

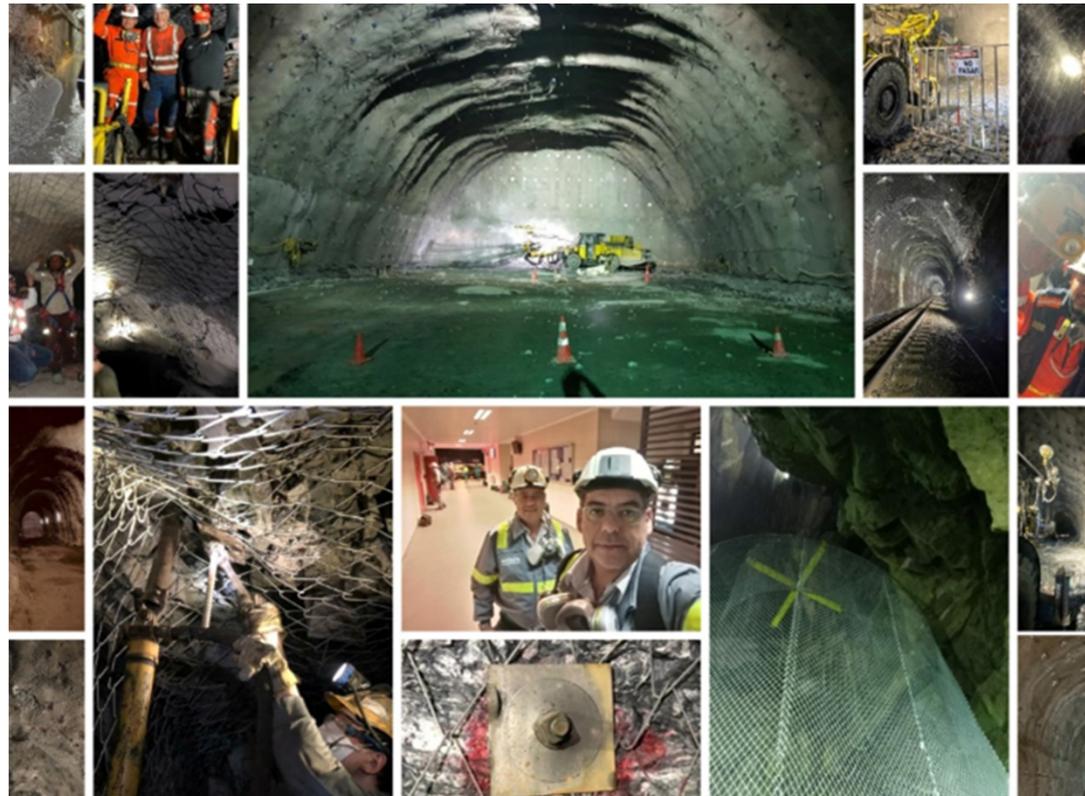
Roberto J. Luis-Fonseca
Lima, 12 Diciembre 2023

DISEÑO RACIONAL DEL SOSTENIMIENTO EN GALERÍAS SUBTERRÁNEAS BASADO EN LA CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA Q

ISCHEBECK[®]
TITAN

BRUGG
Geobrugg 
Safety is our nature

Contenido

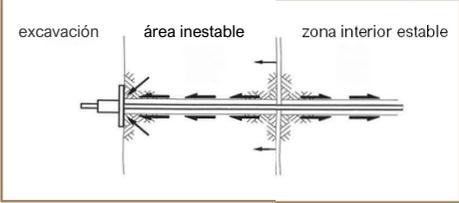
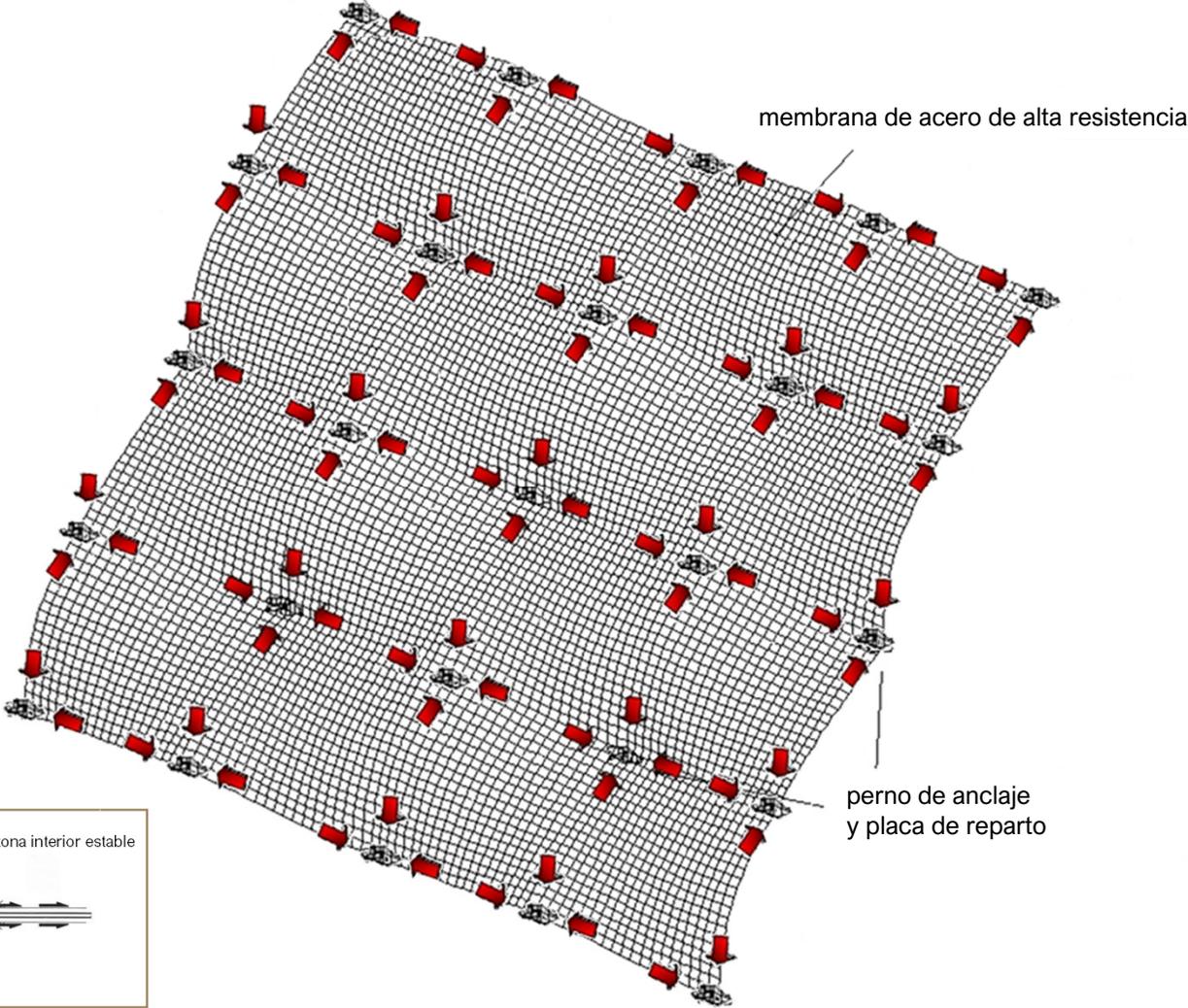
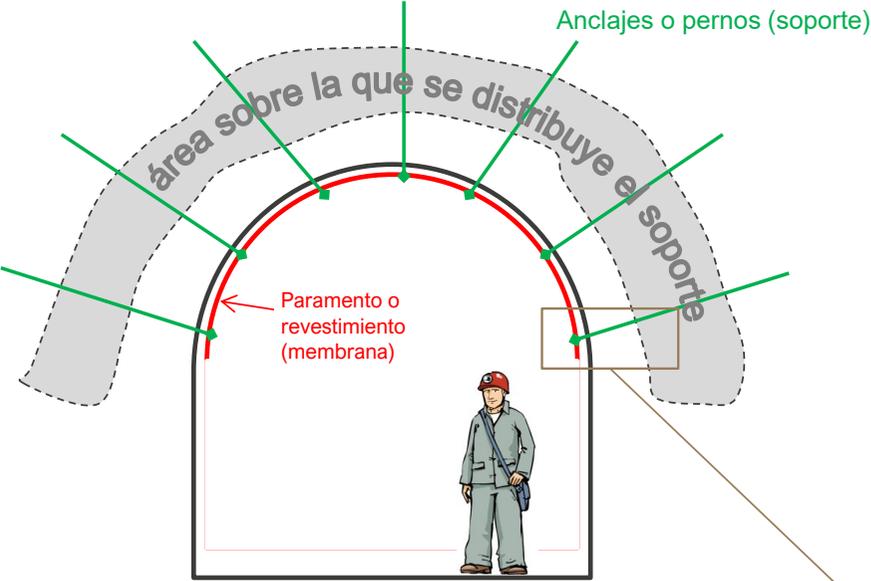


1. Soporte del terreno en excavaciones subterráneas
2. Clasificación geomecánica Q Barton
3. Soporte necesario
4. Selección de la membrana o paramento
5. Elección del patrón de anclaje
6. Control deformacional en la membrana
7. Comprobación de pernos
8. Conclusiones

Soporte en excavaciones subterráneas



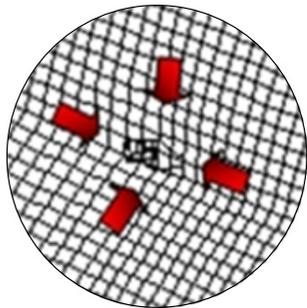
Elementos de soporte subterráneo



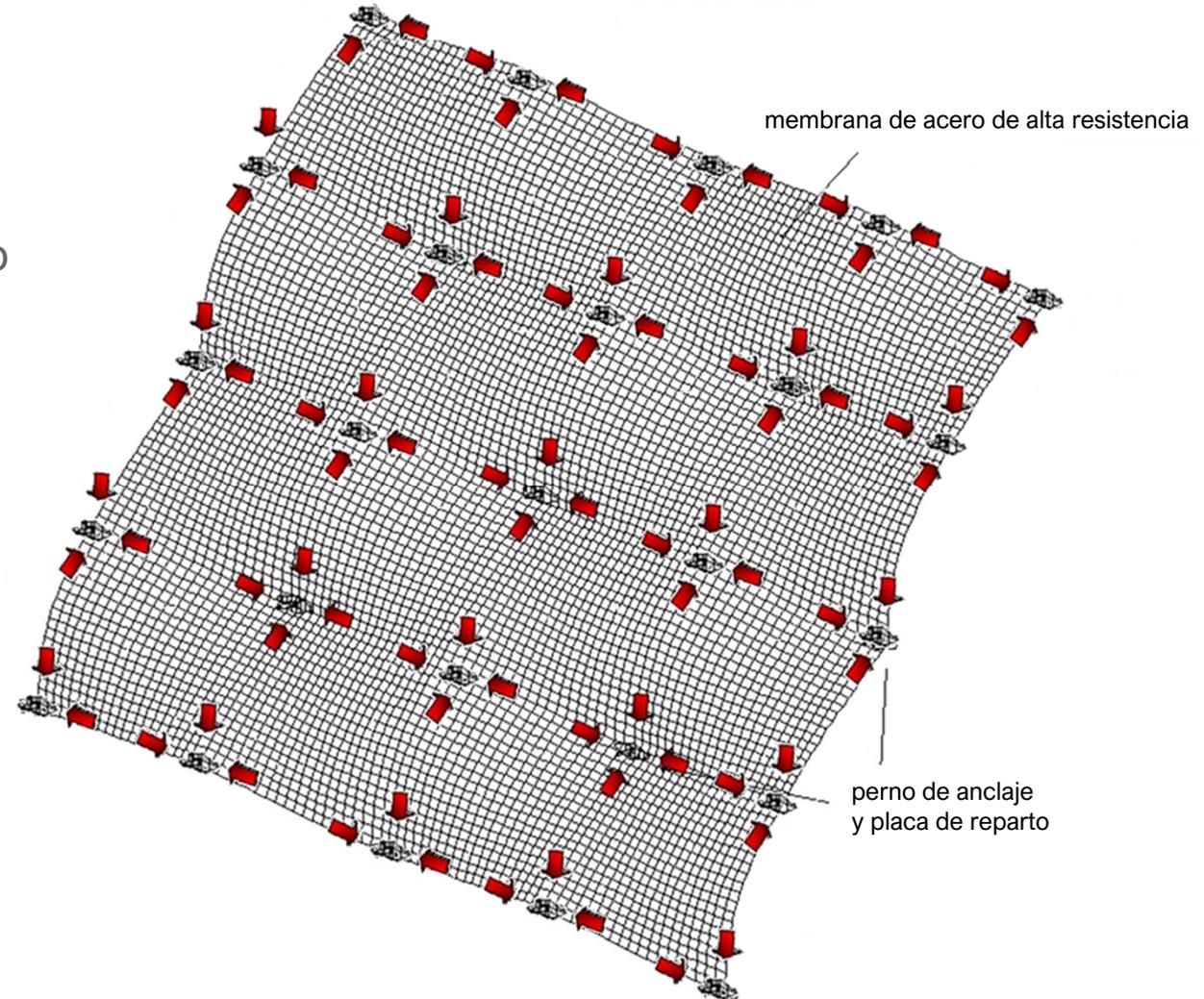
Soporte en excavaciones subterráneas

Funcionalidad de la membrana

Históricamente la malla se ha utilizado como **elemento de retención** contra desprendimientos de rocas, sin embargo, con las membranas de alta resistencia la función real es diferente: **distribución de carga y soporte del macizo**



Source: Luis-Fonseca, 2010



Dimensionamiento



clasificación geomecánica Q

presión de soporte requerida [kPa]

membrana + placa seleccionada [kPa]
(Resistencia punzonamiento)

patrón de anclaje seleccionado [m²]

control deformacional [%]

verificación del anclaje o perno

Índice de calidad del macizo rocoso



Método empírico Q por Barton

Prueba y error utilizando dos, tres, cuatro y finalmente seis parámetros, con ajustes sucesivos de las clasificaciones para obtener el mejor ajuste entre la calidad de la roca, las dimensiones de la excavación y las cantidades de soporte, dio como resultado una de las ecuaciones más simples que se utilizan regularmente en la ingeniería de rocas (Barton et al. 1974).

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

RQD	índice de calidad de la roca (Rock Quality Designation)	$\frac{RQD}{J_n}$	grado de fracturación (o tamaño del bloque)
J_n	número de familias de juntas		
J_r	rugosidad de las juntas	$\frac{J_r}{J_a}$	fricción entre las juntas (resistencia al corte entre bloques)
J_a	meteorización de las juntas		
J_w	agua en las juntas	$\frac{J_w}{SRF}$	estrés activo
SRF	factor de reducción de la tensión		

fuentes: Using the Q-system NGI, 2015

Índice de calidad del macizo rocoso



Relación de soporte de la excavación (ESR)

Además de la calidad del macizo rocoso (el valor Q), otros dos factores son decisivos para el diseño del soporte en las excavaciones y cavernas subterráneas.

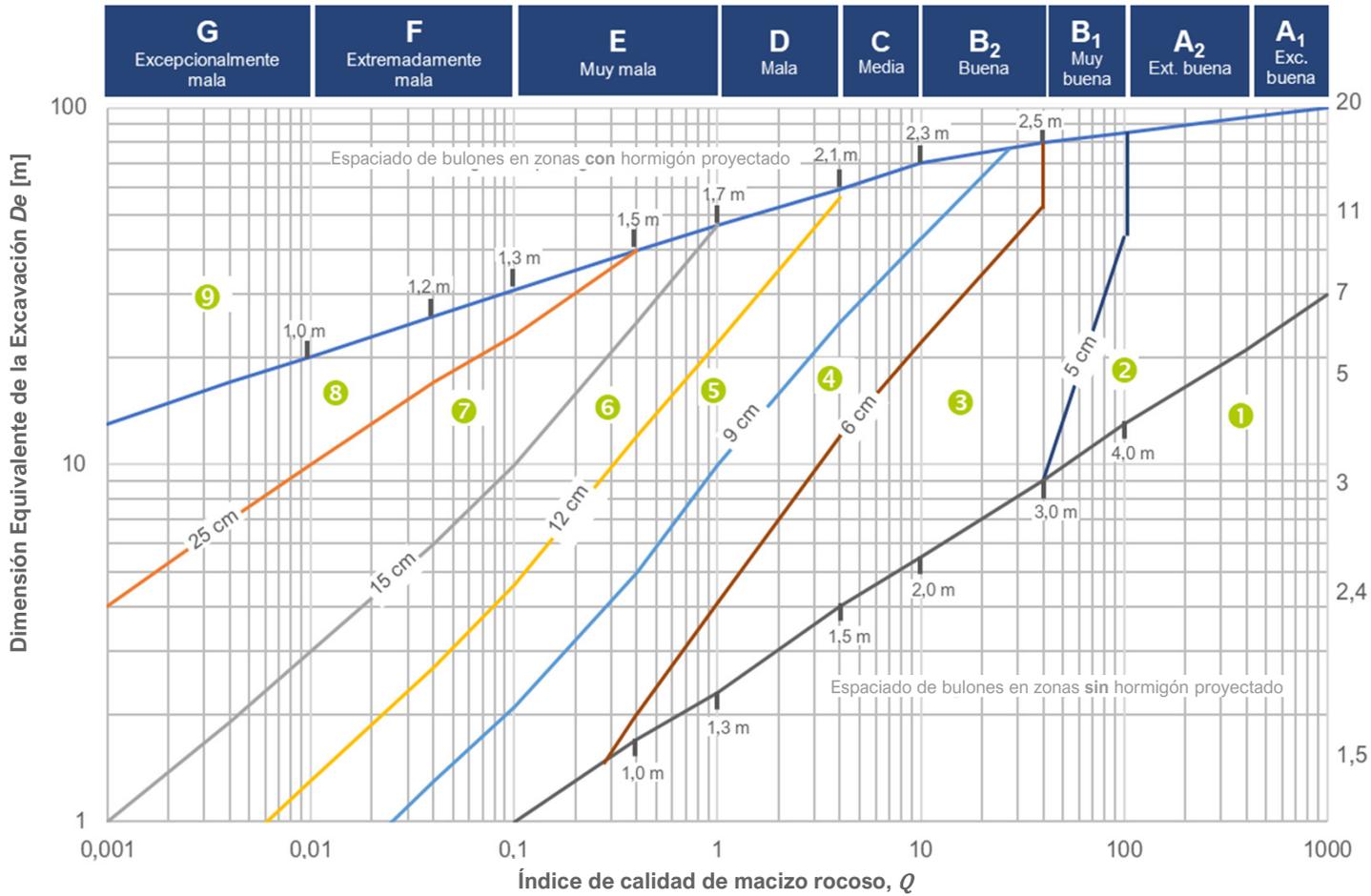
$$\frac{\text{Span or height in m}}{\text{ESR}} = \text{Equivalent dimension}$$

La luz, o dimensión crítica de la cavidad, puede ser el ancho, la altura, el diámetro equivalente o la excavación, dependiendo de la geometría final de la cavidad y de la geometría en cada fase de construcción.

ESR (Excavation Support Ratio), depende del tipo de excavación, es un factor de seguridad que modifica la Dimensión Equivalente en función del uso futuro de la obra subterránea: por ejemplo, reduce el diámetro para galerías mineras y la mayoría para cavernas, de uso industrial o civil.

fuelle: Using the Q-system NGI, 2015

Índice de calidad del macizo rocoso



fuelle: Using the Q-system NGI, 2015

Longitud de anclaje, L_e para ESR = 1

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

Índice de calidad del macizo rocoso



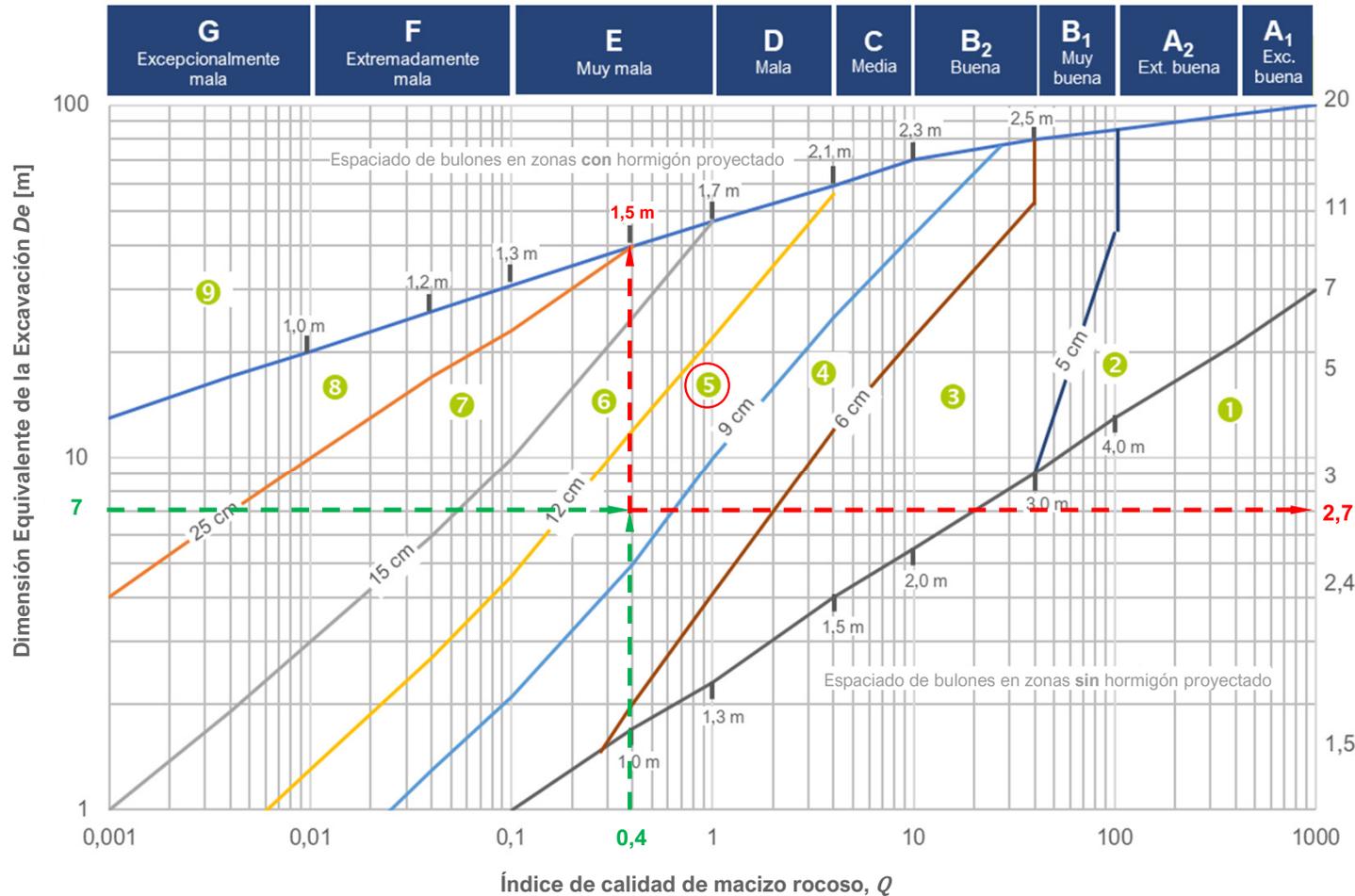
Recomendaciones de soporte permanente basadas en valores Q y De

- ① Sin sostenimiento o bulonado puntual
- ② Bulonado sistemático
- ③ Bulonado sistemático, hormigón proyectado reforzado con fibras, 5-6 cm
- ④ Hormigón proyectado reforzado con fibras y bulonado, 6-9 cm
- ⑤ Hormigón proyectado reforzado con fibras y bulonado, 9-12 cm
- ⑥ Hormigón proyectado reforzado con fibras y bulonado, 12-15 cm
- ⑦ Hormigón proyectado reforzado con fibras >15 + cerchas armadas de hormigón proyectado y bulonado
- ⑧ Revestimiento de hormigón encofrado
- ⑨ Evaluación especial

Nota: El espaciado de los pernos se basa en $\varnothing 20$ mm

fuelle: Using the Q-system NGI, 2015

Índice de calidad del macizo rocoso



Ejemplo de dimensionamiento

Datos de entrada

$Q = 0,4$ (muy mala)

Dimensión Equivalente = 7,0m

Resultado

categoría de soporte = 5

longitud de pernos = 2,7m

espaciado 1,5m

Longitud de anclaje, L_e para ESR = 1

Índice de calidad del macizo rocoso



Recomendaciones de soporte permanente basadas en valores Q y De

- ① Sin sostenimiento o bulonado puntual
- ② Bulonado sistemático
- ③ Bulonado sistemático, hormigón proyectado reforzado con fibras, 5-6 cm
- ④ Hormigón proyectado reforzado con fibras y bulonado, 6-9 cm
- ⑤ Hormigón proyectado reforzado con fibras y bulonado, 9-12 cm con pernos de 2,7m espaciados 1,5m
- ⑥ Hormigón proyectado reforzado con fibras y bulonado, 12-15 cm
- ⑦ Hormigón proyectado reforzado con fibras >15 + cerchas armadas de hormigón proyectado y bulonado
- ⑧ Revestimiento de hormigón encofrado
- ⑨ Evaluación especial

Nota: El espaciado de los pernos se basa en $\varnothing 20$ mm

fuelle: Using the Q-system NGI, 2015

Dimensionamiento



clasificación geomecánica Q

presión de soporte requerida [kPa]

membrana + placa seleccionada [kPa]
(Resistencia punzonamiento)

patrón de anclaje seleccionado [m²]

control deformacional [%]

verificación del anclaje o perno

Soporte requerido



Soporte permanente requerido en techo y hastiales (valor estimado)

Grimstad y Barton (1993) sugirieron determinar la presión de soporte permanente necesaria en el techo a partir de la evaluación del índice de calidad del macizo rocoso Q , así como de los valores de J_n (índice de juntas) y J_r (índice de rugosidad), con la siguiente

$$P_r = \frac{200 \cdot \sqrt{J_n}}{3 \cdot J_r \cdot \sqrt[3]{Q}} \quad \text{para } J_n \leq 6 \quad \text{para menos de tres familias de juntas}$$

$$P_r = \frac{200}{J_r \cdot \sqrt[3]{Q}} \quad \text{para } J_n > 6 \quad \text{para tres o más familias de juntas}$$

En el caso de los hastiales, los valores de Q se pueden aumentar usando:

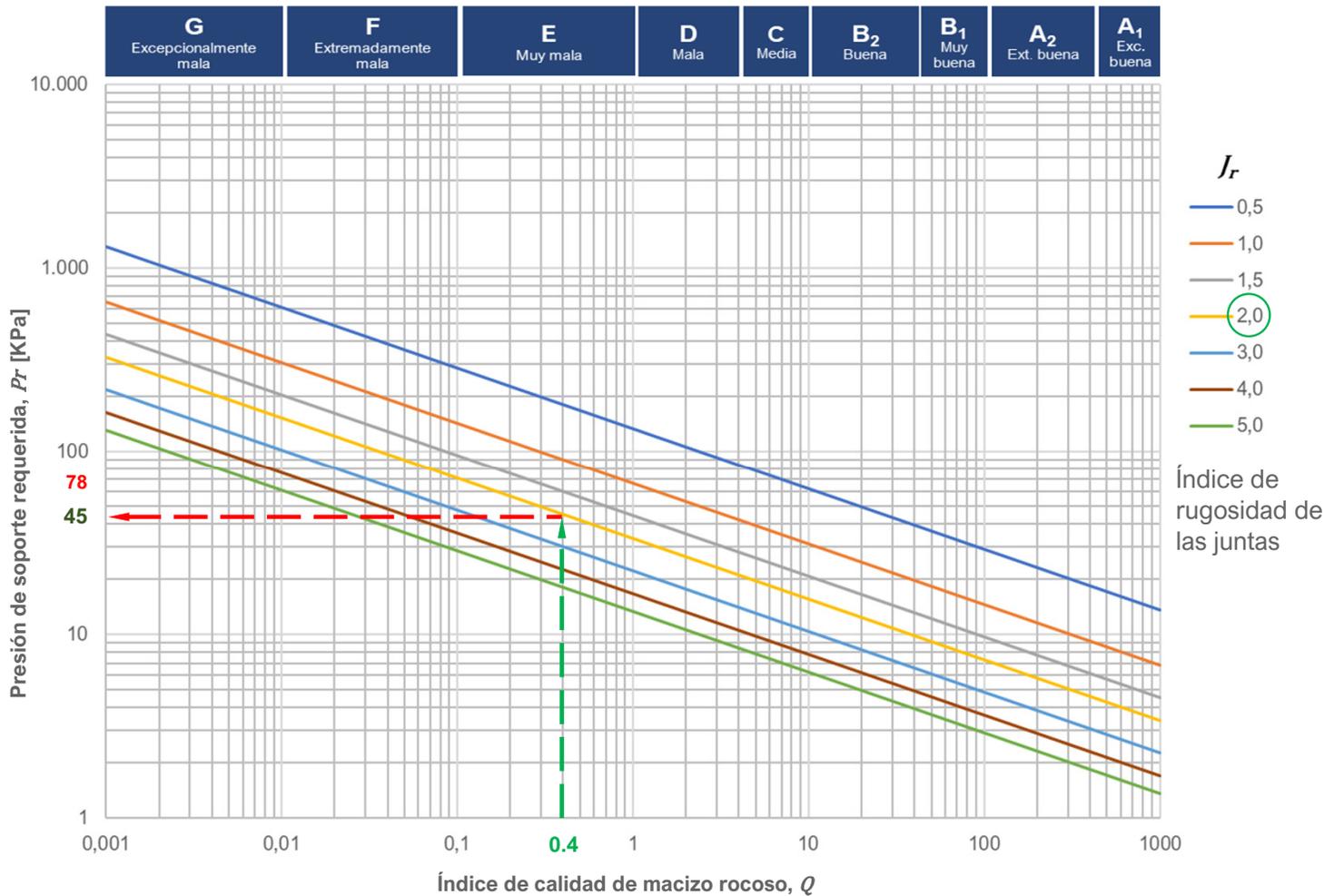
$$Q_{wall} \approx \frac{9\sqrt{3}}{8} \cdot Q^{6/5}$$

P_r : presión de sostenimiento o soporte permanente del techo, [kPa]

Nota: para soporte temporal, la regla general recomienda $5Q$ y $1,5 ESR$ (2014)

fuelle: Grimstad and Barton, 1993 and Barton and Grimstad, 2014

Soporte requerido



Ejemplo de dimensionamiento

Datos de entrada

$Q = 0,4$ (muy mala)

$J_r = 2,0$

$J_n = 3,0$

Resultado

presión de soporte requerido

$P_r = 45\text{kPa}$ (considerando $J_n = 1$)

para $J_n = 3$ corrección por $\sqrt{J_n}$

$P_{rc} = 78\text{kPa}$

Dimensionamiento



clasificación geomecánica Q

presión de soporte requerida [kPa]

**membrana + placa seleccionada [kPa]
(Resistencia punzonamiento)**

patrón de anclaje seleccionado [m²]

control deformacional [%]

verificación del anclaje o perno

Resistencia de la membrana

Soporte según la resistencia al punzonamiento de la membrana (Luis-Fonseca y Roduner, 2021)

Para las membranas de acero, la capacidad de soporte que puede brindar el paramento está en función de la resistencia al punzonamiento, con una placa de distribución de carga específica (150mm):

$$D_{R\text{ calc}} = N_{\text{wire}} \cdot T_{\text{wire}} \cdot \frac{\sqrt{3}}{3}$$

$D_{R\text{ calc}}$ Resistencia al punzonamiento de la membrana, [kN]

N_{wire} Número de puntos de contacto en la frontera de la placa de reparto

T_{wire} Resistencia a tracción de un alambre, [kN]



100x100 (3,2 – 5,9mm) 350 MPa



75x75 (3,2 – 3,8mm) 900 MPa



G80 (3-5mm) 1770 MPa



G65 (3-4mm) 1770 MPa

Resistencia de la membrana

Soporte según la resistencia al punzonamiento de la membrana (Luis-Fonseca y Roduner, 2021)

Para las membranas de acero, la capacidad de soporte que puede brindar el paramento está en función de la resistencia al punzonamiento, con una placa de distribución de carga específica (200mm):

$$D_{R\text{ calc}} = N_{\text{wire}} \cdot T_{\text{wire}} \cdot \frac{\sqrt{3}}{3}$$

$D_{R\text{ calc}}$ Resistencia al punzonamiento de la membrana, [kN]

N_{wire} Número de puntos de contacto en la frontera de la placa de reparto

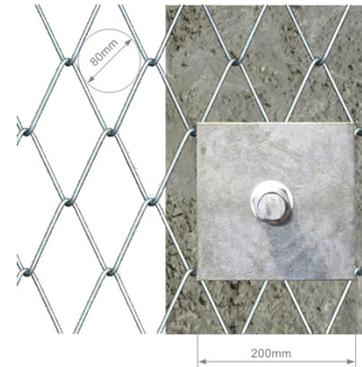
T_{wire} Resistencia a tracción de un alambre, [kN]



100x100 (3,2 – 5,9mm) 350 MPa



75x75 (3,2 – 3,8mm) 900 MPa



G80 (3-5mm) 1770 MPa



G65 (3-4mm) 1770 MPa

Dimensionamiento



clasificación geomecánica Q

presión de soporte requerida [kPa]

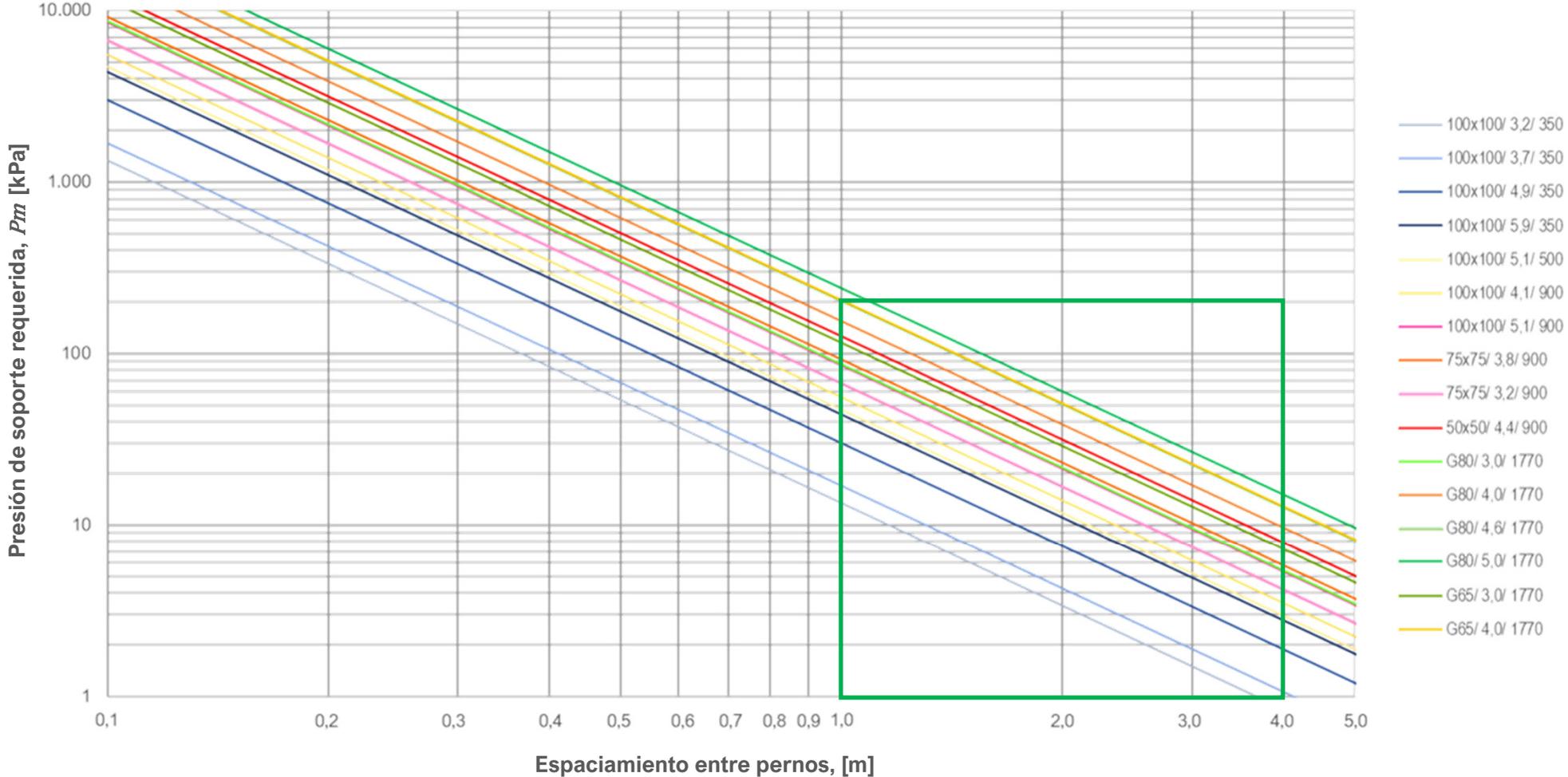
membrana + placa seleccionada [kPa]
(Resistencia punzonamiento)

patrón de anclaje seleccionado [m²]

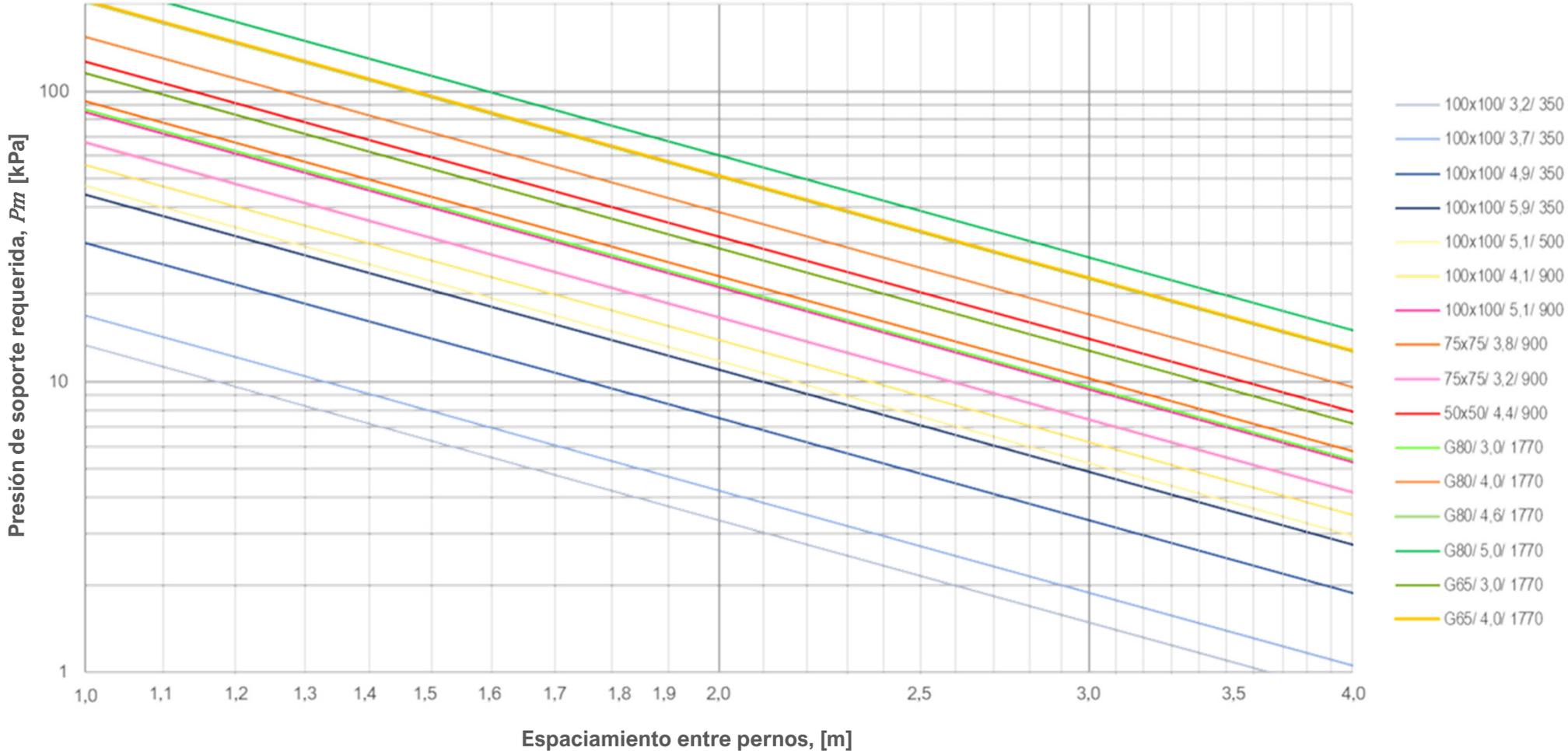
control deformacional [%]

verificación del anclaje o perno

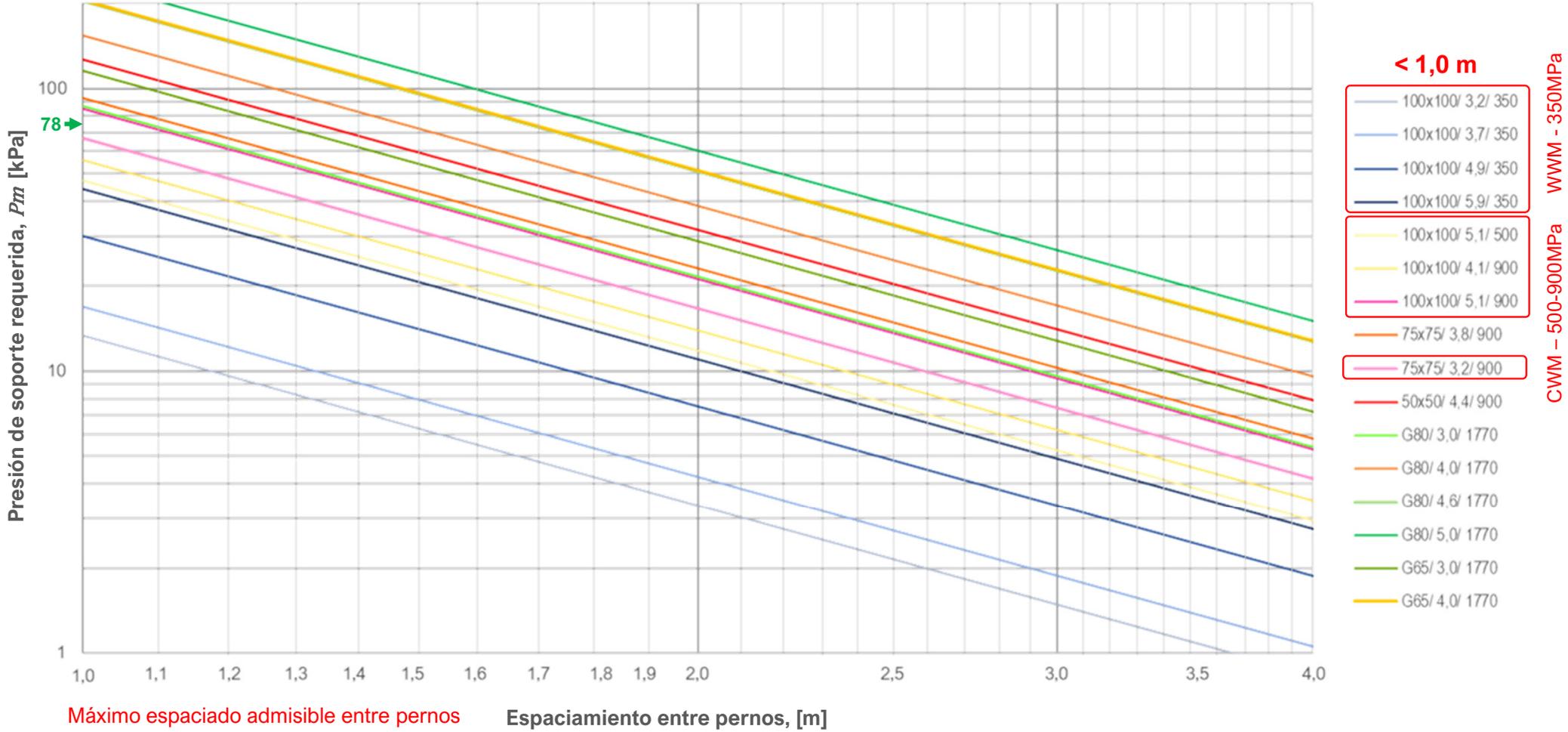
Selección de la membrana



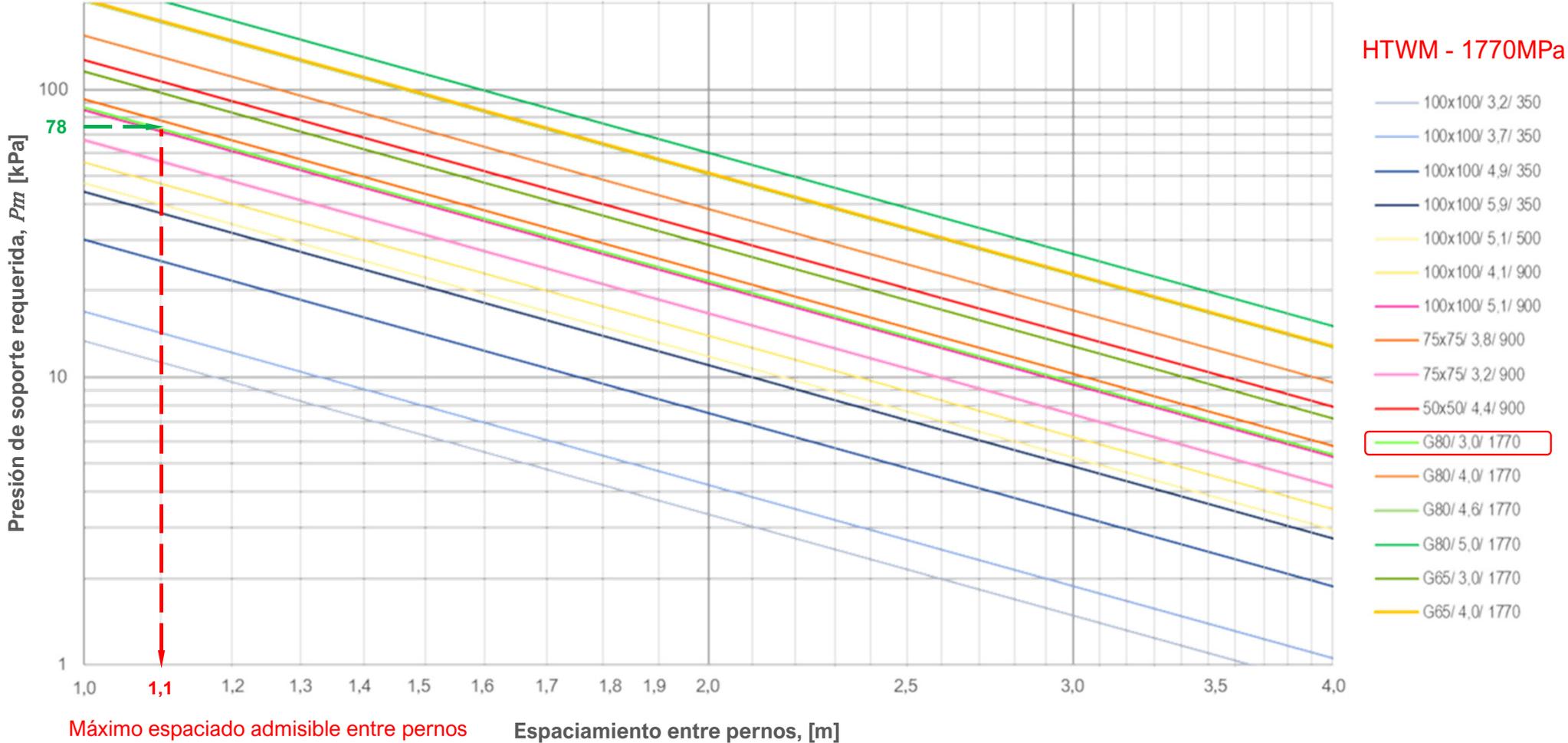
Selección de la membrana



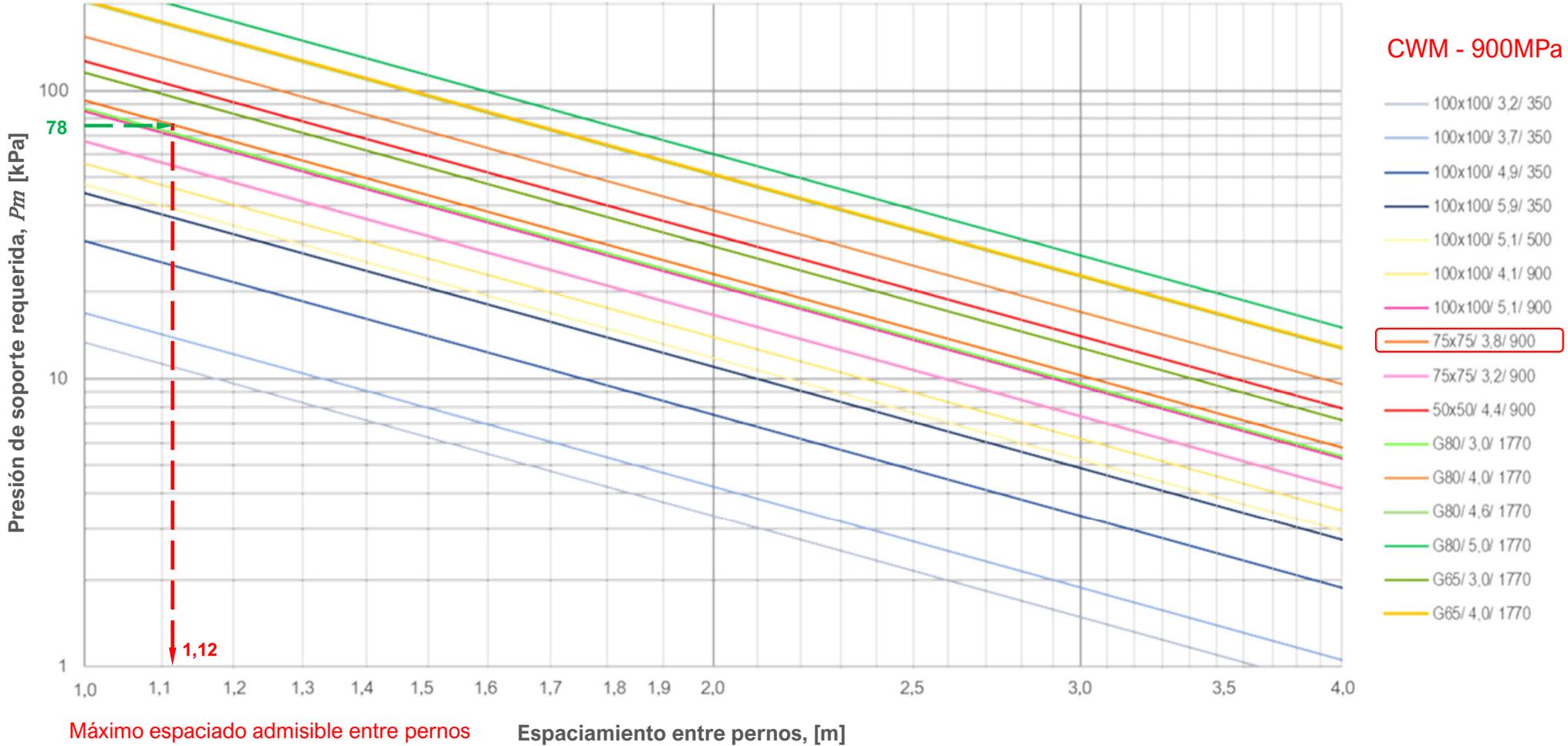
Selección de la membrana



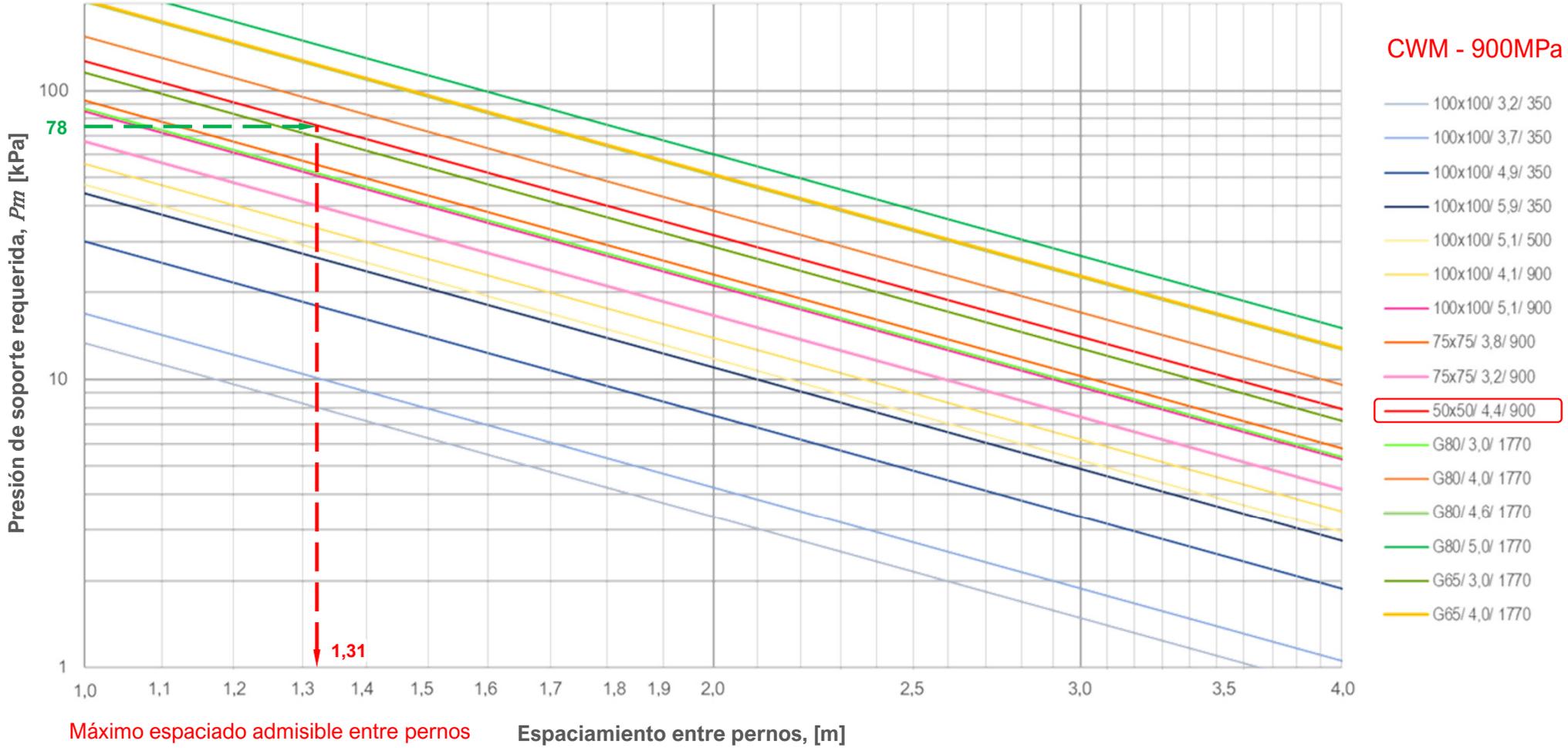
Selección de la membrana



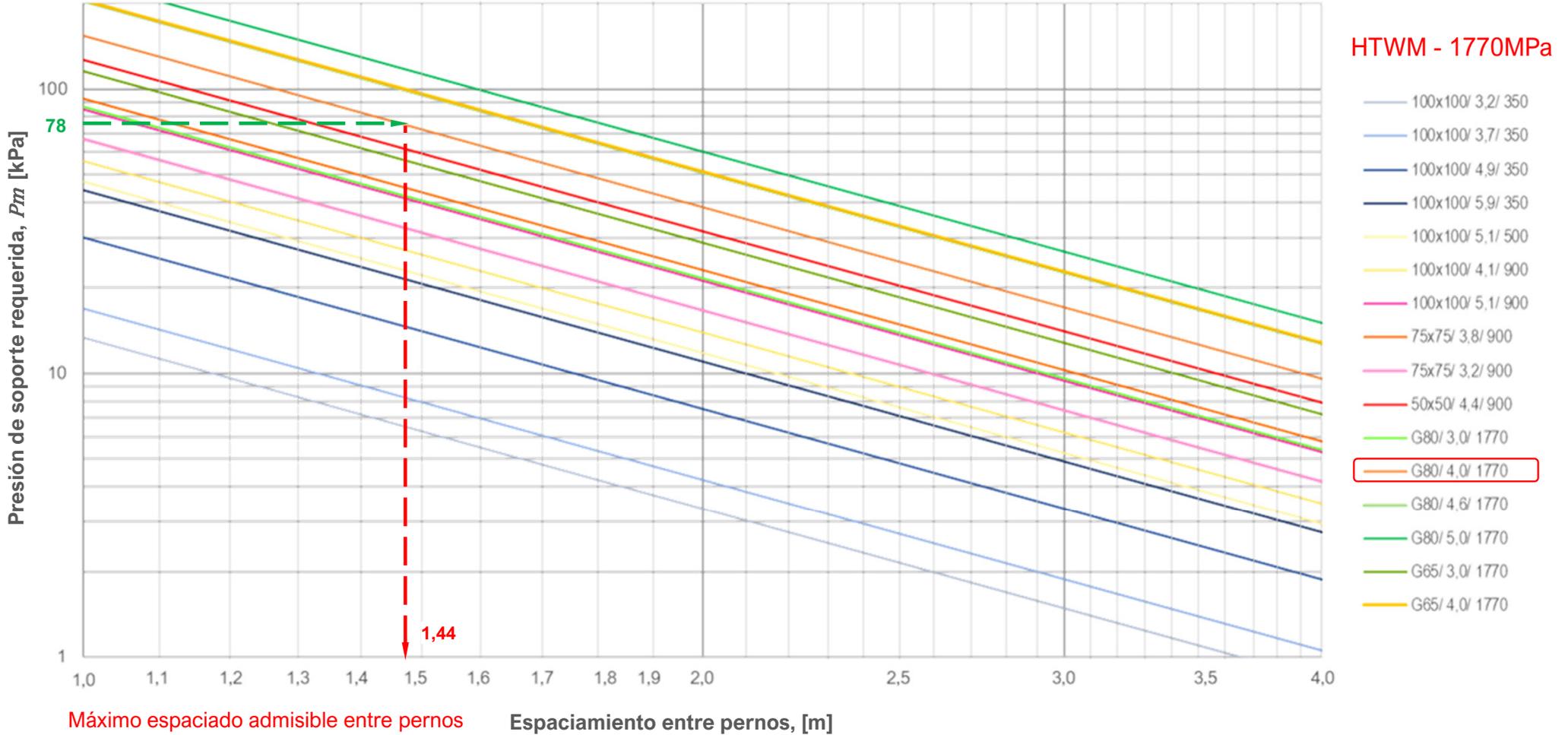
Selección de la membrana



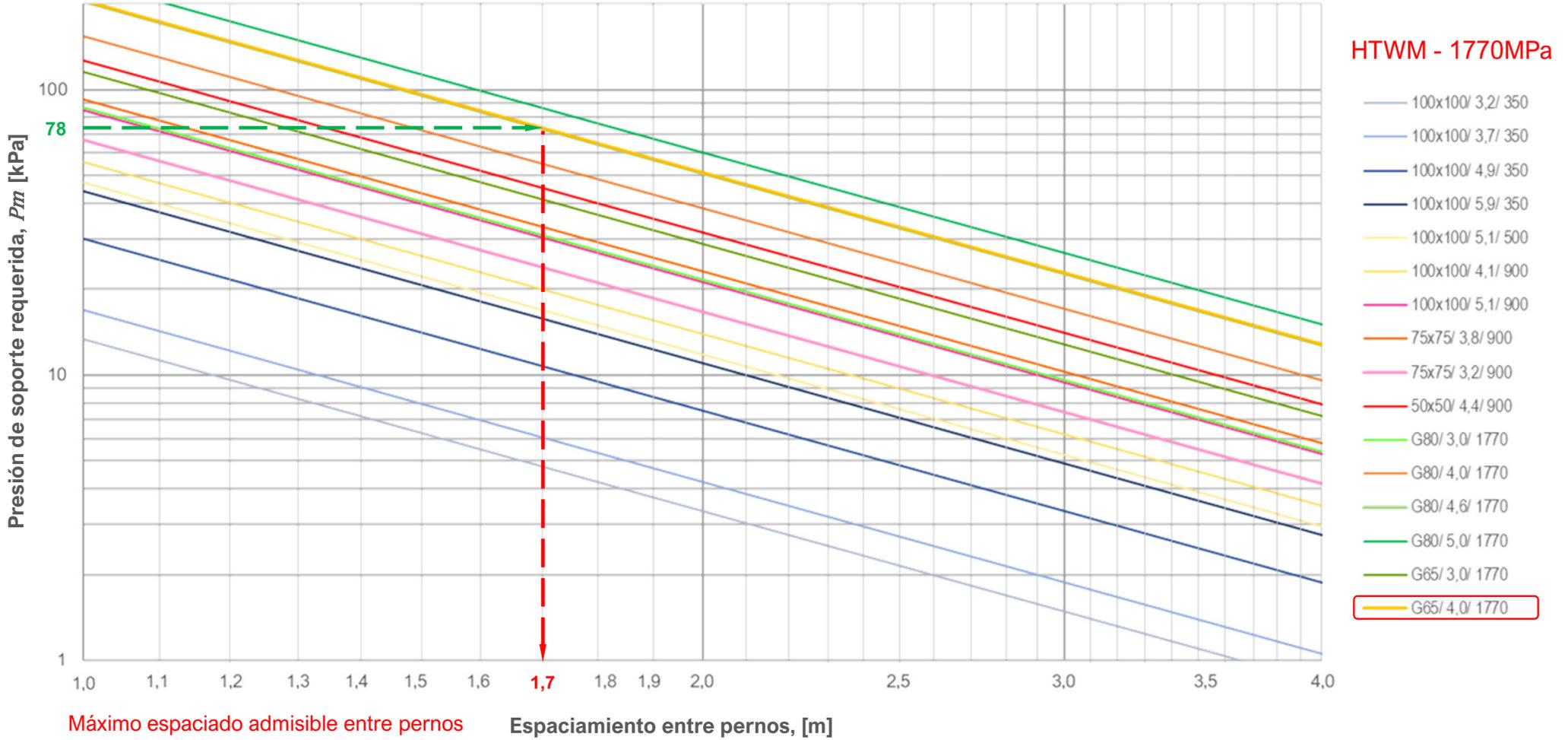
Selección de la membrana



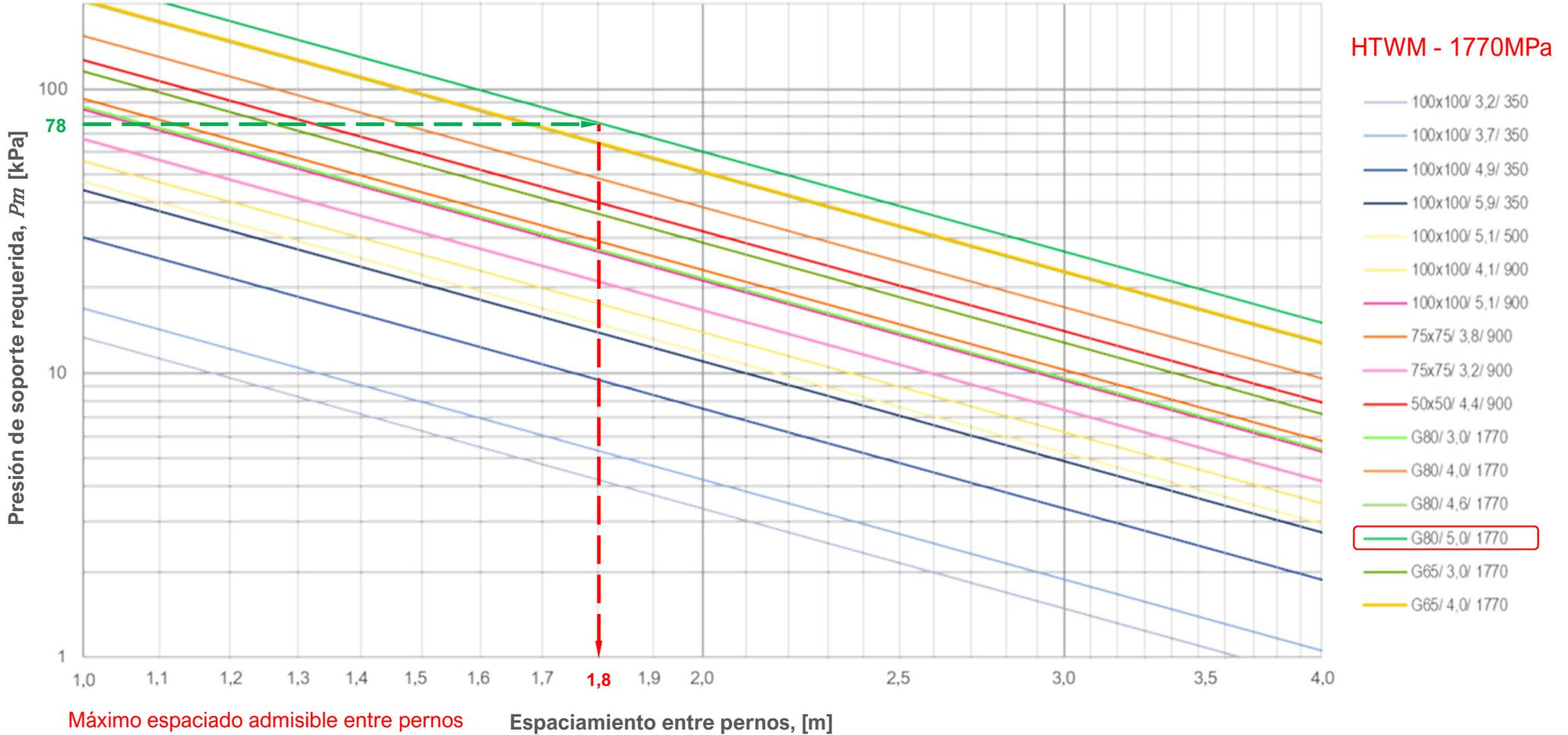
Selección de la membrana



Selección de la membrana



Selección de la membrana



Dimensionamiento



clasificación geomecánica Q

presión de soporte requerida [kPa]

membrana + placa seleccionada [kPa]
(Resistencia punzonamiento)

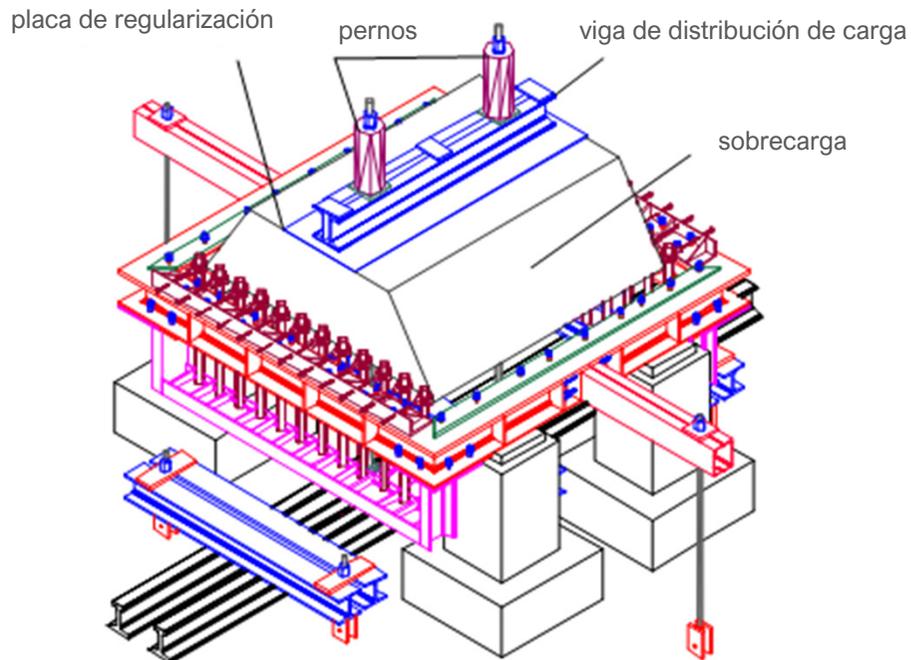
patrón de anclaje seleccionado [m²]

control deformacional [%]

verificación del anclaje o perno

Deformación de la membrana

Ensayo estático de carga distribuida. Análisis deformacional



Fuente: Torres, 2001



Deformación de la membrana



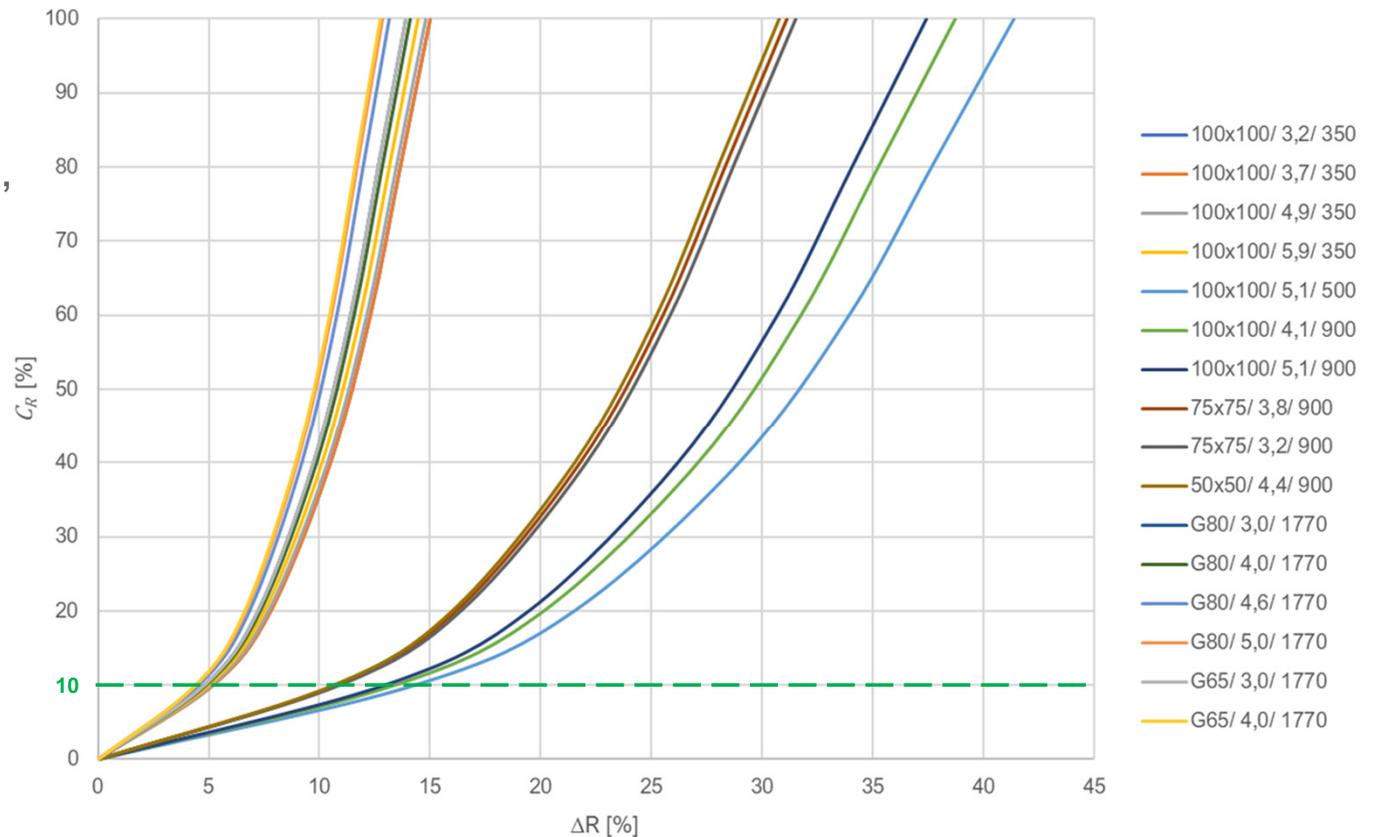
Imprescindible cuando estamos trabajando con sistemas flexibles. Es muy importante poder establecer el valor del desplazamiento relativo (ΔR), y la carga aplicada a la membrana (C_R) %

$$C_R = D_R / D_{R\text{ break}}$$

$$\Delta R = \Delta Z / S$$

ΔZ : deformación en el medio de la distancia S , [mm]

S : patrón de bulonado [m]



Deformación de la membrana



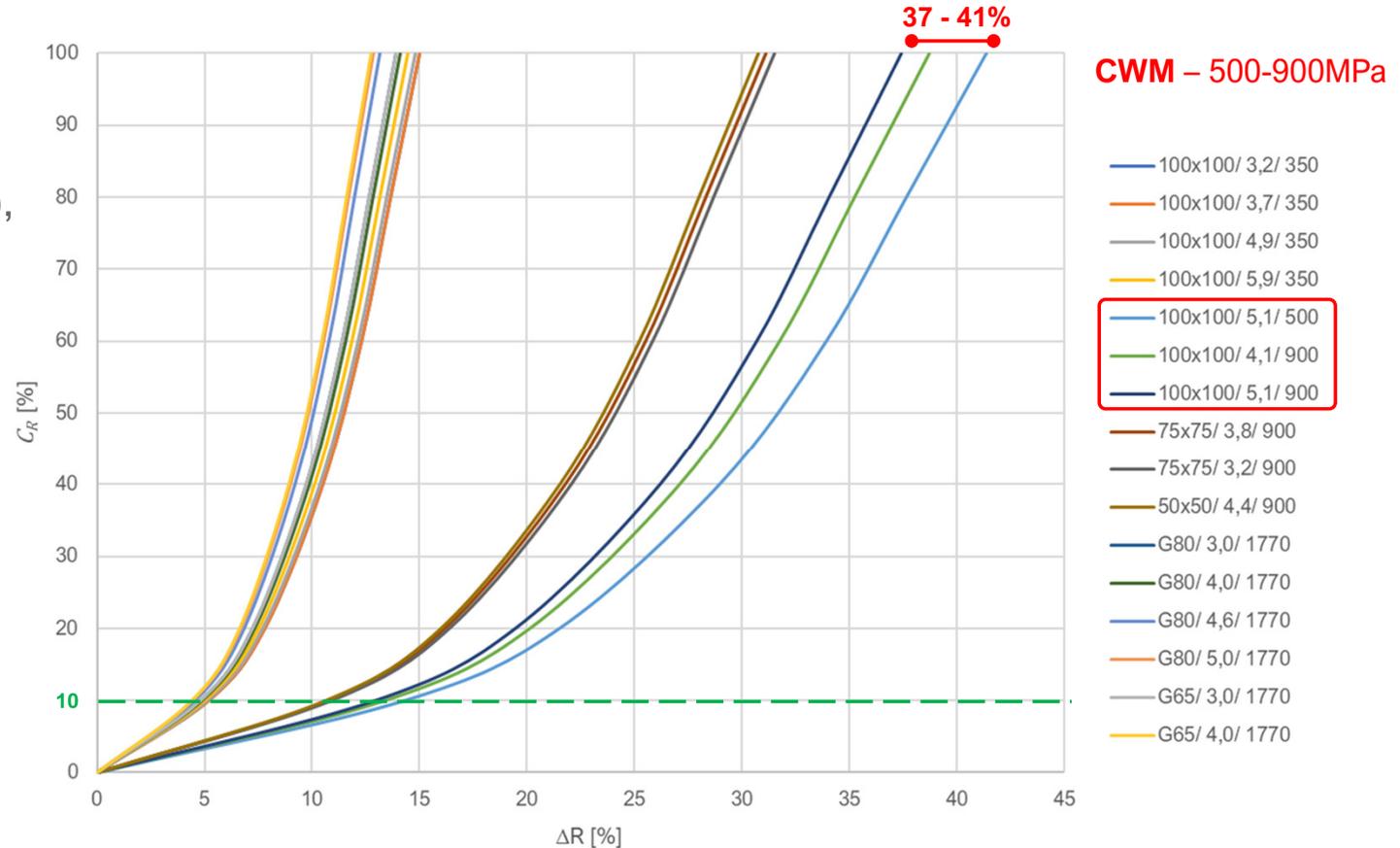
Imprescindible cuando estamos trabajando con sistemas flexibles. Es muy importante poder establecer el valor del desplazamiento relativo (ΔR), y la carga aplicada a la membrana (C_R) %

$$C_R = D_R / D_{R\text{ break}}$$

$$\Delta R = \Delta Z / S$$

ΔZ : deformación en el medio de la distancia S, [mm]

S: patrón de bulonado [m]



Deformación de la membrana



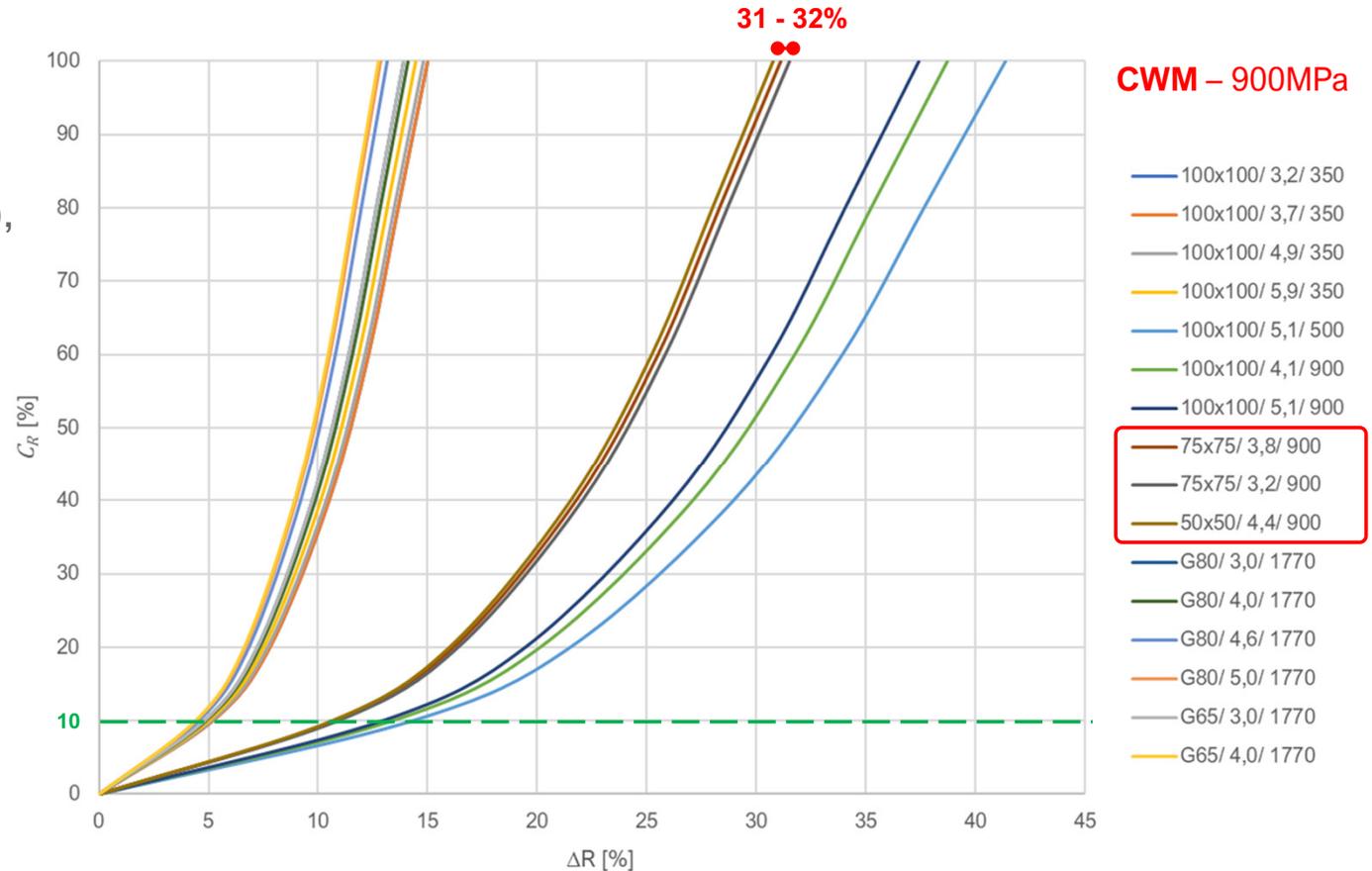
Imprescindible cuando estamos trabajando con sistemas flexibles. Es muy importante poder establecer el valor del desplazamiento relativo (ΔR), y la carga aplicada a la membrana (C_R) %

$$C_R = D_R / D_{R\text{ break}}$$

$$\Delta R = \Delta Z / S$$

ΔZ : deformación en el medio de la distancia S , [mm]

S : patrón de bulonado [m]



Deformación de la membrana



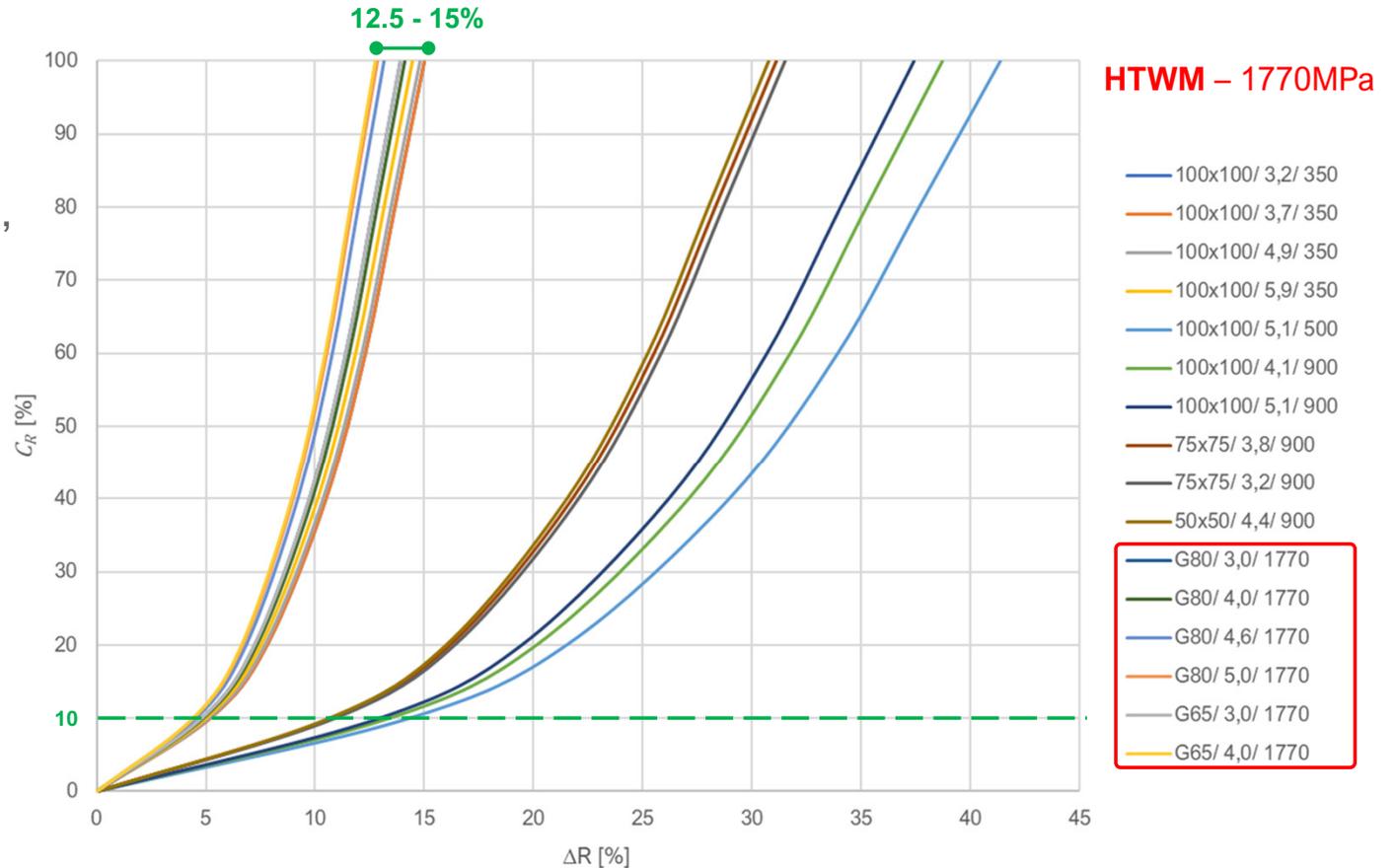
Imprescindible cuando estamos trabajando con sistemas flexibles. Es muy importante poder establecer el valor del desplazamiento relativo (ΔR), y la carga aplicada a la membrana (C_R) %

$$C_R = D_R / D_{R\text{ break}}$$

$$\Delta R = \Delta Z / S$$

ΔZ : deformación en el medio de la distancia S, [mm]

S: patrón de bulonado [m]



Deformación de la membrana



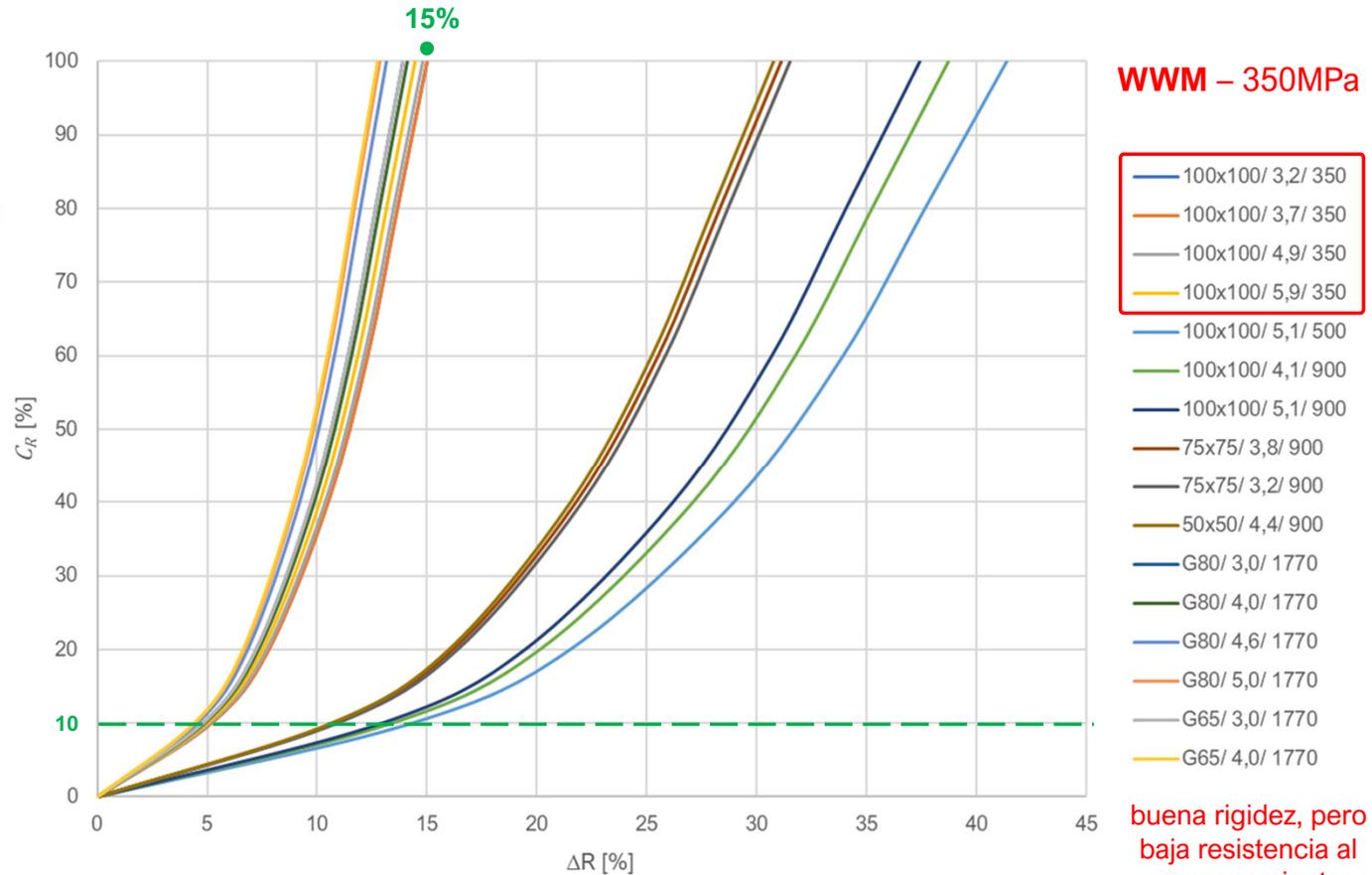
Imprescindible cuando estamos trabajando con sistemas flexibles. Es muy importante poder establecer el valor del desplazamiento relativo (ΔR) y la carga aplicada a la membrana (C_R) %

$$C_R = D_R / D_{R\text{ break}}$$

$$\Delta R = \Delta Z / S$$

ΔZ : deformación en el medio de la distancia S, [mm]

S: patrón de bulonado [m]



Dimensionamiento



clasificación geomecánica Q

presión de soporte requerida [kPa]

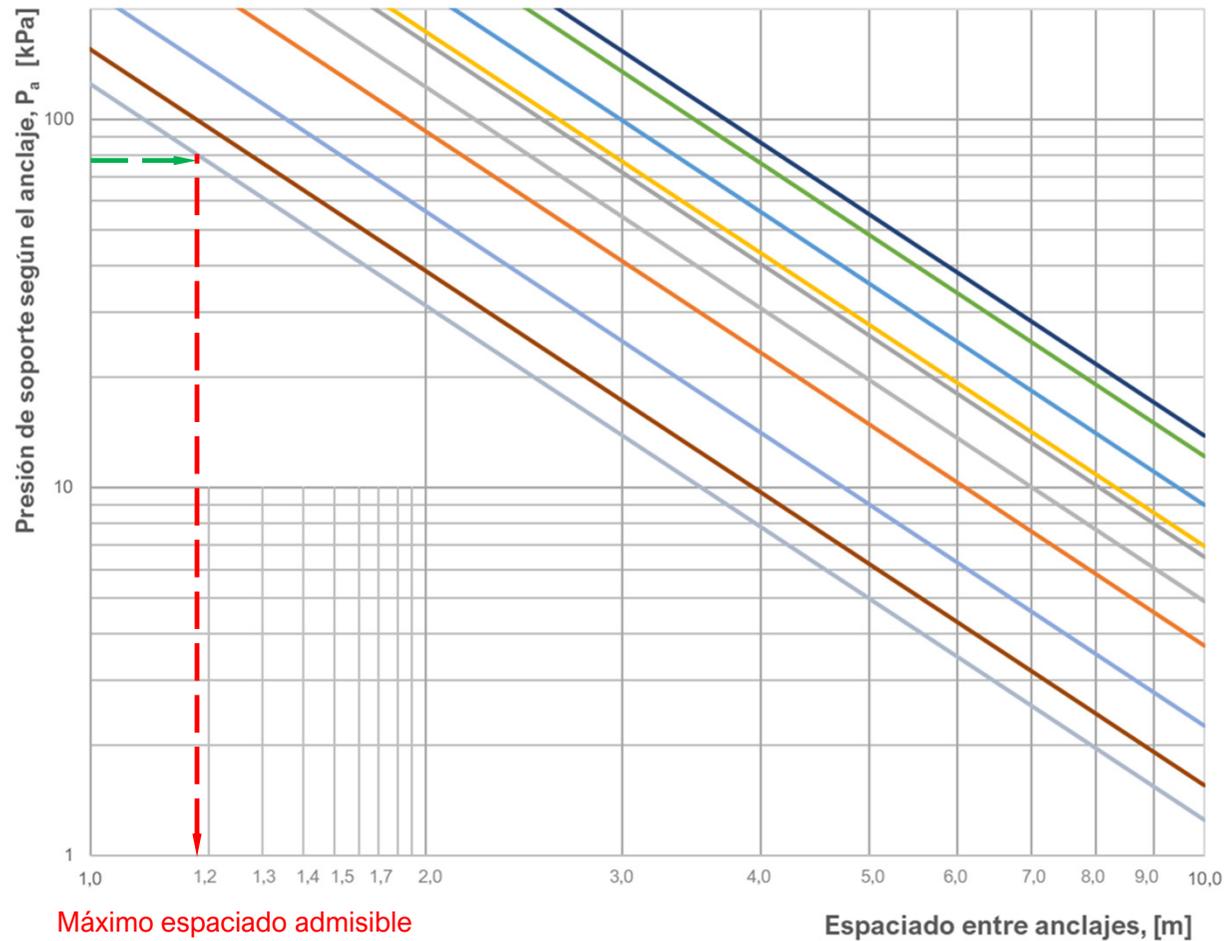
membrana + placa seleccionada [kPa]
(Resistencia punzonamiento)

patrón de anclaje seleccionado [m²]

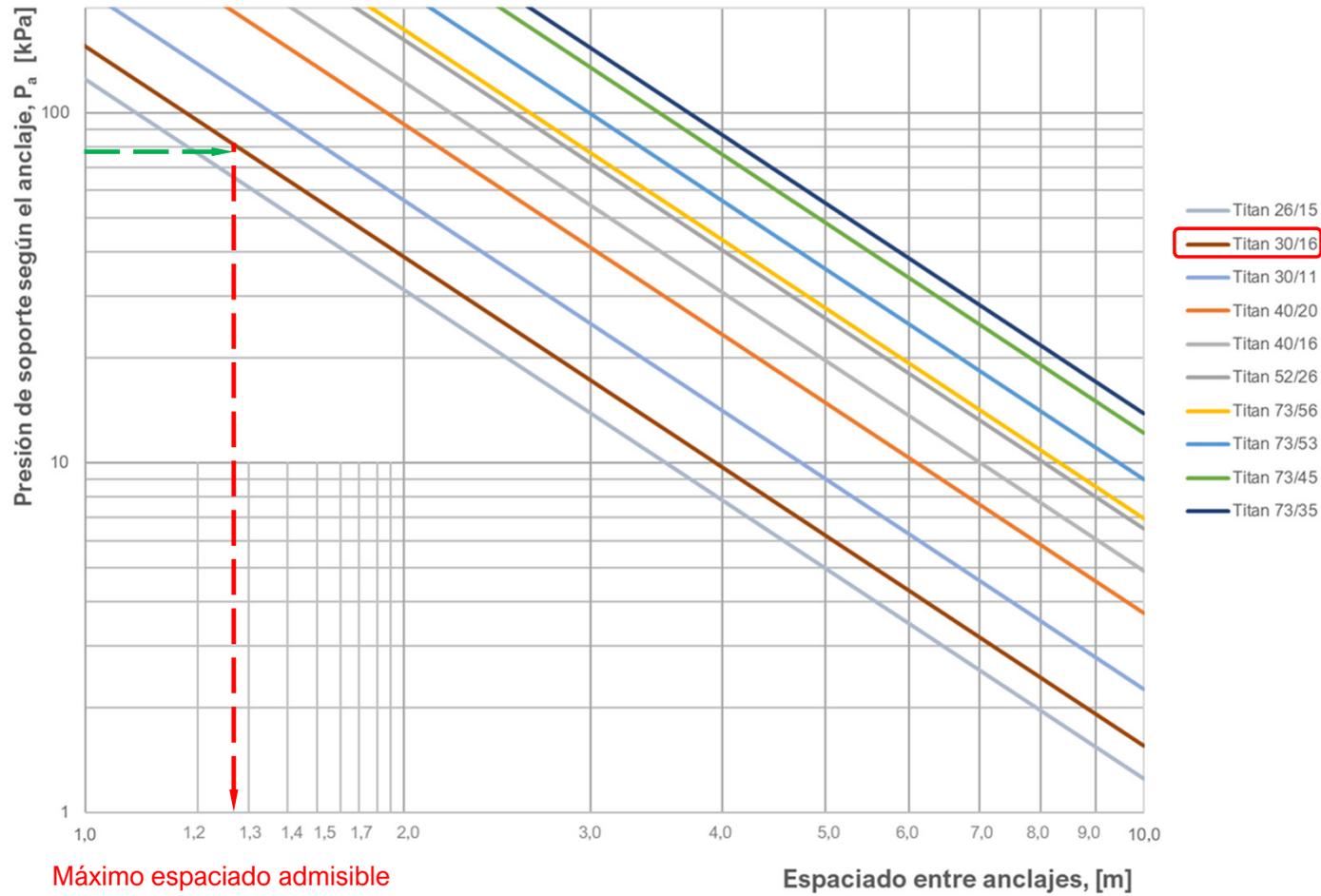
control deformacional [%]

verificación del anclaje o perno

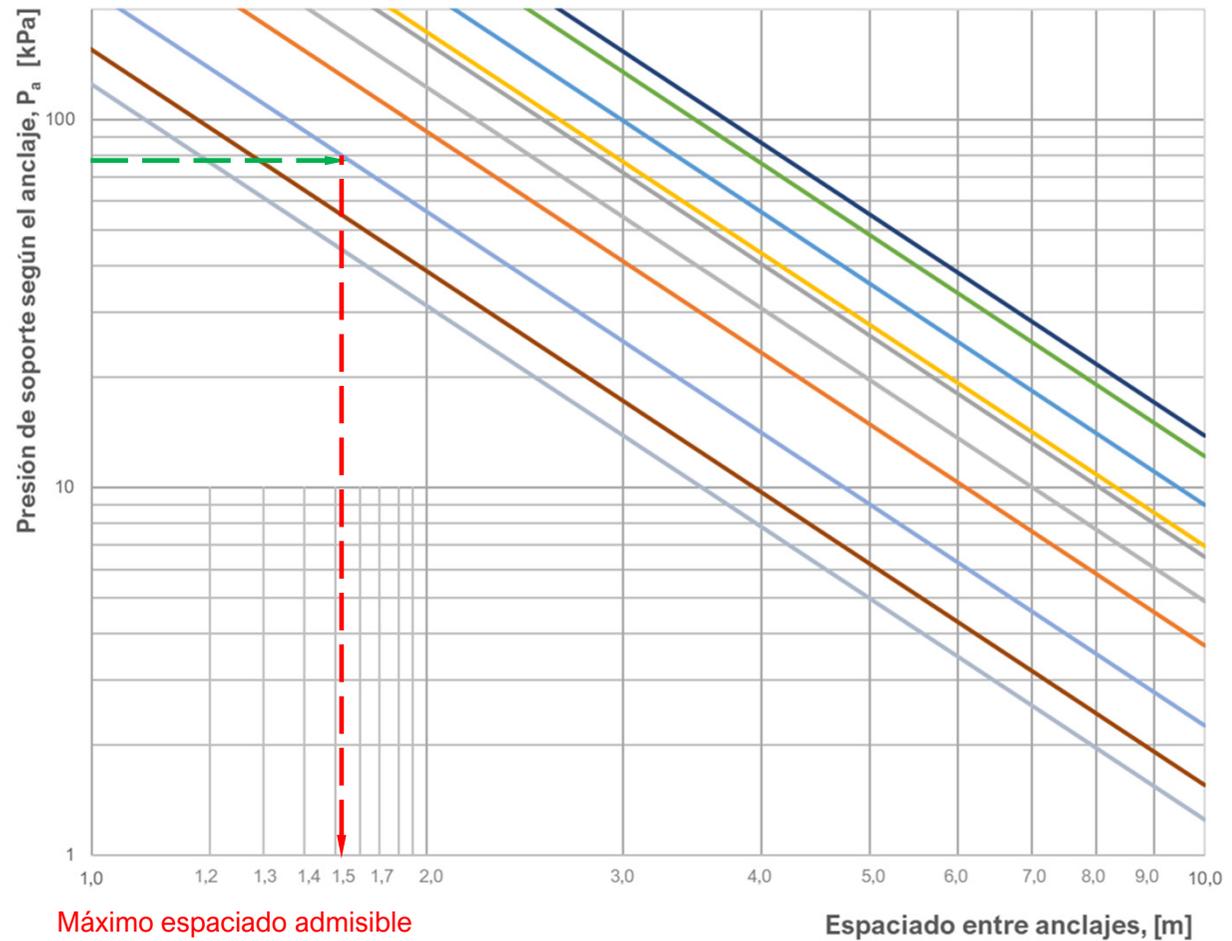
Comprobación de pernos. Ejemplo de barra Titan



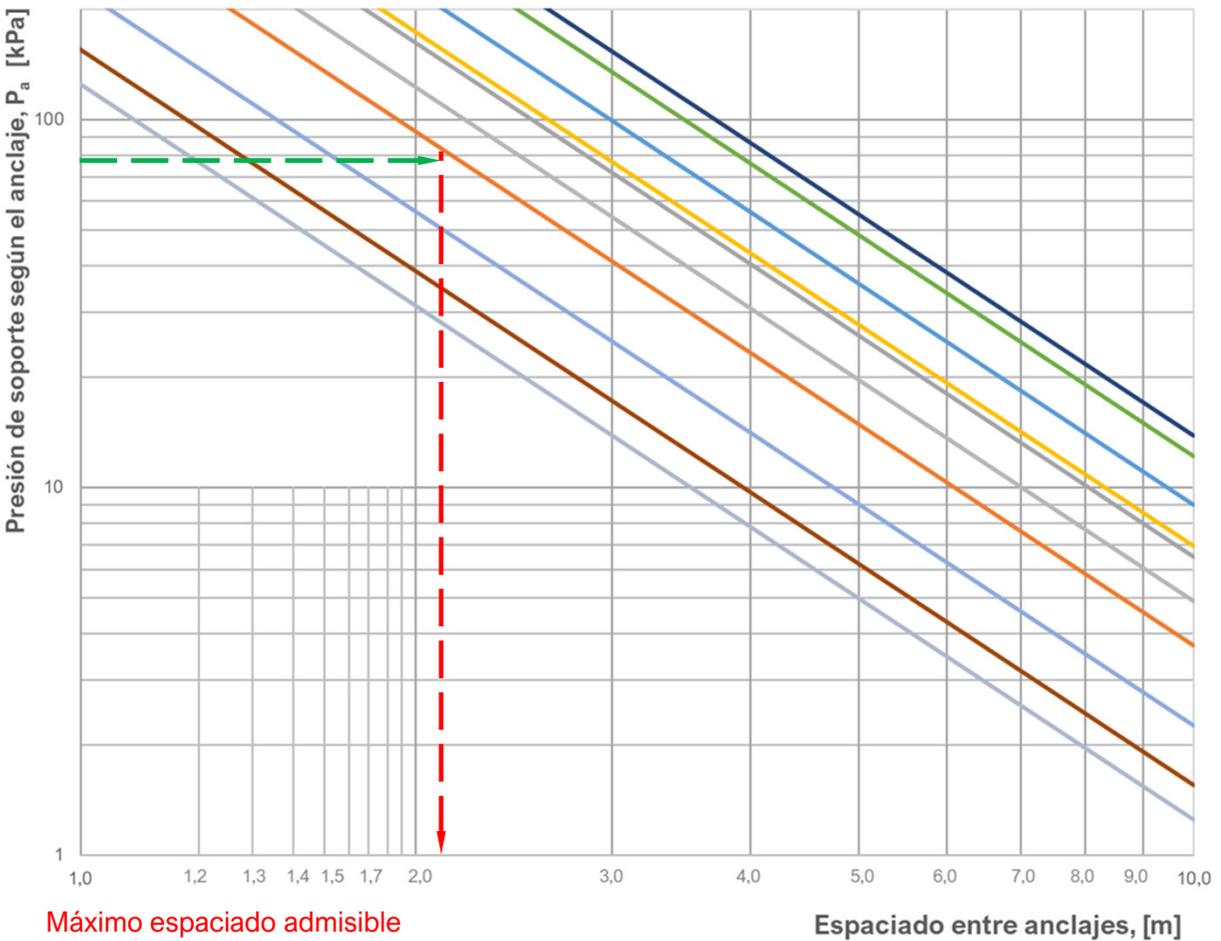
Comprobación de pernos. Ejemplo de barra Titan



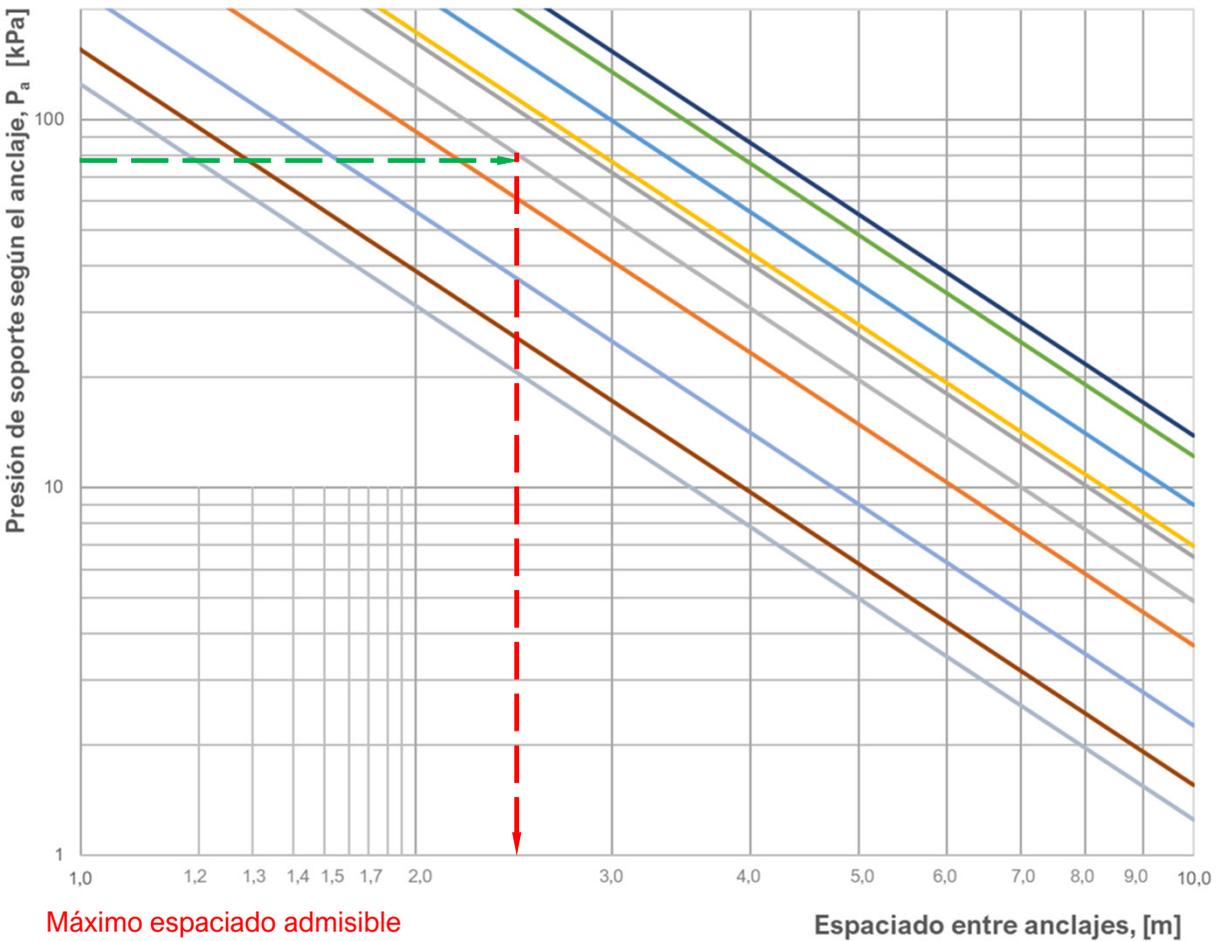
Comprobación de pernos. Ejemplo de barra Titan



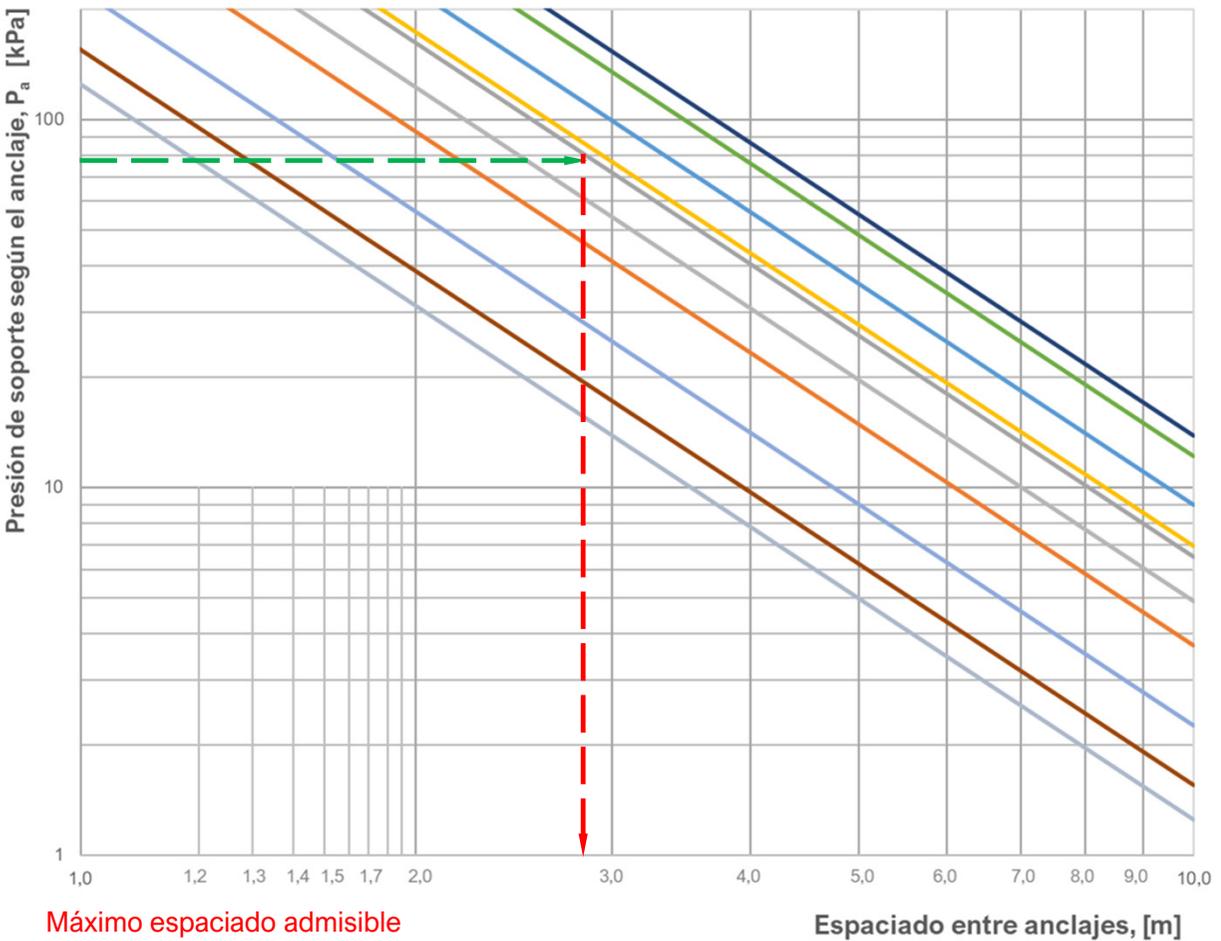
Comprobación de pernos. Ejemplo de barra Titan



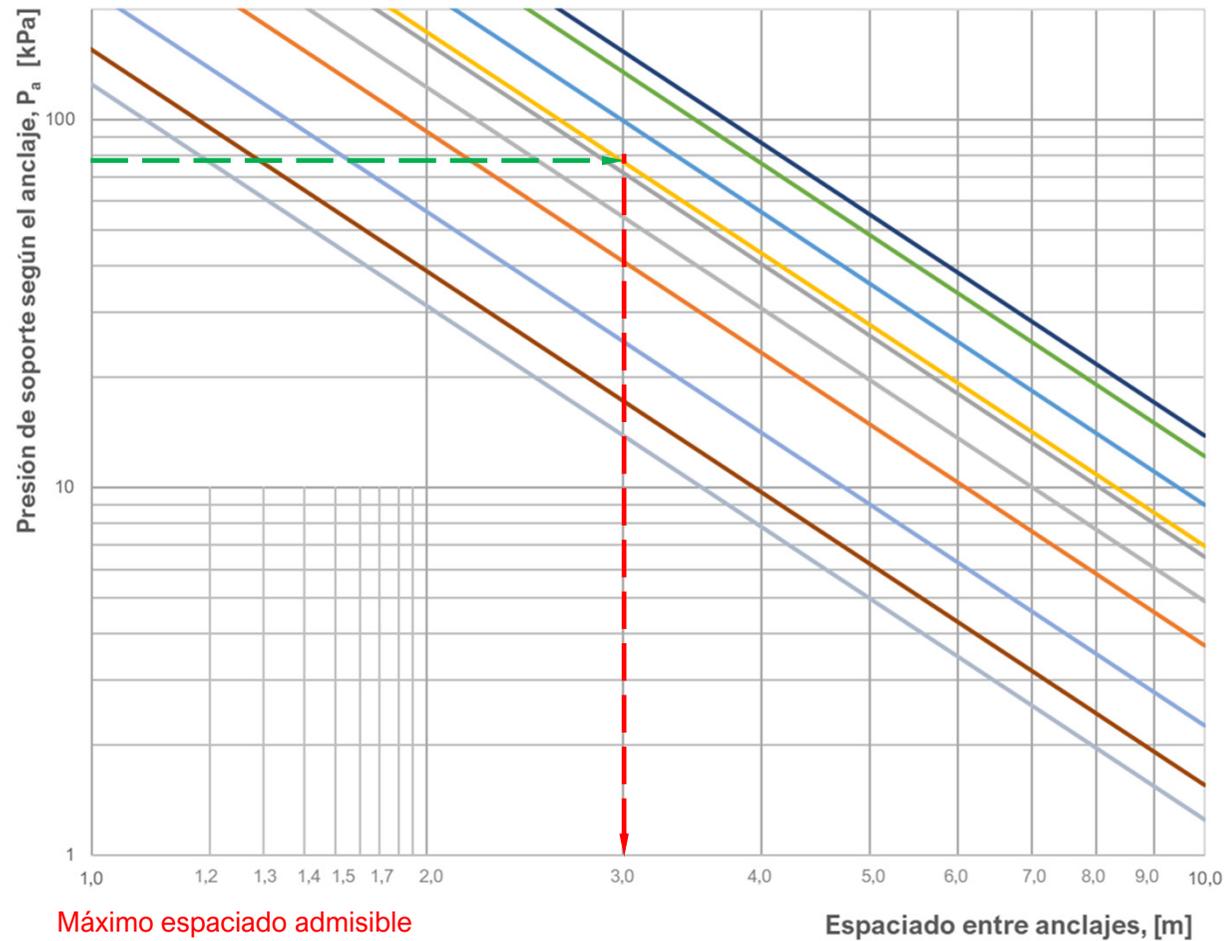
Comprobación de pernos. Ejemplo de barra Titan



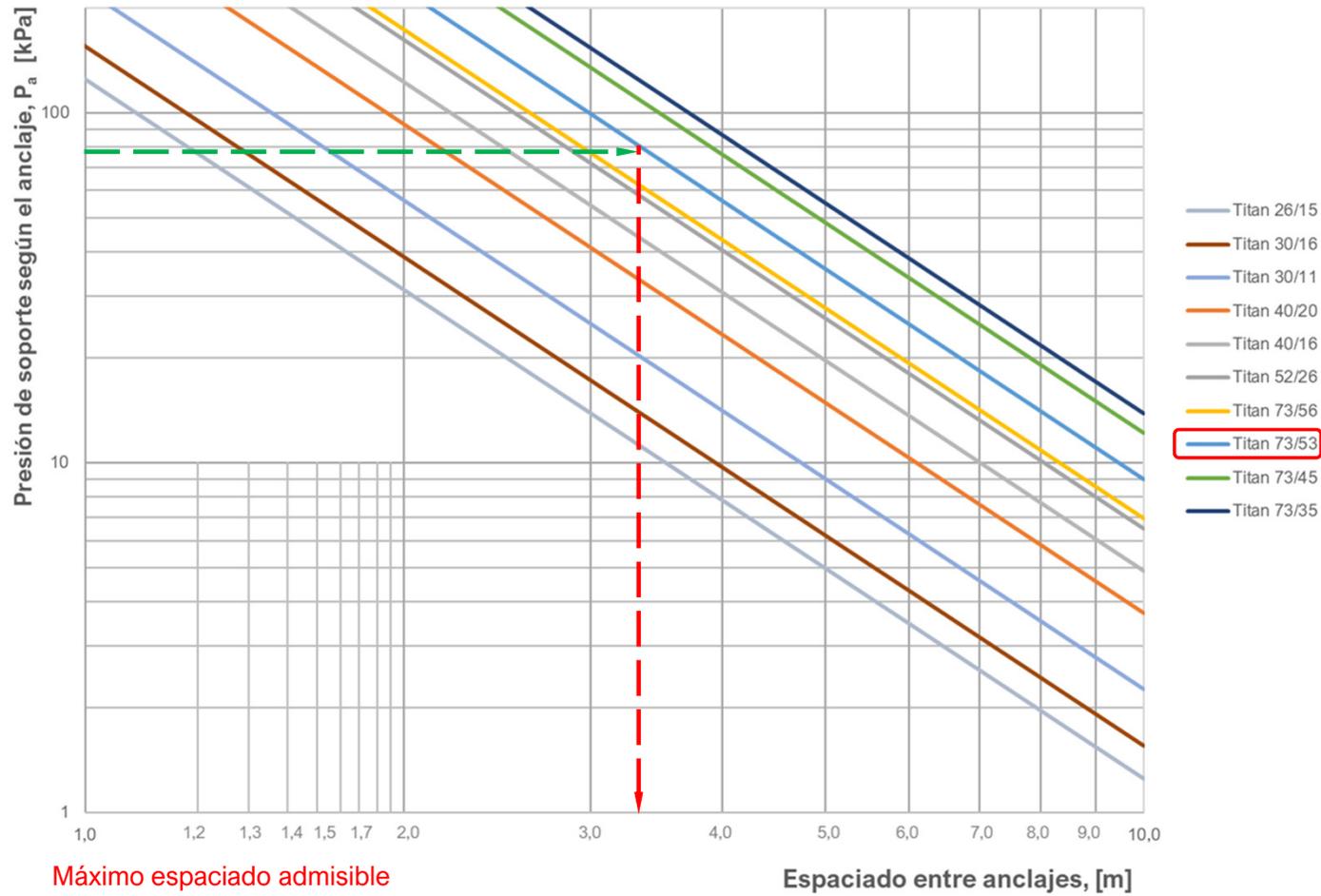
Comprobación de pernos. Ejemplo de barra Titan



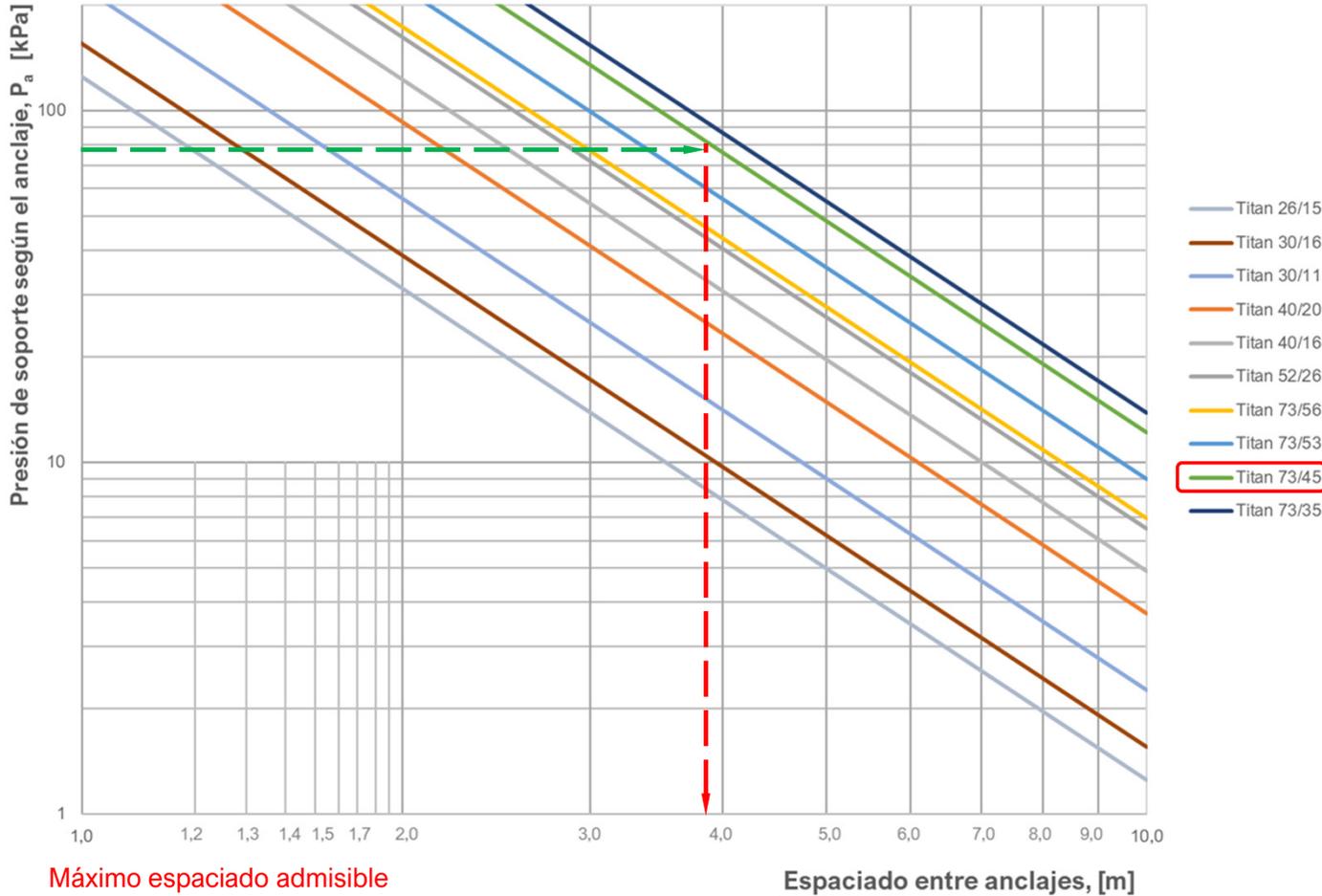
Comprobación de pernos. Ejemplo de barra Titan



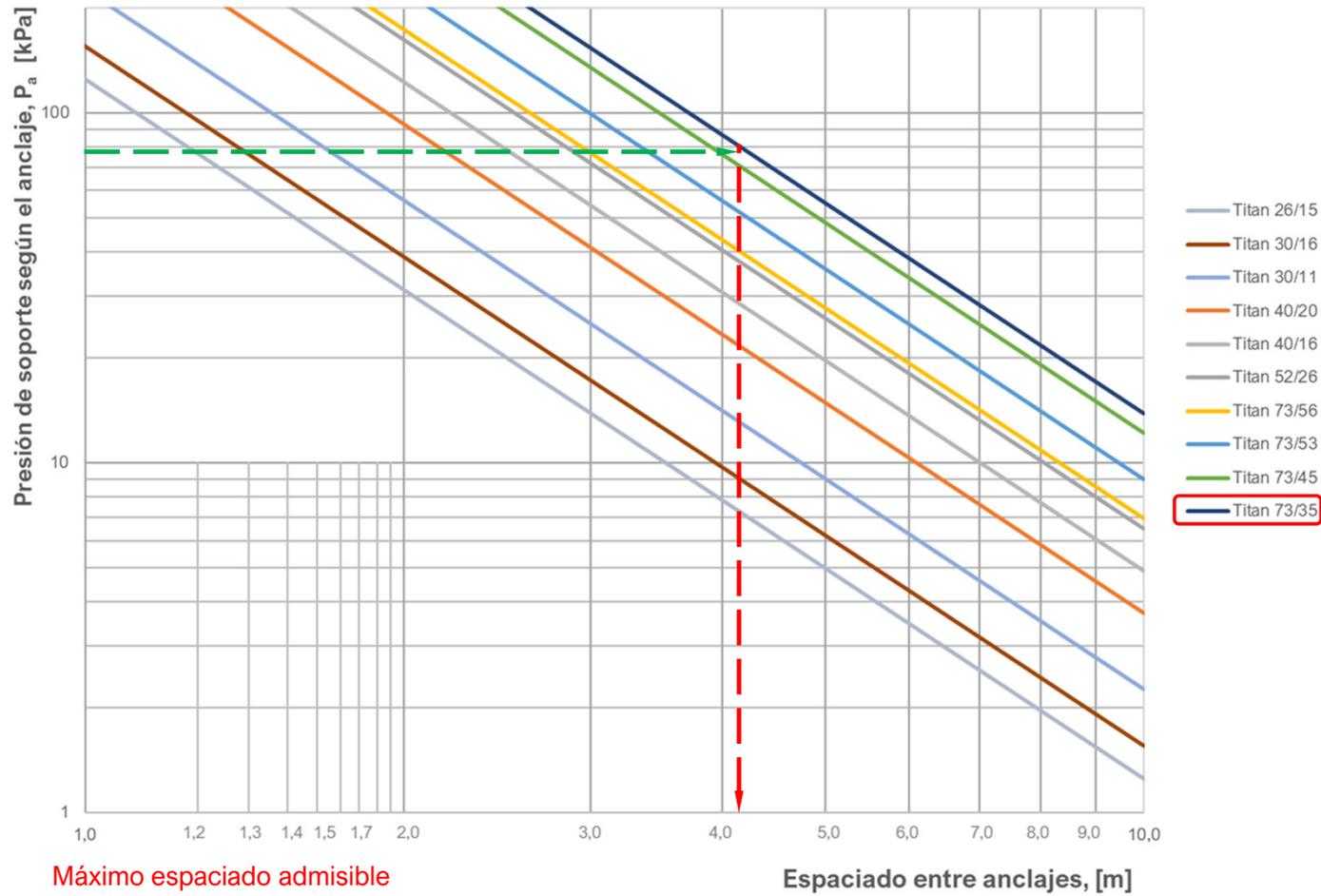
Comprobación de pernos. Ejemplo de barra Titan



Comprobación de pernos. Ejemplo de barra Titan



Comprobación de pernos. Ejemplo de barra Titan



Conclusiones



- El sistema que vincula **Q** con las medidas recomendadas de soporte y refuerzo permanente del terreno ha demostrado su valía durante sus 50 años de existencia. Ampliamente adoptado en muchos países, como una de las herramientas estándares de caracterización empírica y como método de diseño en túneles. Su extendido uso en ingeniería civil y en los principales países mineros (EE.UU., Canadá, Brasil, Perú, Chile, Australia, Sudáfrica, etc.) permite recomendar el uso de **Q para el dimensionado** de las armaduras de terreno. Si bien es cierto que el sistema tiene algunas limitaciones, también es cierto que, en un entorno de situaciones muy importante, su uso es válido.
- El valor de **soporte requerido** para el macizo puede provenir de otras fuentes, el proceso de revisión es similar.
- La aparición de las membranas flexibles de **acero de alta resistencia a la tracción** ha cambiado la forma de pensar y la forma de resolver los problemas de soporte, tanto para esfuerzos estáticos como dinámicos. Su uso permite, minimizar el uso de hormigón proyectado, y optimizar el patrón de bulonado.
- Para **la influencia de la carga dinámica**, los procedimientos de ensayo en proceso complementarán esta metodología de dimensionado.

Conclusiones



Influencia de la carga dinámica.
Ensayo de campo de doble
impacto

¡Gracias por su atención!

