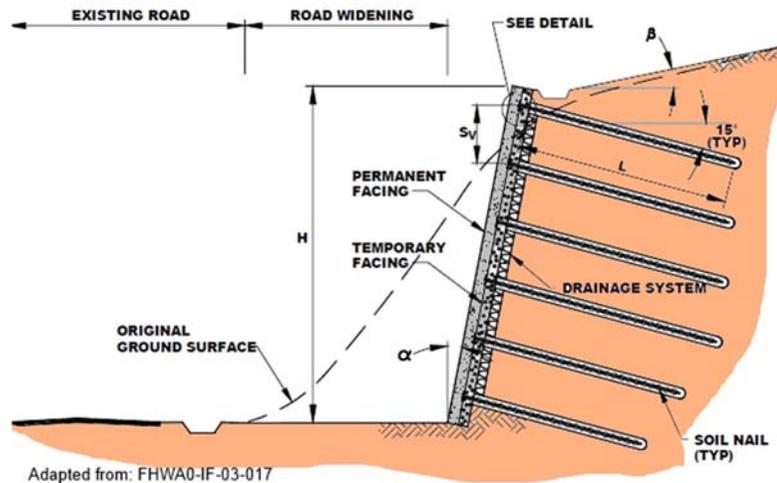




# ESTRUCTURAS DE SUELO REFORZADO II SUELO CLAVETEADO

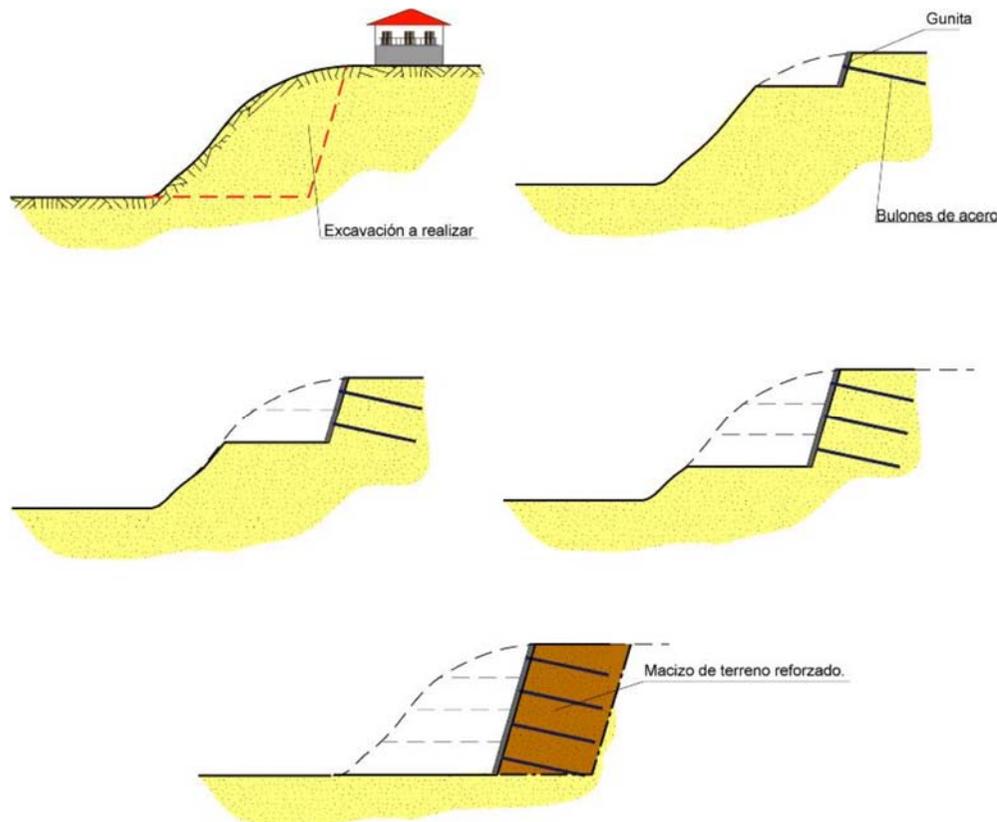


Luis Ortuño  
Uriel & Asociados, S.A.  
Universidad Politécnica de Madrid

- 1.- INTRODUCCIÓN. OBJETIVOS DEL CLAVETEADO
- 2.- CRITERIOS DE APLICACIÓN. VENTAJAS Y LIMITACIONES.
- 3.- PROCEDIMIENTOS DE EJECUCIÓN
- 4.- PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO. OBSERVACIONES.
- 5.- PROYECTO DE TALUDES CLAVADOS

# INTRODUCCIÓN. OBJETIVOS

**ESTABILIZACIÓN DE DESMONTES EXCAVADOS EN SUELO, MEDIANTE LA INTRODUCCIÓN DE BULONES PASIVOS (CLAVOS) A MEDIDA QUE AVANZA LA EXCAVACIÓN. OBTENCIÓN DE UN POTENTE “MURO DE GRAVEDAD DE SUELO REFORZADO”**



- **CONSTRUCCIÓN EN BANCADAS**
- **BULONES LIGERAMENTE INCLINADOS**
- **CONCEBIDOS PARA TRABAJAR FUNDAMENTAMENTE A TRACCIÓN (A VECES TAMBIÉN A FLEXIÓN Y CORTANTE)**
- **SEPARACIONES  $S_v$ ,  $S_H$  ENTRE 1 Y 2 M**
- **TERMINACIÓN SUPERFICIAL CON UN PARAMENTO O PIEL (HABITUALMENTE DE GUNITA ARMADA)**
- **ACABADO EN OBRAS DEFINITIVAS CON MURO EXTERIOR**
- **IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS DE DRENAJE**

# INTRODUCCIÓN. OBJETIVOS

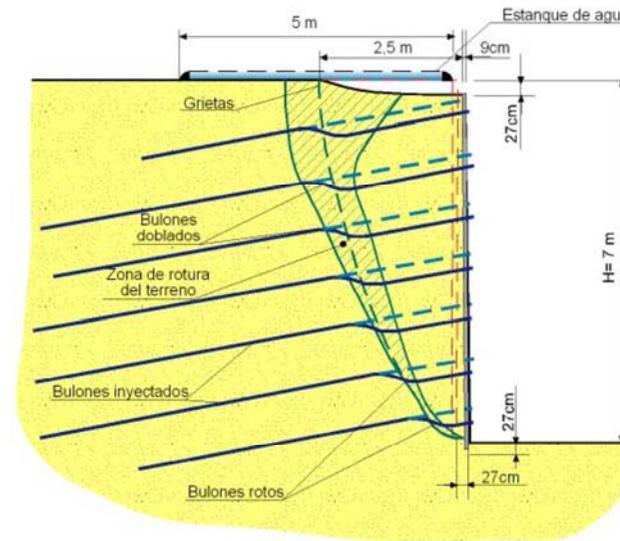
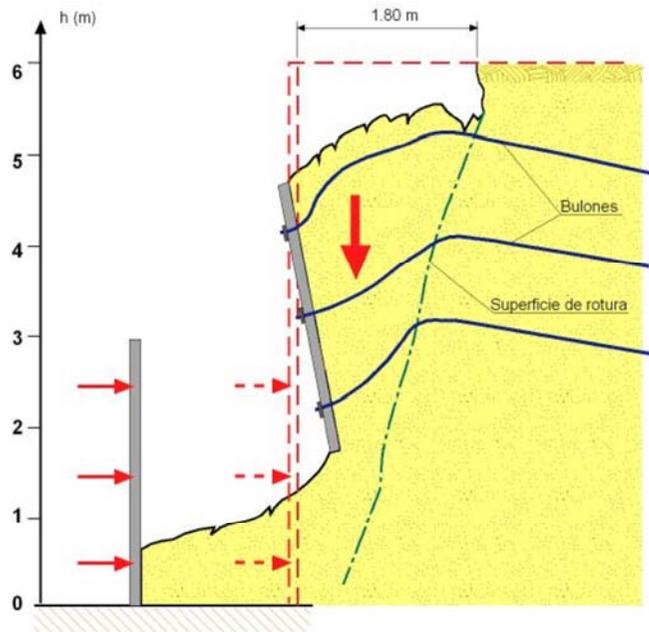


S. Sebastián de los Reyes (SITE)

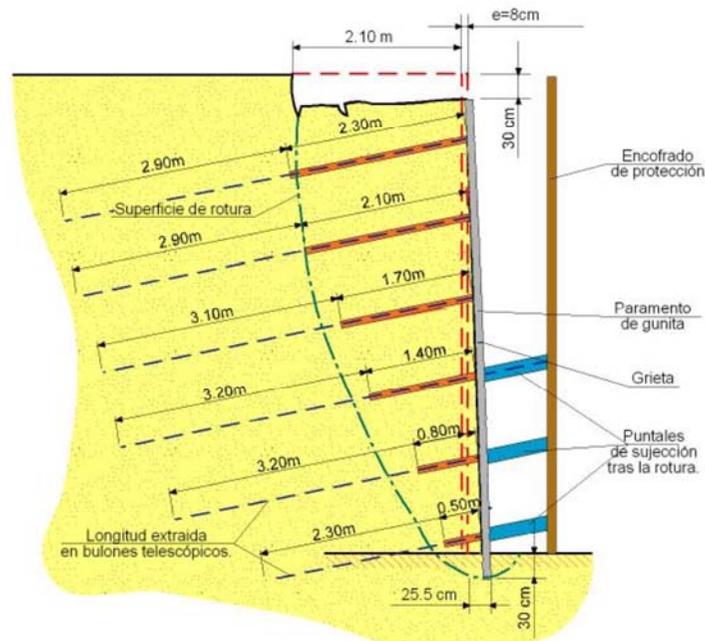
Autopista Roma-Nápoles



# INTRODUCCIÓN. ANTECEDENTES

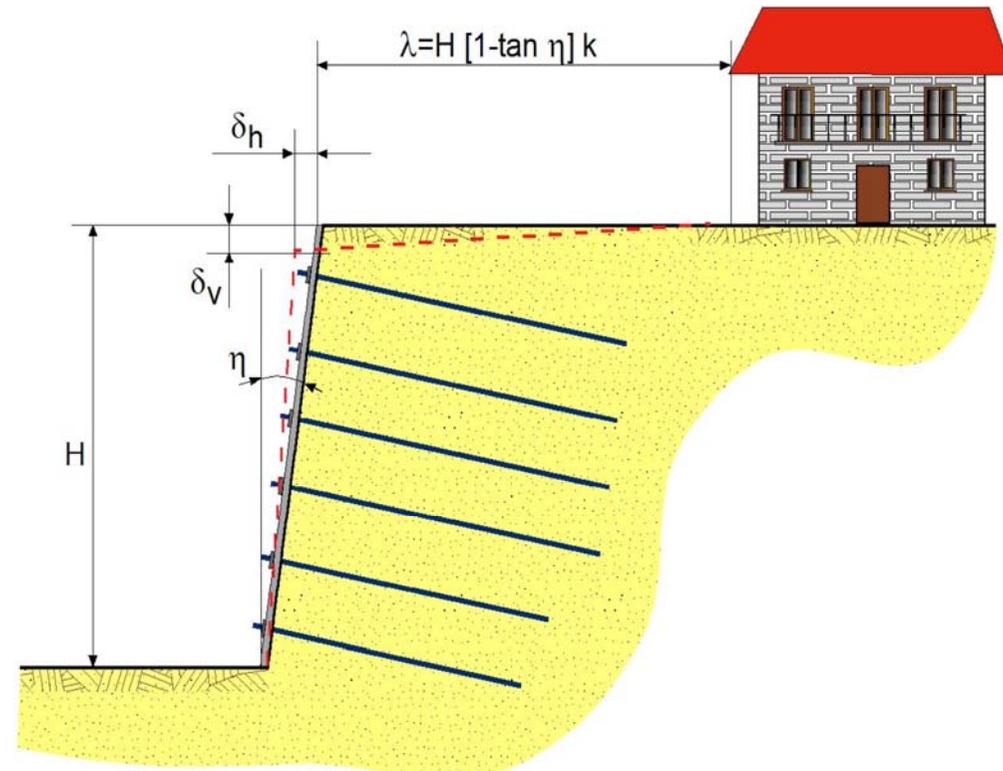


CLOUTERRE.  
1985-1991



# CRITERIOS DE APLICACIÓN. LIMITACIONES

- ES UNA SOLUCIÓN “FLEXIBLE”
- NECESIDAD DE ASEGURAR LA ESTABILIDAD DE LAS BANCADAS. SUELOS CON ALGO DE COHESIÓN, ¿4 KPA?. TIEMPO (24-48 HORAS)
- ¿NIVEL FREÁTICO? → DRENAJE
- CUIDADO CON AMBIENTE AGRESIVO, ARCILLAS BLANDAS (Nº DE CLAVOS Y LONGITUD), ARCILLAS EXPANSIVAS, ARCILLAS CON FLUENCIA EN CLAVOS



Tipo de Suelo	Roca meteorizada y suelos rígidos	Suelos arenosos	Suelos arcillosos
$\delta_h \approx \delta_v$	H/1000	2H/1000	4H/1000
k	0.8	1.25	1.5

Figura 2.3: Movimientos producidos en un talud clavado. Ordenes de magnitud. (tomado de CLOUTERRE, 1991).

## SUELOS FAVORABLES PARA EL CLAVETEADO

- SUELOS RESIDUALES Y ROCAS ALTERADAS, CON ESTRUCTURA FAVORABLE
- SUELOS COHESIVOS RÍGIDOS (LIMOS Y ARCILLAS DE BAJA PLASTICIDAD), SIN DEFORMACIONES DE FLUENCIA RELEVANTES (Plasticidad)
- SUELOS GRANULARES, CON ALGUNOS FINOS, ALGO CEMENTADOS O CON SUFICIENTE SUCCIÓN (CON ALGO DE COHESIÓN : ¿ $c' > 4$  kPa?)
- RELLENOS COMPACTADOS (TERRAPLENES) EJECUTADOS CON SUELOS FAVORABLES (Los rellenos compactados recientes son menos favorables)

## SUELOS DESFAVORABLES PARA EL CLAVETEADO

- RELLENOS SIN COMPACTAR
- SUELOS RESIDUALES Y ROCAS ALTERADAS, CON ESTRUCTURA DESFAVORABLE
- SUELOS GRANULARES SECOS, SIN COHESIÓN (Dificultades de excavación de bancadas)
- SUELOS GRANULARES MUY FLOJOS O CON NIVEL FREÁTICO ELEVADO
- SUELOS CON BOLOS (Dificultades de perforación)
- SUELOS COHESIVOS BLANDOS ( $N_{60} < 4$ ) O MUY PLÁSTICOS (FLUENCIA, RESISTENCIA AL ARRANCAMIENTO BAJA)
- SUELOS COLAPSABLES, EXPANSIVOS, ORGÁNICOS O ALTAMENTE CORROSIVOS (SUELO & AGUA),

## En caso necesario:

- CONSTRUCCIÓN DE ACCESOS
- CANALIZACIÓN DE AGUAS DE ESCORRENTÍA
- EJECUCIÓN DE DRENAJE PROFUNDO
- INSTALACIÓN DE BULONES DE PRUEBA. ENSAYOS DE TESADO (ARRANCAMIENTO, ADECUACIÓN (FLUENCIA))
- INSTALACIÓN DE INSTRUMENTACIÓN

# FASES DE EJECUCIÓN. EXCAVACIÓN.

- DOS FASES POR BANCADA:  
EXCAVACIÓN Y REPERFILADO

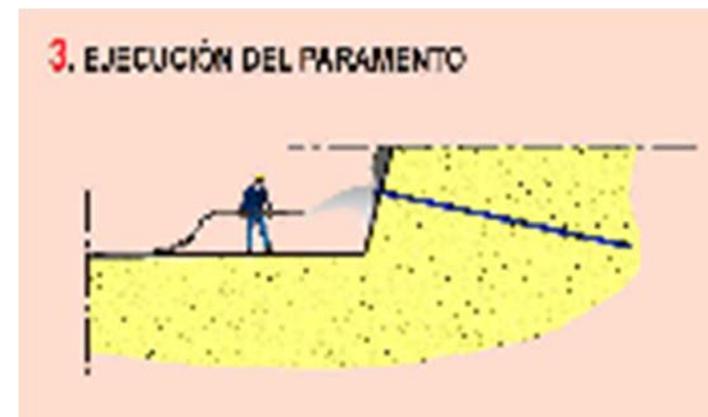
- INVESTIGACIÓN INICIAL DE LA  
ESTABILIDAD: ZANJAS, CONTROL  
DE LAS PRIMERAS BANCADAS.

- ALTURAS DISCRETAS, DE 1 A 2,5 M.  
TIEMPO HASTA FINAL DE FASE (24 A  
48 HORAS). EFECTOS ARCO. GUNITA  
INICIAL O BERMAS EN CASO  
NECESARIO.

- LONGITUD DE BANCADA PARA UNA  
JORNADA DE BULONADO Y  
GUNITADO.

-ANCHURA DE PLATAFORMA DE  
TRABAJO 10 M (PUEDE REDUCIRSE  
A 4 Ó 5 M).

- OBSERVACIÓN DE CONDICIONES  
DE AGUA (MUY IMPORTANTE).

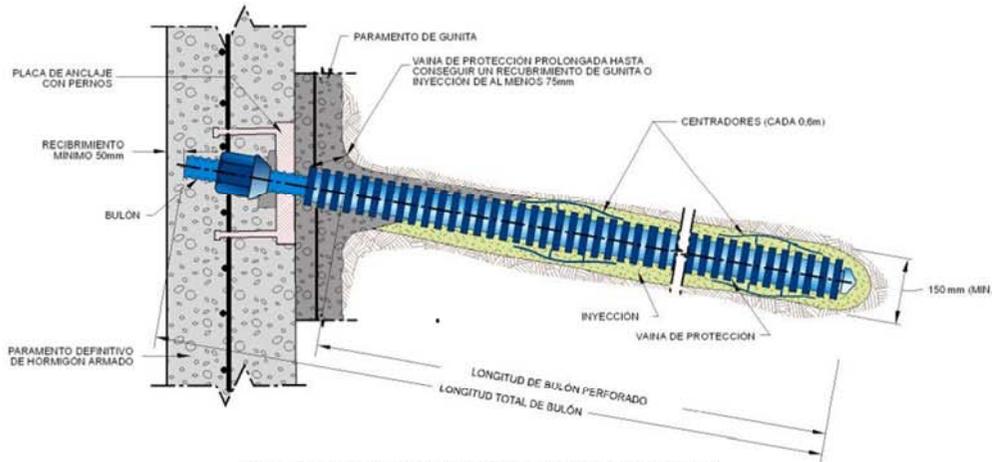


# FASES DE EJECUCIÓN. CLAVOS.

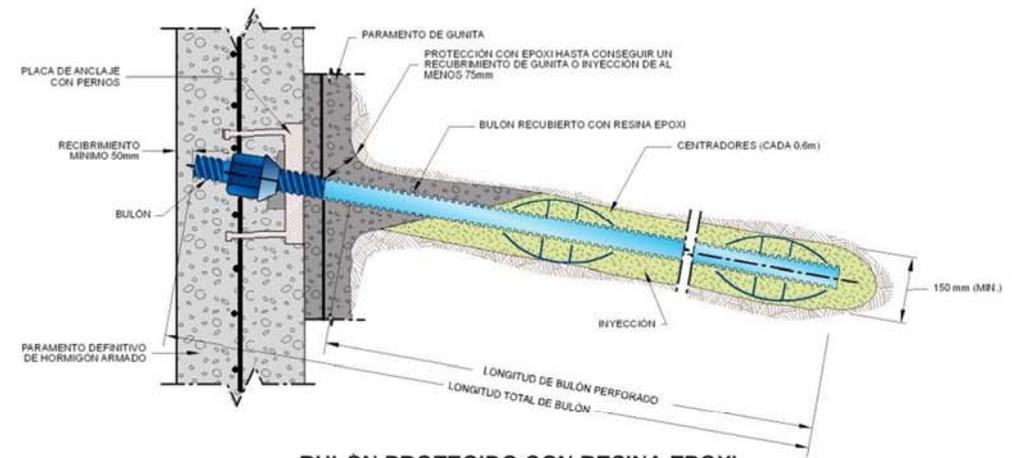
- DIVERSOS MÉTODOS: PERFORACIÓN E INYECCIÓN, AUTOPEFORANTES, “BALÍSTICOS”, ETC.
- PERFORADOS:  $D_{\text{PERF}} = 100 \text{ A } 200 \text{ MM}$ ; BARRAS  $\phi = 25 \text{ A } 40 \text{ MM}$
- INCLINACIÓN DESCENDENTE: HABITUAL  $\theta \approx 15^\circ$ , SALVO PRIMERAS FILAS CON ESTRUCTURAS O SERVICIOS PRÓXIMOS. RECOMENDABLE  $\theta > 5^\circ$  PARA FACILITAR INYECCIÓN.
- CENTRADORES, PROTECCIÓN FRENTE A LA CORROSIÓN, COMO EN LOS ANCLAJES.
- PRIMERA FILA PRÓXIMA A CORONACIÓN (REDUCCIÓN DE VOLADIZO, SIN EFECTO BÓVEDA).

# FASES DE EJECUCIÓN. CLAVOS.

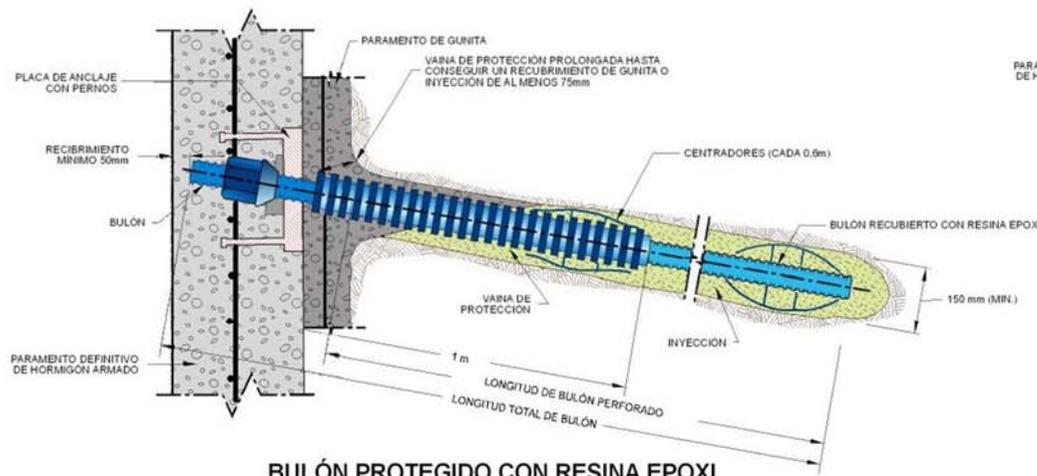
(FHWA, 1998)



**BULÓN PROTEGIDO CON VAINA CONTINUA**



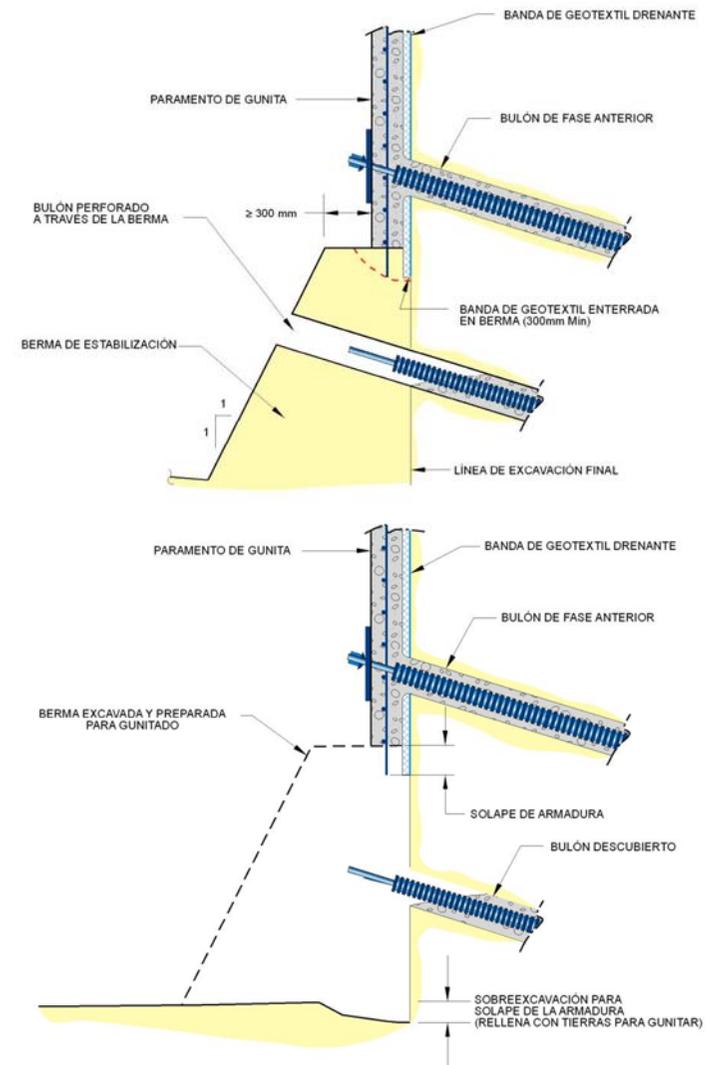
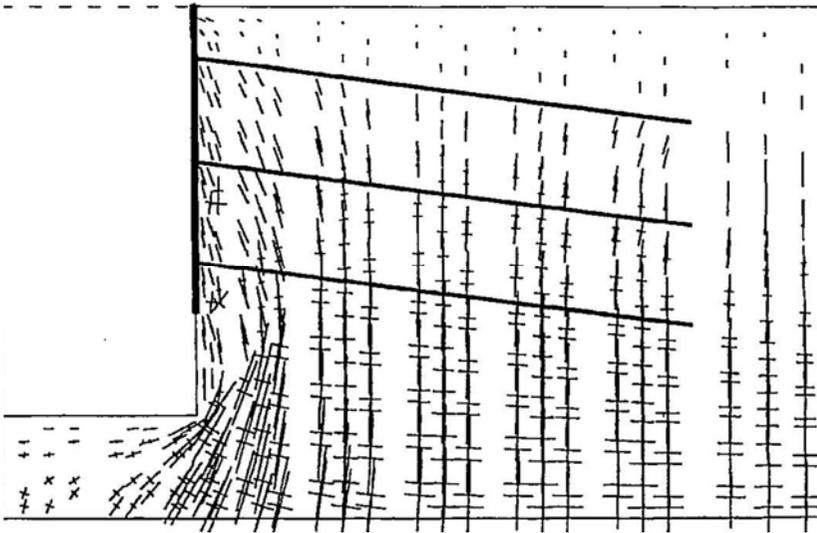
**BULÓN PROTEGIDO CON RESINA EPOXI**



**BULÓN PROTEGIDO CON RESINA EPOXI  
MÁS VAINA JUNTO AL PARAMENTO**

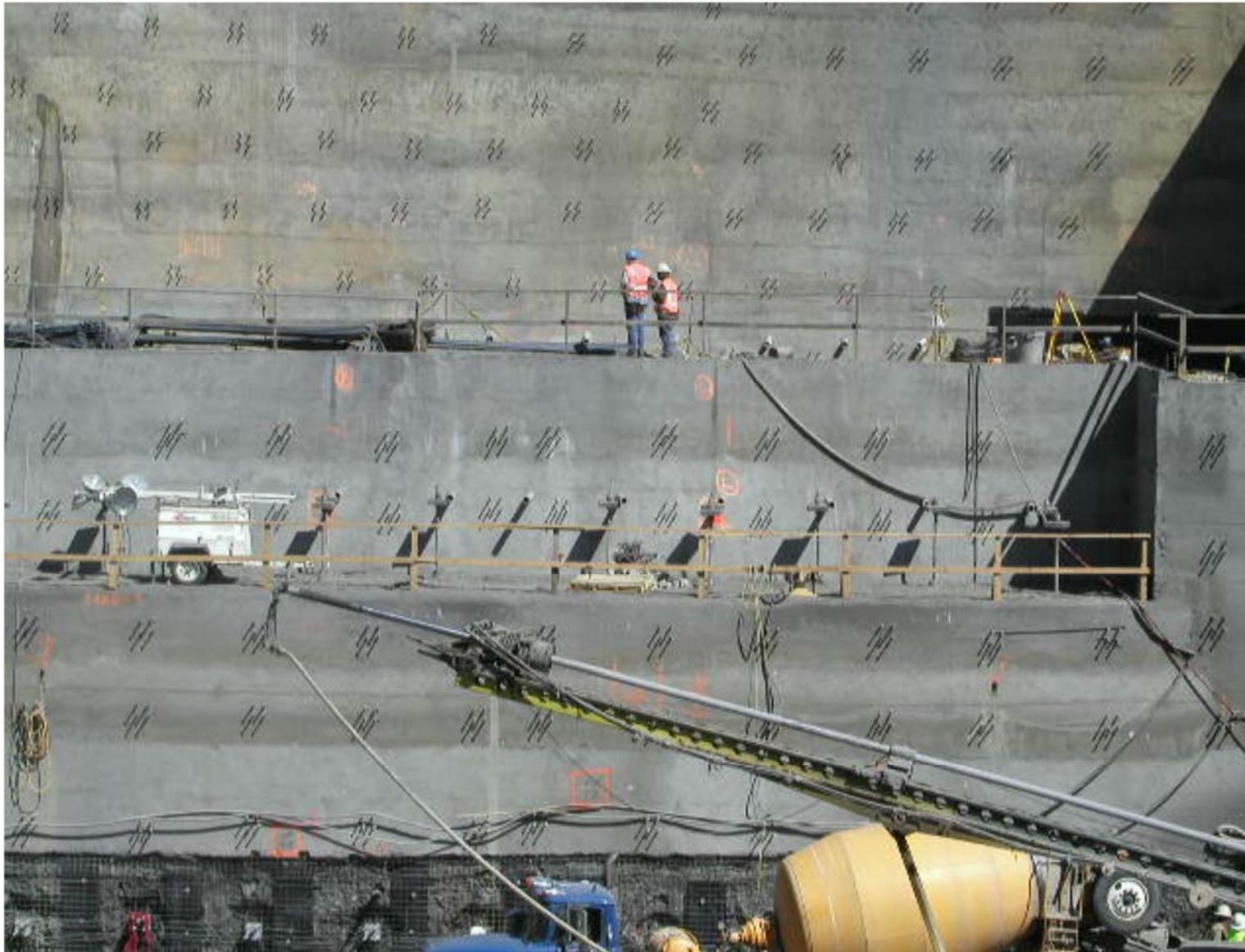
# FASES DE EJECUCIÓN. DETALLES

## Efecto arco



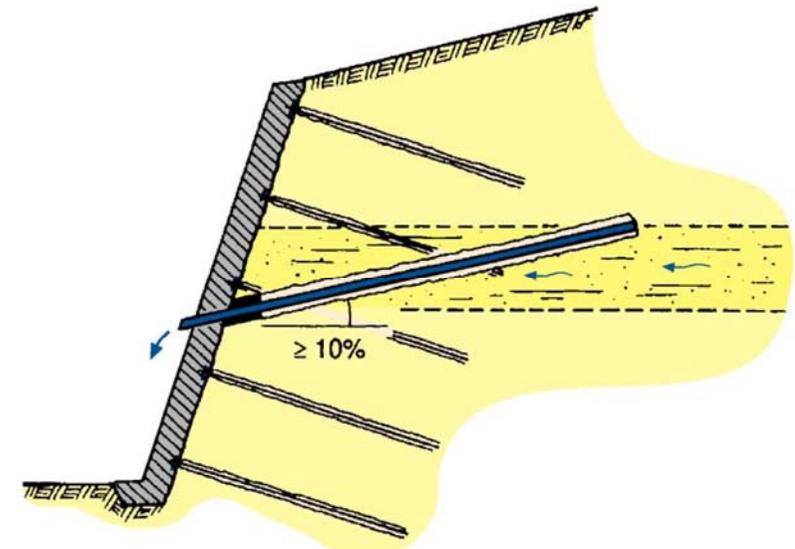
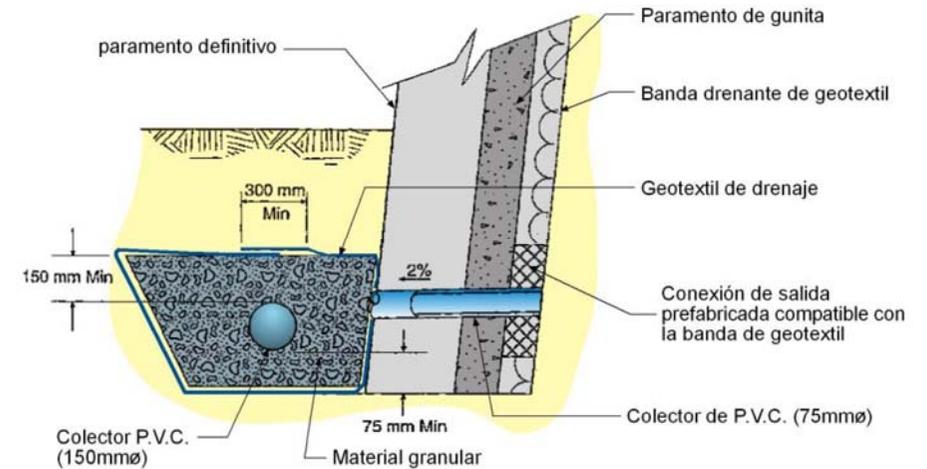
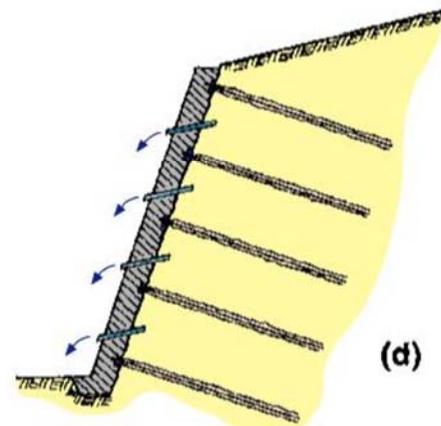
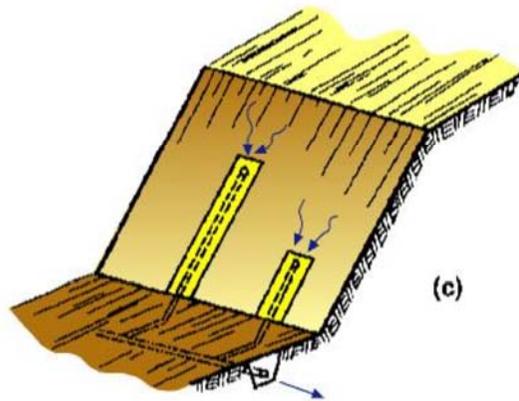
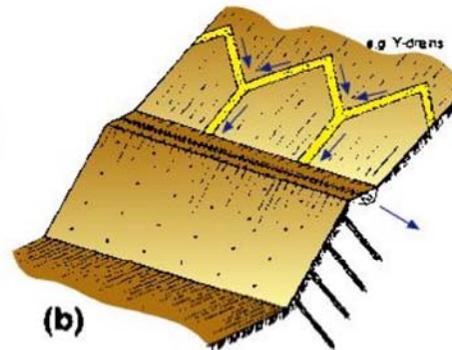
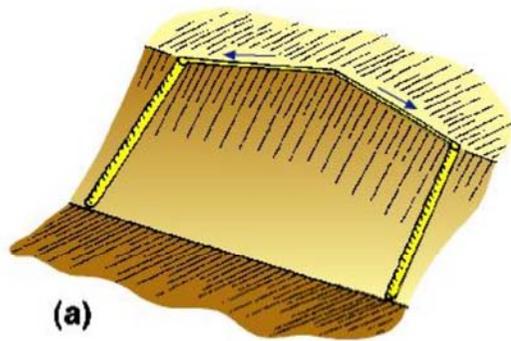
**Berma intermedia de estabilización. FHWA 1998**

# FASES DE EJECUCIÓN. DETALLES



Tomada de internet

# FASES DE EJECUCIÓN. DRENAJE SUPERFICIAL.



Tomada de BS y FHWA

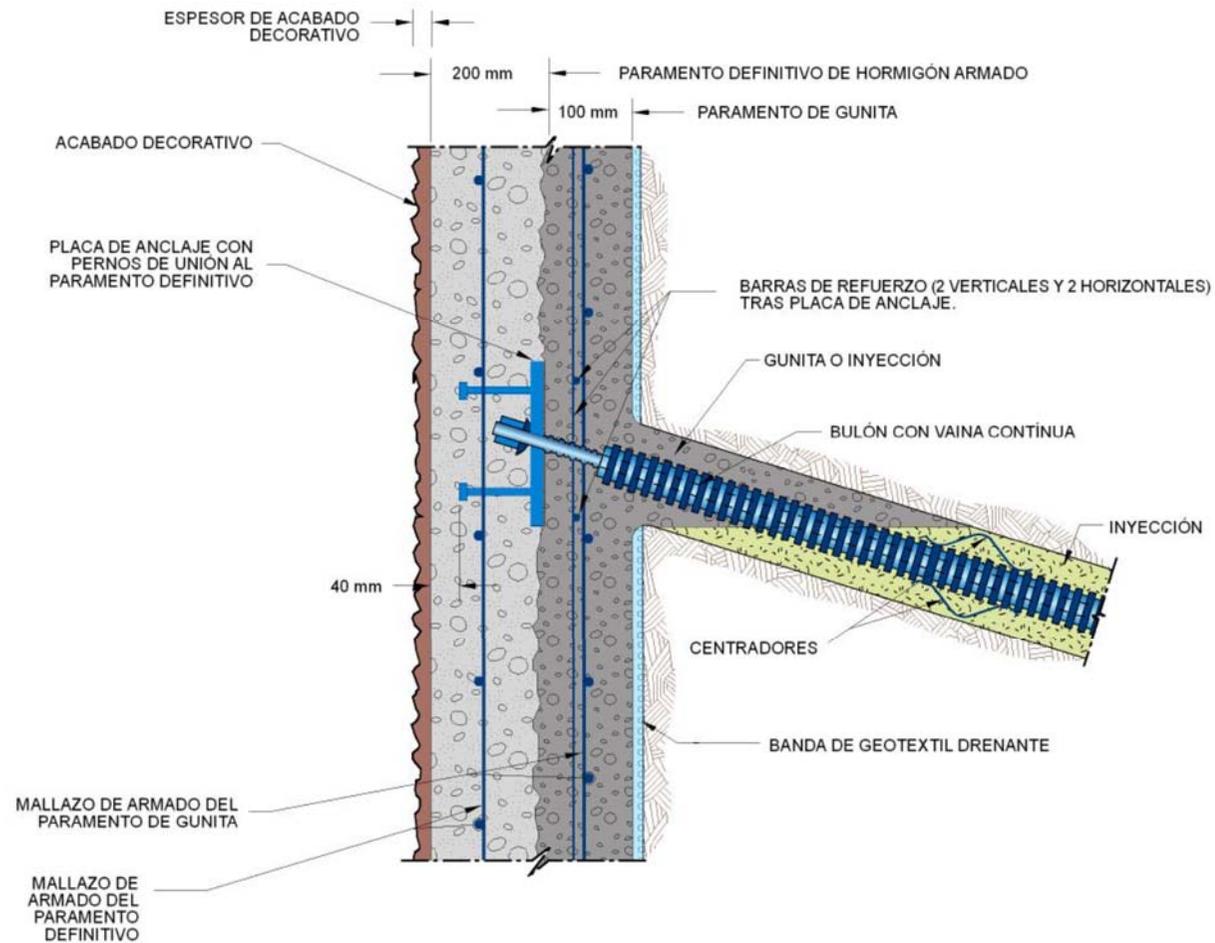
# FASES DE EJECUCIÓN. PARAMENTO.

- **Convencional: Gunita armada con mallazo (y refuerzo)**
  - Espesor 10 a 15 cm.
  - Placas de reparto para bulones de 200 a 250 mm de lado y 20 mm de espesor.
- **Secuencia variable (gunita o bulones)**
- **En situaciones permanentes o de cierta responsabilidad (cercanía de estructuras), se suele adosar finalmente un paramento de hormigón.**



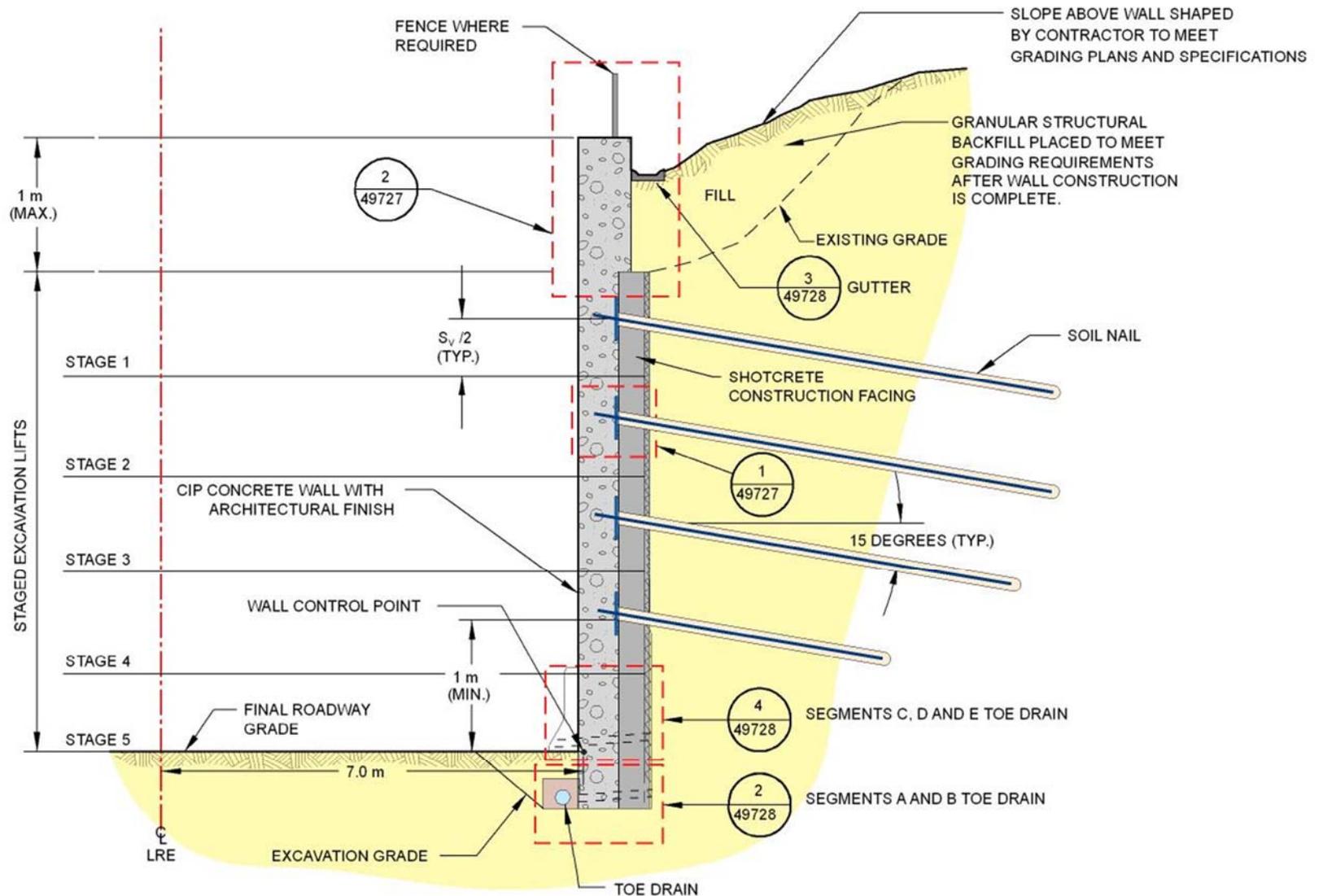
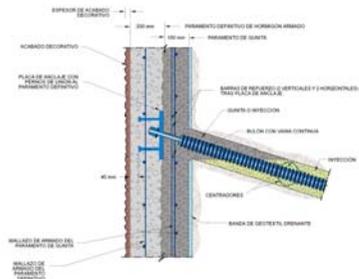
A2 (SITE)

# FASES DE EJECUCIÓN. PARAMENTO.



FHA, 1998

# FASES DE EJECUCIÓN. PARAMENTO.



NOTE:  $S_v$  = Vertical Nail Spacing (m)

FHA, 1998

## Localización de tracciones máximas. Zonificación

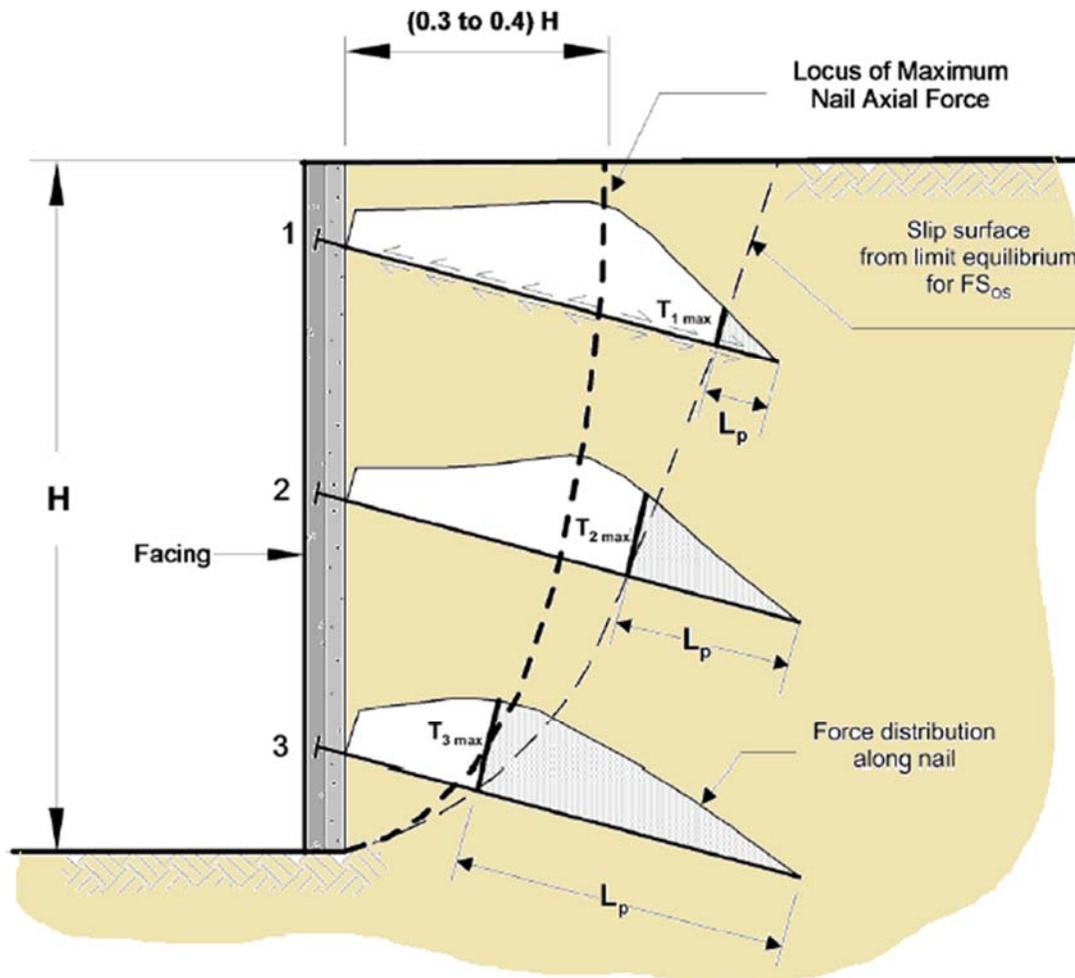


Figure 5.4: Illustration. Location of maximum tensile forces in soil nails. Modified after Byrne et al. (1998).

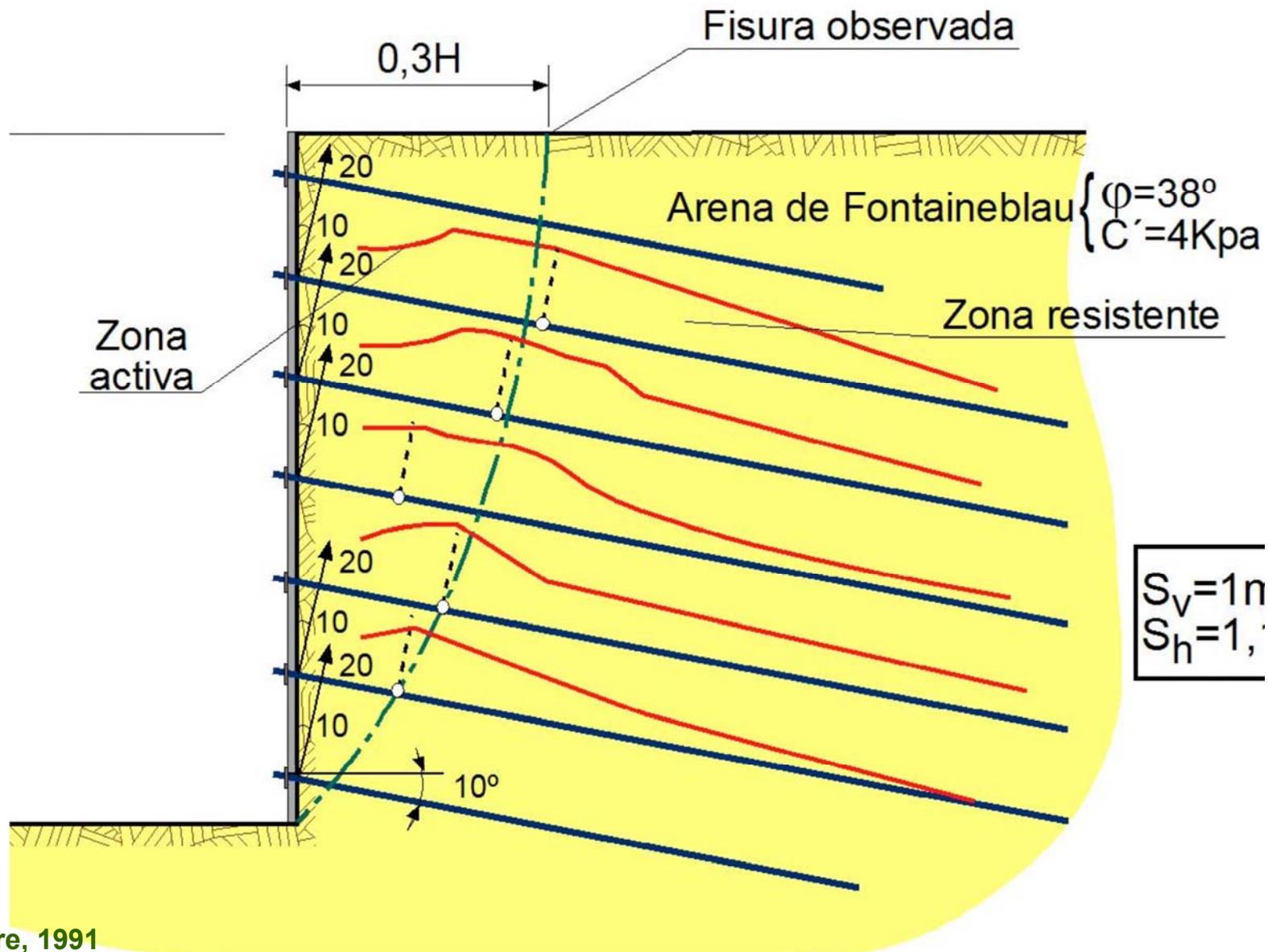
- Las tracciones máximas se producen en el interior del macizo reforzado. Dependen de la geometría, de la inclinación de los bulones, etc.

- La línea de tracciones máximas adopta una directriz curva que separa una zona “activa” de otra “resistente”.

- En el paramento (cabeza de los clavos) las tracciones resultan sustancialmente inferiores a las máximas

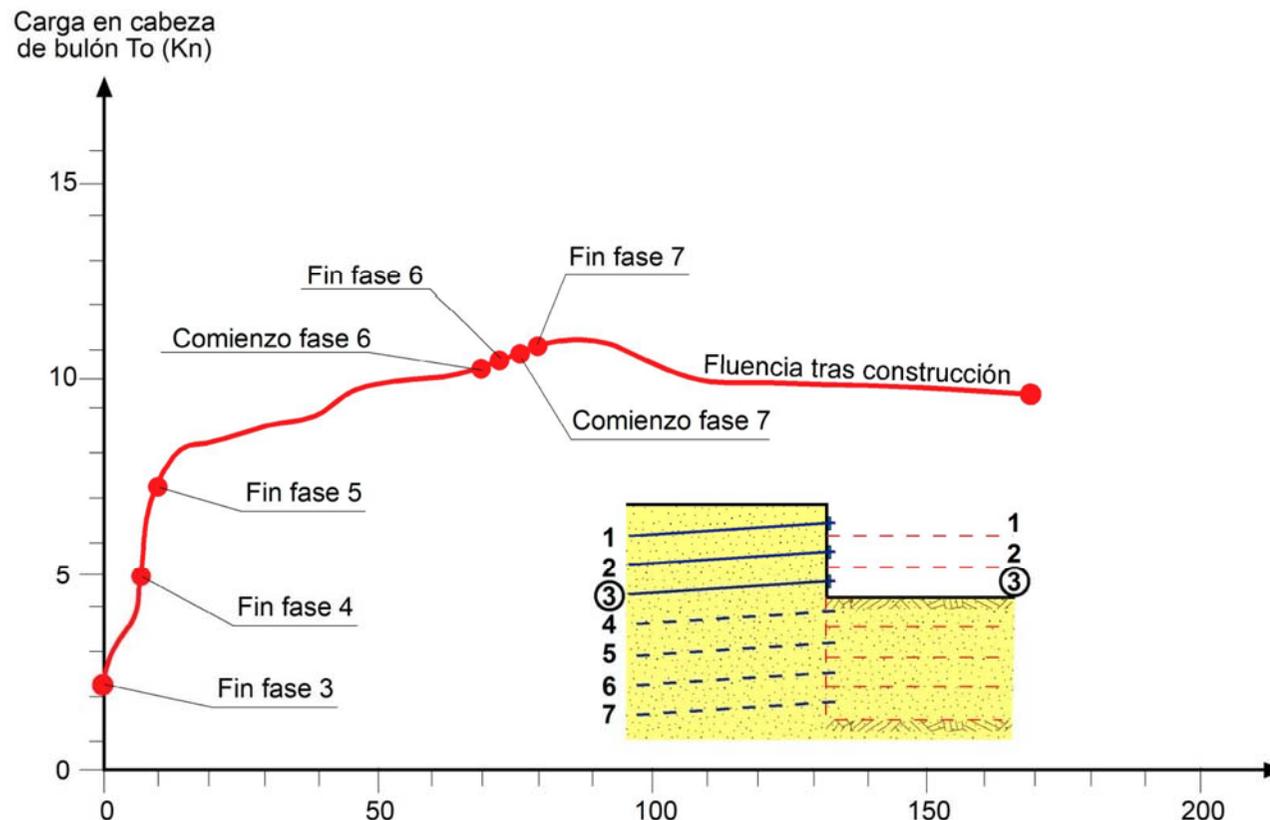
# PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO

## Localización de tracciones máximas. Zonificación



Clouterre, 1991

## Evolución de los esfuerzos de tracción



La generación de tracciones en los clavos se produce en las tres fases subsiguientes a su instalación.

Posteriormente apenas varían, salvo si se desarrollan deformaciones de fluencia a talud terminado.

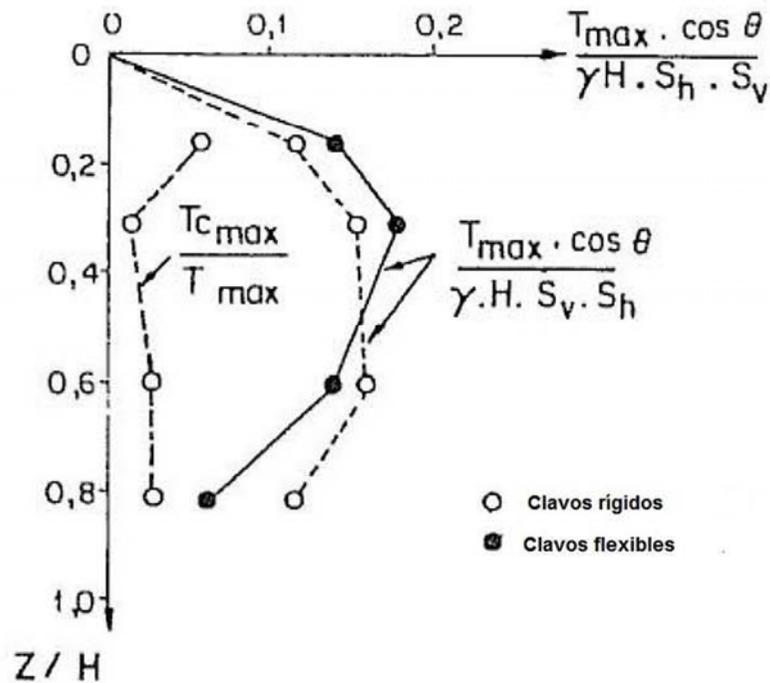
Clouterre, 1991

Tracciones en el paramento ( $T_0$ ).

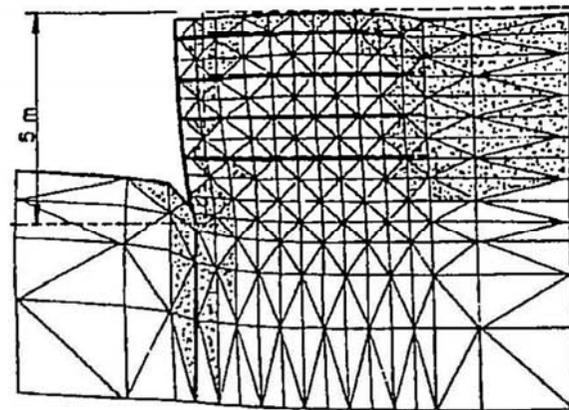
- **Resultan sustancialmente inferiores a las máximas (abovedamiento entre clavos)**
  
- **Dependen del tipo de suelo, de las rigideces del paramento y los clavos, de la profundidad y del espaciamiento entre clavos.**
  - **Clouterre 1991:  $T_0/T_{max} = 0,6$  a 1**
  - **FHA 1998:  $T_0 = 0,5 \cdot \gamma \cdot K_a \cdot H \cdot S_H \cdot S_V$**

## Contribución de los clavos a flexión y cortante

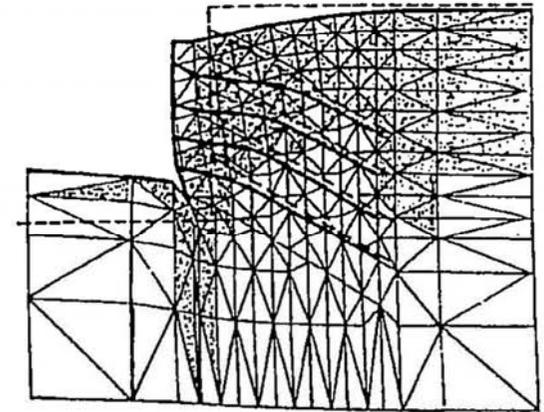
Cuando la orientación de los clavos es cercana a la horizontal (lo más frecuente por la optimización de su trabajo a tracción y la limitación de deformaciones), su contribución a flexión y cortante resulta muy escasa, al menos bajo cargas de servicio



Clouterre, 1991



Clavos horizontales



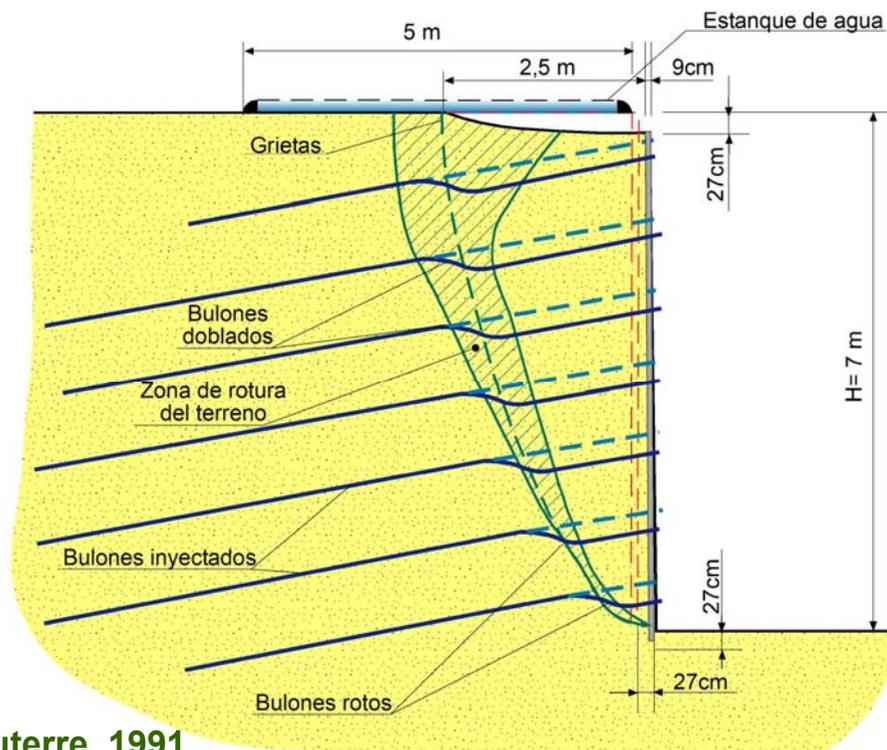
Clavos inclinados 30°  
con la horizontal

Los clavos “muy” inclinados  
producen más deformaciones

## Contribución de los clavos a flexión y cortante

Para movilizar la resistencia a flexión y cortante de los clavos son necesarias deformaciones muy importantes

Los modelos de experimentación a escala real parecen sugerir que la resistencia a flexión de las inclusiones sólo se moviliza realmente en las proximidades de la rotura (deslizamiento)

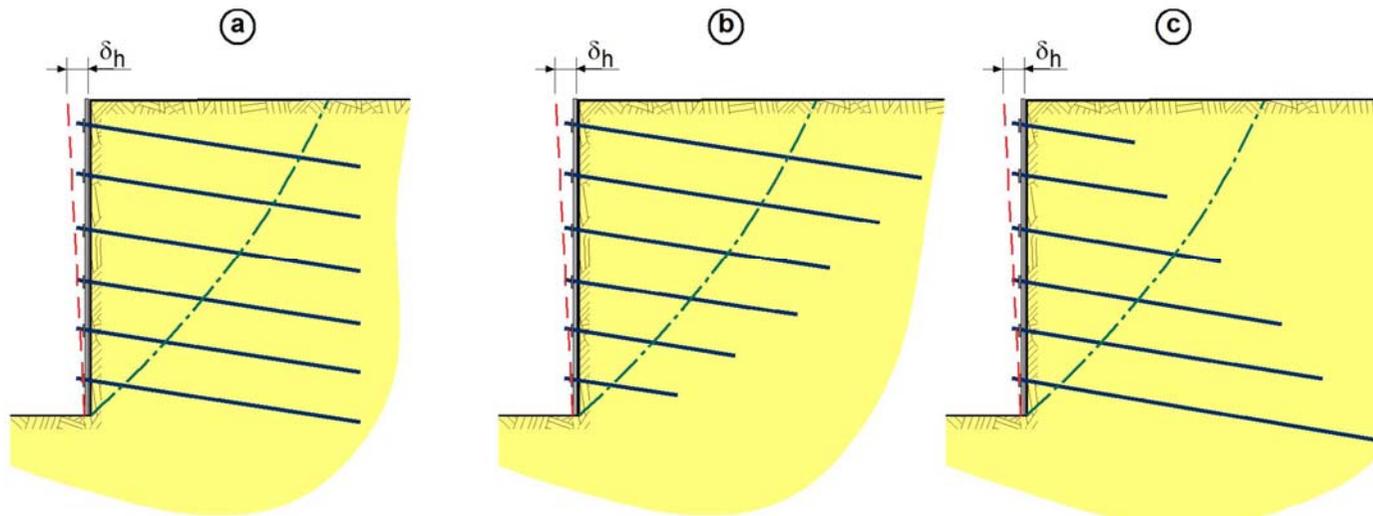


**RESULTA RAZONABLE LLEVAR A CABO UN DISEÑO BASADO EXCLUSIVAMENTE EN LOS ESFUERZOS DE TRACCIÓN DE LOS CLAVOS**

Clouterre, 1991

## PREDISEÑO DEL TALUD (sistematizado en ábacos)

- Diámetro barras de 25 a 40 mm (espaciamiento, terreno, altura de talud...)
- Espaciamiento de 1 a 2 m. (terreno, altura de talud, pendiente de ladera, calibre de bulón...)
- Inclinación: 5 a 15° (¿servicios o estructuras próximos?)
- Longitud de bulón = 0,8 a 1,2H, uniforme en primer tanteo (terreno, tipo de bulón, inclinación  $\theta$ , pendiente talud y ladera, proximidad a estructuras...)



SI, INICIAL

POSIBLE TRAS  
TANTEOS

NO (deformaciones)

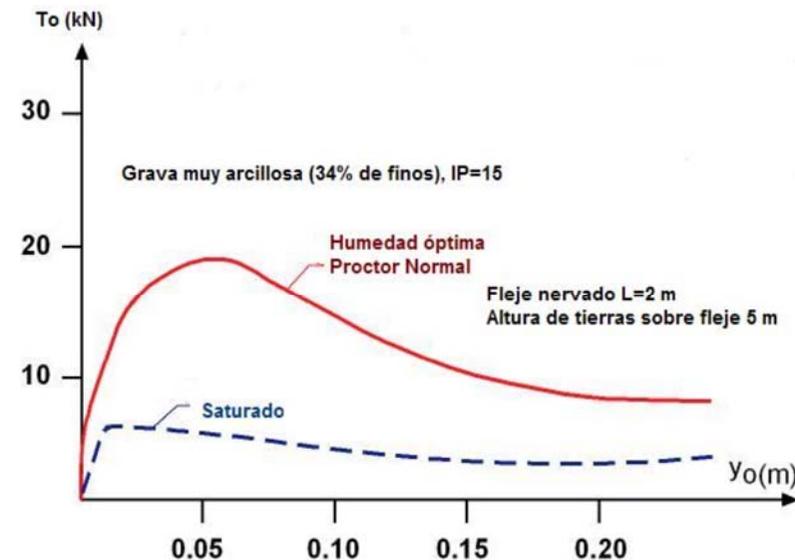
## RESISTENCIAS ADMISIBLES A CONSIDERAR

**(A) Resistencia a tracción: Depende del material de los clavos.**

$$T_{\text{trac}}^{\text{adm}} = \frac{T_{\text{trac}}^{\text{ult}}}{F_{\text{trac}}}$$

**(B) Resistencia al arrancamiento. Depende del método de instalación y del terreno.**

$$T_{\text{arr}}^{\text{adm}} = \frac{1}{F_{\text{arr}}} \cdot \pi \cdot D \cdot L_a \cdot q_s$$



## RESISTENCIA AL ARRANCAMIENTO

- Se pueden llevar a cabo pruebas previas de arrancamiento y fluencia (quizás no habitual en fase de proyecto, pero desde luego recomendable en las primeras fases de la obra)
- Se suelen emplear resistencias tomadas de la bibliografía: Ábacos de Bustamante, Guía de anclajes, etc. El manual de la FHWA contiene también una serie de tablas a este respecto

## Resistencia al arrancamiento Valores estimativos FHWA, 2015

**Table 4.4a: Estimated Bond Strength for Soil Nails in Coarse-Grained Soils  
(Modified after Elias and Juran 1991)**

Drill-Hole Drilling Method	Soil Type	Bond Strength, $q_u$ (psi)	Bond Strength, $q_u$ (kPa)
Rotary Drilled	Sand/gravel	15 - 26	100-180
Rotary Drilled	Silty sand	15 - 22	100-150
Rotary Drilled	Silt	9 - 11	60-76
Rotary Drilled	Piedmont residual	6 - 17	41-117
Rotary Drilled	Fine Colluvium	11 - 22	76-150
Driven Casing	Sand/gravel w/low overburden <sup>(1)</sup>	28 - 35	193-241
Driven Casing	Sand/gravel w/high overburden <sup>(1)</sup>	41 - 62	283-427
Driven Casing	Dense Moraine	55 - 70	380-482
Driven Casing	Colluvium	15 - 26	100-180
Augered	Silty sand fill	3 - 6	20.5-41
Augered	Silty fine sand	8 - 13	55-90
Augered	Silty clayey sand	9 - 20	60-138
Note: (1) Low and high overburden are defined as effective overburden pressure being, respectively, less than and greater than 1.5 tsf.			

## Resistencia al arrancamiento Valores estimativos FHWA, 2015

**Table 4.4b: Estimated Bond Strength for Soil Nails in Fine-Grained Soils (Modified after Elias and Juran 1991)**

<b>Drill-Hole Drilling Method</b>	<b>Soil Type</b>	<b>Bond Strength, <math>q_u</math> (psi)</b>	<b>Bond Strength, <math>q_u</math> (kPa)</b>
Rotary Drilled	Silty clay	5 - 7	34-48
Driven Casing	Clayey silt	13 - 20	90-138
Augered	Loess	4 - 11	28-76
Augered	Soft clay	3 - 4	21-28
Augered	Stiff clay	6 - 9	41-62
Augered	Stiff clayey silt	6 - 15	41-103
Augered	Calcareous sandy clay	13 - 20	90-138

## Resistencia al arrancamiento Valores estimativos FHWA, 2015

**Table 4.5: Estimated Bond Strength for Soil Nails in Rock  
– Drilling Method: Rotary Drilled  
(Modified after Elias and Juran 1991)**

<b>Rock Type</b>	<b>Bond Strength, <math>q_u</math> (psi)</b>	<b>Bond Strength, <math>q_u</math> (kPa)</b>
Marl/limestone	44-58	303-400
Phyllite	15-44	103-303
Chalk	73-87	503-600
Soft dolomite	58-87	400-600
Fissured dolomite	87-145	600-1000
Weathered sandstone	29-44	200-303
Weathered shale	15-22	103-152
Weathered schist	15-25	103-173
Basalt	73-87	503-600
Slate/Hard shale	44-58	303-400

## RESISTENCIA AL ARRANCAMIENTO

### FLUENCIA

El Manual 2015 de la FHWA indica que, aunque no existe un criterio definitivo, se debe considerar que puede haber fluencia cuando el terreno presenta algunas de estas características:

LL>50

PI>20

Su<50 kPa

Índice de liquidez (LI)>0.2

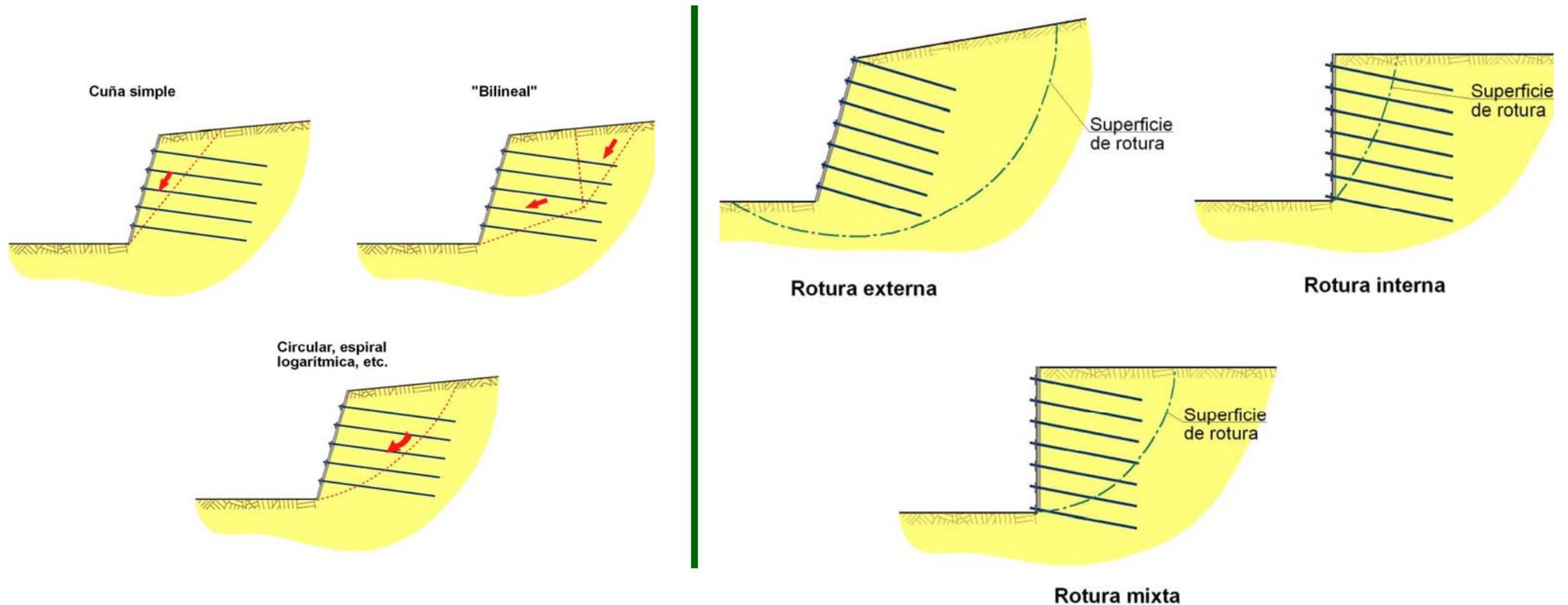
Orgánico

**Se pueden llevar a cabo ensayos de fluencia.**

**Si se emplea el claveteado en estos suelos se deben emplear tensiones de trabajo bien por debajo de las de pico**

## COMPROBACIÓN DE LA ESTABILIDAD GLOBAL

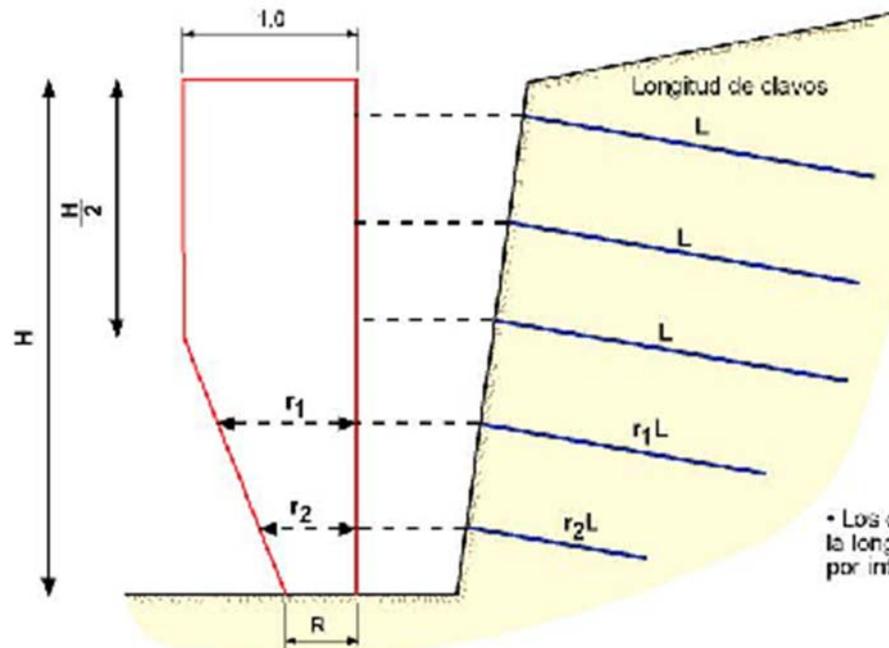
- Métodos de equilibrio límite (a veces elementos finitos)
- Superficies de rotura y modos básicos





## COMPROBACIÓN DE LA ESTABILIDAD GLOBAL

### •Reducción de la longitud de cálculo



FHWA, 1998

En los métodos de equilibrio límite la resistencia al arrancamiento del refuerzo no es un resultado del cálculo, sino es un dato de entrada, que es proporcional a la longitud de anclaje disponible.

Puede ser en exceso optimista suponer que los bulones de las filas inferiores, donde el movimiento horizontal es menor y por tanto la sollicitación de los bulones también, pueden llegar a movilizar la resistencia correspondiente a toda su longitud de anclaje con movimientos discretos

## 4.- COMPROBACIÓN DE LA ESTABILIDAD GLOBAL

### •Reducción de la longitud de cálculo

- Lower half of the wall: Soil nails whose heads are in this zone should be increasingly shorter toward the bottom. The lengths of these nails must be determined by linear interpolation from value  $L$  at the wall mid height, to  $R \times L$  at the base of the wall.  $R$  is  $< 1.0$  and is selected depending on subsurface and geometric conditions and other factors, as indicated below.
  - For very dense, coarse-grained granular soils:  $0.15 \leq R \leq 0.30$
  - For silty sand, sand, to gravelly sand:  $0.25 \leq R \leq 0.40$
  - For fined-grained soils:  $0.30 \leq R \leq 0.45$

$R$  has been estimated for the following conditions: safety factor for pullout  $FS_{PO} = 2.0$ , drill hole diameter ( $D_{DH}$ ) between 4 to 8 in., horizontal and vertical nail spacing ( $S_H$  and  $S_V$ ) between 4 and 6 ft, and typical ranges of bond strengths ( $q_U$ ) for the soil types listed above.

## 4.- COMPROBACIÓN DE LA ESTABILIDAD GLOBAL

- Reducción de la longitud de cálculo

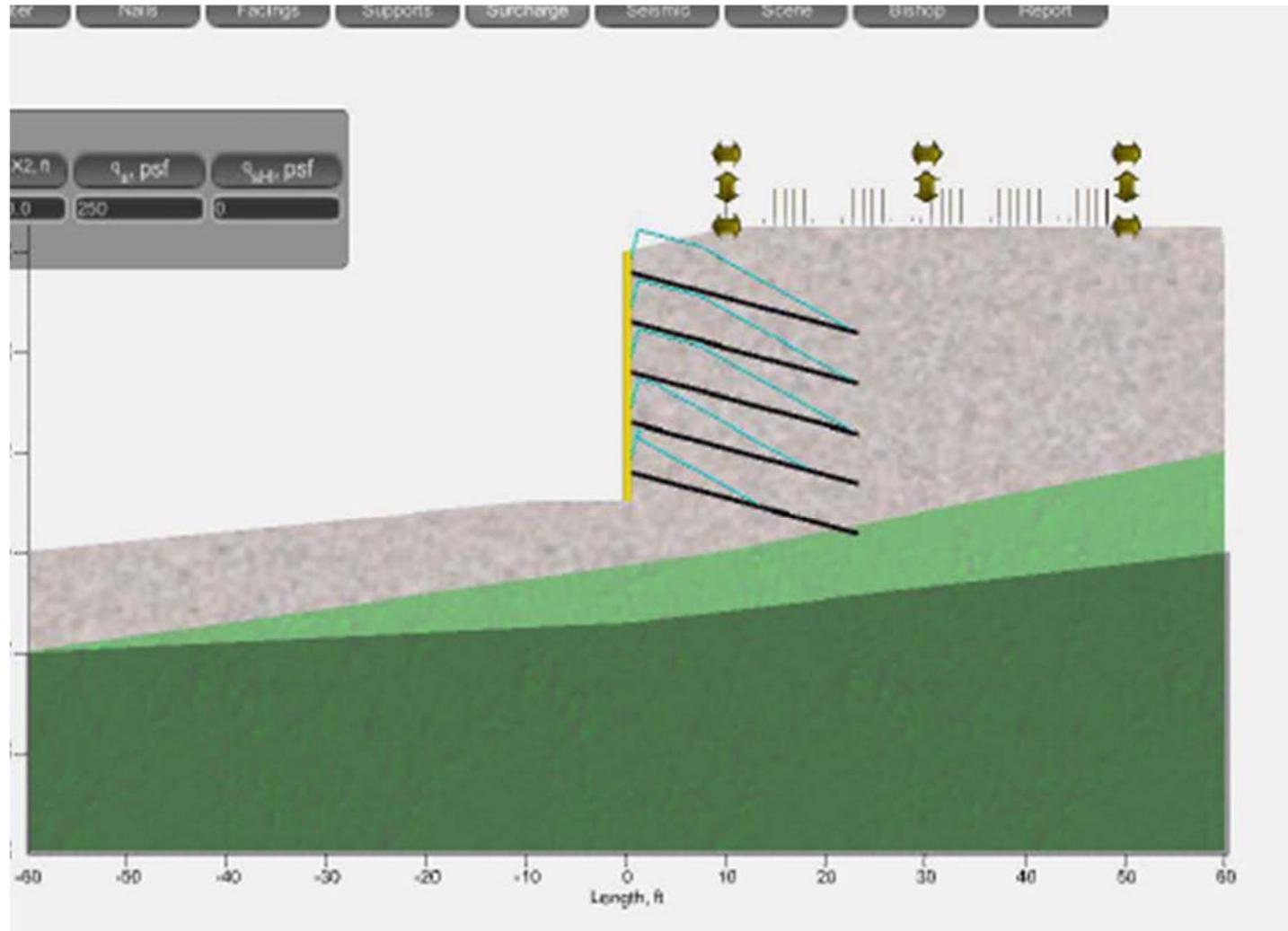
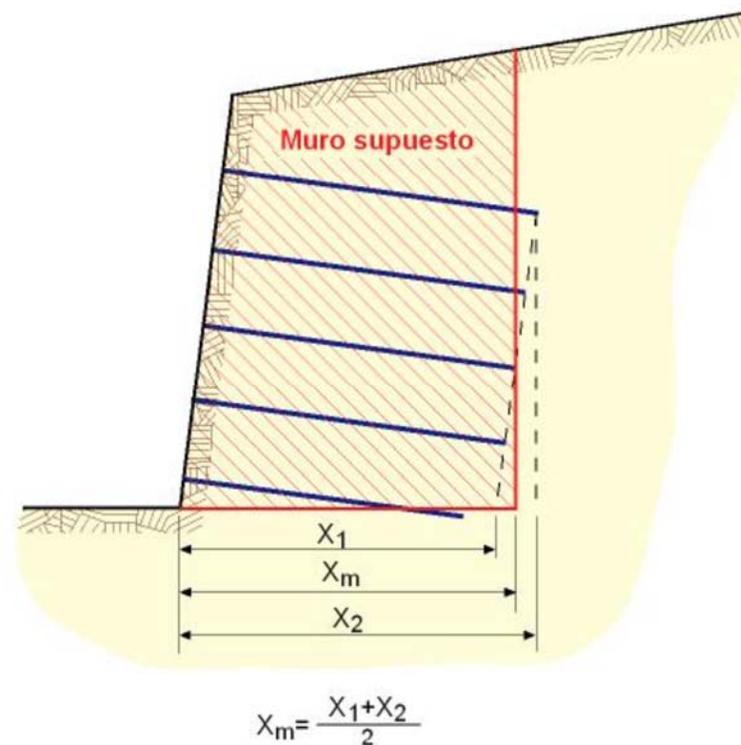


Figure 19. Screen Shot. SNAP - Surcharge

## 5.- OTRAS COMPROBACIONES

- Hundimiento (como cimentación del macizo), en caso de suelos blandos o con nivel freático próximo a la máxima excavación prevista.
- Voladizo superior
- Medidas de drenaje
- Auscultación



- “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. ICET. CICC.
- 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. Capo. 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.