiera mayor refuerzo en forma de subbalasto adicional.

En la figura 5 se presentan las curvas de dimensionamiento calculadas mediante interpolación a partir de la tabla 8.

4. AGRADECIMIENTOS

El contenido de este artículo forma parte de los trabajos realizados en el marco del convenio de colaboración suscrito entre el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) y el la Dirección General de Infraestructura del Transporte Ferroviario del Ministerio de Fomento y fueron realizados en colaboración con Julián Santos Mesa y José Rodríguez Castillo.

5. REFERENCIAS

- 1.- Jorge Nasarre y de Goicoechea
Aproximación a un método racional para el dimensionamiento de plataformas ferroviarias en líneas existentes.1993
- 2.- V. Profilidis
La Voie Ferrée et sa fondation : Modelisation Mathématique
Thèse de Doctorat, Ecole Nationales des Ponts et Chaussées, 1983



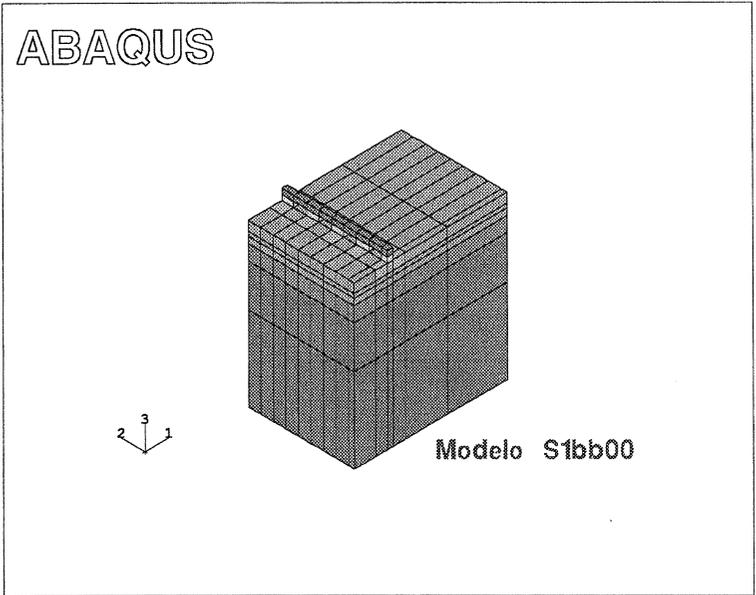
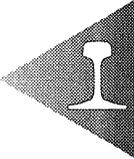


Figura 1 Malla de cálculo modelo S1bb00

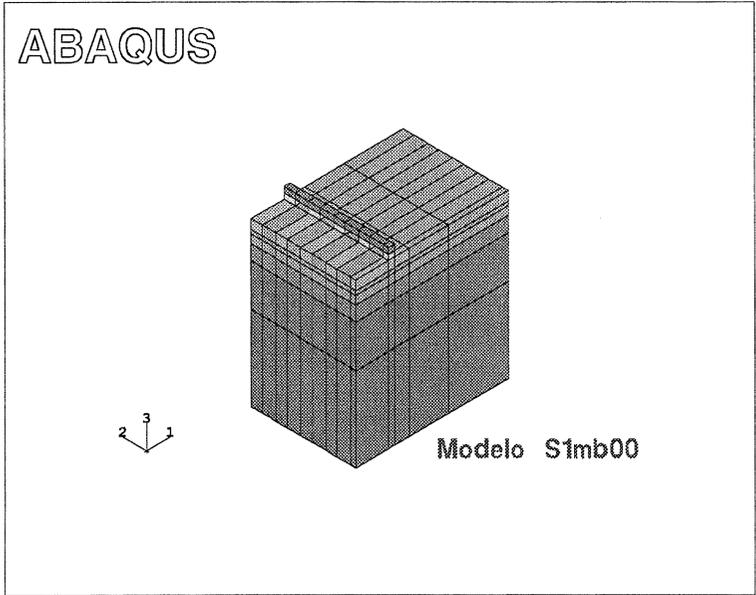


Figura 2 Malla de cálculo modelo S1mb00

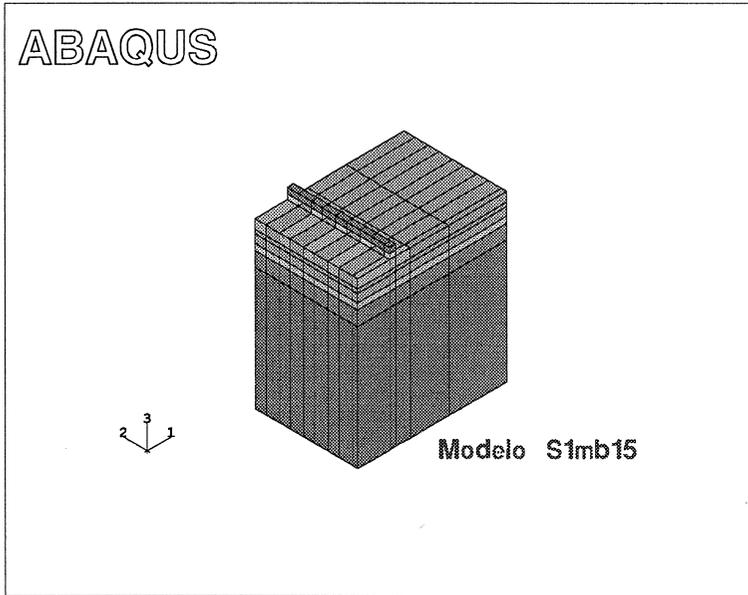


Figura 3 Malla de cálculo modelo S1mb15

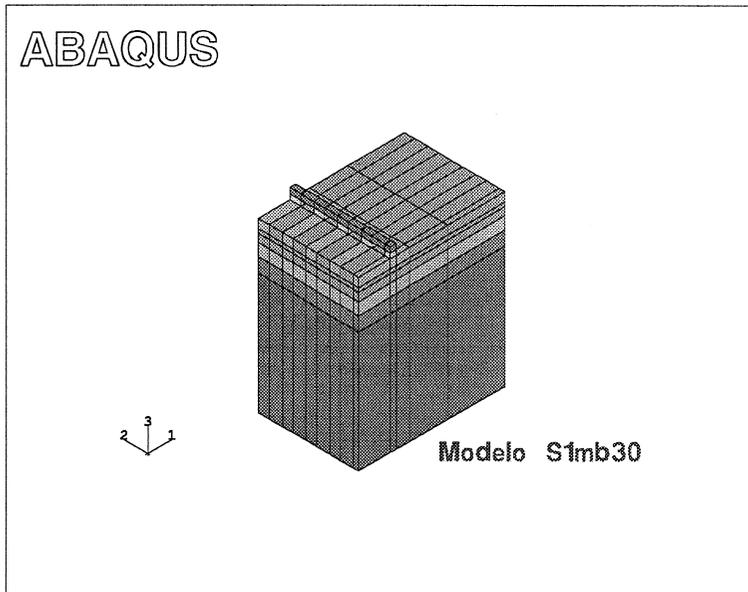


Figura 4 Malla de cálculo modelo S1mb30



Desplazamientos verticales en carril bajo carga (m)				
	S1	S2	S3	S4
bb00	-0.005139	-0.005545	-0.005363	-0.005193
mb00	-0.004340	-0.004596	-0.004487	-0.004376
mb15	-0.004132	-0.004470	-0.004256	-0.004162
mb30	-0.003857	-0.004149	-0.003957	-0.003881

Tabla 4

Tensiones verticales estáticas sobre plataforma (N/m ²)				
	S1	S2	S3	S4
bb00	-18540.0	-27937.0	-22850.0	-19442.0
mb00	-14029.0	-18115.0	-16041.0	-14441.0
mb15	-10357.0	-15681.0	-11518.0	-10629.0
mb30	-9260.0	-13655.0	-10206.0	-9486.0

Tabla 5

Rigidez estática (t/mm)				
	S1	S2	S3	S4
bb00	1.945904	1.803427	1.864628	1.925669
mb00	2.304147	2.175805	2.228661	2.285192
mb15	2.420136	2.237136	2.349624	2.402691
mb30	2.592689	2.410219	2.527167	2.576656

Tabla 6

Solicitud dinámica (N)				
	S1	S2	S3	S4
bb00	-68337.8	-68033.1	-68164.6	-68294.8
mb00	-76238.0	-75876.0	-76025.7	-76184.9
mb15	-76561.0	-76049.6	-76365.1	-76512.7
mb30	-77034.3	-76533.5	-76855.6	-76990.7

Tabla 7

Tensiones verticales dinámicas sobre plataforma (N/m ²)				
	S1	S2	S3	S4
bb00	-26228.0	-39113.0	-32144.0	-27459.0
mb00	-22058.0	-28491.0	-25257.0	-22710.0
mb15	-16533.0	-24887.0	-18302.0	-16943.0
mb30	-14992.0	-21912.0	-16465.0	-15341.0

Tabla 8



Curvas de dimensionamiento espesores-tensiones Tramo Sagunto-Moncofar

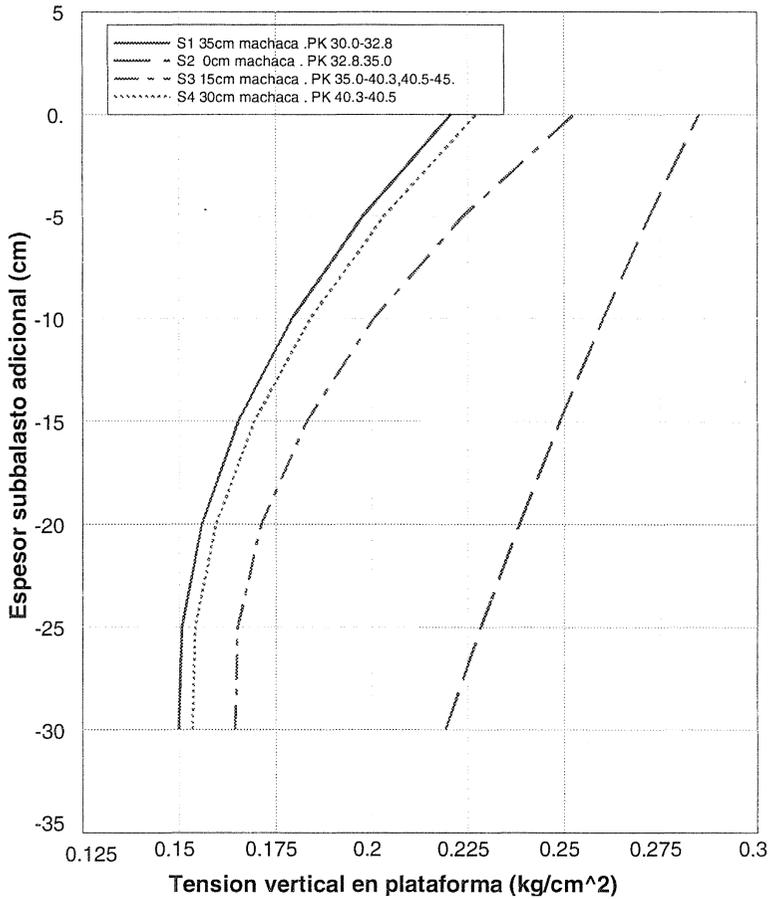


Figura 5 Curvas de dimensionamiento

