

ESTRUCTURAS DE SUELO REFORZADO III MUROS Y TALUDES

Luis Ortuño
Uriel & Asociados, S.A.
Universidad Politécnica de Madrid

1.- Cuestiones de diseño según el manual de la FHWA

- Resistencia al arrancamiento
- Resistencia del refuerzo
- Estados límite. Comprobaciones

2.- Propiedades de los geosintéticos. Implicaciones en el suelo reforzado

CONSIDERACIONES DE DISEÑO BÁSICAS DEL MANUAL DE LA FHWA (2009)

“Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Slopes. FHWA GEC-011”

DETALLES BÁSICOS DE TIERRA ARMADA (FHWA)

GEOMETRÍA

Lo habitual (USA) es que los flejes tengan una longitud de al menos el 70% de la altura del muro. Dicha longitud puede terminar siendo mayor por diversos motivos (estabilidad, hundimiento, etc)

Table 2-1. Typical Minimum Length of Reinforcement.

Case	Typical Minimum L/H Ratio
Static loading with or with traffic surcharge	0.7
Sloping backfill surcharge	0.8
Seismic loading	0.8 to 1.1

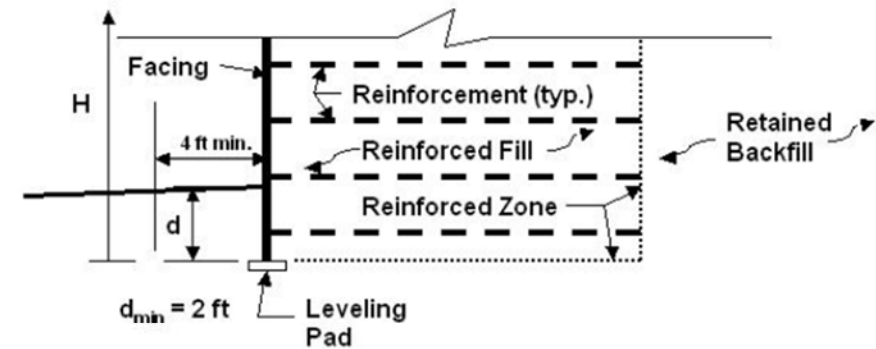
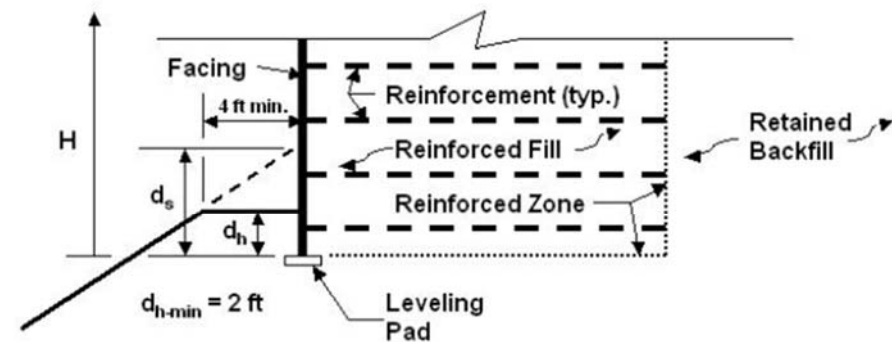


Table 2-2. Minimum MSEW Embedment Depths.

Slope in Front of Wall	Minimum Embedment Depth to Top of Leveling Pad*
All Geometries	2 ft minimum
horizontal (walls)	H/20
horizontal (abutments)	H/10
3H:1V	H/10
2H:1V	H/7
1.5H:1V	H/5

* Minimum depth is the greater of applicable values listed, frost depth, or scour depth.



2-16. MSE wall embedment depth requirements, (a) level toe condition and (b) benched slope toe condition (d_h = minimum depth for horizontal slope and d_s = minimum depth for sloping toe, from Table 2-2).

DETALLES BÁSICOS DE TIERRA ARMADA (FHWA)

MATERIAL DE RELLENO SELECCIONADO

Se emplea tradicionalmente material granular de calidad

Table 3-1. MSE Wall Select Granular Reinforced Fill Requirements.

<u>Gradation:</u> (AASHTO T-27)	<u>U.S. Sieve Size</u>	<u>Percent Passing</u> ^(a)
	4 in. (102 mm) ^(a,b)	100
	No. 40 (0.425 mm)	0-60
	No. 200 (0.075 mm)	0-15
<u>Plasticity Index, PI</u> (AASHTO T-90)	PI ≤ 6	
<u>Soundness:</u> (AASHTO T-104)	The materials shall be substantially free of shale or other soft, poor durability particles. The material shall have a magnesium sulfate soundness loss of less than 30 percent after four cycles (or a sodium sulfate value less than 15 percent after five cycles).	
Notes: (a) To apply default F* values, C _u should be greater than or equal to 4. (b) As a result of recent research on construction survivability of geosynthetics and epoxy coated reinforcements, it is recommended that the maximum particle size for these materials be reduced to ¾-in. (19 mm) for geosynthetics, and epoxy and PVC coated steel reinforcements unless construction damage assessment tests are or have been performed on the reinforcement combination with the specific or similarly graded large size granular fill. Prequalification tests on reinforcements using standard agency fill materials should be considered.		

A estos materiales se les suele asignar $\phi' = 34^\circ$. A veces con arenas uniformes se emplean ángulos más bajos. Ensayos en caso de duda

MATERIAL DE RELLENO SELECCIONADO

Se deben cumplir además algunas condiciones electroquímicas, dependiendo del material de refuerzo

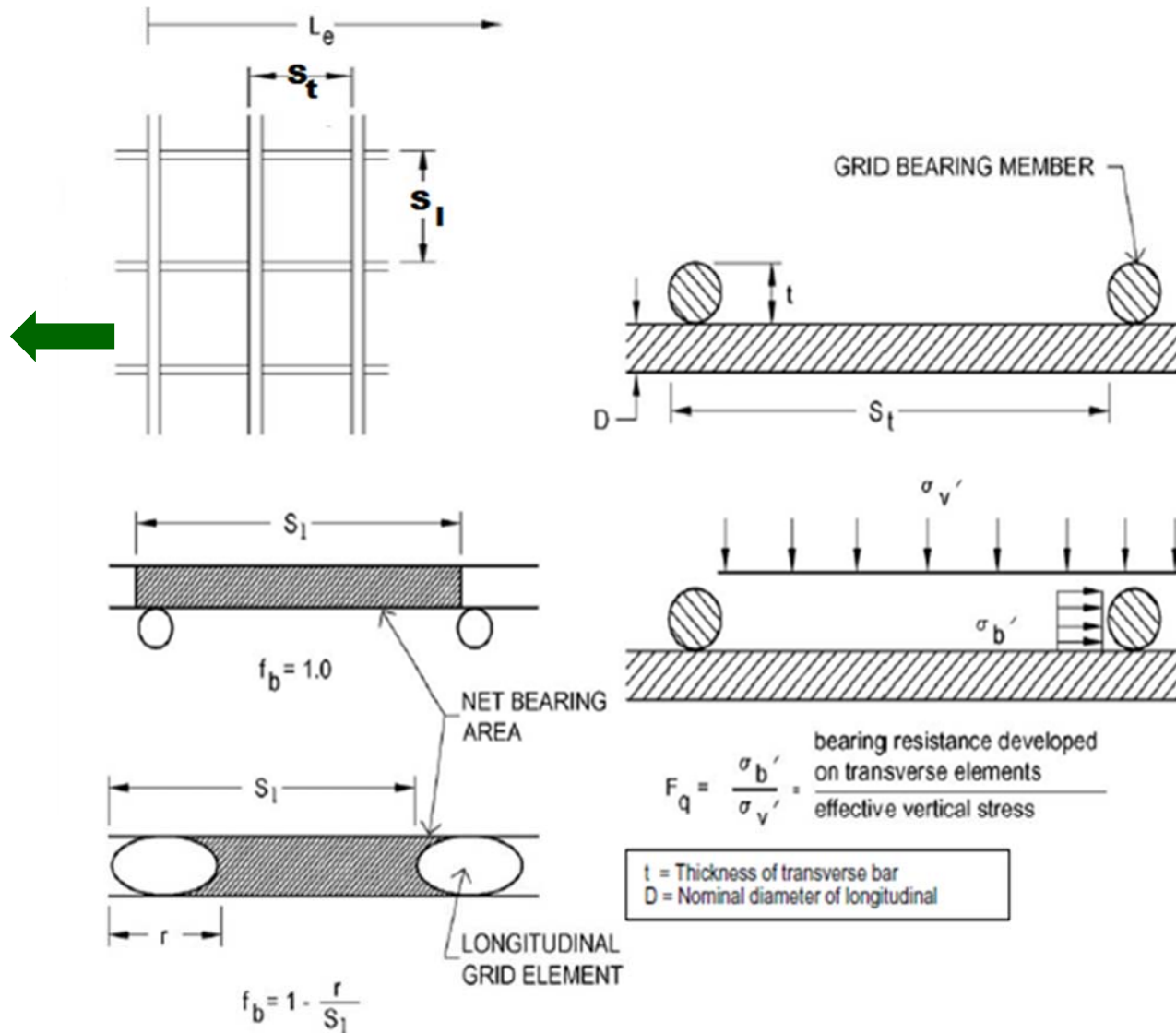
Table 3-3. Recommended Limits of Electrochemical Properties for Reinforced Fills with Steel Reinforcement.

<u>Property</u>	<u>Criteria</u>	<u>Test Method</u>
Resistivity	> 3000 ohm-cm	AASHTO T-288
pH	> 5 and < 10	AASHTO T-289
Chlorides	< 100 PPM	ASMT D4327
Sulfates	< 200 PPM	ASTM D4327
Organic Content	1% max.	AASHTO T-267

Table 3-4. Recommended Limits of Electrochemical Properties for Reinforced Fills with Geosynthetic Reinforcements (FHWA NHI-09-087, Elias et al., 2009).

<u>Base Polymer</u>	<u>Property</u>	<u>Criteria</u>	<u>Test Method</u>
Polyester (PET)	pH	$3 < \text{pH} < 9$	AASHTO T-289
Polyolefin (PP & HDPE)	pH	$\text{pH} > 3$	AASHTO T-289

RESISTENCIA AL ARRANCAMIENTO (FHWA)



L_e : es la longitud de anclaje

S_l : es la distancia entre elementos longitudinales

S_t : es la distancia entre elementos transversales

F_q : es un factor adimensional de capacidad de carga "pasiva", que proporciona el valor de ésta en función de la presión vertical efectiva al nivel del refuerzo

f_b : es un factor geométrico que proporciona la parte de área que contribuye a la capacidad de carga "pasiva"

t : es el "canto" de los elementos transversales

Se define la resistencia (unidades de fuerza) al arrancamiento por unidad de ancho de refuerzo en paralelo al muro) como :

$$P_r = F^* \alpha \sigma'_v L_e C$$

Donde:

- L_e = longitud de anclaje del refuerzo (en perpendicular al muro)
- $C = 2$
- F^* = factor d arrancamiento
- σ'_v = presión efectiva vertical a la profundidad del nivel de refuerzo en estudio
- α = factor de corrección para tener en cuenta la reducción no lineal de tensiones a lo largo de la longitud de anclaje en el caso de refuerzos muy extensibles. Para refuerzos metálicos $\alpha=1$, pero para geosintéticos puede oscilar entre $\alpha=0.6$ a 1.0 . **Se mide en laboratorio**. En ausencia de datos, para geomallas se adopta $\alpha=0.8$ y para geotextiles $\alpha=0.6$.

Por otra parte F^* es:

$$F^* = F_q \cdot \alpha_\beta + \tan \rho$$

Donde:

- F_q = factor de capacidad de carga “pasiva”
- α_β = factor de resistencia pasiva dependiente de la geometría del refuerzo
- ρ = ángulo de rozamiento del contacto refuerzo-suelo

El primer sumando representa la capacidad de carga “pasiva” de los nervios transversales. El segundo el rozamiento de la superficie de contacto refuerzo-suelo. Cuando existen ambos, la capacidad de carga “pasiva” es predominante

$$P_r = F^* \alpha \sigma'_v L_e C \qquad F^* = F_q \cdot \alpha_\beta + \tan \rho$$

Desarrollando le expresión de Pr:

$$P_r = 2 \cdot \alpha \cdot F_q \cdot \sigma'_v \cdot \alpha_\beta L_e + 2 \cdot \alpha \cdot \sigma'_v \cdot \tan \rho \cdot L_e$$

Componente de carga "pasiva"

Componente de rozamiento

RESISTENCIA AL ARRANCAMIENTO (FHWA)

Con respecto a los parámetros, la FHWA establece:

Table 3-6. Summary of Pullout Capacity Design Parameters.

Reinforcement Type	S_{opt}	Grid Spacing	Tan ρ	F_q	α_β	α Default Value
Inextensible strips		NA	Obtain Tan ρ from tests, or use default values	NA	NA	1.0
Inextensible grids (bar mats and welded wire)	$\frac{t F_q}{2 \tan \phi}$	$S_t \leq S_{opt}$	Obtain Tan ρ from tests	NA	NA	1.0*
	$\frac{t F_q}{2 \tan \phi}$	$S_t > S_{opt}$	NA	Obtain F_q from tests, or use default values	$\frac{t}{2 S_t}$	1.0*
Extensible grids with $\frac{\text{min. grid opening}}{d_{50}} > 1$	$\frac{t F_q}{2 \tan \phi}$	$S_t \leq S_{opt}$	Obtain Tan ρ from tests	NA	NA	0.8
	$\frac{t F_q}{2 \tan \phi}$	$S_t > S_{opt}$	NA	Obtain F_q from tests, or use default values	$\frac{f_b t}{2 S_t}$	0.8
Extensible grids with $\frac{\text{min. grid opening}}{d_{50}} < 1$		NA	Obtain Tan ρ from tests	NA	NA	0.8
Extensible sheets		NA	Obtain Tan ρ from tests	NA	NA	0.6

Nótese que cuando $S_t < S_{opt}$ es como si el refuerzo fuera continuo

Con lo siguientes comentarios:

- (i) It is acceptable to use the empirical values provided in or referenced by this table to determine F^* in the absence of product and backfill specific test data, provided granular reinforced fill as specified in Table 3-1 for MSE walls is used and $C_u \geq 4$. For fill outside these limits, tests must be run.
- (ii) Pullout testing to determine α is recommended if α shown in table is less than 1.0. These values of α represent highly extensible geosynthetics.
- (iii) For grids where $\tan \rho$ is applicable, apply $\tan \rho$ to the entire surface area of the reinforcement sheet (i.e., soil and grid), not just the surface area of the grid elements.
- (iv) NA means "not applicable." ϕ is the soil friction angle. ρ is the interface friction angle mobilized along the reinforcement. S_{opt} is the optimum transverse grid element spacing to mobilize maximum pullout resistance as obtained from pullout tests (typically 6 in. (150 mm) or greater). S_t is the spacing of the transverse grid elements. t is the thickness of the transverse elements. F_q is the embedment (or surcharge) bearing capacity factor. α_p is a structural geometric factor for passive resistance. f_b is the fraction of the transverse member on which bearing can be fully developed (typically ranging from 0.6 to 1.0) as obtained from an evaluation of the bearing surface shape. D_{50} is the backfill grain size at 50% passing by weight. α is the scale effect correction factor.
- (v) Definitions of the geometric variables are illustrated in Figure 3-4.

* For longitudinal bars/wires spacing greater than 6 inches, α may be less than 1.0 and pullout tests are required.

RESISTENCIA AL ARRANCAMIENTO (FHWA) VALORES POR DEFECTO

$$P_r = F^* \alpha \sigma'_v L_e C \qquad F^* = F_q \cdot \alpha_\beta + \tan \rho$$

$$P_r = 2 \cdot \alpha \cdot F_q \cdot \sigma'_v \cdot \alpha_\beta L_e + 2 \cdot \alpha \cdot \sigma'_v \cdot \tan \rho \cdot L_e$$

VALORES POR DEFECTO EN AUSENCIA DE ENSAYOS, SIEMPRE QUE SE CUMPLAN LAS CONDICIONES DE LA TABLA 3.1 (VER ANTES)

Flejes metálicos (funcionan sólo por rozamiento)

$F^* = \tan \rho = \tan \phi' + 1.2C_u < 2$ Para flejes situados a profundidades de menos de 6 m bajo la coronación del muro

$F^* = \tan \rho = \tan \phi'$ Para profundidades de más de 6 m

Cu es el coeficiente de uniformidad del material de relleno (ver tabla 3.1 anterior)

RESISTENCIA AL ARRANCAMIENTO (FHWA) VALORES POR DEFECTO

Para geomallas metálicas con $150 \text{ mm} < St < 610 \text{ mm}$ $F^* = F_q \cdot \alpha_\beta + \tan \rho$

Se desprecia el rozamiento y sólo se considera resistencia “pasiva”. Se adopta $F_b=40$ en los primeros 6 m y $F_b=20$ por debajo de 6 m

$$F^* = F_b \cdot \alpha_\beta = F_b \cdot \frac{t}{2S_t} = \begin{cases} 20 \cdot \frac{t}{S_t} & \text{hasta 6 m} \\ 10 \cdot \frac{t}{S_t} & \text{bajo 6 m} \end{cases}$$

Para geotextiles o geomallas con $St < S_{opt}$. Sólo rozamiento

$$F^* = \tan \rho = \frac{2}{3} \tan \phi'$$

ϕ' es el ángulo de rozamiento de pico del relleno (con máximo de 34° , salvo que se cuente con ensayos que justifiquen valores mayores)

Para deslizamiento se adopta también el mismo valor del rozamiento en el contacto

RESISTENCIA AL ARRANCAMIENTO (FHWA) VALORES POR DEFECTO

$$F^* = F_q \cdot \alpha_\beta + \tan \rho$$

Para geotextiles o geomallas con $St < S_{opt}$. Sólo rozamiento

$$F^* = \tan \rho = \frac{2}{3} \tan \phi'$$

ϕ' es el ángulo de rozamiento de pico del relleno (con máximo de 34° salvo que se cuente con ensayos)

Para deslizamiento se adopta también el mismo valor del rozamiento en el contacto

$$P_r = 2 \cdot \alpha \cdot F_q \cdot \sigma'_v \cdot \alpha_\beta L_e + 2 \cdot \alpha \cdot \sigma'_v \cdot \tan \rho \cdot L_e$$

De nuevo, el primer sumando es el término de capacidad de carga (“pasiva”). El segundo el de rozamiento en el contacto refuerzo suelo.

Ejemplo 1: Flejes de tierra armada. La fuerza por metro de ancho de fleje sólo depende del rozamiento, con $\alpha = 1$

$$P_r = 2 \cdot \sigma'_v \cdot \tan \rho \cdot L_e$$

La fuerza de arrancamiento por fleje de ancho b sería entonces:

$$P_r = 2 \cdot \sigma'_v \cdot \tan \rho \cdot L_e \cdot b$$

Desarrollando le expresión de P_r :

$$P_r = 2 \cdot \alpha \cdot F_q \cdot \sigma'_v \cdot \alpha_\beta L_e + 2 \cdot \alpha \cdot \sigma'_v \cdot \tan \rho \cdot L_e$$

El primer sumando es el término de capacidad de carga (“pasiva”). El segundo el de rozamiento en el contacto refuerzo suelo. Parece complicado, pero veamos algunos ejemplos:

Ejemplo 1: Flejes de tierra armada. La fuerza por metro de ancho de fleje sólo depende del rozamiento, con $\alpha = 1$

$$P_r = 2 \cdot \sigma'_v \cdot \tan \rho \cdot L_e$$

La fuerza de arrancamiento por fleje de ancho b sería entonces:

$$P_r = 2 \cdot \sigma'_v \cdot \tan \rho \cdot L_e \cdot b$$

$$P_r = 2 \cdot \alpha \cdot F_q \cdot \sigma'_v \cdot \alpha_\beta L_e + 2 \cdot \alpha \cdot \sigma'_v \cdot \tan \rho \cdot L_e$$

Ejemplo 2: Geotextil. Sólo componente de rozamiento. Con $\alpha=0.6$, la fuerza de arrancamiento por unidad de ancho de geotextil resulta:

$$P_r = 2 \cdot \alpha \cdot \sigma'_v \cdot \tan \rho \cdot L_e = 1.2 \cdot \sigma'_v \cdot \tan \rho \cdot L_e$$

Ejemplo 3: Geomalla inextensible formada por barras ($fb=1$) y con $St > S_{opt}$. En principio tendría las dos componentes, pero se desprecia la del rozamiento. Con $\alpha=1$ resulta:

$$P_r = 2 \cdot \frac{\sigma'_b}{\sigma'_v} \sigma'_v \cdot \frac{t}{2S_t} \cdot L_e$$

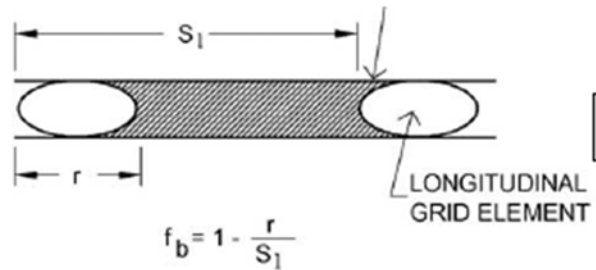
Simplificando:

$$P_r = \sigma'_b \cdot \frac{L_e}{S_t} \cdot t$$

Nótese que L_e/S_t es el número de nervios transversales disponibles en L_e

$$P_r = 2 \cdot \alpha \cdot F_q \cdot \sigma'_v \cdot \alpha_\beta L_e + 2 \cdot \alpha \cdot \sigma'_v \cdot \tan \rho \cdot L_e$$

Ejemplo 4: Geomalla extensible con $St > S_{opt}$ y $f_b = 0.85$. Tiene todas los componentes, pero se desprecia el rozamiento. Con $\alpha = 0.8$ resulta:



$$P_r = 2 \cdot 0.8 \cdot \frac{\sigma'_b}{\sigma'_v} \sigma'_v \cdot \frac{0.85 \cdot t}{2S_t} \cdot L_e$$

$$P_r = 0.68 \cdot \sigma'_b \cdot \frac{L_e}{S_t} \cdot t$$

Nótese que L_e/S_t es el número de nervios transversales disponibles en L_e

Geometría

Para relacionar fuerza por unidad de ancho del refuerzo con distribuciones de refuerzos discontinuas se emplea el factor R_c (coverage ratio), que es simplemente el ancho de refuerzo disponible por unidad de ancho de muro

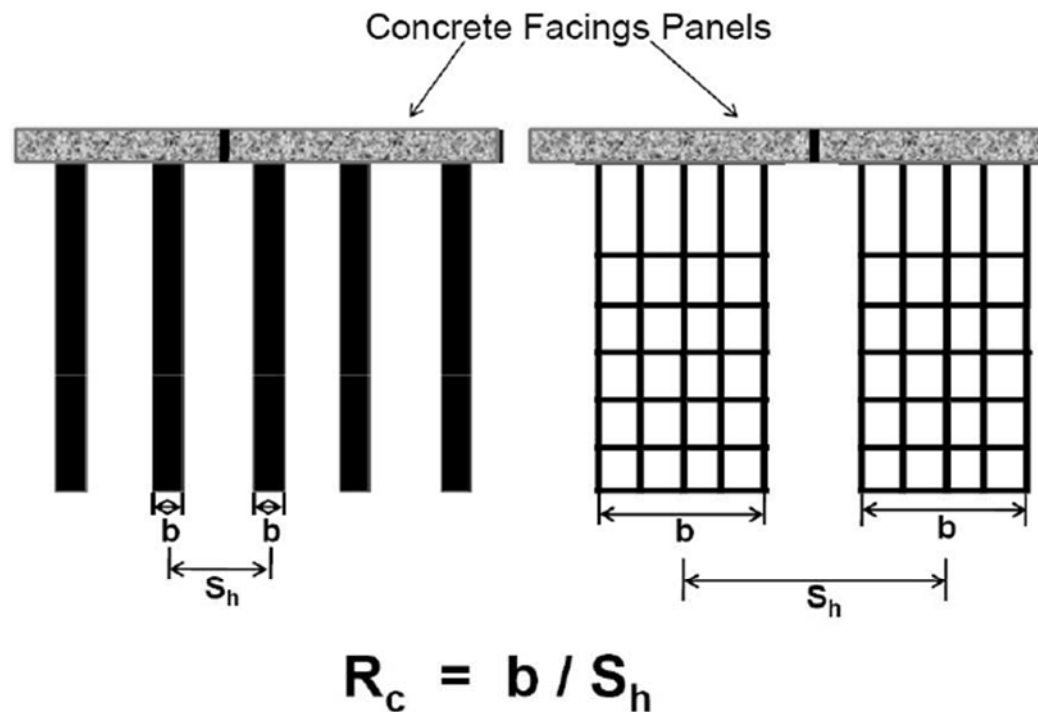


Figure 3-3. Coverage ratio.

REFUERZOS DE ACERO

- Se reduce el espesor por la corrosión prevista durante la vida útil

$$E_c = E_n - E_R$$

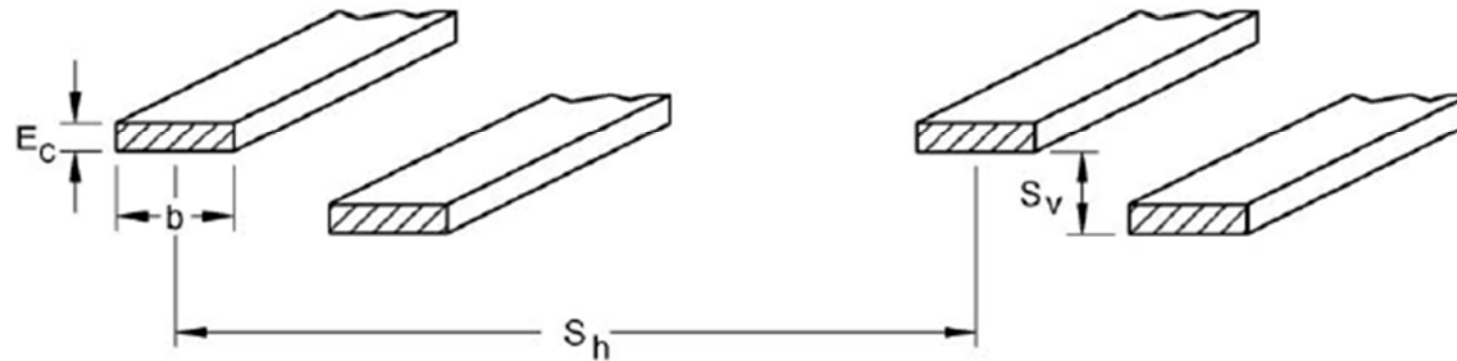
Donde E_c es el espesor al final de la vida útil, E_n es el espesor nominal y E_R es el espesor perdido por corrosión

- La resistencia nominal a tracción T_{al} **por unidad de ancho del refuerzo** se expresa como:

$$T_{al} = \frac{F_y \cdot A_c}{b}$$

Donde b es el ancho del refuerzo, F_y es el límite elástico del acero y A_c la sección de refuerzo de ancho b , reducida por corrosión

Refuerzos de acero. Flejes



$$A_c = b E_c$$

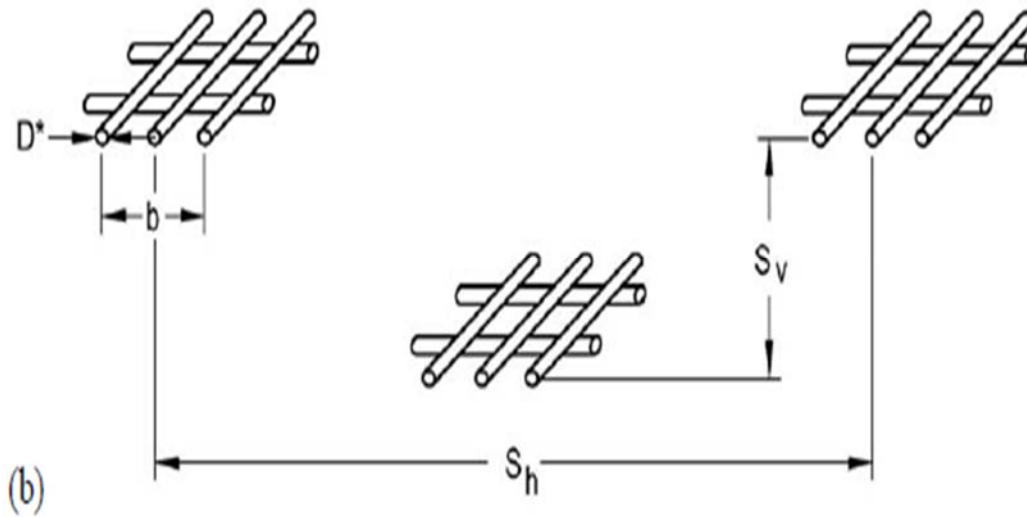
E_c = strip thickness corrected for corrosion loss.

(a)

La FHWA establece el cálculo con coeficientes parciales (LFRD). La resistencia de cálculo por metro lineal de muro está afectada por un coeficiente reductor $\phi = 0.75$ para flejes de acero

$$T_r = \phi \cdot T_{al} \cdot R_c = \phi \cdot \frac{F_y \cdot A_c}{b} \cdot \frac{b}{S_h} = 0.75 \cdot \frac{F_y \cdot E_c \cdot b}{S_h}$$

Refuerzos de acero. Geomalla de barras



$$A_c = (n^{\circ} \text{ barras}) \cdot \frac{\pi \cdot (D^*)^2}{4}$$

D^* es el diámetro de las barras, corregido por corrosión

Para geomallas de acero $\phi=0.65$

$$T_r = \phi \cdot T_{al} \cdot R_c = \phi \cdot \frac{F_y \cdot A_c}{b} \cdot \frac{b}{S_h} = 0.65 \cdot \frac{F_y \cdot A_c}{S_h}$$

Refuerzos de acero. Consideraciones sobre corrosión

Table 3-7. Minimum Galvanization Thickness by Steel Thickness
(after AASHTO M 111 and ASTM A123).

Category	Steel Thickness	Minimum Galvanization Thickness
Strip	< ¼ in. (6.4 mm)	3.4 mils (85 µm)
	> ¼ in. (6.4 mm)	3.9 mils (100 µm)
Wire*	All diameters	3.4 mils (85 µm)

* For bar mats fabricated from uncoated steel wire.

Table 3-8 Steel Corrosion Rates for Moderately Corrosive Reinforced Fill.

For zinc/side:	0.58 mils/yr (15 µm/year) (first 2 years)
	0.16 mils/yr (4 µm/year) (thereafter)
For residual carbon steel/side:	0.47 mils/yr (12 µm/year) (thereafter)

REFUERZOS CON GEOCOMUPUESTOS

Su resistencia puede degradarse por varios motivos: actividad fisico-química, daños durante la instalación, fluencia, temperatura, etc.

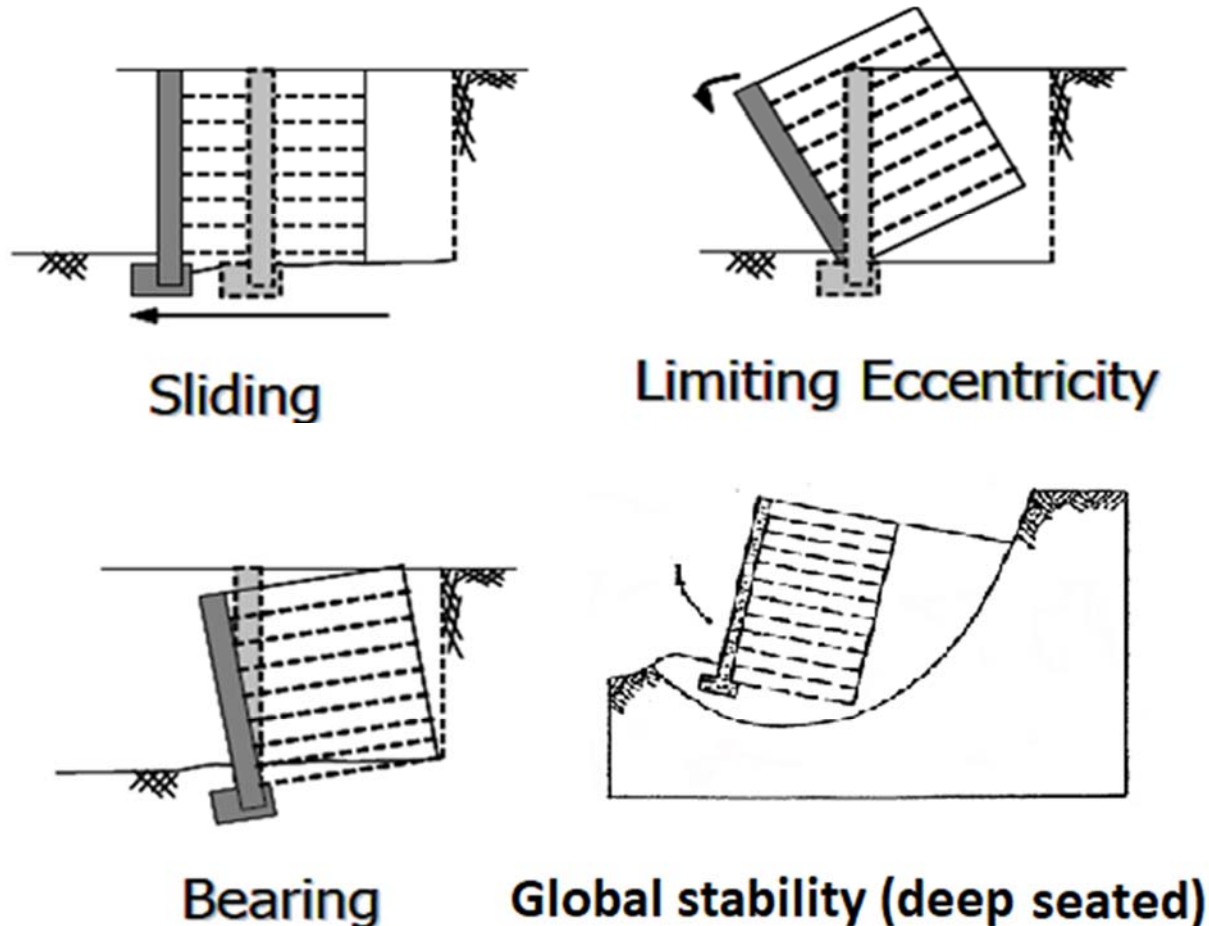
La resistencia a largo plazo T_{al} por unidad de ancho de refuerzo se expresa como

$$T_{al} = \frac{T_{ult}}{RF_{ID} \cdot RF_{CR} \cdot RF_B}$$

Donde:

- T_{ult} : Se determina con ensayos. ASTM 4595, por ejemplo
- RF: factores de reducción:
 - ID: Por instalación
 - CR: Por fluencia
 - D: Por durabilidad (envejecimiento químico)

ESTADOS LÍMITE. ESTABILIDAD EXTERNA

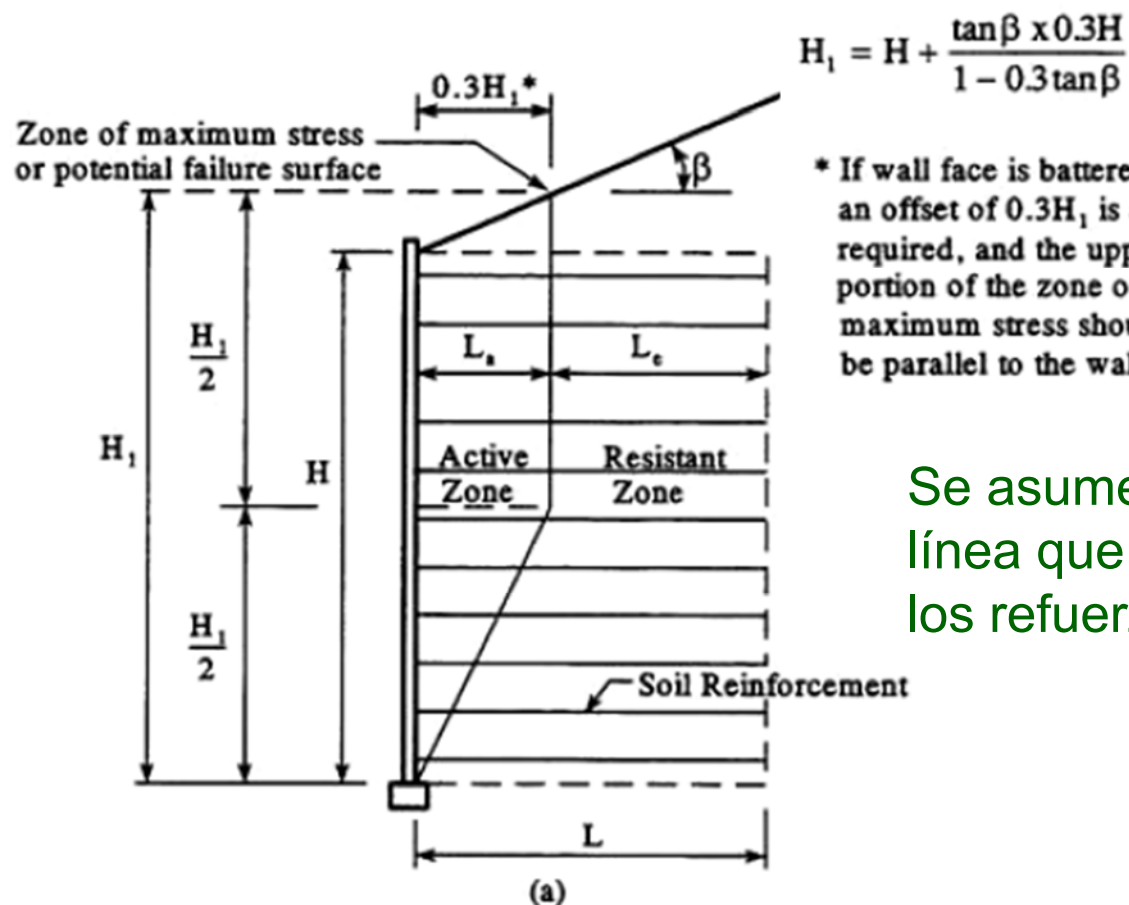


Son comprobaciones convencionales similares a las de cualquier otro tipo de muro. Como se aprecia en la figura, los modos de rotura asumen que la masa de suelo reforzado funciona como un bloque. Se encuentran detalladamente definidas en el manual

ESTADOS LÍMITE. ESTABILIDAD INTERNA

La rotura interna se puede producir de dos formas:

- Por rotura de los elementos de refuerzo (también puede ser por elongación excesiva en el caso de muros de geosintéticos)
- Por arrancamiento de los refuerzos



Para estudiar la estabilidad interna en TA (refuerzo inextensible), se considera una superficie “crítica” de rotura quebrada que divide la zona reforzada en una parte “activa” y otra “resistente”

Se asume que la superficie crítica coincide con la línea que une los puntos de tracción máxima en los refuerzos (observación experimental)

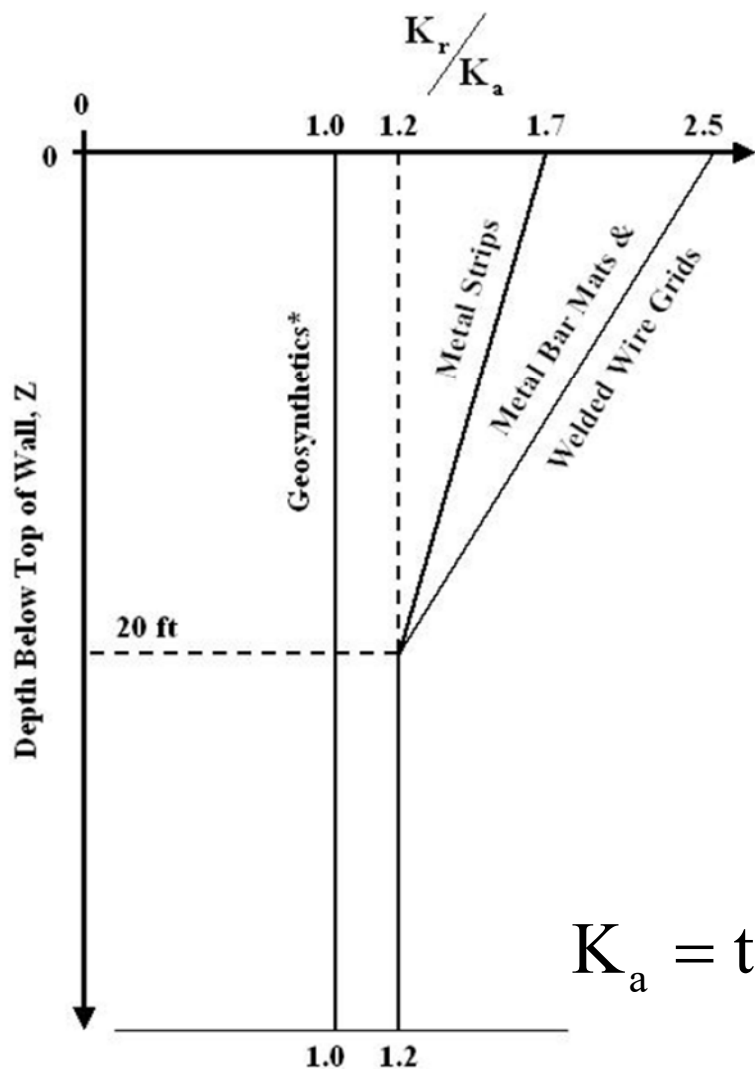
ESTABILIDAD INTERNA. DISTRIBUCIÓN DEL REFUERZO EN VERTICAL

En principio los refuerzos no se separan en vertical más de 80 cm, salvo excepciones. A mayor profundidad se requiere mayor refuerzo. Este hecho se tiene en cuenta, bien variando el espaciamiento en vertical (S_v), bien aumentando el refuerzo por metro lineal de muro a medida que se profundiza

En muros con flejes o mallazos de acero se suele mantener constante el espaciamiento en vertical y se aumenta la densidad del refuerzo, el número de elementos o su tamaño (flejes más juntos y/o flejes más grandes, por ejemplo), en cada plataforma .

En muros con geomallas y geotextiles es común modificar el espaciamiento S_v . Estos espaciamientos hay que adaptarlos no obstante a un múltiplo del espesor de las tongadas compactadas. Para muros altos también es frecuente cambiar a geomallas o geotextiles de resistencia creciente en profundidad

ESTABILIDAD INTERNA. TENSIONES HORIZONTALES



*Does not apply to polymer strip reinforcement

Se adopta la siguiente distribución de tensiones horizontales

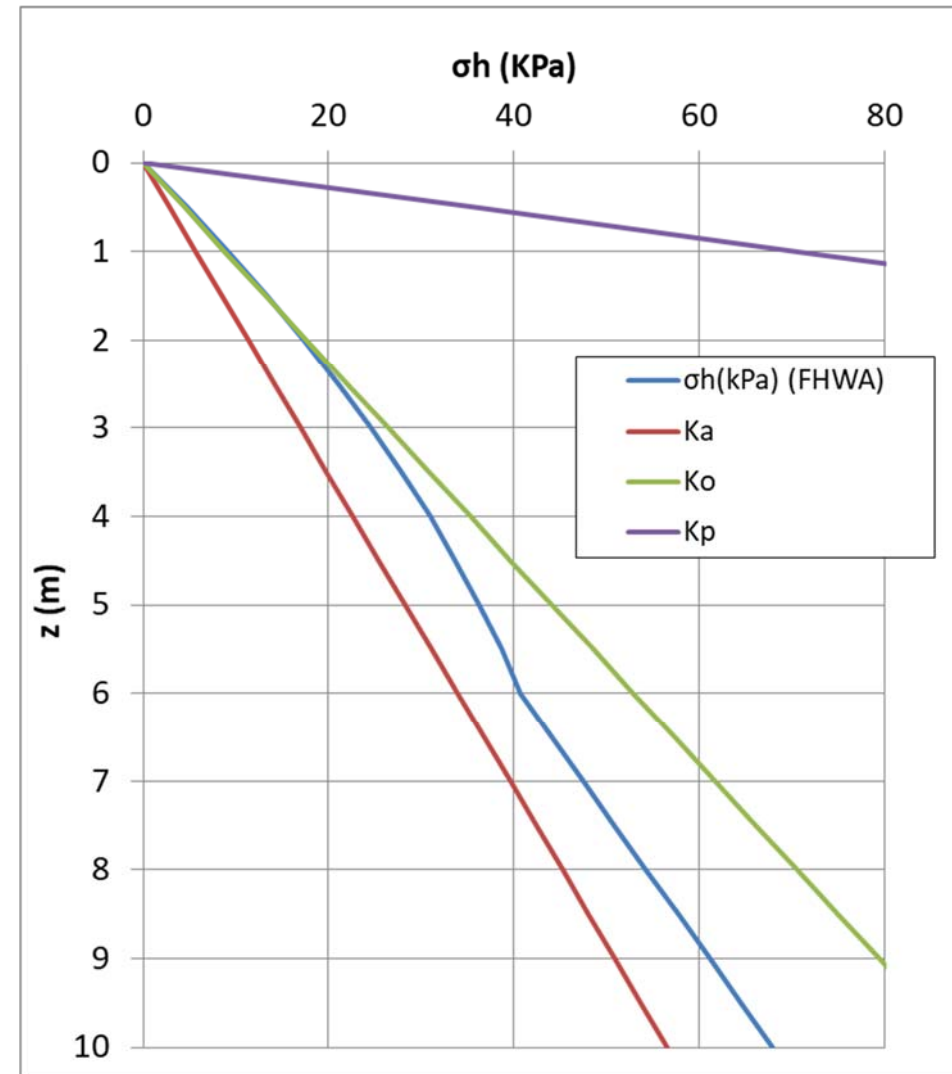
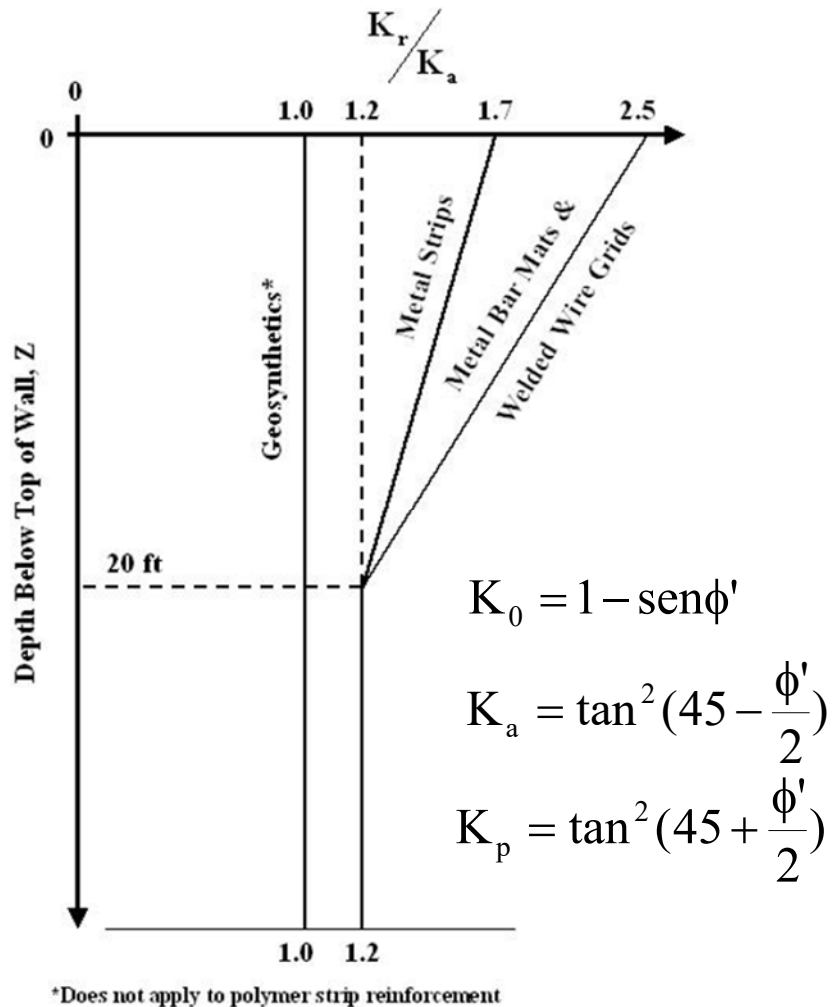
$$\sigma_h = K_r \cdot \sigma_v + \Delta\sigma_H$$

- σ_v es la presión vertical de tierras (mayorada) a cada profundidad
- $\Delta\sigma_H$ es el incremento de tensión horizontal (mayorada) debido a otras cargas externas
- K_a es el coeficiente de empuje de Rankine para el relleno del macizo de TA . Para muro vertical e inclinado respectivamente:

$$K_a = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi'_r}{2} \right) \quad K_a = \frac{\text{sen}(\theta + \phi'_r)}{\text{sen}^3 \theta \cdot \left[1 + \frac{\text{sen} \phi'_r}{\text{sen} \theta} \right]}$$

ESTABILIDAD INTERNA. TENSIONES HORIZONTALES

Ejemplo para $(K_r/K_a)_{\max} = 1.7$; $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$; $\phi' = 34^\circ$. Superficie horizontal, sin sobrecargas



ESTABILIDAD INTERNA. FACTORES DE MAYORACIÓN

Presión vertical debido al peso de tierras del macizo:

$$\gamma_{P-EV} = 1.35$$

Las sobrecargas verticales debidas a peso de suelo y consideradas como carga de suelo equivalente (LS tráfico en este caso), se consideran EV y llevan el mismo coeficiente

$$\gamma_{P-EV} = 1.35$$

Las demás cargas verticales (no asimilables a una altura de suelo) son de tipo ES (por ejemplo el efecto de una zapara por encima del muro). Su coeficiente es:

$$\gamma_{P-ES} = 1.50$$

Los incrementos de tensión horizontal adicionales se consideran ES:

$$\gamma_{P-ES} = 1.50$$

ESTABILIDAD INTERNA. EJEMPLOS DE TENSIONES HORIZONTALES A PROFUNDIDAD Z

Muro vertical con coronación horizontal, sin sobrecargas:

$$\sigma_h = 1.35 \cdot K_r \cdot \gamma_r \cdot z$$

Muro vertical con coronación inclinada (Seq es una altura de tierras equivalente al efecto de la sobrecarga en talud)

$$\sigma_h = 1.35 \cdot K_r \cdot \left[\gamma_r \cdot (z + S_{eq}) \right]$$

Muro vertical con coronación horizontal y sobrecarga de tráfico (heq es una altura de tierras equivalente al efecto de la sobrecarga de tráfico)

$$\sigma_h = 1.35 \cdot K_r \cdot \left[\gamma_r \cdot (z + h_{eq}) \right]$$

Muro vertical con coronación horizontal y con una zapata de estribo sobre él (ver manual FHWA)

ESTABILIDAD INTERNA. TRACCIÓN MÁXIMA T_{MAX}

Tracción máxima por unidad de longitud de muro

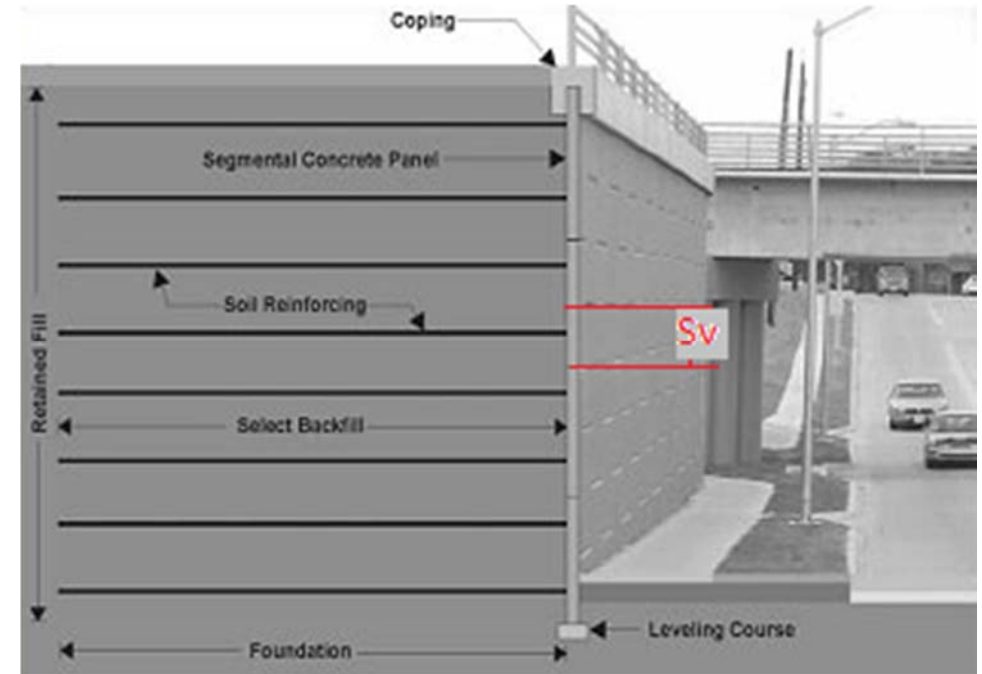
$$T_{MAX} = \sigma_H \cdot S_v$$

Tracción máxima por refuerzo . Caso de refuerzos discontinuos

$$T_{MAX_B} = \sigma_H \cdot S_v \cdot S_h = \frac{\sigma_H \cdot S_v \cdot b}{R_c}$$

Tracción máxima por unidad de ancho de refuerzo . Caso de refuerzos discontinuos

$$P_{TMAX_UWR} = \frac{\sigma_H \cdot S_v}{R_c}$$



Tomada de Internet

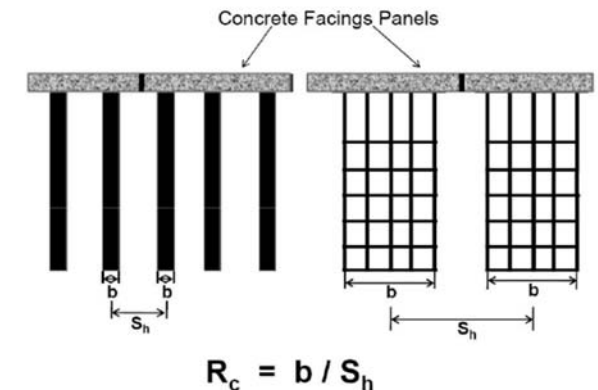


Figure 3-3. Coverage ratio.

ESTABILIDAD INTERNA. RESISTENCIA DEL REFUERZO. SEGURIDAD

Table 4-7. Resistance Factors, ϕ , for Tensile and Pullout Resistance for MSE Walls
(after Table 11.5.6-1, AASHTO {2007}).

Resistencia por unidad de ancho del refuerzo

$$T_R = \phi \cdot T_{al} \quad T_{al} = \frac{F_y \cdot A_c}{b}$$

Resistencia por unidad de longitud de muro

$$T_r = \phi \cdot T_{al} \cdot R_c$$

Se comprueba que:

$$T_{max} \leq T_r$$

Reinforcement Type and Loading Condition		Resistance Factor
Metallic reinforcement and connectors	Strip reinforcements ^(A)	
	Static loading	0.75
	Combined static/earthquake loading	1.00
	Combined static/traffic barrier impact ^(B)	1.00
	Grid reinforcements ^(A, C)	
	Static loading	0.65
Geosynthetic reinforcement and connectors	Combined static/earthquake loading	0.85
	Combined static/traffic barrier impact ^(B)	0.85
	Static loading	0.90
Pullout resistance of tensile reinforcement (metallic and geosynthetic)	Combined static/earthquake loading	1.20
	Combined static/traffic barrier impact ^(B)	1.20
	Static loading	1.00
Notes:		
A. Apply to gross cross-section less sacrificial area. For sections with holes, reduce gross area in accordance with AASHTO (2007) Article 6.8.3 and apply to net section less sacrificial area.		
B. Combined static/traffic barrier impact resistance factors are not presented in AASHTO.		
C. Applies to grid reinforcements connected to rigid facing element, e.g., a concrete panel or block. For grid reinforcements connected to a flexible facing mat or which are continuous with the facing mat, use the resistance factor for strip reinforcements.		

ESTABILIDAD INTERNA. ARRANCAMIENTO DEL REFUERZO. SEGURIDAD

Resistencia al arrancamiento minorada por unidad de ancho del refuerzo:

$$P_{r-\text{minorada}} = \phi \cdot 2F^* \alpha \sigma'_v L_e$$

Por unidad de longitud de muro

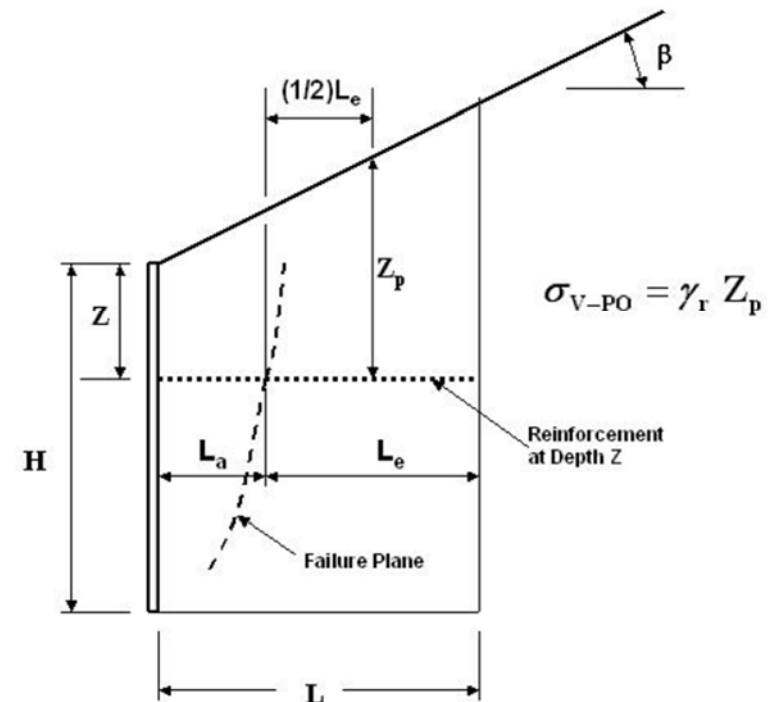
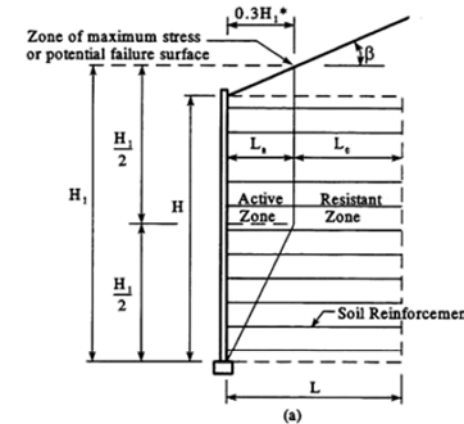
$$P_{r-\text{minorada-um}} = \phi \cdot 2F^* \alpha \sigma'_v L_e \cdot R_c$$

Se debe cumplir :

$$T_{\text{MAX}} \leq \phi \cdot 2F^* \alpha \sigma'_v L_e \cdot R_c$$

Se establece:

$$L_e \geq \frac{T_{\text{MAX}}}{\phi \cdot 2F^* \alpha \sigma'_v \cdot R_c} \geq 1 \text{ m}$$



CÁLCULOS DE TIERRA ARMADA (FHWA)

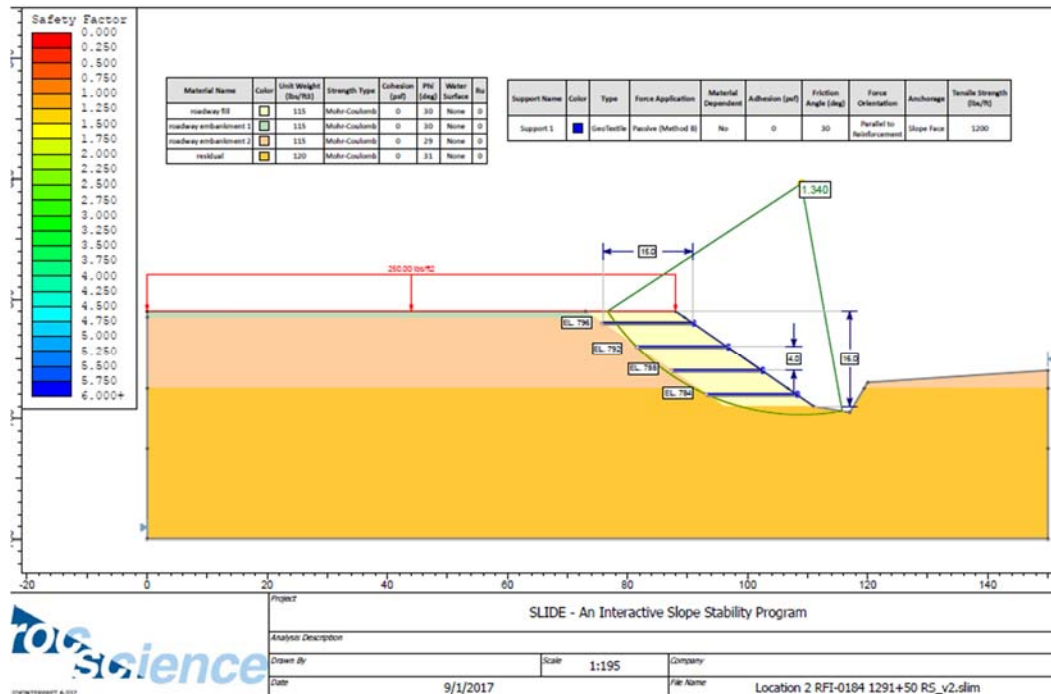
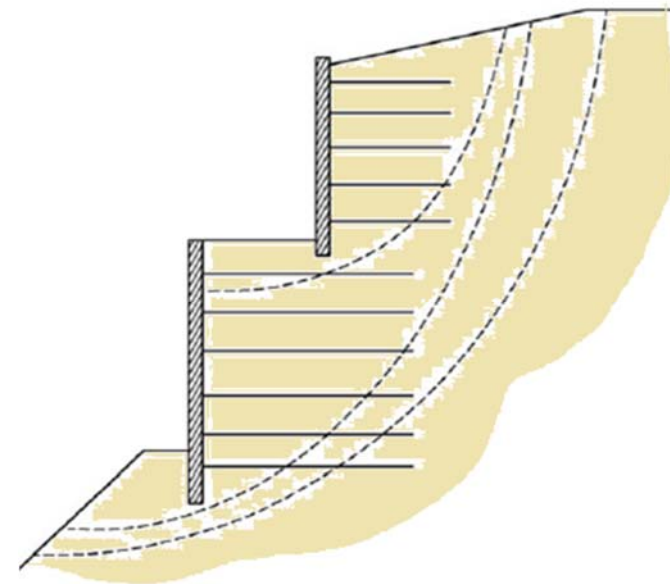
ESTADOS LÍMITE. OTRAS COMPROBACIONES

Resistencia de la conexión con el paramento

Resistencia del paramento

Estabilidad global y compuesta (FS=1.30 a 1.50)

Otras



REFUERZOS CON POLÍMEROS

Su comportamiento mecánico depende de:

Composición química
Temperatura
Tiempo

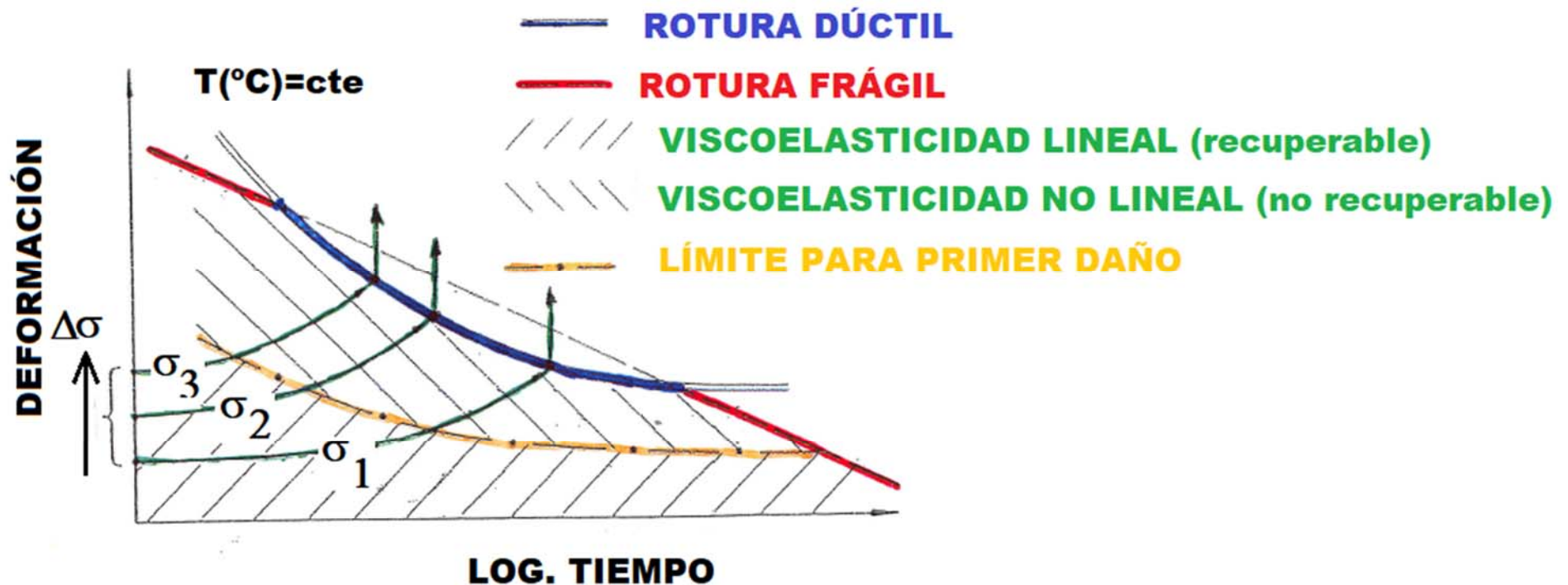
Cada material posee unas propiedades en cuanto a :

RIGIDEZ (expresada en isocronas)
RESISTENCIA (transición dúctil/frágil)

Sufren cambios respecto a sus condiciones ideales debido a:

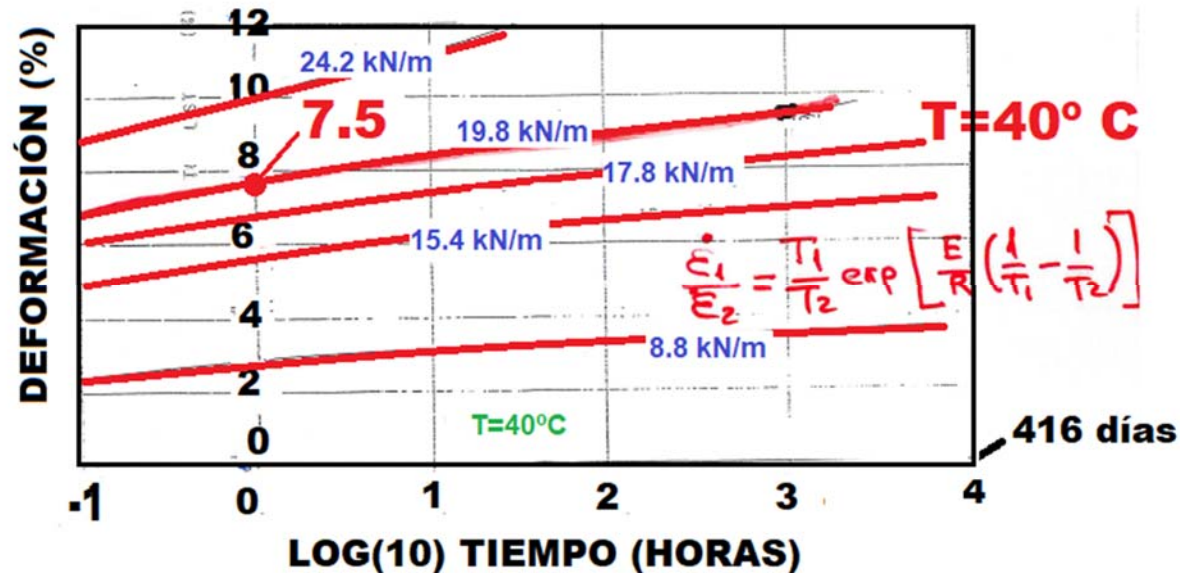
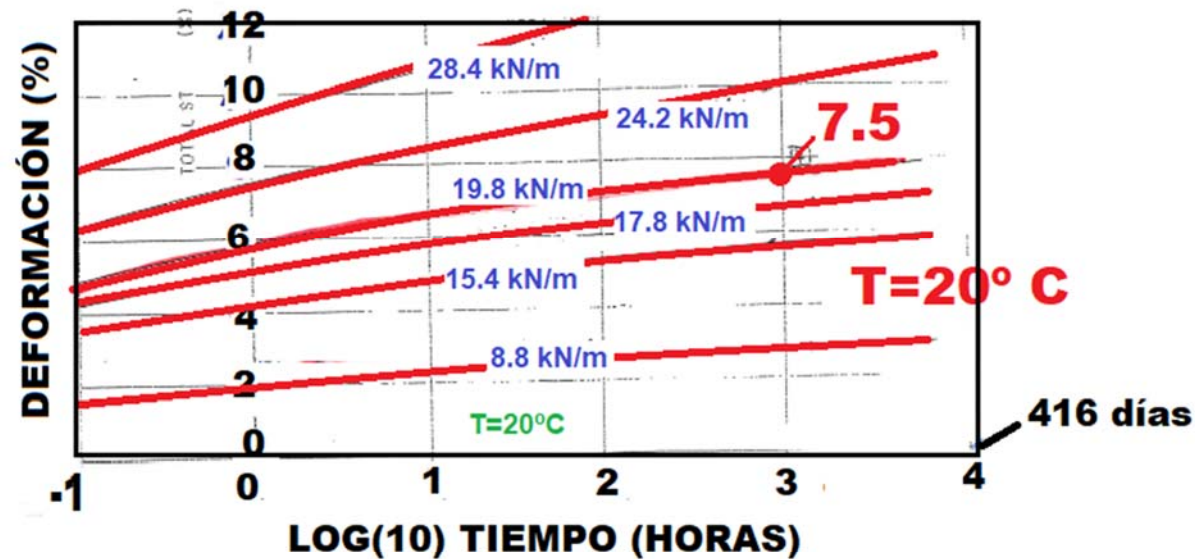
Cargas cíclicas
Procesos de deterioro (daño) mecánicos y químicos

COMPORTAMIENTO DE POLÍMEROS BAJO CARGA CONSTANTE A TEMPERATURA CONSTANTE



Tomado de Milligan, 1994

CURVAS DE FLUENCIA A TENSION Y TEMPERATURA CONSTANTES

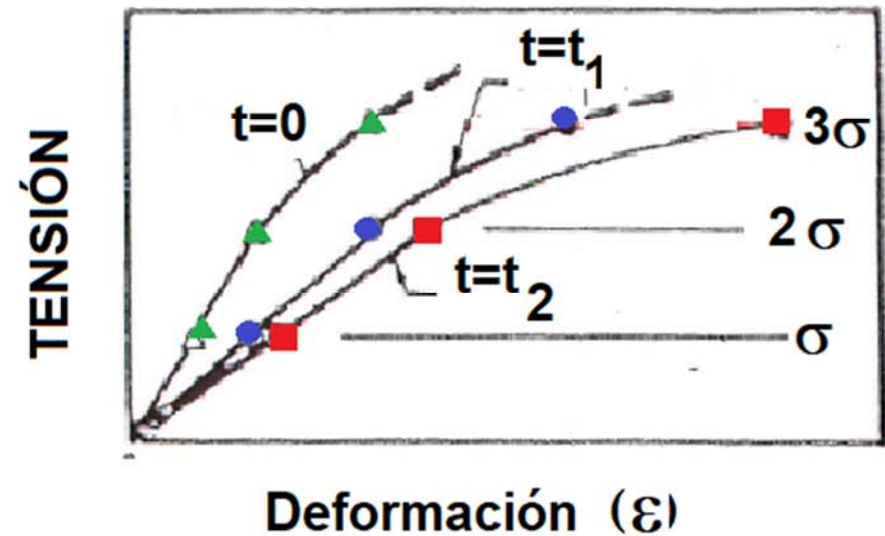
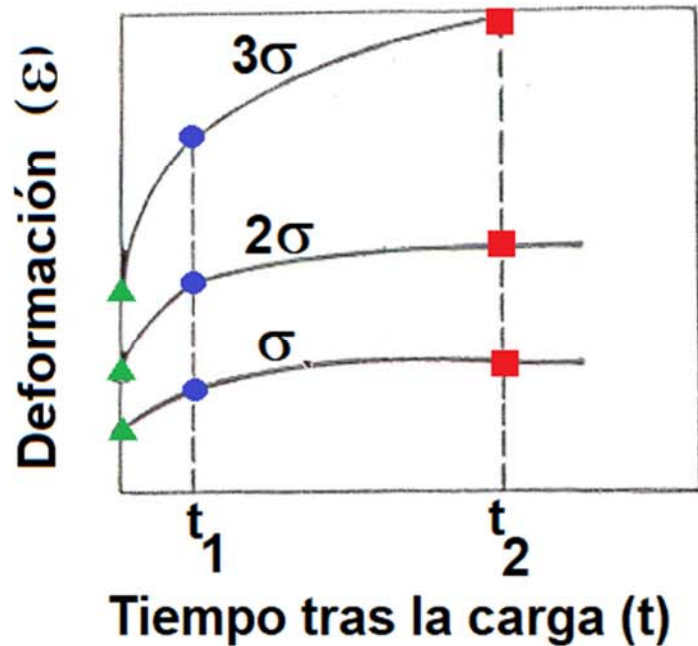


Ejemplo: Para una carga de 19.8 kN/m, el polímero ensayado alcanza un 7.5% de deformación a los 41.3 días si la temperatura es de 20 °C. Si la temperatura es de 40° C, sólo tarda 1 hora.

El aumento de temperatura equivale a una traslación vertical de las curvas del gráfico

Esta característica permite estudiar el efecto del tiempo aumentando la temperatura, sin tener que acudir a ensayos muy largos

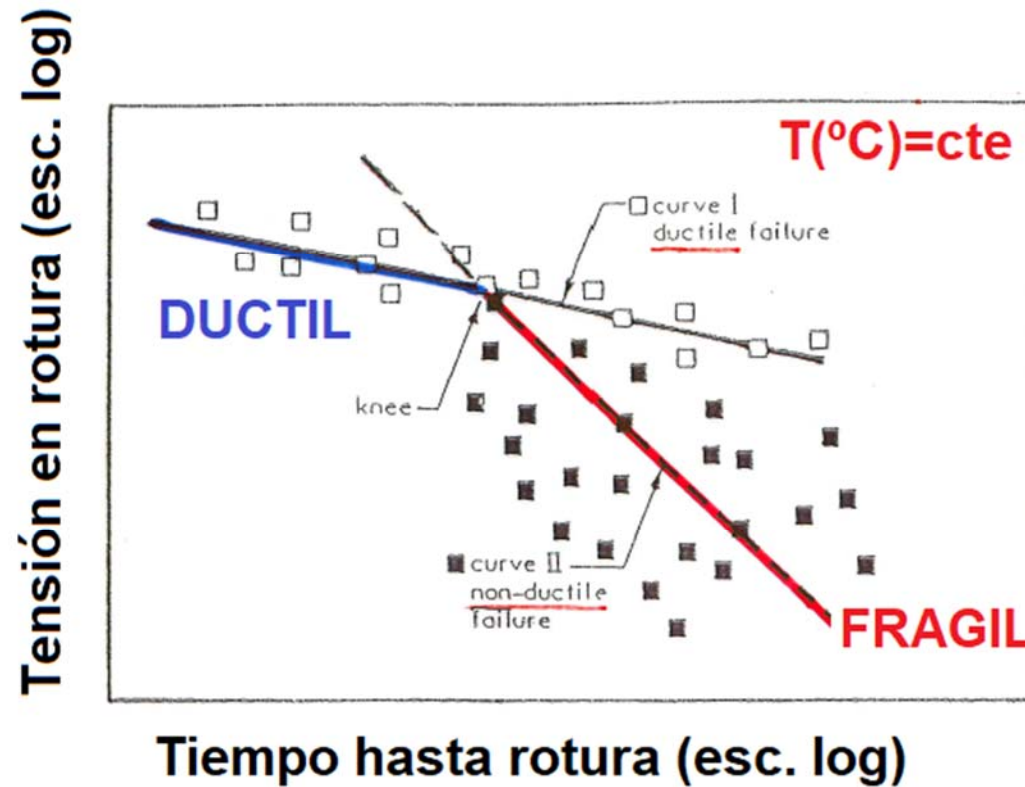
CURVAS ISOCRONAS. EVOLUCIÓN DE LA RIGIDEZ CON EL TIEMPO A TENSIÓN CONSTANTE



Tomado de Milligan, 1994

- Las curvas de la derecha se denominan isocronas. Muestran la relación (σ-ε) o carga extensión para diversos tiempos (de interés: final de construcción, vida útil...)
- Se observa que la rigidez (pendiente de las isocronas) disminuye con el tiempo

EVOLUCIÓN DE LA TENSIÓN DE ROTURA CON EL TIEMPO A TEMPERATURA CONSTANTE

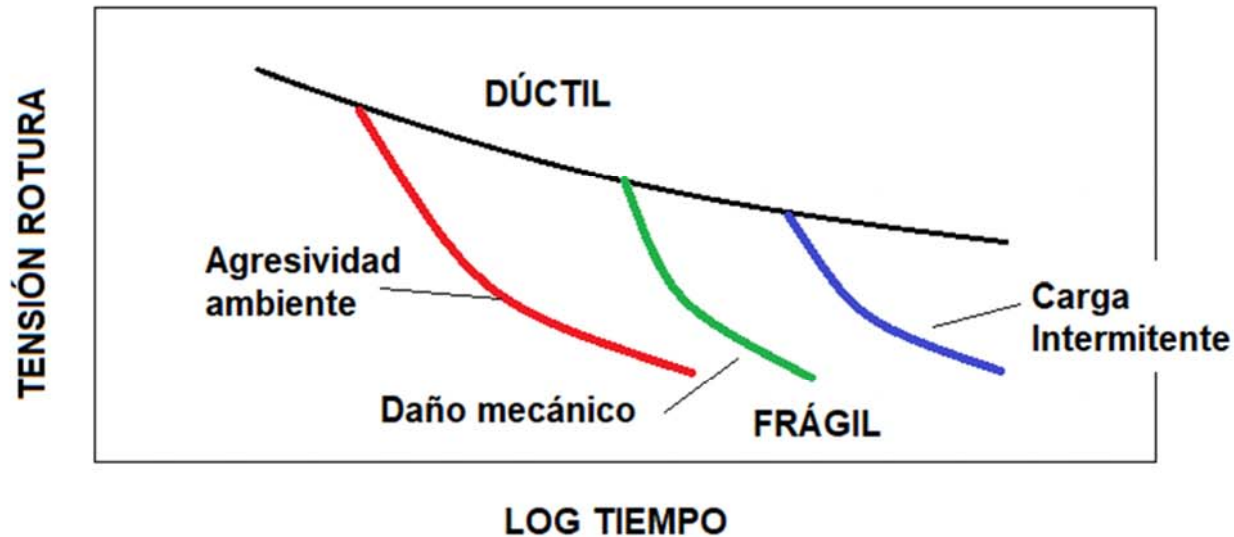


Tomado de Milligan, 1994

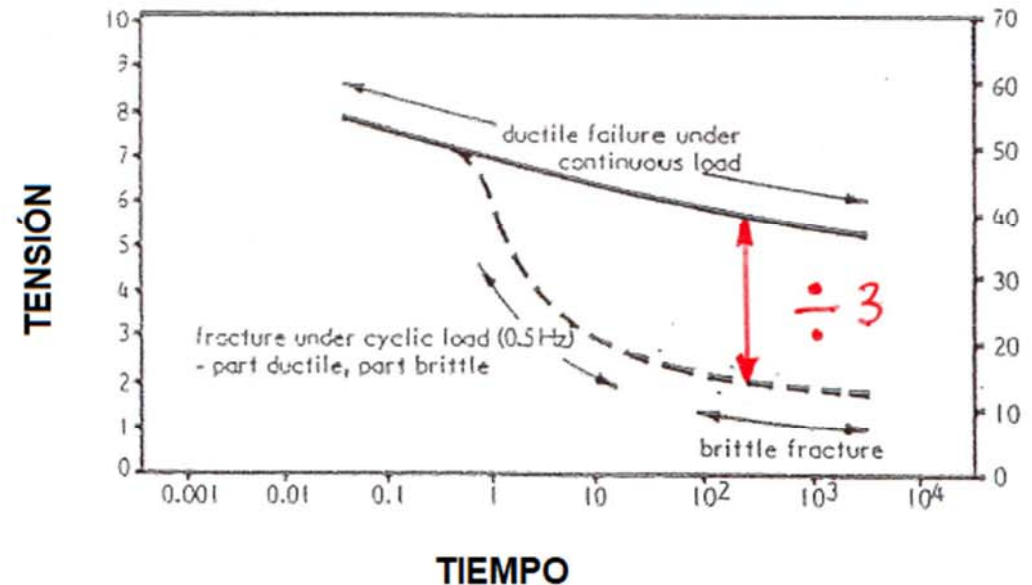
- 1.- El tiempo de rotura varía para cada tensión y temperatura
- 2.- El paso de rotura dúctil a frágil depende de factores externos y del tipo de carga

EVOLUCIÓN DE LA TENSIÓN DE ROTURA CON EL TIEMPO A TEMPERATURA CONSTANTE

PASO DE ROTURA DÚCTIL A FRÁGIL. CAUSAS

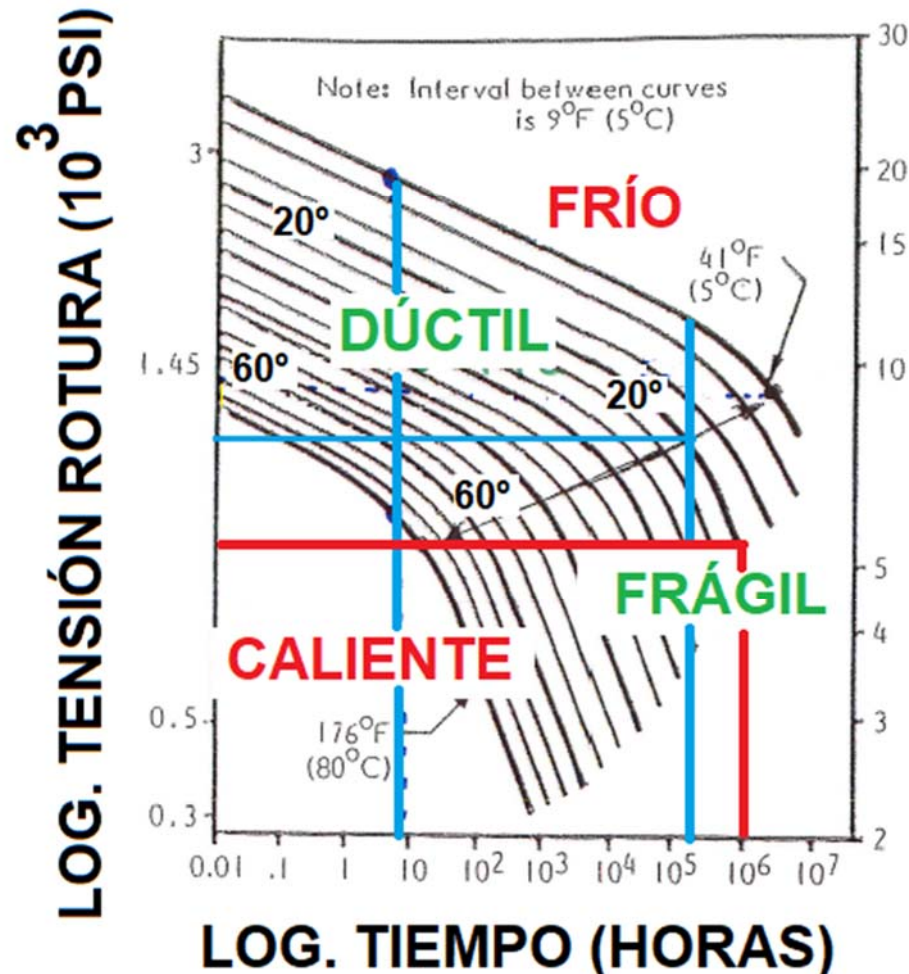


Tomado de Milligan, 1994



EVOLUCIÓN DE LA TENSIÓN DE ROTURA CON EL TIEMPO Y LA TEMPERATURA

(HPDE) POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD

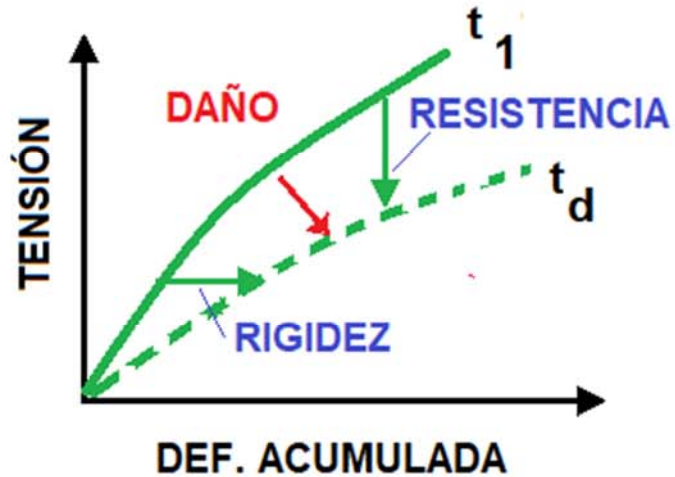


- Para una tensión determinada, el tiempo de rotura se reduce al aumentar la temperatura
- Incertidumbres con ensayos “cortos” para obtener valores realistas de la tensión de rotura

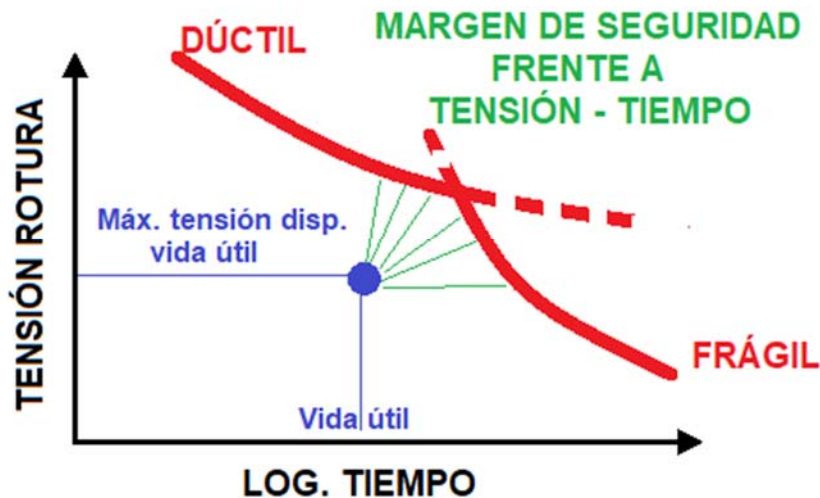
Tomado de Milligan, 1994

INFORMACIÓN PARA EL DISEÑO. RIGIDEZ Y RESISTENCIA

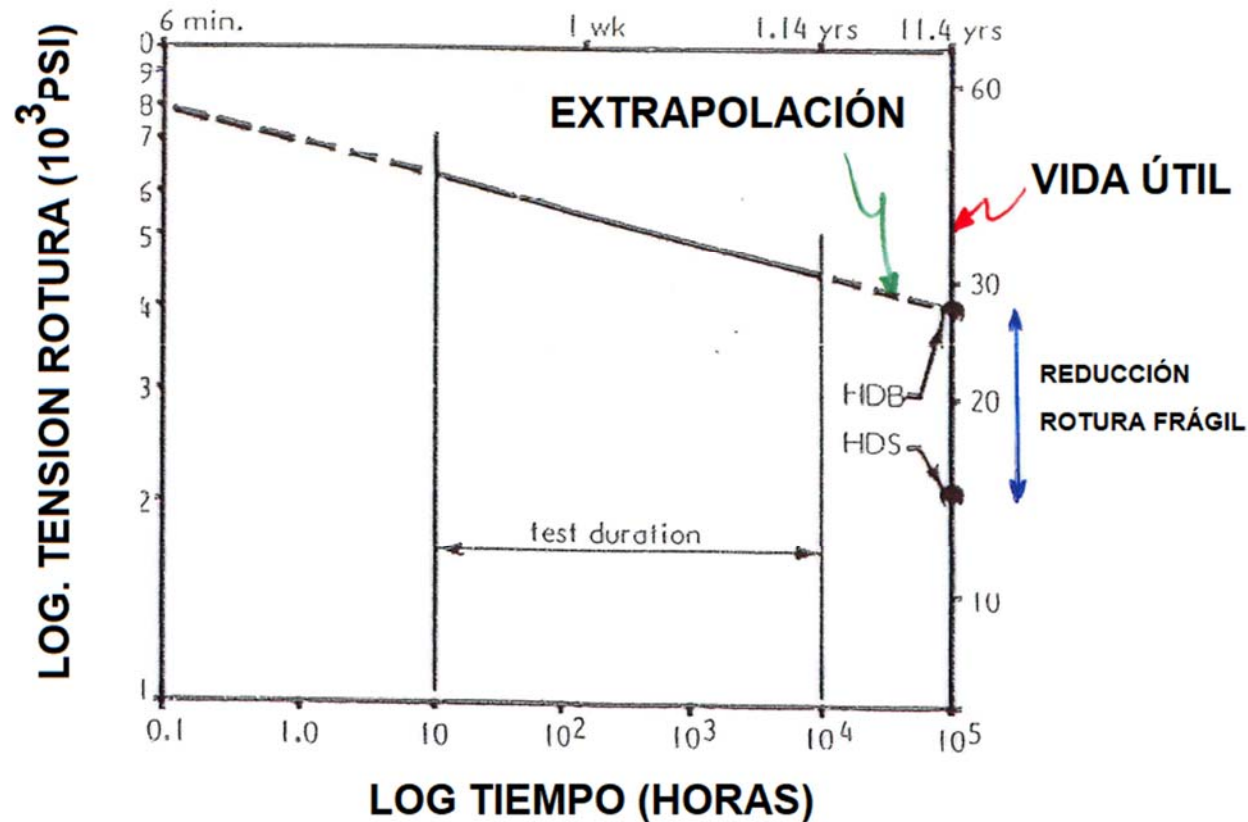
RIGIDEZ (¿cuánto se va a deformar?)



RESISTENCIA (¿se caerá?)



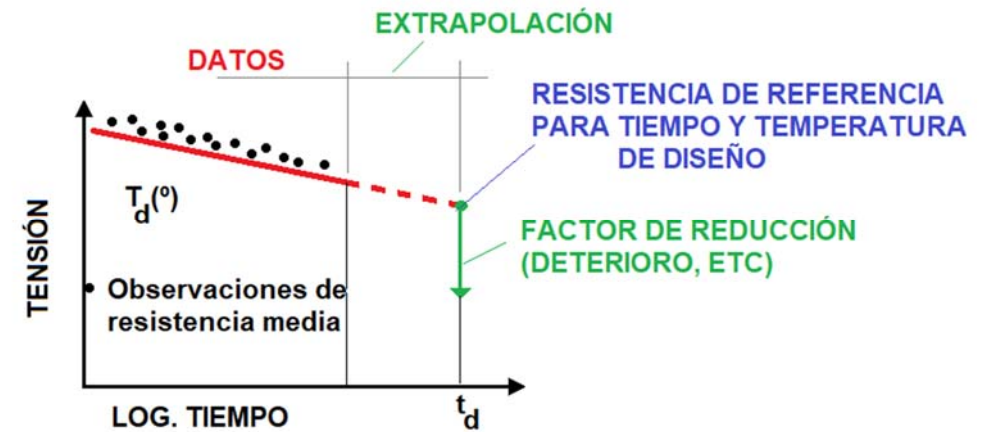
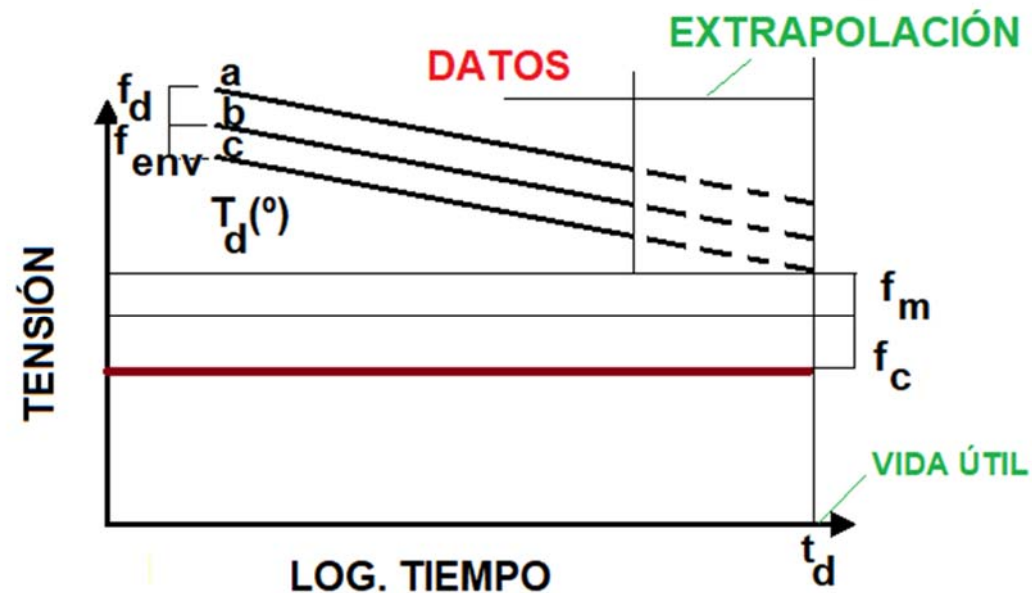
Tomado de Milligan, 1994



Tomado de Milligan, 1994

- Para cada tensión hay un tiempo de rotura

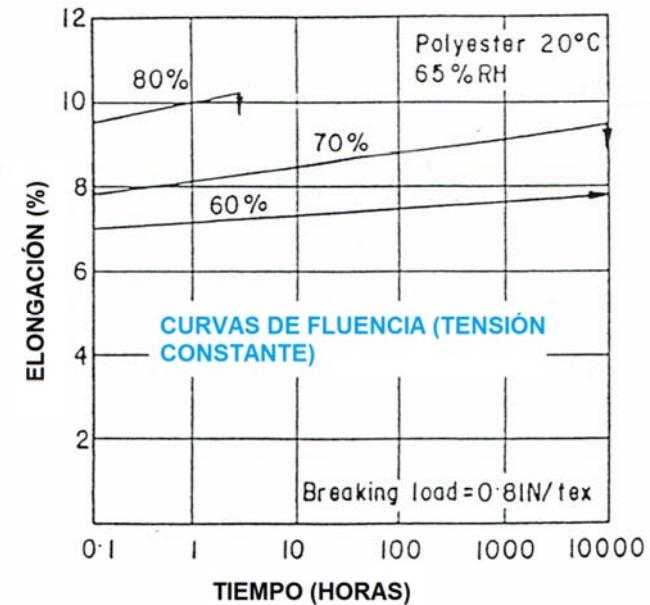
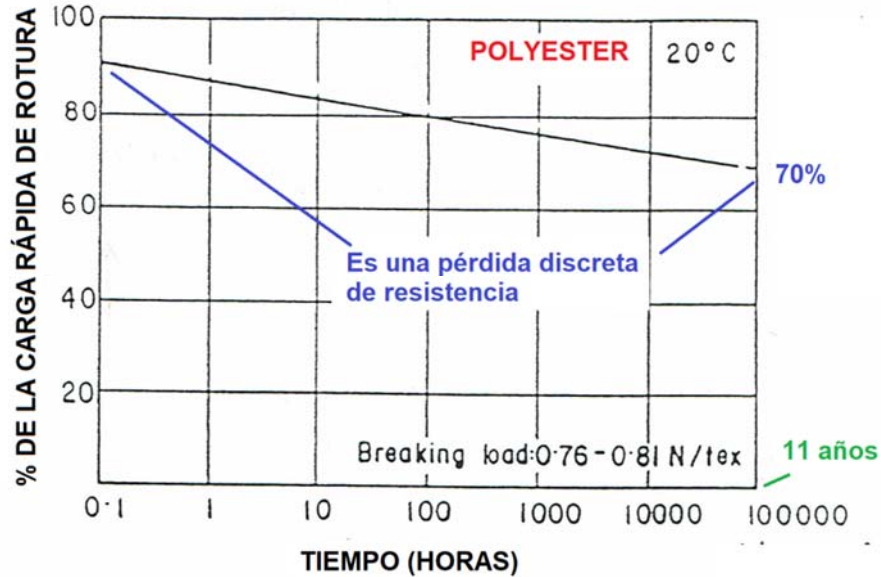
RESISTENCIA DE DISEÑO



Tomado de Milligan, 1994

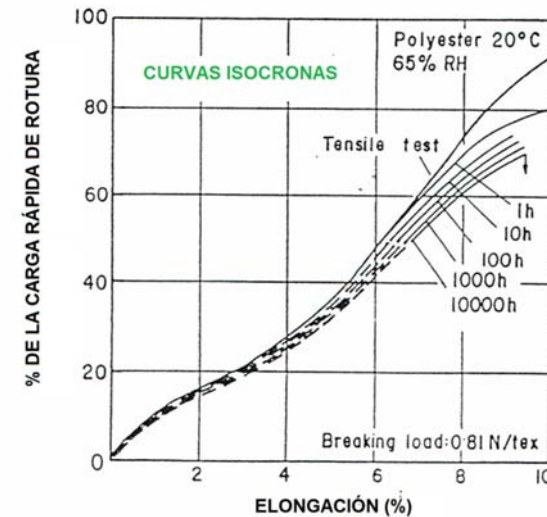
- f_d : Daños, deterioro físico
- f_{env} : Ambiental, ataque químico
- f_m : Coeficiente de seguridad del material
- f_c : Factor de seguridad global

EJEMPLO: POLYESTER



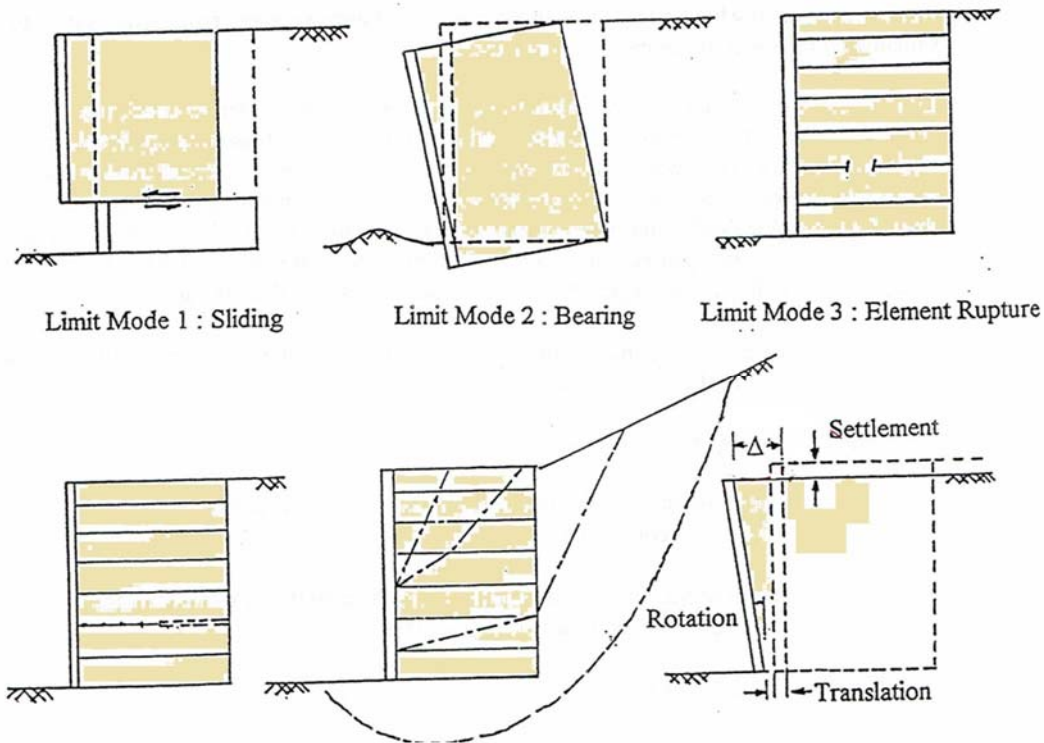
Tomado de Milligan, 1994

- No pierde mucha resistencia con el tiempo a temperatura normal
- Tampoco pierde mucha rigidez con el tiempo
- Es un buen material para este tipo de uso



ESTABILIDAD DE TALUDES DE SUELO REFORZADO

- MODOS DE ROTURA



Tomado de Milligan, 1994

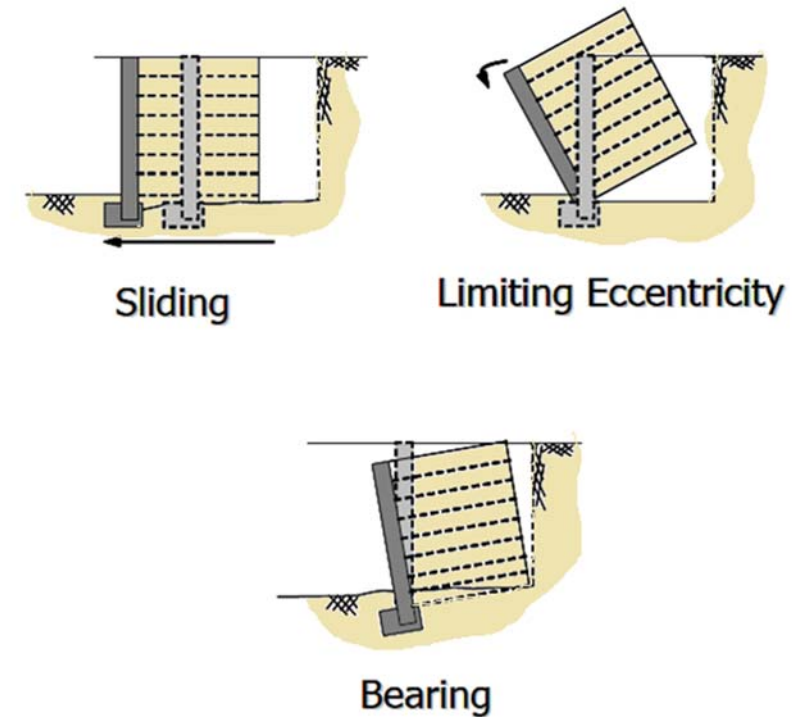
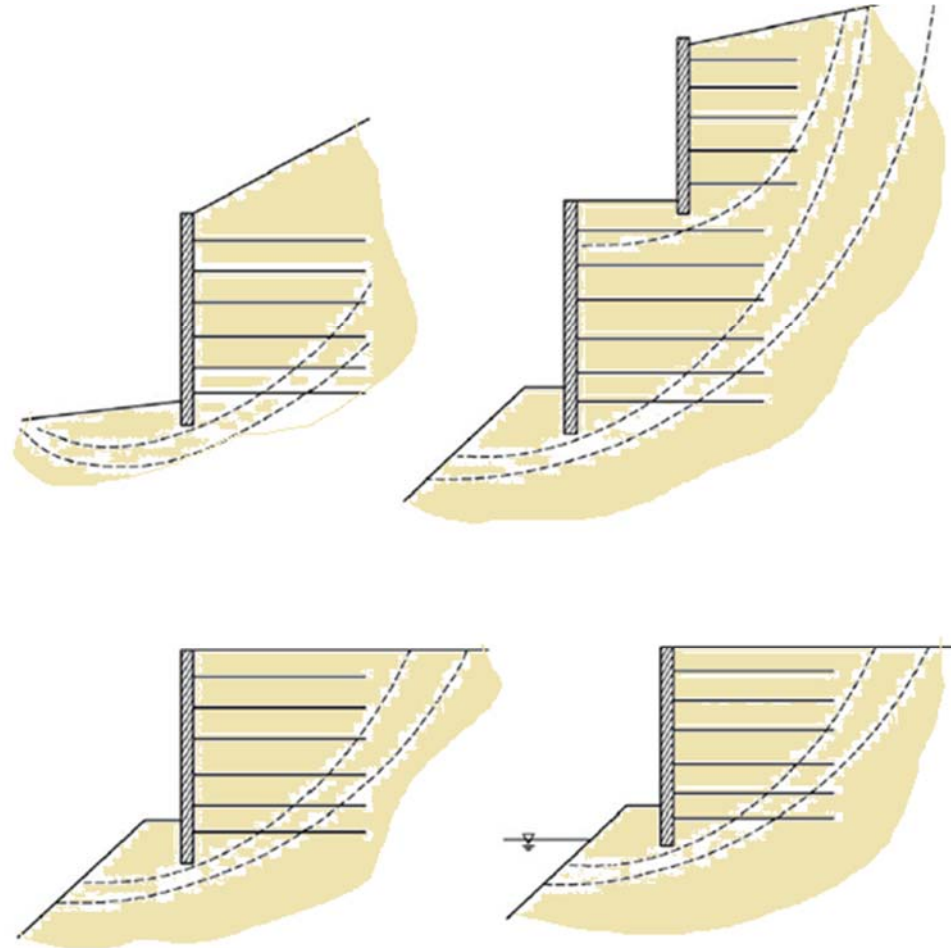


Figure 4-6. Potential external failure mechanisms for a MSE wall.

Tomado FHWA 2010

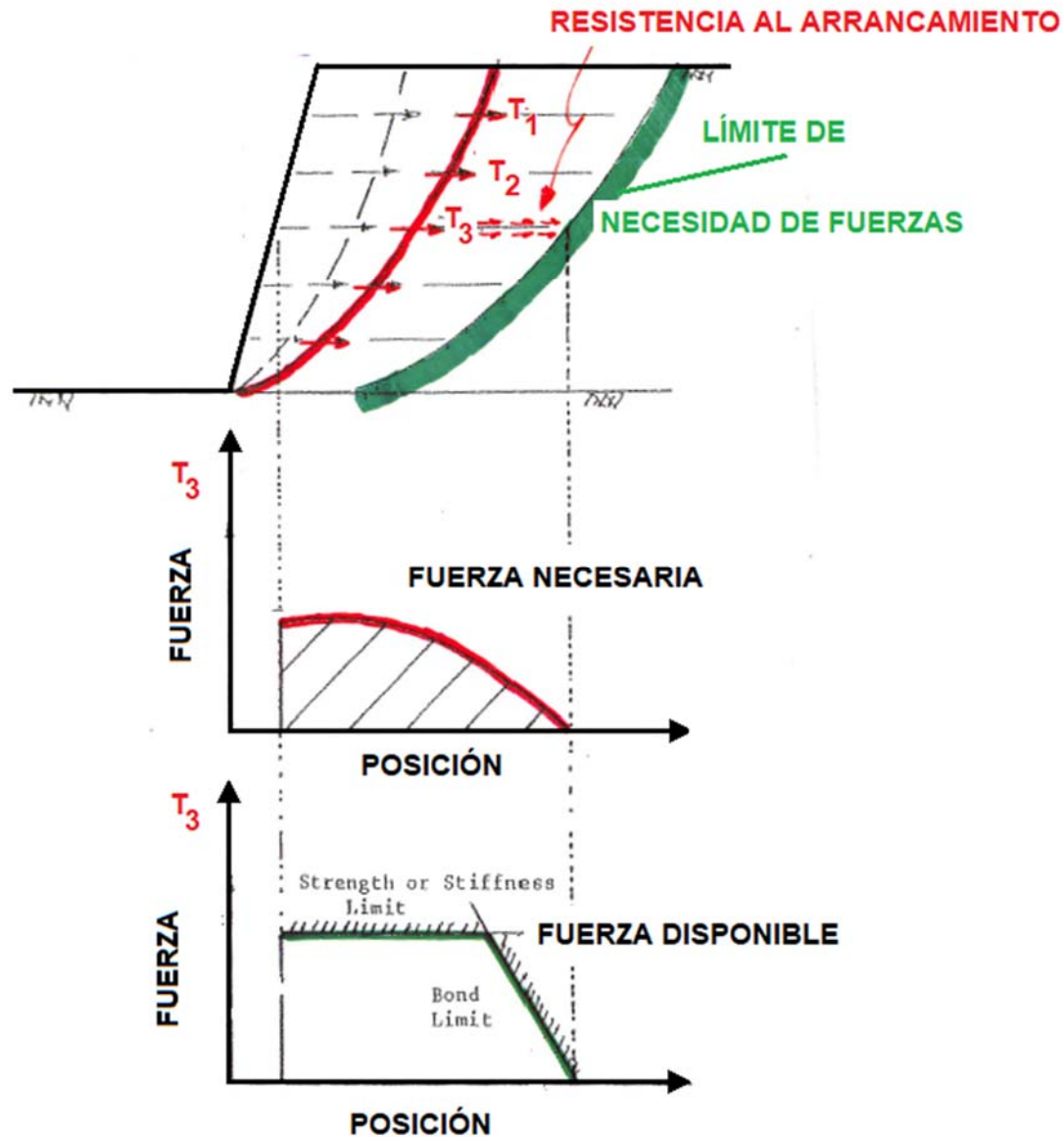
- MODOS DE ROTURA



Tomado FHWA 2010

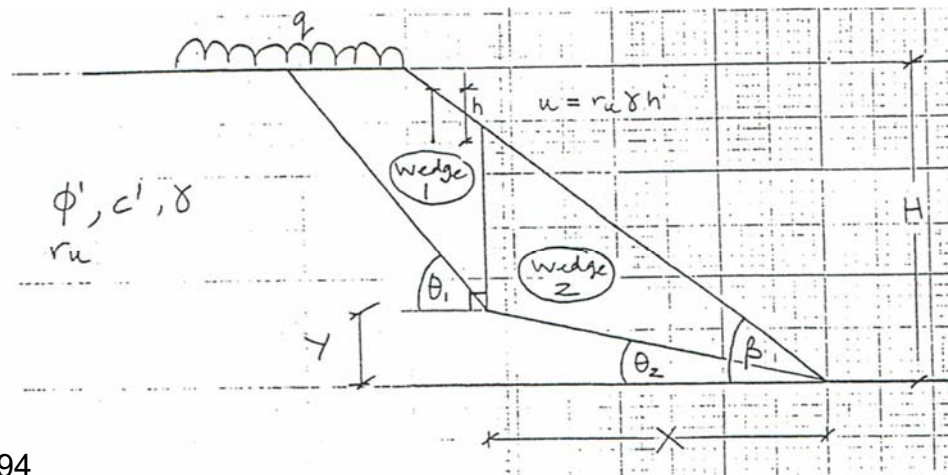
ESTABILIDAD DE TALUDES DE SUELO REFORZADO

- ESTABILIDAD GLOBAL Y COMPUESTA (SUPERFICIES DESLIZAMIENTO)



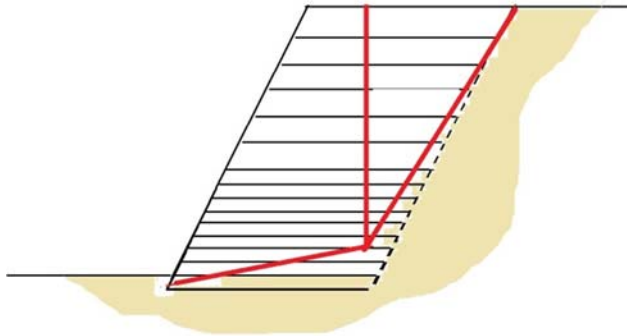
ESTABILIDAD DE TALUDES DE SUELO REFORZADO

- ESTABILIDAD GLOBAL Y COMPUESTA (SUPERFICIES DESLIZAMIENTO)
- Hay varios procedimientos (empujes de tierras, análisis límite, etc., pero el más común para analizar estabilidad global es el análisis de superficies de deslizamiento mediante equilibrio límite.
- De nuevo, lo más común en este caso es emplear programas de cálculo de métodos de rebanadas. Para primeros tanteos se puede acudir a un cálculo sencillo de estabilidad de bloques (Jewel, 1990). Este caso se encuentra resuelto mediante ábacos

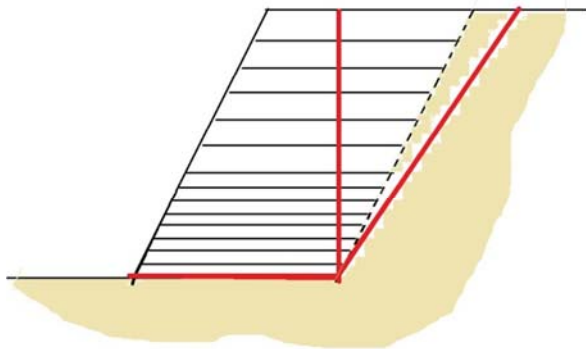


Tomado de Milligan, 1994

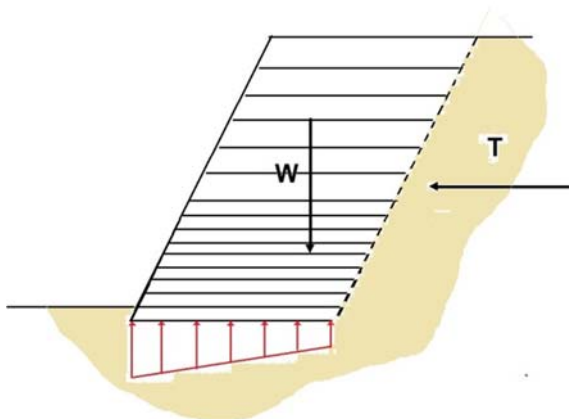
- CUESTIONES PREVIAS EN CUANTO A LA GEOMETRÍA DEL MACIZO DE SUELO REFORZADO



- En coronación el refuerzo debe extenderse por detrás de las cuñas más críticas. Si queda corto, la carga se transmite a las capas subyacentes

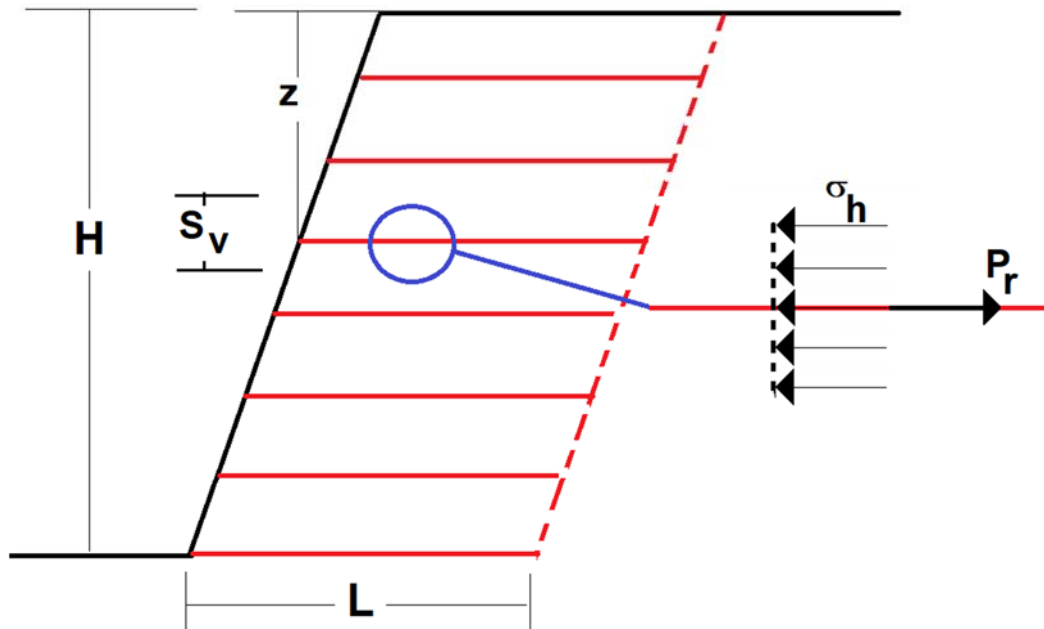


- La base del macizo de suelo reforzado ha de ser suficientemente amplia para evitar la rotura por deslizamiento en el contacto refuerzo-suelo



- La base del macizo de suelo reforzado ha de ser suficientemente amplia como para dar lugar a tensiones aceptables en el cimiento

- ESTABILIDAD GLOBAL Y COMPUESTA (SUPERFICIES DESLIZAMIENTO)

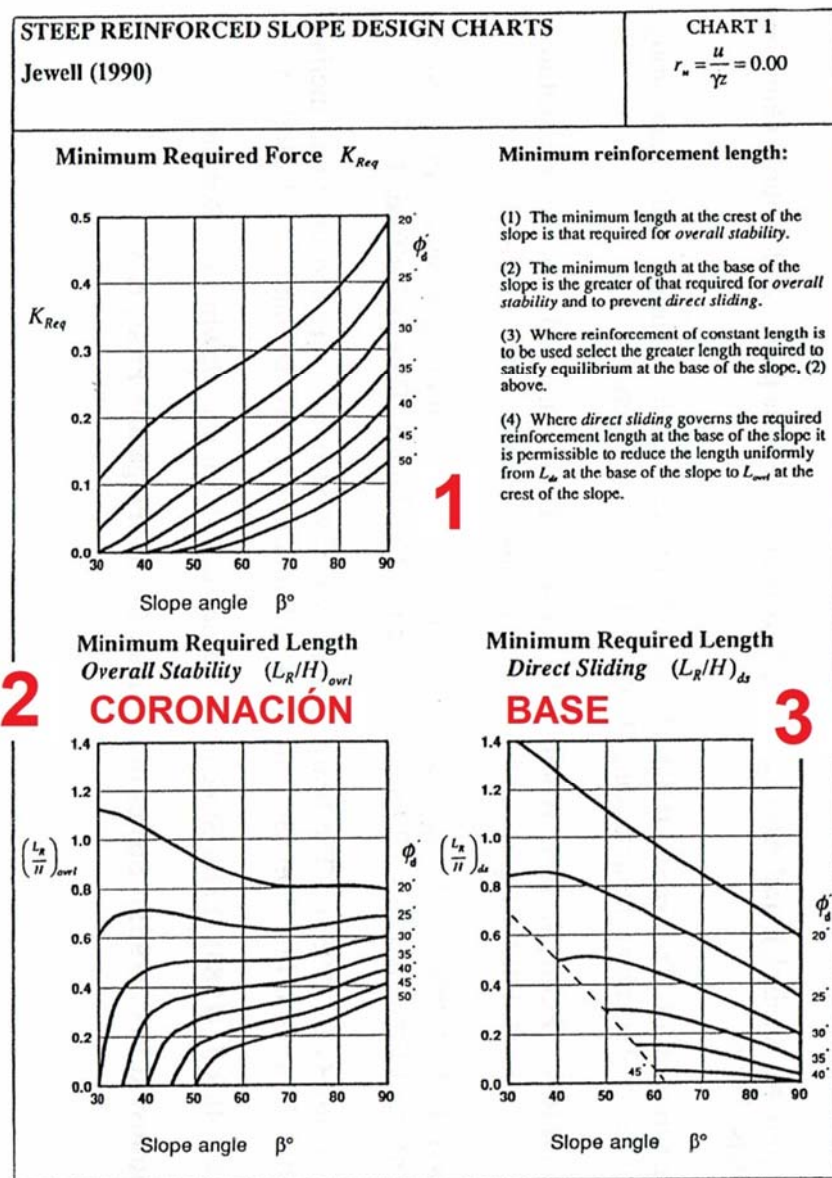


$$\left. \begin{array}{l} \sigma_h = K \cdot \sigma_v \approx K \cdot \gamma \cdot z \\ P_r = S_v \cdot \sigma_h \end{array} \right\} S_v = \frac{P_r}{K \gamma z}$$

- Para incluir el efecto de las sobrecargas se pueden emplear los procedimientos de cálculo de muros para estimar el incremento de presión horizontal a cada profundidad

ESTABILIDAD DE TALUDES DE SUELO REFORZADO

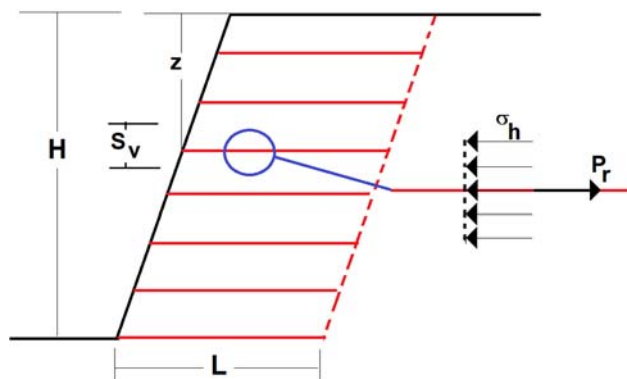
- ABACOS DE JEWELL (1990) PARA REFUERZO CON GEOTEXILES



- 0.- Se selecciona el ábaco a emplear en función del factor r_u .
- 1.- Conocida la inclinación a dar al talud, β , y el ángulo de rozamiento del relleno compactado, ϕ' , se obtiene el coeficiente K_{Req} que proporcionará la fuerza o empuje actuante
- 2.- A partir de la altura corregida del talud H' , definida como la altura real de talud de relleno (H) más la altura adicional de relleno que equivale al efecto de posibles sobrecargas, se obtiene la longitud mínima de refuerzo en coronación
- 3.- Con las mismas premisas se obtiene la longitud mínima en la base
- 4.- Se elige la longitud mayor

NOTA: El ábaco incorpora un factor de minoración $f_b=0.8$

5.- Elegido el geotextil a emplear y conocida su resistencia de cálculo para la vida de diseño, se determina el mínimo espaciado vertical entre geotextiles (base del muro)



$$S_{v(\text{base}; z=H)} = \frac{P_r}{K \cdot \gamma \cdot H'}$$

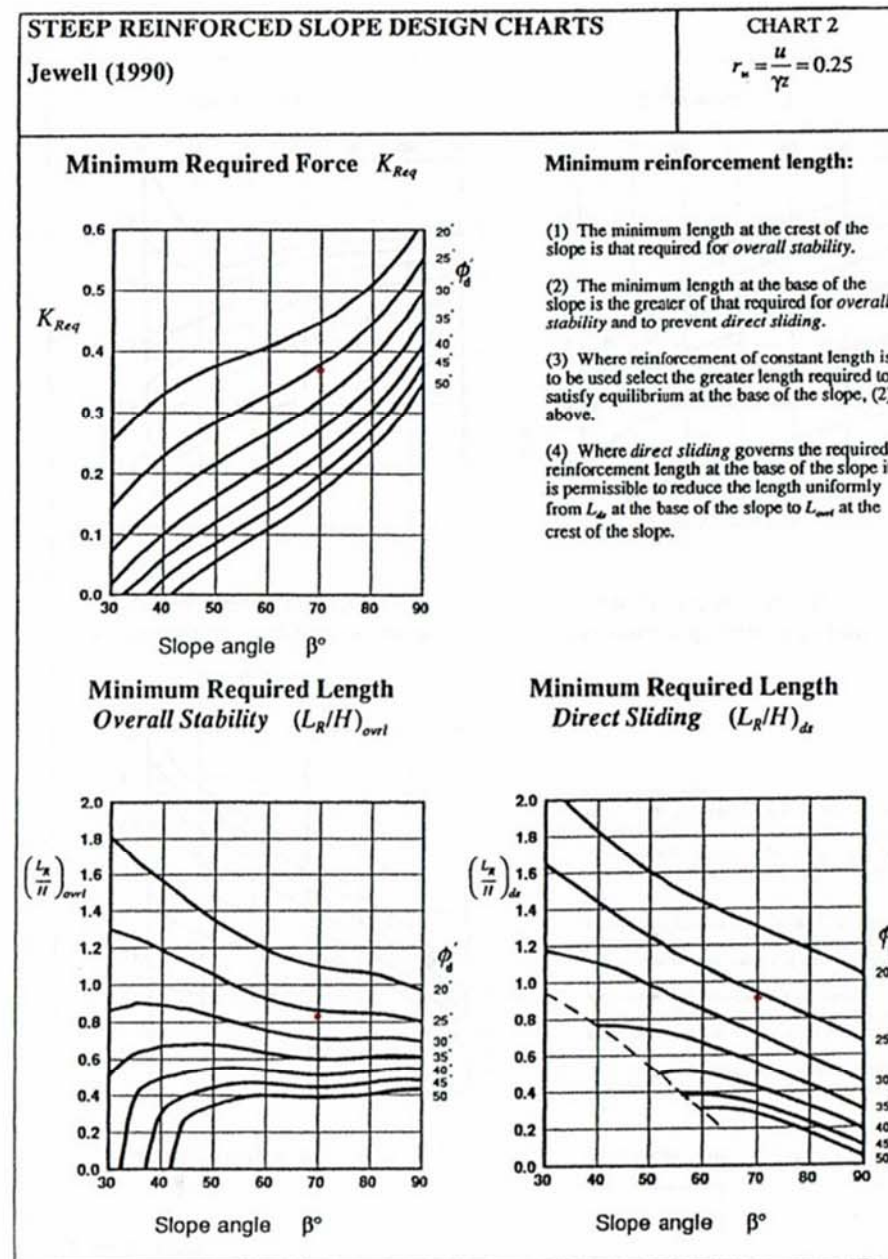
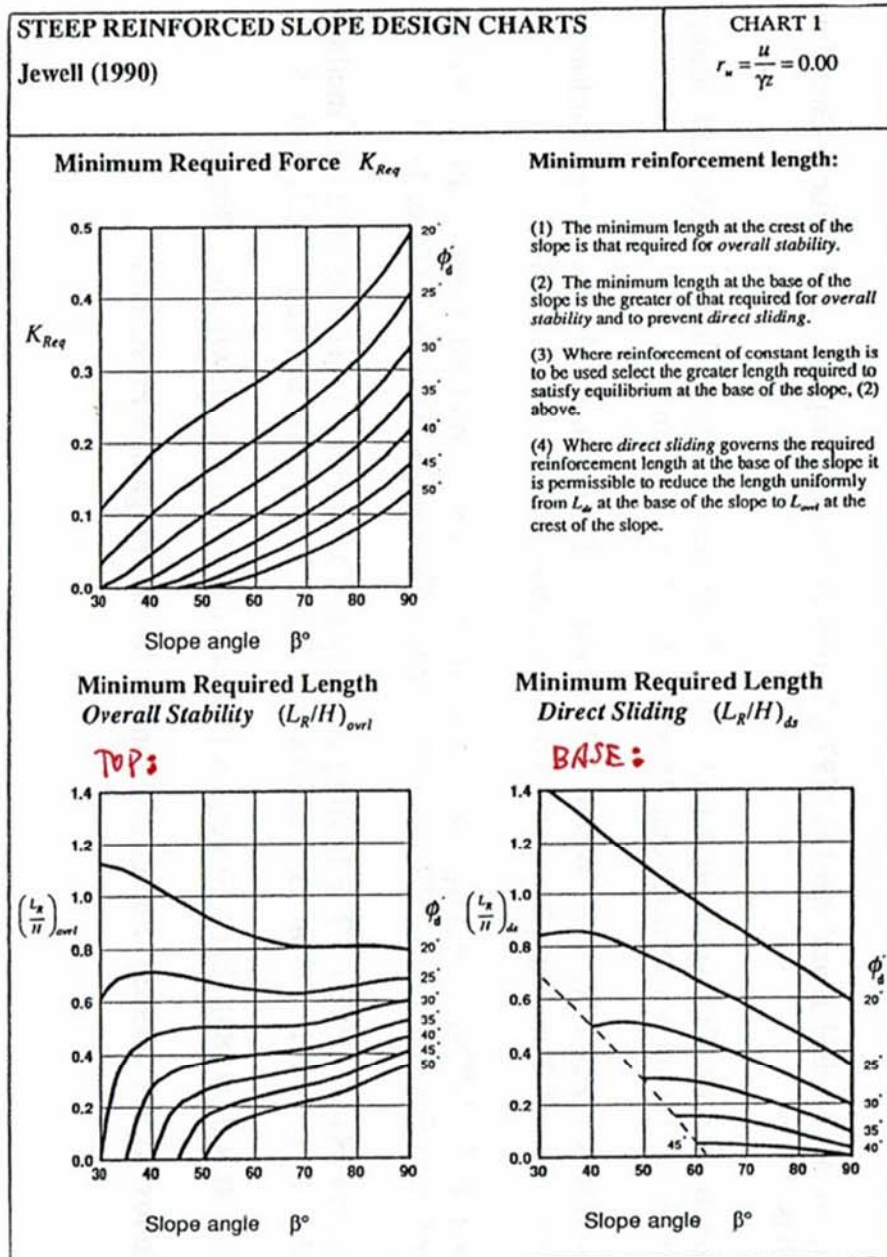
En zonas superiores del muro con la misma P_r se podrá aumentar el espaciado (menor z)

NOTA: En función del relleno y de los equipos a emplear, las tongadas tendrán un determinado espesor máximo razonable, por ejemplo 30 cm. El espaciado vertical se ajusta a múltiplos de dicho espesor de tongada.

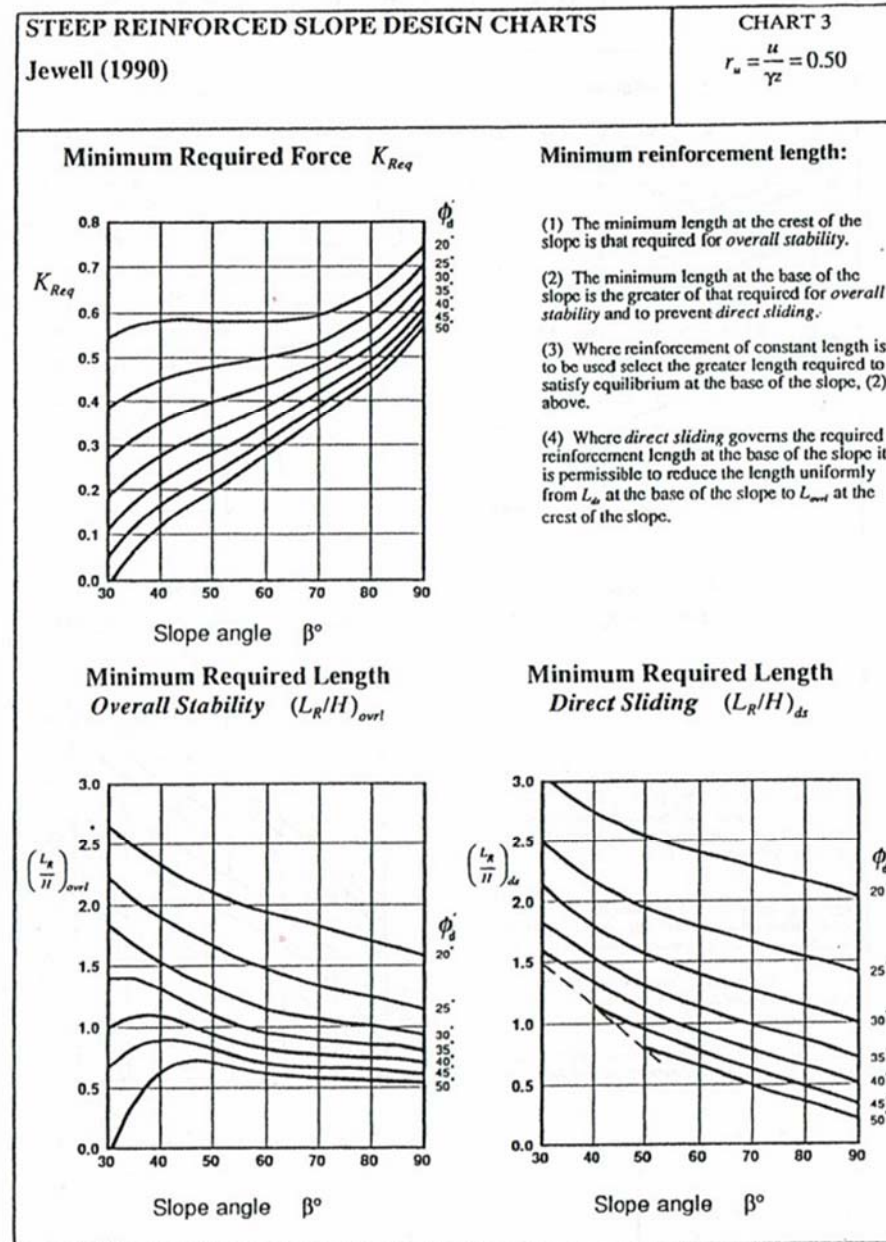
6.- Se debe finalmente comprobar que la resistencia disponible es superior a las acciones actuantes. Siendo γ el peso específico del relleno y n_{capas} el número de capas de geotextil:

$$P_r \cdot n_{\text{capas}} > \frac{1}{2} \cdot K_{\text{Req}} \cdot \gamma \cdot H'^2$$

ESTABILIDAD DE TALUDES DE SUELO REFORZADO



ESTABILIDAD DE TALUDES DE SUELO REFORZADO



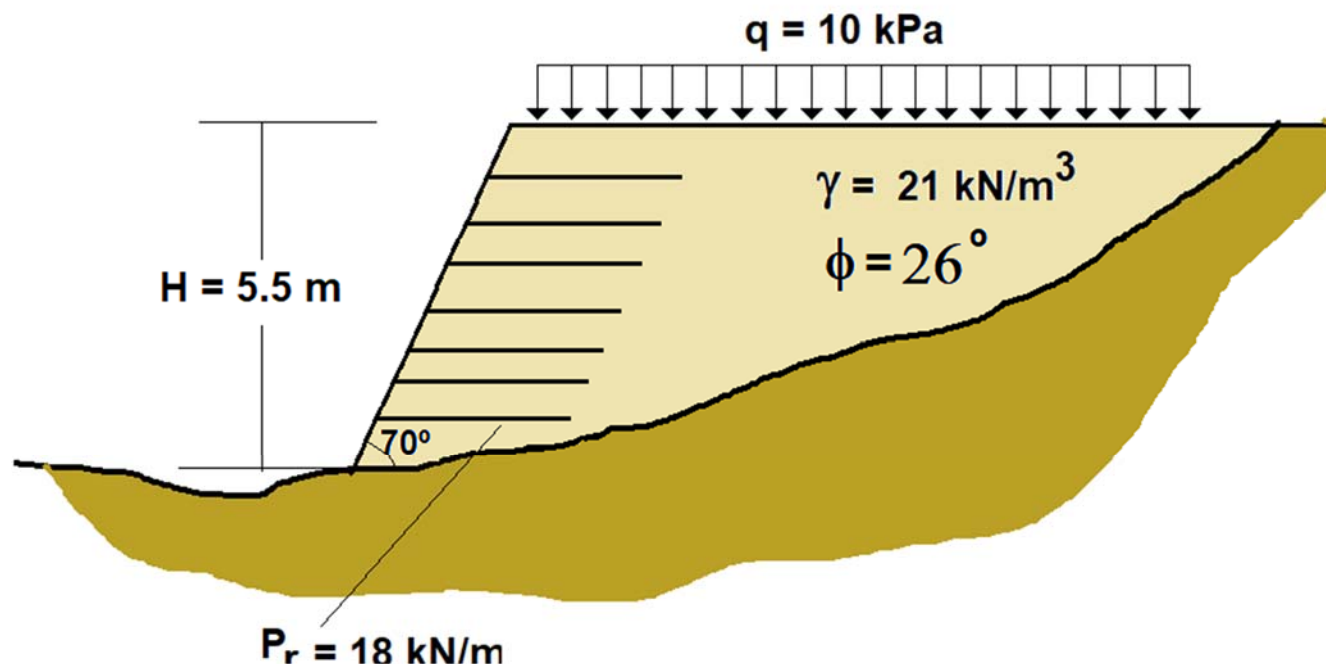
EJERCICIO A RESOLVER POR LOS ALUMNOS

Se plantea construir un relleno de terraplén para emplazar un aparcamiento de vehículos. La máxima altura del relleno será de 5 m, y por razones de ocupación el ángulo del talud ha de forzarse a 70° .

Se pide diseñar un muro de suelo reforzado para las condiciones anteriores suponiendo que la sobrecarga de vehículos será $q=10$ kPa, que el relleno se ejecutará con un material de densidad aparente 21 kN/m³, sin cohesión efectiva y con ángulo de rozamiento tras la compactación $\phi'=26^\circ$.

Se dispone de geotextiles con resistencia de cálculo $P_r=18$ kN/m para la vida útil prevista de 50 años.

Se asumirá que las condiciones del agua en el relleno pueden llegar a ser las correspondientes a un coeficiente $ru=0.25$.



- “ADDITIF 2002 AUX RECOMMANDATIONS CLOUTERRE 1991”. Presses de L’Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. Paris, 2002.
- AFNOR (2009): NF P 94-270. “Calcul géotechnique. Ouvrages de soutènement. Remblais Renforcés et massifs en sol cloué”
- BLONDEAU, F., CHRISTIANSEN, M., GUILLOUX, A. & SCHLOSSER, F. (1984): “TALREN, Méthode de calcul des ouvrages en terre renforcée”. Renforcement en place des sols et des roches. Paris, Presses de l’ENPC.
- BS 8081 (1989): “Ground Anchorages”. British Standard Code of practice
- BUSTAMANTE, M., “Un método para el cálculo de los anclajes y de los micropilotes inyectados”, Boletín de la SEMSC, nº 81-82, Madrid, 1986.
- BRITISH STANDARDS (2002): “prEN 14490 Execution of Special Geotechnical Works. Soil Nailing” (Borrador para comentarios).
- DIRECCIÓN GENERAL DE CARRETERAS (MINISTERIO DE FOMENTO), 1998: “Manual para el Proyecto y Ejecución de Estructuras de suelo reforzado
- DIRECCIÓN GENERAL DE CARRETERAS (MINISTERIO DE FOMENTO), 2001: “Guía para el diseño y la ejecución de anclajes al terreno en obras de carreteras”.
- FHWA (1998): “Manual for Design & Construction Monitoring of Soil Nail Walls”. U.S. Department of Transportation. Publication No. FHWA-SA-96-069R.
- FWHA (2015): “Soil Nail Walls. Reference Manual”. Publication No. FHWA-NHI-14-007. FHWA GEC 007

- FHWA (2009): “Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Slopes”. FHWA GEC 011
- HP 8-96 (1996): “Recomendaciones para el Proyecto, Construcción y Control de Anclajes al Terreno”. ATEP. ICCTET. CICCP.
- JEWELL, R.A. (1980): “Some Effects of Reinforcement on the Mechanical Behaviour of Soils”. PhD Thesis. Cambridge
- JIMENEZ SALAS, J.A. (1980): Geotecnia y Cimientos III. Cap. 15. (Autor: Rodrigo Molina). Editorial Rueda. Madrid
- KERISEL, J. (1987): “Down to Earth. Foundations Past and Present: The Invisible Art of the Builder”. A.A. Balkema. Rotterdam. ISBN 90 6191 688 7
- MILLIGAN, G.W.E. (1994): “Mechanics of Reinforced Soil. Action and Interaction”. Course on Reinforced Soil: Mechanics and Design. Department for Continuing Education. University of Oxford.
- “RECOMMENDATIONS CLOUTERRE 1991”. Presses de L’Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. Paris, 1991.
- SCHOLSSER, F. & DELAGE, P. (1987): “Reinforced Soil Retaining Structures and Polymeric Materials” . Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on the Application of Polymeric Reinforcement in Soil Retaining Structures, Kingston. Ontario. Canada. Kluwer Academic Publishers”
- UNTERREINER, P., BENHAMIDA, B. & SCHLOSSER, F. (1997): “Finite Element Modelling of the Construction of a Full-Scale Experimental Soil-Nailed Wall. French National Research Project CLOUTERRE”. Ground Improvement, 1, 1-8.