

41121  
24

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
CAMPUS ARAGON**

**“CONCEPTOS BASICOS PARA LA APLICACIÓN  
DE LA TIERRA ARMADA”**

**T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERIA CIVIL**

**P R E S E N T A :  
MAURICIO MONTOYA SANCHEZ**

**ASESOR:  
ING. GABRIEL ALVAREZ BAUTISTA**

MEXICO 2003

2



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS  
PROFESIONALES ARAGON - UNAM

JEFATURA DE CARRERA  
DE INGENIERIA CIVIL

OFICIO No. ENAR/ICIC/0404/2003

ASUNTO: Sinodo.

LIC. ALBERTO IBARRA ROSAS  
SECRETARIO ACADÉMICO  
P R E S E N T E

Por medio del presente me permito relacionar los nombres de los profesores que sugiero integren el Sinodo del Examen Profesional del C. MAURICIO MONTOYA SÁNCHEZ, con número de cuenta: 09850619-0, con el tema de tesis: " CONCEPTOS BÁSICOS PARA LA APLICACIÓN DE LA TIERRA ARMADA ".

~~PR~~ PRESIDENTE:  
VOCAL:  
SECRETARIO:  
SUPLENTE:  
SUPLENTE:

ING. PASCUAL GARCÍA CUEVAS  
ING. JOSÉ MARIO ÁVALOS HERNÁNDEZ  
ING. GABRIEL ÁLVAREZ BAUTISTA  
ING. KARLA IVONNE GUTIÉRREZ VÁZQUEZ  
ING. GABRIEL RUÍZ GONZÁLEZ



Quiero subrayar que el director de tesis es el Ing. Gabriel Álvarez Bautista, el cual está incluido en base a lo que reza el Reglamento de Exámenes Profesionales de esta Escuela.

A T E N T A M E N T E  
" POR MI RAZA HABLARA EL ESPANOL " ~~ESPANOL~~  
San Juan de Aragón, Estado de México, a 20 de Octubre del 2003

EL JEFE DE CARRERA

ING. MARTÍN ORTIZ LEÓN



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

c.c.p. Lic. Ma. Teresa Luna Sánchez - Jefa del Departamento de Servicios Escolares.  
Ing. Karla Ivonne Gutiérrez Vázquez - Secretaria Técnica de la carrera de Ingeniería Civil  
Ing. Gabriel Álvarez Bautista - Director de Tesis  
Comité de Tesis  
Interesado



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
ARAGÓN

DIRECCIÓN

MAURICIO MONTOYA SANCHEZ  
Presente

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

\* Con fundamento en el punto 6 y siguientes, del Reglamento para Exámenes Profesionales en esta Escuela, y toda vez que la documentación presentada por usted reúne los requisitos que establece el precitado Reglamento; me permito comunicarle que ha sido aprobado su tema de tesis y asesor. \*

TÍTULO: "CONCEPTOS BÁSICOS PARA LA APLICACIÓN DE LA TIERRA ARMADA"

ASESOR: Ing. GABRIEL ÁLVAREZ BAUTISTA

Aprovecho la ocasión para reiterarle mi distinguida consideración.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
San Juan de Aragón, México, 23 de junio de 2003  
LA DIRECTORA

*L. Turcott*  
ARQ. LILIA TURCOTT GONZÁLEZ



6  
C p Secretaría Académica  
C p Jefatura de Carrera de Ingeniería Civil  
C p Asesor de Tesis

LTG/AIR/11a

3



INDICE

	<b>TESIS CON FALLA DE ORIGEN</b>	
<b>INTRODUCCIÓN</b>		<b>I</b>
<b>I ANTECEDENTES</b>		<b>1</b>
<b>II CONSIDERACIONES DEL FUNCIONAMIENTO DE LA TIERRA ARMADA</b>		<b>10</b>
II.1	Consideraciones del funcionamiento de la tierra armada	11
II.2	Conceptos básicos y características especiales de la tierra armada	14
II.3	Interacción suelo - refuerzo	15
II.4	El principio de la tierra armada	20
II.5	Pruebas a escala reducida	27
II.6	Experimentos a escala natural	36
II.7	Reconocimiento del subsuelo para un proyecto de tierra armada	42
<b>III COMPORTAMIENTO Y PROPIEDADES DE LA TIERRA ARMADA</b>		<b>44</b>
III.1	Comportamiento y propiedades de la tierra armada	45
III.2	Fricción en la tierra armada	48
III.3	Ventajas de la tierra armada en diversas obras	51
III.3.1	Carreteras y autopistas de montaña	51
III.3.2	Carreteras y autopistas urbanas	52
III.3.3	Carreteras litorales y muros inundables	53
III.3.4	Estribos de puentes	54
III.3.5	Ferrocarril	55
III.3.6	Merlones de almacenaje	56
III.3.7	Urbanismo	58

4



<b>IV MÉTODOS DE DISEÑO</b>		<b>59</b>
IV.1	Consideraciones de análisis y diseño	60
IV.2	Métodos de diseño de estructuras de tierra armada	63
IV.3	Método de los esfuerzos de trabajo	63
IV.3.1	Cálculo de las fuerzas máximas de tensión en los refuerzos	65
IV.3.2	Cálculo de la longitud de adherencia	68
IV.3.3	Método de los planos de falla	72
IV.4	Análisis de estabilidad del muro de tierra armada	75
IV.5	Ejemplos de aplicación	81
<b>V PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO</b>	<b>PROCESO DE ORIGEN</b>	<b>88</b>
V.1	Trabajos de campo y Análisis de alternativas para el desarrollo de un proyecto de tierra armada	89
V.2	Requisitos mínimos para desarrollar un proyecto de tierra armada	99
V.3	Operaciones de montaje	111
<b>VI CONCLUSIONES Y BIBLIOGRAFÍA</b>		<b>132</b>
	Conclusiones	133
	Bibliografía	137

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

5



## INTRODUCCIÓN

El objetivo de este trabajo de tesis es, hasta donde la simplicidad lo permita y mediante términos sencillos explicar el funcionamiento, el procedimiento y planteamiento de un proyecto de tierra armada.

Como se podrá apreciar en el contenido de este trabajo, los temas se han desarrollado de manera totalmente teórica para una mejor comprensión de los temas que componen el presente.

Dando un breve panorama de cómo se ha ido desarrollando el procedimiento de la tierra armada así como sus aplicaciones muy variadas en muros de contención en carreteras, autopistas, vías férreas, etc.

En el país esta tecnología se desarrolla principalmente para la construcción de estribos de puentes y muros de contención debido a las características económicas y técnicas que reporta este procedimiento dando ventaja sobre otros procedimientos convencionales que en el pasado se utilizaron.

En México esta tecnología ha sido reglamentada por varios estados de la república entre ellos el principal el Distrito Federal, el procedimiento esta avalado en todos los casos por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT).

En el primer capítulo se presenta una reseña histórica del procedimiento, así como los principales aspectos que debe tenerse en cuenta para el desarrollo del análisis y diseño de proyectos de tierra armada teniendo una comparativa con otros procedimientos constructivos, esto con el afán de iniciar la comparativa del procedimiento en estudio con los métodos convencionales que a lo largo de la carrera se enseñan.

En el segundo capítulo se desarrollan las consideraciones que deben tomarse en cuenta para el buen funcionamiento de las futuras estructuras a base de tierra armada considerando que el punto clave para que la estructura funcione adecuadamente será la fricción generada entre el suelo y el refuerzo, resaltando que el procedimiento constructivo de la tierra armada es una combinación de elemento

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



lineales capaces de soportar fuerzas importantes de tensión y tierra; recordando que los primeros elementos suelen ser tiras metálicas o de plástico. De tal manera que la asociación de tierra y elementos lineales den al conjunto una resistencia a la tensión de la que el suelo carece.

En este capítulo se dan recomendaciones de granulometría, adherencia grano – armadura, tipo de piel (concreto o metálica), refuerzo,

Así como la forma teórica de cómo se da la fricción entre el suelo y el refuerzo. Las investigaciones que se han dado desde la aplicación de la tierra armada tanto en modelos en miniatura y en pruebas a muros construidos que sirvieron para el avance de esta tecnología, dando a conocer los resultados que arrojaron dichos estudios, por ello la importancia de este capítulo que refleja la estrecha relación que existe entre la teoría y la realidad de construir muros de tierra armada.

En el tercer capítulo se estudia el comportamiento y las propiedades del procedimiento, considerando que la tierra armada es en sí un material que posee características propias de y no es únicamente un sistema de anclaje como se juzgó en un inicio.

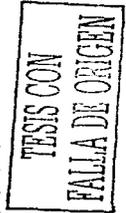
Por ello en este capítulo se estudian muestras de que se reforzaron siguiendo una distribución bidimensional, resultando que los refuerzos mejoran notablemente las propiedades mecánicas de un suelo especialmente los de características friccionantes.

Como se menciona en el capítulo anterior el punto clave de la tierra armada es la fricción que se genera entre el suelo y el refuerzo en este tercer capítulo se desarrollan varios tipos de ensayos como son:

- Pruebas de corte directo.
- Pruebas de resistencia a la extracción con refuerzos colocados dentro de un terraplén.

Y concluyendo este capítulo con las ventajas que ofrece este sistema en diversas estructura que se estudiaron en forma separada y comparando se comportamiento con estructuras desarrolladas con los métodos convencionales.

En el capítulo cuarto se estudian con detalle los métodos de diseño que se han desarrollado para los proyectos de tierra armada teniendo especial cuidado en el estudio de la aplicación y distribución de los elementos lineales (refuerzo), debido a que es este elemento el que brinda las principales





cuales a el sistema que se estudia en el presente trabajo. en el estudio de los empujes generados por el suelo se estudian de manera convencional, es decir, como empujes de tierras con los mismos principios y formulas que se estudian en empuje de tierras, en este capitulo se repasan los principios y aspectos generales para un buen proyecto de tierra armada, al final se exponen ejemplos del calculo de empujes y la secuela de calculo para el refuerzo que llevara un muro de tierra armada.

Considerando algunas ventajas que la tierra armada son las siguientes:

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

- Gran resistencia, en obras de gran altura o que soportan grandes sobre cargas.
- Gran flexibilidad de los paramentos, que permite a los macizos adaptarse a suelos con cimentación conflictiva.
- Rapidez de ejecución, integración completa al movimiento de tierras.
- Economía.
- Estética.

En el quinto capitulo se presenta el procedimiento constructivo en el ual se describen en forma detallada la forma de cómo se debe realizar la organización y las especificaciones que se necesitan para construir con tierra armada son

#### ➤ LA TIERRA

Son validos todos los materiales de origen natural que respondan a los criterios que se establecieron en los párrafos anteriores. Siempre y cuando no contengan un porcentaje elevado de finos. Las investigaciones llevadas a cabo en relación con tierras adecuadas para utilizar en los macizos de tierra armada, parecen indicar que cualquier material considerado como un buen relleno es apropiado para la tierra armada.

#### ➤ LAS ARMADURAS.

Se ha previsto la utilización de cualquier tipo de armaduras, capa de tejido, mallas de alambre, armaduras metálicas lineales o no.

Las armaduras normalizadas son de 5 mm. de espesor, son elementos lineales de acero sin galvanizar o galvanizado, con un diseño que aumenta la adherencia. Son flexibles y muy resistentes.



## ✓ LAS PIELES.

Se han puesto a prueba dos tipos de piel:

### ✓ METÁLICAS

Esta construida por elementos lineales de acero galvanizado con una sección en media elipse (el eje mayor mide 333 mm) que se fija a las armaduras y hace la función de una membrana, conservando su forma elíptica estable ante cualquier tensión en el macizo armado, ante los asentamientos producidos.

La puesta en obra es muy sencilla, el montaje se en capas de 333 mm en la secuencia piel, armadura y relleno y así sucesivamente para cualquier altura de macizo, ya que solamente se trabaja desde la plataforma formada por la última capa de relleno.

### ✓ CONCRETO.

Esta formada por escamas cruciformes de concreto reforzado de 1.50 mts. de lado unidas a las armaduras por medio de arranques, empotrados en la escama, del mismo metal que el de las armaduras.

Estas escamas, que pesan del orden de una tonelada, permiten una manipulación y colocación en obra con una pequeña grúa. La forma de las juntas y los bulones de las escamas permiten un montaje flexible con las escamas contiguas.

La rapidez del montaje radica en la posibilidad de colocar las escamas sin necesidad de andamios. Al igual que en el caso de la piel metálica, la plataforma de trabajo esta formada por la última capa de relleno extendida.

La utilización de concreto permite realizar paramentos estéticos que se integran perfectamente a la arquitectura del paisaje.

La tierra armada presenta entre sus principales características las siguientes:

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



- Posibilidad de utilizar en grandes macizos con tratamiento similar al de un terraplén.
- Flexibilidad, que le permite adaptarse a terrenos con características geotécnicas mediocres. Generalmente se admiten asentamientos diferenciales del orden de un 1% para un muro de 6 mts. de altura; asentamientos completamente imposibles para estructuras rígidas.
- Experimenta mínimas deformaciones en el sentido de las armaduras, por lo que prácticamente las elimina del paramento.
- Tiene excelente comportamiento ante las vibraciones y temblores de tierra como ha sido demostrado en los ensayos efectuados sobre modelos por el laboratorio de los ferrocarriles japoneses y en las obras situadas en la región de Udine, en el norte de Italia.

Precio reducido: el costo de una obra en tierra armada es inferior al de una obra clásica, siendo la diferencia más importante cuanto mayor es la altura. En el caso de obras de cimentación mediocre, la diferencia es todavía más notable debido a que la solución tierra armada suprime las cimentaciones especiales.

En el quinto capítulo se presentan las conclusiones y la bibliografía esperando que este proceso constructivo sea de interés y provechoso para el futuro lector de este trabajo, se de cuenta de la enorme capacidad que se tiene con un poco de imaginación.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
"ARAGÓN"



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## I. ANTECEDENTES



## I. ANTECEDENTES

La tierra armada por sus aplicaciones muy variadas: muros de contención en carreteras, autopistas y vías férreas; estribos de puentes, construcciones industriales, protección civil y militar, obras hidráulicas, etc.

El desarrollo tan rápido de este nuevo sistema constructivo es consecuencia de las cualidades de la tierra armada, tales como:

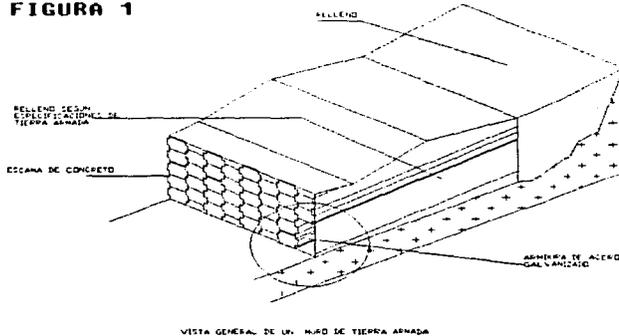
- Gran resistencia, en obras de gran altura o que soportan grandes sobrecargas.
- Gran flexibilidad de los paramentos, que permite a los macizos adaptarse a suelos con cimentación conflictiva.
- Rapidez de ejecución, integración completa al movimiento de tierras.
- Economía.
- Estética.

Inventada y patentada mundialmente por el ingeniero y arquitecto francés, Henri Vidal, la tierra armada es un material de características especiales al asociar la tierra con armaduras. La adherencia entre los granos de tierra y las armaduras, juega un papel importante en el comportamiento de este material y le confiere una gran cohesión.

Vidal, el inventor de la tierra armada, cuenta que fue durante unas vacaciones en las islas Baleares del Mediterráneo cuando, jugando con la arena de la playa, concibió la idea de dar cohesión a los materiales granulares con elementos flexibles resistentes. Esta idea original se ha desarrollado considerablemente a través del tiempo, y ha encontrado un gran número de aplicaciones, principalmente en la construcción de estructuras de contención y de estribos de puentes. La tecnología actual combina principalmente tres elementos: El material de relleno granular, las armaduras de acero y las escamas de concreto para los paramentos (Fig. 1). Los métodos de diseño y los tipos de aplicación presentan una evolución rápida a nivel mundial. En México, esta técnica es todavía nueva pero ya se está aplicando en diversas obras.



FIGURA 1



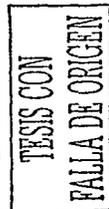
VISTA GENERAL DE UN MURO DE TIERRA ARMADA

El 14 de marzo de 1965 Henri Vidal, inventor de la "Tierra Armada", impartió su primera conferencia sobre este tema.

Para esa fecha sólo existía una estructura de tierra armada, que era el muro de Pragnère construido en 1964, aunque el inventor ya había para entonces realizado una amplia investigación teórica y experimental con modelos de laboratorio a escala reducida.

En 1966 el Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) empezó a interesarse por la tierra armada. A principios de 1967, llevó a cabo las primeras investigaciones tendientes a verificar los métodos empleados para el diseño de muros de tierra armada. Dichos proyectos se realizaron a base de modelos bidimensionales usando cilindros de acero que tomaban el lugar del suelo.

Al mismo tiempo, los ingenieros del citado laboratorio tomaron parte en un estudio geotécnico efectuado para la construcción de una carretera en un sitio montañoso de la zona de Niza (al sur de Francia). Preocupados por la construcción de terraplenes altos en taludes compactos e inestables, pensaron que la tierra armada, debido a su flexibilidad, podría proporcionar soluciones interesantes a los problemas específicos del sitio.



Como resultado, entre 1968 y 1969 se construyeron los primeros muros con un total de paramento exterior de 5630 m<sup>2</sup>.

En 1968 el antes mencionado laboratorio también efectuó el primer experimento a escala natural en el muro Incarville.

En 1997 se inició la promoción en Centroamérica, lográndose contratar obras en Guatemala, Honduras, Nicaragua, El Salvador y Costa Rica, todas por medio de algún representante en la zona.

En Septiembre de 1999, FREYSSINET adquiere TIERRA ARMADA, y a partir de ese momento ambos grupos empiezan a trabajar como uno sólo. Ofreciendo a los clientes los muros de contención mecánicamente estabilizados siguiendo el procedimiento de TIERRA ARMADA, y las Bóvedas Prefabricadas TechSpan®

El prestigio de TIERRA ARMADA está avalado por la SCT y por Gobiernos de diferentes Estados como Jalisco, Nuevo León, México, Puebla y Querétaro, así como el Departamento del D.F. Una característica de los muros de TIERRA ARMADA en México es que más del 80 % trabajan como estribos y muros de contención a la vez, debido a la gran economía que esto representa.

En esta forma, mientras que la compañía Reinforced Earth desarrollaba importantes investigaciones sobre la tecnología del método, los primeros avances fundamentales sobre el comportamiento de la tierra armada se realizaban en el citado Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

En la actualidad TIERRA ARMADA comparte ahora su misión con FREYSSINET DE MEXICO. Son una empresa comprometida con la calidad y la satisfacción de las necesidades y expectativas de sus clientes: con el desarrollo personal y profesional de los empleados de la empresa, así como con la remuneración adecuada para los accionistas.

Cómo se enfrenta hoy la gestión de los proyectos", con un desarrollo del tema desde la perspectiva del mandante -generalmente la empresa inmobiliaria- que es quien tiene definidas las características de la edificación, con sus objetivos, y forma para esto un equipo multidisciplinario para su posterior desarrollo.

Por corresponder originalmente a una tecnología patentada, donde este tipo de obras sólo las podía diseñar y proveer alguna de las empresas del grupo inventor, toda la investigación, medición, control



y perfeccionamiento de esta tecnología se centró en dicho grupo. Sin embargo, dada la necesidad de que existiera algún documento oficial público, el Ministerio de Transporte de Francia, en el año 1979, publicó el primer documento relacionado con esta tecnología «Les ouvrages en terre armée - Recommandations et règles de l'art» (Las obras en tierra armada - Recomendaciones y reglas del arte)

Posteriormente ya vencidas algunas patentes, se promulga en Francia la norma NF P 94-220 «Renforcement des sols: Ouvrages en sols rapportés renforcés par armatures ou nappes peu extensibles et souples» (Refuerzo de suelos: Obras de suelo reforzado con armaduras o membranas inextensibles y flexibles), en el año 1992.

La violenta expansión del sistema TME obligó a diferentes países a dictar normas y recomendaciones de diseño, algunas de las cuales son: Estados Unidos: - Norma AASHTO. «Standard Specifications for Highway Bridges». (Especificaciones Standard para puentes carreteros)

Como se puede apreciar, esta tecnología no sólo está reiteradamente validada en grandes proyectos y fuertes sismos en el lapso de 40 años, sino que también está normada en la mayoría de los países donde se aplica.

A pesar de que el empleo de elementos de refuerzo trabajando a la tensión para mejorar la resistencia y la capacidad de carga de los suelos se remonta a tiempos prehistóricos, ha sido en los últimos años cuando los resultados de estudios rigurosos tanto analíticos como experimentales efectuados por Vidal han permitido el uso muy difundido de la tierra armada en una gran variedad de aplicaciones. A la fecha, se han realizado miles de estructuras en todo el mundo.

La tierra armada puede resultar un material de construcción económico, adecuado para emplearse en muchas aplicaciones tales como muros de retención, accesos para puentes, terraplenes, puentes de calizas cavernosas, diques de contención, fosos de almacenamiento de carbón y minerales, y desarrollos habitacionales en laceras.

Experiencias recientes han demostrado que la tierra armada puede ser aplicable a casi todos los casos en que se requiera una diferencia de elevación entre 20 y 30 m y en que se disponga de suelo adecuado para la construcción.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



En el presente trabajo se realiza una recopilación excelente de los avances alcanzados en el estudio del mecanismo y comportamiento de la tierra armada. También ha cubierto los métodos de diseño aplicados en la actualidad. Por tanto, estos tópicos no se tratarán con detalle en el presente trabajo. Por el contrario, la finalidad y alcance de esta presentación serán:

- I. Acotar el concepto de la tierra armada dentro del campo de acción más amplio del refuerzo de suelos.
- II. Sintetizar el concepto fundamental y las características más relevantes de la tierra armada.
- III. Complementar los trabajos de diseño, incluyendo el diseño sísmico.
- IV. Presentar algunas referencias que describen con detalle la tierra armada y el refuerzo de suelos.

#### REFUERZO DE SUELOS Y TIERRA ARMADA

Se han desarrollado varios tipos de refuerzo de suelo para aplicaciones geotécnicas. Las características esenciales de estos métodos se presentan en la tabla I.1 y sus aplicaciones se resumen en la tabla I.2.

TABLA I.1 DE REFUERZOS EN SUELOS

Trabajo principal del refuerzo	Tierra armada	Banderillas	Micro pilotes	Columnas de piedras	Pilotes remodelados en el lugar
Tensión	¶	¶	¶		
Compresión			¶	¶	¶
Por cortante		¶	¶	¶	¶
Por flexión			¶		

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



TABLA I.2. DE APLICACIONES DEL REFUERZO EN SUELOS

Aplicación	Tierra armada	Banderillas	Micro pilotes	Columnas de piedra	Pilotes remodelados en el lugar
Capacidad de carga	SI		SI	SI	SI
Estabilidad	SI	SI	SI	SI	SI
Reducción de asentamientos	SI		SI	SI	SI
Aumento de la rapidez de asentamiento				SI	

BANDERILLAS

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Las banderillas están formadas por una serie de varillas de refuerzo que se inyectan dentro del suelo que se va a estabilizar. Un ejemplo ilustrativo del sistema de banderillas para soportar un talud excavado se muestra en la Fig. I.2.

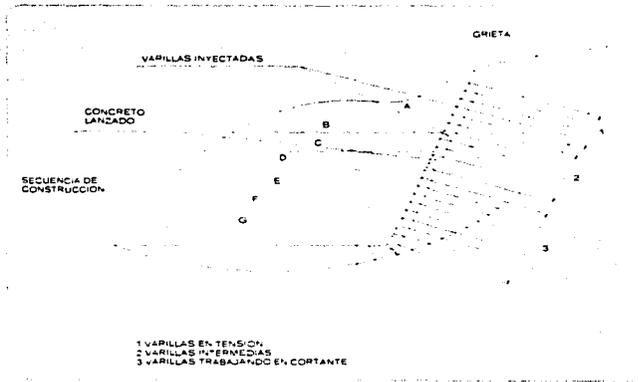


Figura I.2 Estabilización de un talud por medio de banderillas inyectadas



## LOS MICROPILOTES

Los micropilotes son pilotes de pequeño diámetro (100 a 150 mm) de concreto colado en el lugar que tienen generalmente una varilla de refuerzo colocada al centro. Se instalan en grupos y los pilotes individuales se construyen tanto en posición vertical como inclinados. Se pueden usar como apoyo de estructuras y para estabilizar el suelo alrededor contra movimientos y pérdida de equilibrio.

## COLUMNAS DE PIEDRA

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Las columnas de piedra son columnas compactadas de grava o roca triturada que se colocan en suelos blandos. Los diámetros están generalmente comprendidos entre 0.6 y 1.0 m. Proporcionan apoyo vertical a las superestructuras o a terrapienes y funcionan como drenes del suelo blando. Se pueden también usar para resistir el cortante en planos horizontales.

## PILOTES REMODELADOS EN EL LUGAR

Los pilotes remodelados en el lugar son pilotes cilíndricos en los cuales cemento, cal u otro aditivo se mezcla directamente con el suelo encontrado en el sitio. Los pilotes así formados se pueden usar individualmente o en grupos como apoyo de cimentaciones. También se pueden agrupar para formar pilas o colocarse uno junto a otro para construir muros.

## TIERRA ARMADA

La tierra armada es un sistema constructivo que consta de capas alternadas de relleno compactado y de tiras de refuerzo a la tensión. La construcción resultante es una estructura coherente tipo gravedad que se puede emplear en cualquiera de las aplicaciones mencionadas en la introducción de este trabajo y que se describen en detalle en presente trabajo.

La tierra armada es única dentro de las técnicas antes mencionadas en lo que se refiere a que:

1. Los refuerzos se hacen trabajar únicamente a tensión. Los refuerzos sólo funcionan efectivamente a la tensión.



- 2 La tierra armada es un material de construcción compuesto en el cual el suelo y las tiras de refuerzo se van colocando en capas sucesivas. En todos los demás métodos mencionados, el terreno que se va a reforzar o a estabilizar se trata en el lugar.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## II. CONSIDERACIONES DEL FUNCIONAMIENTO DE LA TIERRA ARMADA



## II. 1 CONSIDERACIONES DEL FUNCIONAMIENTO DE LA TIERRA ARMADA

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

La tierra armada es una asociación de tierra y elementos lineales capaces de soportar fuerzas lineales de tensión importantes: estos últimos elementos suelen ser tiras metálicas o de plástico. El refuerzo de tales tiras da al conjunto una resistencia a tensión de la que el suelo carece en sí mismo con la ventaja adicional de que la masa puede reforzarse única o principalmente en las direcciones más convenientes. La fuente de donde emana esta resistencia a la tensión es a fin de cuentas la fricción interna del suelo, puesto que las fuerzas que se producen en la masa se transfieren del suelo a las tiras de refuerzo por fricción.

Se considera, en un relleno, el conjunto de granos en contacto con una armadura. La cara de uno cualquiera de estos granos en contacto la armadura forma un ángulo  $\alpha$  con la normal.

Para que este fenómeno se cumpla, se tiene que verificar que en cada punto de contacto de una armadura con la tierra, el rozamiento tenga, realmente, lugar sin deslizamiento.

Siendo  $F_1$  y  $F_2$  las tensiones conocidas en la armadura en dos puntos distantes  $dl$ ,  $dF = F_1 - F_2 \sigma$  es la tensión de compresión de la tierra, perpendicularmente al punto de la armadura de un ancho  $e$ , la fuerza normal a la armadura sobre la longitud  $dl$  y sobre las dos caras, tiene un valor  $2 \cdot \sigma \cdot e \cdot dl$ . El rozamiento tiene lugar sin deslizamiento cuando  $\frac{dF}{2 \cdot \sigma \cdot e \cdot dl}$  es más pequeño que  $f$  (siendo  $f$  el coeficiente de rozamiento tierra armadura).

La ventaja de la tierra armada reside en el hecho de que la fórmula se verifica fácilmente en todas las obras.

La adherencia grano - armadura tiene, pues, tal importancia que es necesario que se cumpla que el material de relleno tenga un rozamiento suficiente.

Una condición granulométrica para que el material cumpla la condición de adherencia es que contenga menos de un 15 % de elementos inferiores a 80 micras (tamiz 200) y que el ángulo de rozamiento interno sea superior o igual a  $25^\circ$  ( $\rho > 25^\circ$ ).

Los suelos que contienen más de un 15 % de elementos inferiores a 80 micras podrían ser válidos. En estos casos será necesario realizar un ensayo directo e rozamiento tierra - armadura.



Aunque en la práctica todos los granos no pueden estar en contacto directo con las armaduras estimándose que los enlaces entre los granos de terreno que están en contacto con armaduras con aquellos que no lo están, se realiza por medio de la formación de bielas o bóvedas

El funcionamiento del material fue demostrado a partir de ensayos triaxiales sobre muestras de arena armada. Estos ensayos han permitido además demostrar una buena cohesión del material arena armada, con relación a la nula cohesión de la misma arena sin armar, siendo idéntico el ángulo de rozamiento interno de ambos materiales.

Esta cohesión es proporcional a la resistencia a la tracción de las armaduras y en la dirección resistente de las mismas. Por tanto, se puede elegir la cohesión y su intensidad, lo que permite calcular y realizar obras que resistan las más grandes tensiones.

Se ha visto que no todos los granos de un macizo están en contacto con las armaduras. Por tanto, es necesario disponer una piel que contenga localmente la tierra entre dos capas de armaduras.

Esta piel debe ser resistente y flexible para adaptarse en buen estado a las deformaciones del macizo armado.

Para construir con tierra armada se necesitan:

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

#### ➤ LA TIERRA

Son válidos todos los materiales de origen natural que respondan a los criterios que se establecieron en los párrafos anteriores. Siempre y cuando no contengan un porcentaje elevado de finos. Las investigaciones llevadas a cabo en relación con tierras adecuadas para utilizar en los macizos de tierra armada, parecen indicar que cualquier material considerado como un buen relleno es apropiado para la tierra armada.

#### ➤ LAS ARMADURAS.

Se ha previsto la utilización de cualquier tipo de armaduras, capa de tejido, mallas de alambre, armaduras metálicas lineales o no.



Las armaduras normalizadas son de 5 mm. de espesor, son elementos lineales de acero sin galvanizar o galvanizado, con un diseño que aumenta la adherencia. Son flexibles y muy resistentes

#### ➤ LAS PIELES.

Se han puesto a prueba dos tipos de piel:

##### ✓ METÁLICAS

Esta construida por elementos lineales de acero galvanizado con una sección en media elipse (el eje mayor mide 333 mm) que se fija a las armaduras y hace la función de una membrana, conservando su forma elíptica estable ante cualquier tensión en el macizo armado, ante los asentamientos producidos.

La puesta en obra es muy sencilla, el montaje se en capas de 333 mm en la secuencia piel, armadura y relleno y así sucesivamente para cualquier altura de macizo, ya que solamente se trabaja desde la plataforma formada por la ultima capa de relleno.

##### ✓ CONCRETO.

Esta formada por escamas cruciformes de concreto reforzado de 1.50 mts. de lado unidas a las armaduras por medio de arranques, empotrados en la escama, del mismo metal que el de las armaduras.

Estas escamas, que pesan del orden de una tonelada, permiten una manipulación y colocación en obra con una pequeña grúa. La forma de las juntas y los bulones de las escamas permiten un montaje flexible con las escamas contiguas.

La rapidez del montaje radica en la posibilidad e colocar las escamas sin necesidad de andamios. Al igual que en el caso de la piel metálica, la plataforma de trabajo esta formado por la ultima capa de relleno extendida.

La utilización de concreto permite realizar paramentos estéticos que se integran perfectamente a la arquitectura del paisaje.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



## II. 2 CONCEPTOS BÁSICOS Y CARACTERÍSTICAS ESENCIALES DE LA TIERRA ARMADA

La tierra armada es un material compuesto formado por la combinación de refuerzos lineales y un suelo granular prácticamente sin cohesión. Un sistema de tierra armada está constituido por tres elementos: (1) tableros exteriores, (2) tiras de refuerzo. En un muro típico de tierra armada las tiras de refuerzo tienen una longitud entre 0.7 y 0.8 veces la altura del muro. El espaciamiento usual entre tiras en muros típicos es del orden de 1 m horizontalmente y 0.75 m en dirección vertical, y (3) suelo de relleno, según se ilustra esquemáticamente en la Fig. II.2.1.

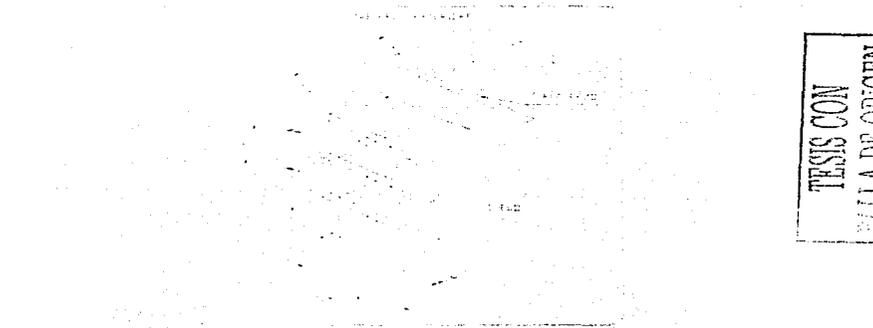
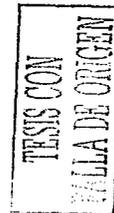


Figura II.2.1 muro de Tierra Armada (vidal)

El punto clave para la estabilidad de una estructura de tierra armada está en la fricción generada entre el suelo y los refuerzos. Una estructura de este tipo bien diseñada y construida, se soporta por sí misma como un cuerpo coherente debido a esta fricción, la cual evita que el suelo se despare lateralmente en la dirección de los refuerzos.

La tierra armada representa una combinación de materiales en la cual cada uno de ellos emplea su resistencia intrínseca para compensar las carencias del otro. Un suelo granular compactado tiene una resistencia excelente a la compresión y al cortante; sin embargo, no puede soportar tensión ni





una resistencia excelente a la compresión y al cortante, sin embargo, no puede soportar tensión ni permanecer estable sin confinamiento. Los refuerzos (generalmente de acero), no trabajan a compresión ni a cortante debido a su flexibilidad, aunque son muy resistentes a tensión. A raíz de la fricción entre suelo y refuerzos, se genera un confinamiento efectivo o aparente dentro del suelo debido a la rigidez tensional de los refuerzos que induce el confinamiento del suelo.

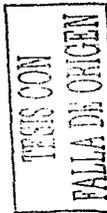
En un sistema de tierra armada idealmente simétrico, no existirán esfuerzos horizontales que deban ser resistidos en las fronteras verticales exteriores. Sin embargo, en la realidad las estructuras de tierra armada no son simétricas, y los refuerzos no son "ideales" en cuanto a que no hay continuidad en planos horizontales. Además, las partículas de suelo están más propensas a movimiento horizontal a medida que aumenta la distancia vertical a las tiras de refuerzo.

Como consecuencia, los tableros exteriores necesitan soportar las concentraciones locales de esfuerzos en el suelo en zonas a cierta distancia de los refuerzos y las debidas a la asimetría de la estructura. Además, los tableros exteriores y las conexiones a los refuerzos deben resistir los esfuerzos inducidos por el equipo de construcción y por la compactación del suelo cerca del paramento. Los tableros exteriores también cumplen con una importante función arquitectónica en muchas de las veces.

Otro aspecto importante de las estructuras de tierra armada está en su flexibilidad. Pueden soportar deformaciones apreciables sin perder su carácter coherente propio. McKittrick describe con cierto detalle dos casos en los que los muros de tierra armada se movieron distancias apreciables, debido a fallas en la cimentación, sin haber perdido su integridad dentro del volumen comprendido por el suelo reforzado. La naturaleza flexible de la tierra armada la hace un tipo de construcción adecuado para casos en que se espera cierto asentamiento de la cimentación. Se han empleado con éxito terraplenes de tierra armada sobre suelos blandos que se han mejorado por medio de columnas de piedra.

## II. 3. INTERACCIÓN SUELO-REFUERZO

La resistencia movilizada entre el suelo y los refuerzos de tensión constituye uno de los aspectos más importantes de la tierra armada. Las cuestiones relativas a cómo se desarrolla, cómo debe medirse, cómo debe expresarse y cómo varía a lo largo de los refuerzos, así como la manera de considerarla en el diseño, serán tratadas en otro capítulo de este trabajo.





En la mayoría de los proyectos actuales se usan tiras corrugadas. Fig II.3.1, en vez de tiras lisas. Las corrugaciones son las responsables de que se genere un coeficiente aparente de fricción,  $f'$ , apreciablemente mayor que el que puede obtenerse con tiras lisas. Se puede esperar que enfrente de cada corrugación se formen pequeñas zonas de falla por empuje pasivo que se agregan a la fricción por deslizamiento desarrollada entre el suelo y las superficies lisas de los refuerzos. Otros factores que se muestran claramente en dicha figura son los efectos importantes que acarrea la compacidad del relleno y el empuje por sobrecarga sobre el coeficiente de fricción aparente.

Se ha medido la fricción suelo-refuerzo bajo distintas condiciones de prueba, según se muestra en la Fig II.3.2. Se han efectuado pruebas de extracción tanto en modelos como en muros a escala natural. También se han hecho algunas pruebas de extracción en muros a escala sometidos a una carga sísmica simulada.



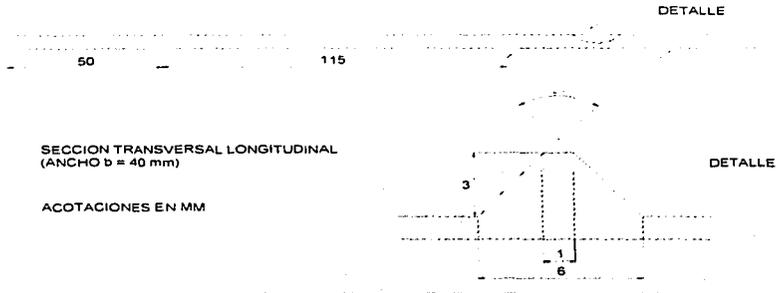
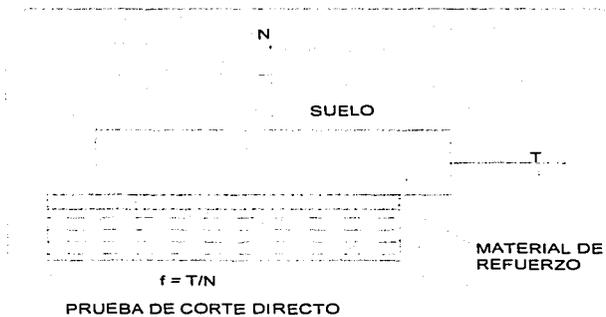


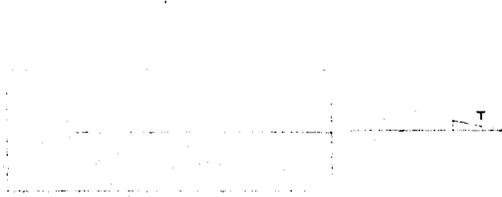
Figura II.3.1 tiras corrugadas



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



N

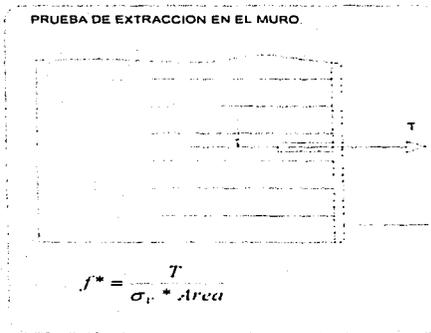


$$f' = T/N$$

PRUEBA DE EXTRACCION EN APARATO DE CORTE DIRECTO

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

PRUEBA DE EXTRACCION EN EL MURO



$$f' = \frac{T}{\sigma_v \cdot Area}$$



M

PRUEBA DE EXTRACCION POR  
 ROTACION.

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

Fig. 11.3.2 Condiciones de Prueba

Aunque la prueba de extracción generalmente se considera como la más adecuada, la distribución de esfuerzos a lo largo de los refuerzos no reduce exactamente la que ocurre en el muro real, como puede verse en la Fig. 11.3.3

CASO	PRUEBA IDEAL DE EXTRACCION	REFUERZO IDEAL	MURO DE CONTENCION A BASE DE TIERRA ARMADA
RESISTENCIA AL CORTANTE	$T_1$	$T_2$	$T_3$
TENSION EN EL ANCLAJE	$S_1$	$S_2$	$S_3$
$M \pm T$	$T_1$	$0.5 T_1$	$T_1$
$F$	$T_1$	$0$	$2/3 T_1$
$N$	$N_1$	$0$	$N_1$



$F_t$  = Fuerza de anclaje en el paramento del muro  
 $\delta$  = Angulo equivalente de fricción lateral  
(Calculada a partir de  $F_t$ )

Figura II.3.3. distribución ideal hipotética de esfuerzos cortantes a lo largo de la tira de refuerzo

Ha habido mucha polémica acerca del posible uso de los suelos cohesivos como material de relleno para tierra armada. Esto generalmente se considera indeseable para estructuras permanentes debido a lo siguiente:

- La resistencia a la fricción de suelos cohesivos, cuando menos bajo condiciones no drenadas que son las indicadas para analizar las condiciones inmediatamente después de la construcción es baja.
- Los rellenos de suelo cohesivo puede esperarse que tengan un drenaje deficiente y que sea susceptibles a perder resistencia al humedecerse.
- También son propensos a tener deformaciones apreciables por flujo plástico al estar sujetos a esfuerzos permanentes
- Por lo tanto, es de esperarse que en estructuras de tierra armada con rellenos cohesivos se presenten deformaciones continuas.
- Por ultimo, los suelos de grano fino son más difíciles de compactar.

#### II. 4. EL PRINCIPIO DE LA TIERRA ARMADA

La fricción generada entre el suelo y los elementos de refuerzo es el fenómeno fundamental de la tierra armada. las fuerzas de tensión desarrolladas dentro de la masa se transmiten a los refuerzos por medio de la fricción producida en las interfases (Fig II.4.1) Los refuerzos son puestos a trabajar por las fuerzas de tensión y la masa en conjunto se comporta como si tuviera a lo largo de la dirección de los refuerzos una cohesión proporcional a la resistencia a la tensión de dichos refuerzos.

Todas las mediciones efectuadas en modelos a escala reducida o en prototipos de tierra armada han demostrado que para un cierto refuerzo la fuerza de tensión varia de un extremo al otro del mismo (Fig. II.4.1). En el extremo libre del refuerzo esta fuerza de tensión es obviamente cero, mientras que en el punto de fijación del refuerzo al tablero exterior, dicha fuerza depende sobre todo de la cantidad de refuerzos por unidad de longitud. Por tanto, si los refuerzos estuviesen muy cercanos entre si, la tensión en los tableros seria cero y los elementos exteriores no serian

TESIS CON  
FALTA DE ORIGEN



necesarios; por otra parte, si los refuerzos están muy separados, las fuerzas de tensión en el punto de fijación pueden resultar muy importantes. Esto muestra que los elementos básicos son el suelo y los refuerzos, mientras que el acabado exterior es de menor importancia. El equilibrio local del refuerzo indica que la variación de la fuerza de tensión induce esfuerzos cortantes en ambos lados del refuerzo y dentro del mismo suelo en la vecindad del refuerzo.

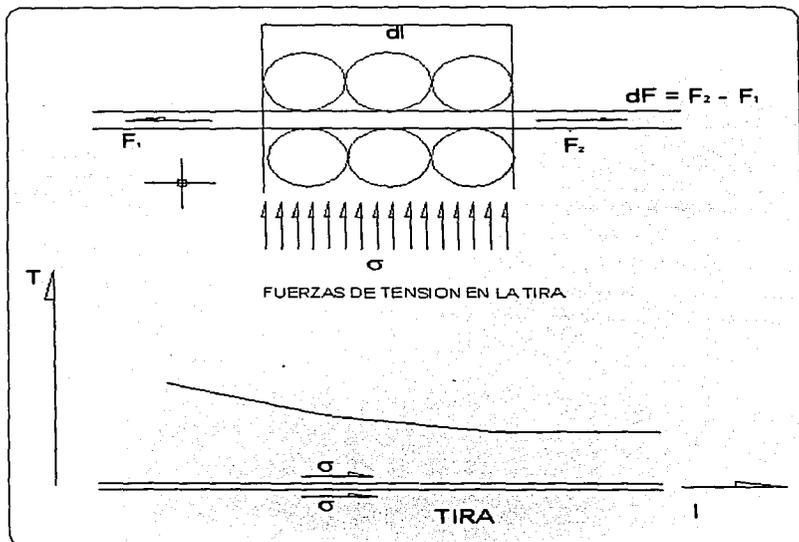


Figura II.4.1 Variación de las fuerzas de tensión en el refuerzo y de los esfuerzos cortantes aplicados al esfuerzo

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Este esfuerzo cortante se puede expresar como sigue, suponiendo que es igual en ambos lados del refuerzo:

$$T = \frac{1}{2b} * \frac{dT}{dt}$$

Donde:

$T$  = Fuerza de tensión en el punto considerado del refuerzo

$t$  = Abcisa del punto en cuestión

$b$  = Anchura del refuerzo.

La movilización del esfuerzo cortante  $\delta$  implica un desplazamiento relativo del refuerzo con respecto al suelo; esto demuestra que la deformabilidad del refuerzo juega un papel importante en la distribución de las fuerzas de tensión a lo largo del refuerzo. La relación fundamental entre esfuerzos y deformaciones en la interfase suelo-refuerzos ha sido objeto de diferentes estudios. Una primera aproximación se puede obtener con una prueba de corte simple entre el suelo y el refuerzo realizado con un aparato de corte directo.

Por otro lado, el esfuerzo cortante  $\tau$  está relacionado con el esfuerzo normal  $\delta$  aplicado al refuerzo a través del valor del coeficiente de fricción entre suelo y refuerzo, el cual por su parte depende de muchos factores como se observa en la siguiente desigualdad:

$$\frac{\tau}{\sigma} \leq f(\sigma, D_r, \rho)$$

Donde:

$D_r$  = Compacidad relativa del suelo

$\rho$  = Coeficiente que caracteriza el grado de rugosidad de la superficie del refuerzo.

Se debe observar que no es posible suponer que los esfuerzos cortantes en ambos lados del refuerzo sean iguales, a menos que exista simetría en la geometría de la masa y en las cargas aplicadas al plano del refuerzo (Figura II. 4. 2). Las pruebas realizadas con modelos fotoelásticos de muros de tierra armada, han demostrado que este caso los esfuerzos cortantes actuando en ambos lados no son iguales.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
"ARAGÓN"



a) SIMETRICO ESPECIMEN DE TIERRA  
ARMADA SOMETIDA A COMPRESION

b) ASIMETRICO: MURO DE TIERRA ARMADA CON  
FUERZAS DE GRAVEDAD.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



### TIRAS DE REFUERZO

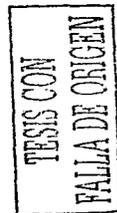


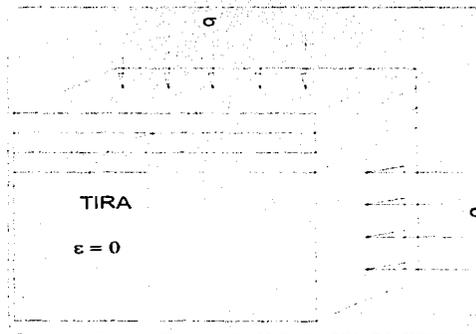
Figura 11.4.2 Esfuerzos cortantes transmitidos por el suelo en las dos caras del refuerzo

El principio de operación de la tierra armada es lograr que una masa granular que no puede soportar fuerzas de tensión forme un medio coherente debido a la flexibilidad de los refuerzos que si pueden trabajar a tensión. Los estudios teóricos basados en el método del elemento finito y los



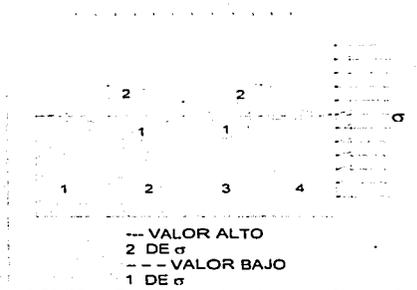
experimentos con estructuras reales, han mostrado la forma en que la cohesión se genera localmente y en toda la masa. Un caso elemental correspondería al comportamiento de una muestra de arena reforzada ensayada en una prueba de corte bajo condiciones de deformación plana.

Del estudio de la distribución de las fuerzas de tensión en los refuerzos con el método del elemento finito (Figura II.4.3) se desprenden los siguientes resultados:



a) Especimen de tierra armada en condición biaxial (deformación plana)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

b) distribución de fuerzas según el método del elemento finito

Figura II.4.3 fuerzas de tensión en los refuerzos de un espécimen de arena reforzada en condición biaxial

a) para valores bajos de los refuerzos verticales  $a_1$ , todas las curvas de las fuerzas de tensión presentan un eje máximo en el eje del espécimen. La dirección del refuerzo cortante (actuando sobre el refuerzo) permite separar la muestra de dos mitades simétricas que están conectadas por los refuerzos

b) para valores altos del esfuerzo axial  $a_1$ , las curvas de las fuerzas de tensión muestran dos puntos máximos y un mínimo en el eje de la muestra.

De ahí resulta posible dividir el refuerzo en cuatro zonas según sea la dirección de los esfuerzos cortantes.

La existencia de zonas interconectadas por los refuerzos constituye un aspecto fundamental de la tierra armada. En realidad permite entender la naturaleza de la cohesión que se genera en el material. Una de las principales características de una masa de tierra armada es que la frontera entre las dos zonas es esencialmente cambiante con la geometría de la masa, las cargas aplicadas, las características del material de relleno, la fricción suelo-refuerzo, etc. Esta frontera representa ya sea el lugar geométrico de los valores mínimos de las fuerzas de tensión o el de sus valores máximos. En



este último caso constituye una superficie potencial de falla de los refuerzos dentro de la masa de tierra armada.

## II. 5. PRUEBAS EN MODELOS A ESCALA REDUCIDA

Las primeras investigaciones sobre tierra armada se efectuaron con modelos de muros a escala reducida. Se debe mencionar que el Ing. Vidal realizó muchas pruebas entre 1961 y 1963 con modelos a escala reducida en los cuales los tableros exteriores y los refuerzos se hacían a base de papel, por lo que dichas pruebas sólo podían proporcionar resultados cualitativos.

Posteriormente se desarrollaron dos tipos de modelos:

- 1) Modelos en los que las tiras de refuerzo tenían una resistencia a la tensión uniforme y constante y en los cuales los muros se construían o se cargaban hasta alcanzar la falla. Estos modelos no implicaban ninguna instrumentación especial para las mediciones y eran sencillos. Los primeros ensayos fueron con modelos bidimensionales usando cilindros de acero para simular la tierra y se realizaron en el Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, en París. Después se emplearon modelos tridimensionales en Lyon.
- 2) Modelos con las mismas características que los anteriores aunque con algunas de las tiras de refuerzo instrumentadas con "strain gages". Estos modelos fueron tridimensionales. Los primeros modelos de este tipo fueron ensayados por Adams, Lee y Vagneron en la Universidad de California en Los Ángeles.

Los modelos a escala reducida tienen dos ventajas sobre los experimentos a escala natural:

- a) Las pruebas en modelos permiten estudiar el comportamiento de la estructura en la falla, lo cual resulta generalmente imposible en las estructuras reales.
- b) Los modelos a escala son rápidos y baratos en comparación con las pruebas al tamaño natural; esto permite estudiar fácilmente la influencia de los diversos parámetros involucrados.

Por el contrario, y esto es un inconveniente de este tipo de pruebas, no se conocen las leyes de similitud de los suelos y por tanto, resulta difícil extrapolar los resultados cuantitativos de las

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



pruebas en modelos a las estructuras reales. Resulta de interés mencionar a continuación las leyes de similitud que existen entre el modelo y la estructura real descritas por Mandel.

Las condiciones de similitud del modelo deben de hecho satisfacer primero las ecuaciones generales de equilibrio de la mecánica de medios continuos y en segundo lugar las relaciones esfuerzo-deformación del material. Esto da lugar a las siguientes relaciones aplicables a un material elasto-plástico

<p>Equilibrio local</p> $\sum \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i = 0$	$\sigma^* = \rho^* \cdot g^* \cdot l^*$
<p>Ley de Hooke (elasticidad)</p> $\sigma_{n,t} = K \cdot E_{n,t}$ $\tau_{t,n,t} = G \gamma_{t,n,t}$	$\sigma^* = E^* \cdot \epsilon^* \quad (E^* = 1)$ $\nu = 1$ $\nu^* = 1$
<p>Plasticidad. Principio del máximo trabajo plástico.</p>	<p>a) Las curvas intrínsecas deben ser simétricas con respecto al origen en función de la relación <math>\sigma^*</math>.</p> <p>b) <math>u_p^* = 1</math> donde <math>u_p</math> es la relación entre las deformaciones plásticas lateral y axial de una prueba triaxial.</p>

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

La notación es la siguiente:

$$\sigma^* = \frac{\sigma_{\text{mod.ctr.}}}{\sigma_{\text{real}}}; \quad \rho^* = \frac{\rho_{\text{mod.ctr.}}}{\rho_{\text{real}}}; \quad g^* = \frac{g_{\text{mod.ctr.}}}{g_{\text{real}}}$$

Donde los símbolos con asterisco representan las relaciones entre el modelo y la estructura real de las distintas variables indicadas.

En un modelo de un muro de tierra armada se deben cumplir estas relaciones para: el suelo dentro del terraplén (considerado como elasto-plástico), los refuerzos y el contacto suelo-refuerzo



(supuestamente elastoplástico) De hecho, dichas ecuaciones prácticamente nunca se satisfacen, lo cual demuestra la dificultad y las limitaciones presentes en las extrapolaciones cuantitativas de resultados obtenidos a partir de modelos a escala reducida.

En los modelos bidimensionales ensayados en el laboratorio, el material de relleno estaba formado por cilindros de acero de 30 mm colocados uno sobre el otro en una disposición paralela. Las características mecánicas de este material son bastante distintas de las correspondientes a una arena real, ya que  $\gamma = 62 \text{ kN/m}^3$  y  $\phi = 27^\circ$

Los refuerzos están formados por tiras cortadas de lámina de aluminio de 9  $\mu$  de espesor, teniendo una resistencia a la tensión de 160 g. El paramento exterior lo constituyen elementos de plástico de 25 mm de altura.

La construcción del modelo de un muro de tierra armada se lleva a cabo de tal manera que reproduzca lo mejor posible el procedimiento constructivo de las estructuras reales.

En la Fig II.5.1 se muestra el modelo antes descrito y los primeros resultados experimentales. Resultan evidentes dos modelos de falla:

- Falla por rotura de los refuerzos
- Falla por falta de adherencia debida a longitud insuficiente de los refuerzos.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

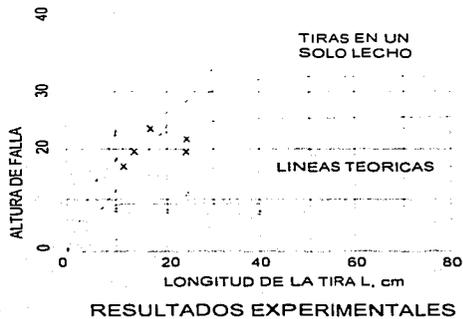


Figura II.5.1 Primeras pruebas con modelos bidimensionales a escala reducida.

Se puede establecer que la falla será por falta de adherencia cuando  $H_1 < L$ , aunque este resultado es exclusivo de los modelos bidimensionales y no corresponde a todas las estructuras reales.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Con estos modelos bidimensionales se puede apreciar la influencia cuantitativa de todos los factores que gobiernan el comportamiento de un muro de tierra armada (longitud de los refuerzos, su resistencia a la tensión, su espaciamiento, etc.) en lo referente a la altura crítica  $H_c$ . De los resultados mostrados en la Figura 11.5.2 se puede deducir la siguiente expresión sencilla:

$$H_{max} = H_0 + \frac{R_f}{K * \gamma * \Delta H}$$

Donde:

$H_{max}$  = Altura crítica del muro en la falla

$H_0$  = Altura del muro sin ningún refuerzo, debida a la rigidez de los elementos de soporte exterior.

$\gamma$  = Peso volumétrico del suelo reforzado

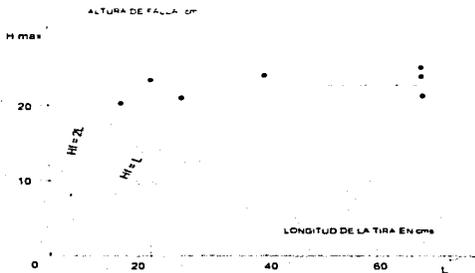
$\Delta H$  = Separación vertical entre dos tiras de refuerzo

$R_f$  = Resistencia a la tensión del refuerzo, por metro lineal

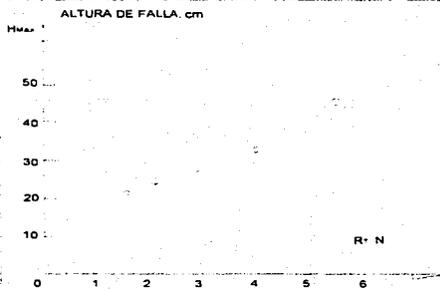
$K$  = Coeficiente que depende sobre todo del ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) el material de relleno.

Con estos primeros resultados se pudo entender mejor el comportamiento de la tierra armada. De hecho, suponiendo que  $K = K_a$  (coeficiente de empuje activo en la falla) los resultados teóricos no difieren mucho de los valores experimentales. De aquí se puede demostrar que el mecanismo de un muro de tierra armada induce un "empuje activo del suelo (el cual se encuentra en un estado de esfuerzos de Rankine) sobre el recubrimiento exterior y sobre el anclaje de las tiras de refuerzo al recubrimiento.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



a) INFLUENCIA DE LA LONGITUD DE LA TIRA, L



c) INFLUENCIA DE LA RESISTENCIA A LA TENSION DE LAS  
TIRAS

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



H max: ALTURA DE FALLA, cm

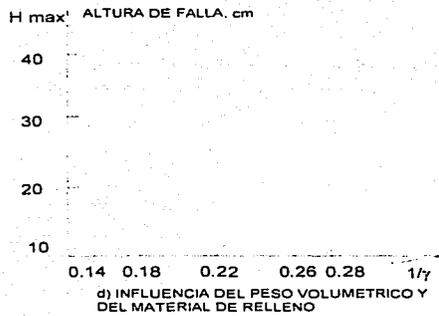
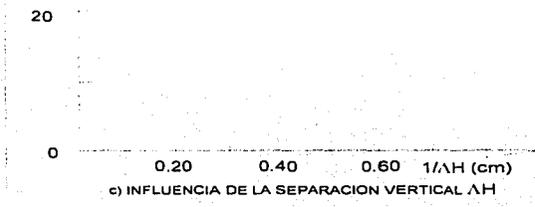


Figura II. 5.2 Influencia de ciertos factores de altura crítica en los modelos bidimensionales a escala reducida de muros de tierra armada



Sin embargo, los resultados de pruebas efectuadas por "Institut National des Sciences Appliquees" en Lyon con modelos tridimensionales mostraron una gran discrepancia entre el mecanismo antes descrito y el comportamiento real de la estructura. Los valores de la altura crítica del muro en la falla fueron el doble de los calculados con la teoría de Rankine.

La superficie de falla observada resultó notablemente más cerca del paramento exterior que el plano de falla correspondiente a la teoría de Coulomb.

De estas observaciones resulta evidente que el valor del coeficiente  $K$  (ecuación anterior) debe ser bastante menor que el valor de  $K_a$ . Este hecho es indicativo del efecto tan importante que tienen los esfuerzos cortantes (generados en las interfases entre el material de relleno y los refuerzos) sobre el estado de esfuerzos dentro del suelo y demuestra la complejidad del mecanismo de la tierra armada. Las pruebas efectuadas en la Universidad de California en los Ángeles con modelos tridimensionales mostraron resultados bastante diferentes y sirvieron para confirmar la teoría de Rankine y corroborar el comportamiento de muros de tierra armada. Los autores observaron planos de falla inclinados un ángulo de  $\pi/4 + \Phi/2$  con respecto a la horizontal y las alturas críticas resultaron muy cercanas a los valores calculados con la expresión:

$$H_{\max} = \frac{R_1}{K_a \cdot \gamma \cdot \Delta H}$$

Se hicieron mediciones con "strain gages" para poder determinar las fuerzas de tensión actuales en los refuerzos cerca del paramento exterior, suponiendo que dichas fuerzas serían máximas en los puntos de fijación. Se encontró que la teoría de Rankine se adapta bien al diseño de muros de tierra armada y que la superficie de deslizamiento corresponde al plano de falla de Coulomb. Sin embargo, en el Laboratorio Central se realizaron algunas pruebas con modelos tridimensionales que confirmaron los resultados obtenidos por Bacot y los experimentos a escala natural (Fig. II. 5. 3). Con ello surgió una seria divergencia entre Laboratorio Central y UCLA en cuanto a su enfoque sobre el comportamiento y diseño de un muro de tierra armada.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

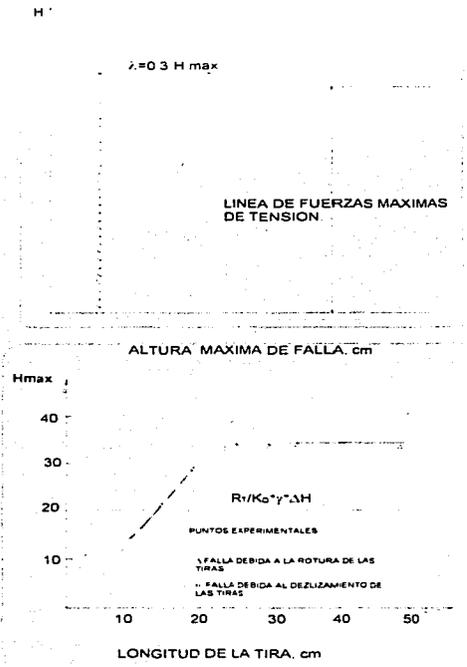


Figura II. 5.3 Resultados de pruebas realizadas en modelos tridimensionales a escala reducida.

Tal parece que la teoría de Rankine no puede describir el complejo mecanismo implícito en los muros de tierra armada y que la superficie de falla observada es muy diferente al plano de Rankine.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Pruebas realizadas por Bolton en Cambridge (Inglaterra) con modelos sometidos a centrifugadora confirmaron estas conclusiones

## II. 6 EXPERIMENTOS A ESCALA NATURAL

Las diferencias encontradas entre los resultados experimentales de pruebas efectuadas en modelos de laboratorio bidimensional y tridimensional y el desacuerdo entre los distintos investigadores dio como resultado la realización de pruebas a escala natural en estructuras reales

El primer experimento a escala natural fuera de Francia se llevó a cabo en California en un muro de tierra armada (carretera 38).

Estos experimentos contribuyeron eficazmente al mejor conocimiento del mecanismo de la tierra armada y a la comprensión del comportamiento de los muros reales.

En 1968, la medición de las fuerzas de tensión en los refuerzos del muro en Incarville mostró que dichas fuerzas no alcanzan un máximo en el revestimiento exterior sino más bien a cierta distancia hacia adentro del muro.

El experimento realizado en el muro de Dunkerque (el material de relleno era una arena uniforme) puso en evidencia la existencia de las zonas "activa" y "resistente" separadas por el lugar geométrico de las fuerzas máximas de tensión. En la zona "activa" los esfuerzos cortantes aplicados a los refuerzos están orientados hacia el exterior del muro mientras que en la zona "resistente" están orientados hacia el interior. El lugar geométrico de las fuerzas máximas de tensión es muy distinto al plano de falla de Coulomb. Su geometría se acerca más a una espiral logarítmica que pasa por el pie del muro formando un ángulo de  $\pi/4 + \Phi/2$  con la horizontal y es vertical en su intersección con la superficie libre superior del muro. En la fig II. 6. 1 se presentan algunas curvas de distribuciones típicas de las fuerzas de tensión en los refuerzos y el lugar geométrico de las fuerzas máximas de tensión en distintos muros. Para todos los muros experimentales se puede obtener una envolvente de las diferentes curvas dibujando la parte de la línea vertical localizada a una distancia de 0.3 H del paramento exterior, hasta una profundidad de 0.5 H, y continuando con la porción de la línea inclinada  $\pi/4 + \Phi/2$  con respecto al plano horizontal que pasa por el pie del muro. La definición exacta del lugar geométrico de las fuerzas máximas de tensión es muy importante, ya que gobierna el diseño de la longitud de los refuerzos. La ecuación



correspondiente implica que las fuerzas máximas de tensión deben equilibrarse con la suma de las fuerzas de fricción movilizadas a lo largo de la parte del refuerzo situada en la zona "resistente".

$$T_{\max} < \int_0^L 2h * n * \sigma_v(x) * f * dx$$

Donde.

$T_{\max}$  = Fuerza máxima de tensión en el refuerzo.

L = "Longitud de adherencia" definida como la parte del refuerzo localizada en la zona "resistente"

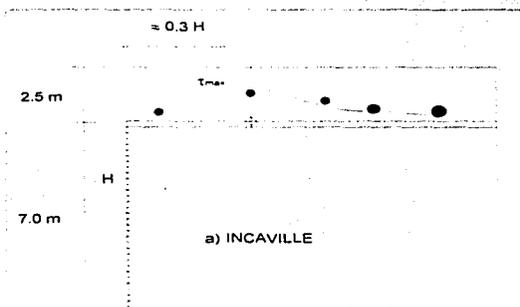
b = Anchura del refuerzo

n = Número de tiras de refuerzo por metro lineal al nivel considerado

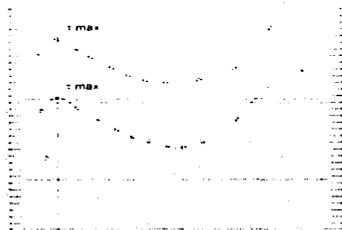
$\sigma_v(x)$  = Esfuerzo normal aplicado al refuerzo, generalmente tomado igual a la presión por sobrecarga y z

f = coeficiente de fricción suelo-refuerzo.

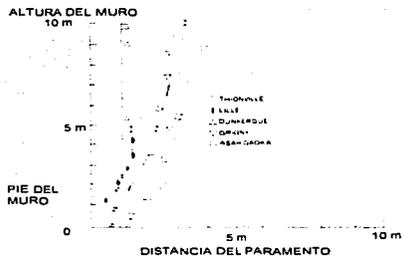
De aquí se desprende que la hipótesis propuesta por Lee la cual considera que el lugar geométrico de las fuerzas máximas de tensión coincide con el plano de falla de Coulomb es por tanto demasiado conservadora, ya que implica que la longitud de la parte del refuerzo situada dentro de la zona "activa" se localiza en la parte superior del muro (0.6 H) mientras que el valor experimental encontrado es de 0.3 H.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



b) DUNKERQUE



c) ENVOLVENTE DE FUERZAS  
MAXIMAS DE TENSION EN CINCO  
MUROS.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

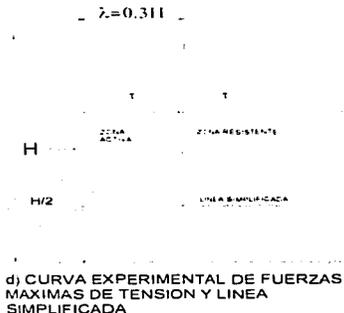


Figura II. 6.1 Implicaciones de los resultados experimentales de pruebas a escala natural en la distribución de las fuerzas de tensión sobre los refuerzos.

En 77, Juran formuló un nuevo método de diseño para muros de tierra armada y estribos de puentes, con motivo de una tesis preparada en el laboratorio central. Este método permite la determinación teórica del lugar geométrico de las fuerzas máximas de tensión, en la forma de una espiral logarítmica perpendicular a la superficie libre superior del muro. En la Fig. II. 6.2 se presentan las variaciones del ancho de la espiral en función del ángulo de fricción interna del material de relleno ( $\Phi$ ), de ahí se puede establecer que la anchura teórica de la zona activa así definida, es del orden de la mitad del valor correspondiente a la zona activa de Coulomb.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

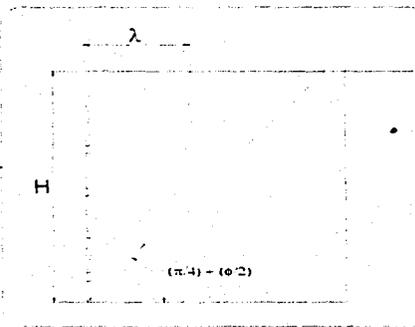
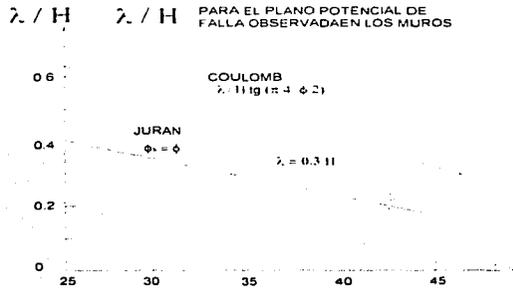


Fig. II. 6.2 Determinación teórica del lugar geométrico de las fuerzas máximas de tensión.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



A la fecha los métodos, adoptados para el diseño interno y para la determinación de las fuerzas máximas de tensión ( $\delta_{max}$ ) se basan en los resultados experimentales de pruebas a escala natural. En ellos se considera esencialmente el equilibrio de un elemento de suelo alrededor del refuerzo limitado en un extremo por el paramento exterior y en el otro por el lugar geométrico de las fuerzas máximas de tensión. La hipótesis adoptada para la formulación de estos métodos, y que ha sido verificada en modelos fotoelásticos, supone que los esfuerzos cortantes ( $\tau$ ) actuando en el plano horizontal ubicado a la mitad de la distancia entre dos tiras de refuerzo son nulos. De esta hipótesis se desprende la ecuación para obtener las fuerzas máximas de tensión en las tiras de refuerzo ( $\delta_{max}$ ):

$$\delta_{max} = k \cdot \sigma_v \cdot \Delta H$$

Donde:

$\sigma_v$  = Esfuerzo normal calculado con la distribución Meyerhof (considerando los momentos de todas las fuerzas actuando en la porción del muro localizada arriba del refuerzo en cuestión)

K = Coeficiente obtenido a partir de ensayos a escala natural, de acuerdo con las siguientes expresiones (Fig. II.6.3):

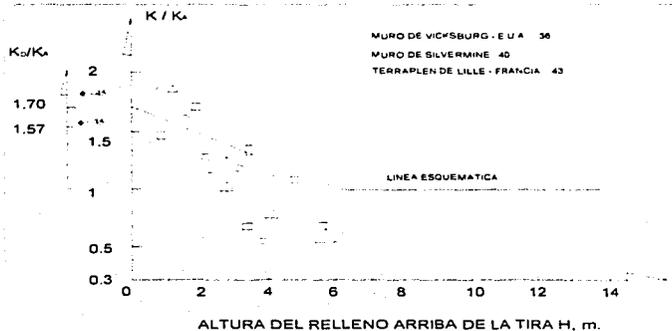


Figura. II.6.3 Valores experimentales del coeficiente K

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



## II. 7 ASPECTOS NECESARIOS PARA PROYECTAR UN MURO DE TIERRA ARMADA

Para la realización de los proyectos de tierra armada necesariamente se deberán tener en cuenta los siguientes puntos:

- Estratigrafía de la zona

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

El subsuelo donde se ubicará la obra de tierra armada deberá definirse como un suelo de la zona de:

- ✓ Lomas
- ✓ Transición
- ✓ Lago

Definiendo si se trata de roca (tipo) o si se van presentando en forma gradual estratos de limos arenosos o de arcillas comprensibles.

Indicar las longitudes que se apoyarán en cada tipo de suelo si se tratara de un suelo en la zona de transición.

Indicar las longitudes de los estratos y la del estrato resistente, así como la capacidad de carga del estrato resistente obtenida de las pruebas de laboratorio.

- Para el uso de la tierra armada bajo condiciones de zona de lago y en general de todas las zonas se deberán efectuar por lo menos tres tipos de análisis:
  - a) La estabilidad a largo plazo del talud del macizo que soportará la rampa de tierra armada.
  - b) Los asentamientos a largo plazo que se generarán por la presencia de los estratos arcillosos blandos del subsuelo.



- c) La capacidad de carga del subsuelo de apoyo bajo la acción de la carga del terraplén.

El análisis de la estabilidad del talud se realizara considerando varias secciones transversales utilizando en los suelos algún método que se crea conveniente para el tipo de suelo que se trata. Obteniendo un factor de seguridad para la sección mas critica.

Por otra parte el análisis de asentamientos se efectuara basado en la teoría de consolidación considerando la compresibilidad propia de los estratos críticos, obteniéndose un asentamiento máximo.

El análisis de la capacidad de carga del terraplén se lleva a cabo empleando la teoría de capacidad de carga de Terzaghi y considerando que la capa mas resistente produce un efecto de distribución de la carga.

Para decidir sobre el uso de la tierra armada no deberán pasarse por alto los análisis de estabilidad del subsuelo de apoyo; ya que la capacidad de carga gobierna el comportamiento de las rampas.

El uso de la tierra armada en la zona del Lago de y en general en Zonas muy compresibles debe revisarse cuidadosamente, debido a los asentamientos que pueden presentarse sobre todo cuando debe existir continuidad con otro tipo de estructuras más rígidas. Desde luego esta recomendación también es valida para terraplenes y rampas de tierra no armada.

El uso de la tierra armada reduce el tiempo de construcción del estribo en comparación con el tiempo de ejecución para la solución tradicional de muros y rellenos en un 30% en promedio.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
"ARAGÓN"



### III. COMPORTAMIENTO Y PROPIEDADES DE LA TIERRA ARMADA

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



### III. 1 COMPORTAMIENTO Y PROPIEDADES DE LA TIERRA ARMADA

Considerando que la tierra armada es en sí un material que posee características propias, y no únicamente un sistema de anclaje, el Laboratorio central llevó a cabo una serie de pruebas triaxiales con especímenes de arena reforzada con placas delgadas de aluminio. Estas pruebas permitieron la determinación de los efectos que los distintos factores (compacidad de la arena, separación entre placas, resistencia a la tensión de las placas) ejercen sobre las propiedades de un volumen reducido de tierra armada.

Los especímenes se reforzaron siguiendo una distribución bidimensional, la cual difiere de la tecnología empleada en estructuras de tierra armada donde los refuerzos están formados por tiras metálicas angostas. Esta diferencia no importa en lo referente a la rotura de los refuerzos, pero resulta significativa para la condición de deslizamiento de los refuerzos.

Siguiendo este principio, varios investigadores realizaron experimentos similares (Bacot y Lareal, Yang y Singh, Romstadetal y Asuman).

El resultado fundamental fue que la presencia de los refuerzos mejora notablemente las propiedades mecánicas de la arena. En el momento de la falla (causada por la rotura de los refuerzos), la muestra se comporta como si la arena tuviera cierta cohesión, proporcional a la cantidad de refuerzos y a la resistencia a la tensión de estos últimos conforme a la siguiente expresión:

$$C = \frac{Kp}{2} * \frac{Rt}{\Delta H}$$

Donde:

Rt = Resistencia a la tensión del refuerzo, por metro lineal

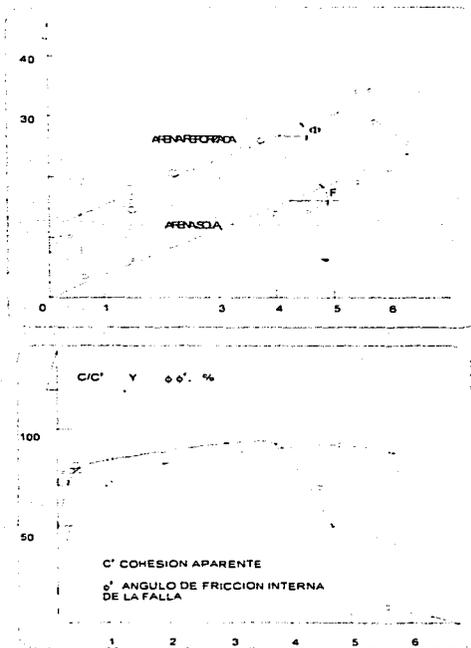
$\Delta H$  = Separación vertical entre dos refuerzos adyacentes.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Además, se pudo establecer que al romperse los refuerzos la resistencia al esfuerzo cortante de la arena se movilizaba totalmente, aunque antes de que ocurriera la falla la resistencia a la tensión del refuerzo se movilizaba mucho más que la resistencia al corte de la arena, y el estado de esfuerzos dentro de la arena se acercaba más al estado 'de reposo'. En la Fig. III. 1.1b se presenta la movilización progresiva del ángulo de fricción ( $\Phi$ ) y de la cohesión (c) en función de la deformación, lo cual constituye uno de los aspectos fundamentales de la tierra armada. Se puede



observar que para el caso de la arena reforzada la movilización del ángulo de fricción interna ( $\Phi$ ) no ocurre como resultado de la deformación lateral del espécimen sino más bien de la movilización de los esfuerzos cortantes en las interfaces suelo-refuerzo que originan el estado de falla. Conforme a lo establecido por distintos investigadores, la movilización de los esfuerzos cortantes en las interfaces da lugar a un aumento en la presión confinante dentro de la capa de arena y de ahí que la presencia de los refuerzos dentro de la muestra de arena contribuya a su resistencia



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Fig. III. 1.1 Comportamiento de la arena reforzada, en pruebas triaxiales



Otros estudios basados ya sea en el método del elemento finito o en mediciones de las fuerzas de tensión en las placas de refuerzo, han demostrado que los refuerzos generan interconexiones entre las distintas zonas dentro de la muestra. En un trabajo preparado por Madani en el Laboratorio Central, confirmó experimentalmente (Fig III.1.2) que las fuerzas máximas en las placas de refuerzo se localizan dentro de un círculo de radio igual a  $2/3$  del radio del disco. Estos resultados concuerdan con los de Schlosser y Long quienes observaron que el inicio de la falla en los discos tiene lugar en un círculo con el mismo radio anterior y propusieron la hipótesis de que la respuesta de una muestra de arena reforzada sometida a compresión triaxial está caracterizada por la movilización de una cohesión aparente como resultado de las interconexiones creadas por los refuerzos entre las dos zonas características del espécimen.

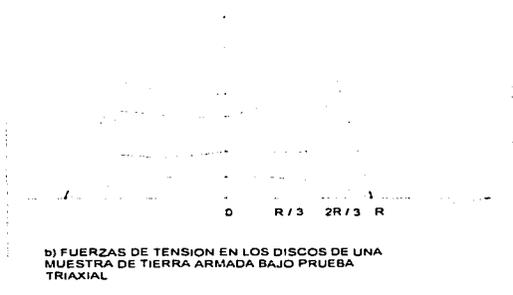


TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

a) APARICION DE FISURAS EN LOS DISCOS DE UNA MUESTRA DE TIERRA ARMADA EN PRUEBA TRIAXIAL.



ESFUERZO RADIAL



b) FUERZAS DE TENSION EN LOS DISCOS DE UNA MUESTRA DE TIERRA ARMADA BAJO PRUEBA TRIAXIAL

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Fig. III.1.2 esfuerzos de tensión en los refuerzos de una muestra de arena armada.

### III.2 FRICCIÓN EN LA TIERRA ARMADA

El principio de la tierra armada estriba en la fricción generada en las interfases suelo-refuerzo. Esta fricción es un fenómeno complejo sobre todo en el caso de estructuras reales donde los refuerzos están formados por elementos lineales.

Para determinar el coeficiente de fricción suelo-refuerzo, se han desarrollado varios tipos de ensayos:

- 1) Pruebas en el aparato de corte directo usando el suelo y el metal de los refuerzos.
- 2) Pruebas de resistencia a la extracción con refuerzos colocados ya sea dentro de un terraplén ó dentro de un muro de tierra armada.

Durante los primeros años en que se construyeron estructuras de tierra armada, se recomendaba usar únicamente materiales granulares (arenas limpias y gravas). Esta limitación se modificó y las primeras especificaciones establecían como máximo un 15 por ciento en peso de material menor de 80  $\mu$ . De acuerdo a los estudios realizados en el Laboratorio Central parece ser que el diámetro



de los granos que separan los suelos "friccionantes" de los suelos puramente cohesivos esta comprendido entre 10 y 20  $\mu$ . Por tanto, las nuevas especificaciones establecen que el porcentaje de partículas con diámetros menores de 15  $\mu$  en el material de relleno, no debe exceder de 15 por ciento en peso.

De los resultados de pruebas de extracción con refuerzos colocados dentro de los terrapienes, se pudo definir un coeficiente de fricción aparente:

$$f^* = \frac{\tau}{\gamma^* h}$$

Este coeficiente no toma en cuenta el valor real del esfuerzo normal actuando sobre el refuerzo, sino más bien el valor medio de la presión por sobrecarga  $\gamma h$ .

Para un suelo "friccionante" el coeficiente  $f^*$  puede llegar a ser más importante que el propio valor del coeficiente real de fricción  $f$  medido por ejemplo en un aparato de corte directo.

Se demuestra que los factores principales que afectan los valores de  $f^*$  para suelos "friccionantes" son (Fig III.2.1):

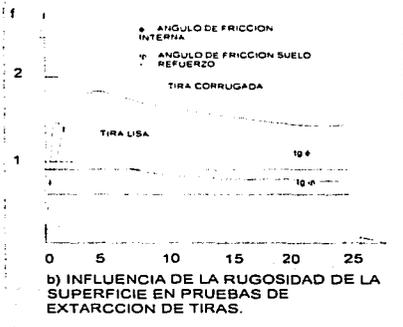
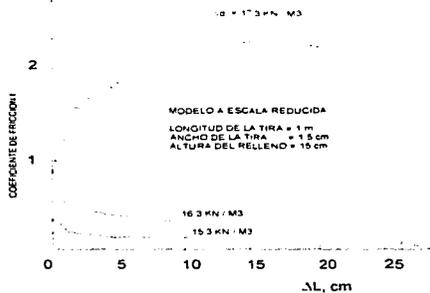
- 1) La compacidad del terraplén
- 2) La rugosidad de la superficie de los refuerzos.
- 3) La presión normal del suelo transmitida a los refuerzos.

Estos resultados hicieron evidente el fenómeno de dilatación dentro del medio granular. Los esfuerzos cortantes generados a lo largo del refuerzo dan lugar a un incremento del esfuerzo normal  $\sigma_v$ . Por tanto, el valor de  $f^*$  resulta mucho más importante que el coeficiente  $f$ .

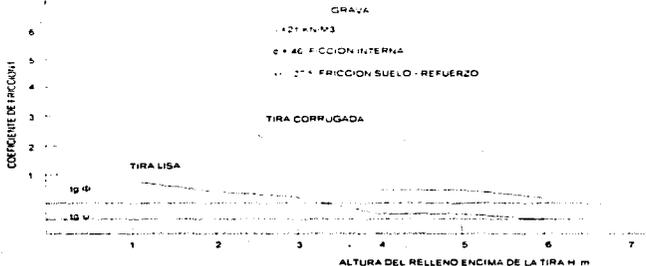
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
"ARAGÓN"



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



c) INFLUENCIA DE LA PRESION POR SOBRE CARGA EN PRUEBA DE EXTRACION DE TIRAS.

Figura III.2.1 Factores que afectan el valor del coeficiente de fricción aparente.

### III. 3 VENTAJAS DE LA TIERRA ARMADA EN DIVERSAS OBRAS

#### III.3.1 CARRETERAS Y AUTOPISTAS DE MONTAÑA

Las fuertes pendientes de las laderas, así como los problemas de expropiación, aconsejan la construcción de muros de contención en posiciones difíciles, así como en zonas montañosas la optimización de un trazado de carretera o de autopista está condicionada frecuentemente por el volumen de terraplenado y la estabilidad de los taludes.

Un trazado que se desarrolla en la ladera de una montaña siguiendo las curvas de nivel es por lo general de perfil mixto. Por un lado se tiene el problema de la inestabilidad de los taludes de desmonte y por otro, la limitación de los taludes de terraplén sobre terreno natural en pendiente, a menudo, al límite de la estabilidad.

En este caso, la tierra armada es por lo general una solución rentable, tanto en el aspecto técnico como en el financiero. Además, la construcción de las estructuras en tierra armada se integra a los trabajos del terraplenado lo que facilita la ejecución de la obra.



Cuando la topografía es muy accidentada (pendientes de laderas muy acusadas) una solución interesante consiste en desdoblarse las calzadas de la autopista.

En la sección tipo se puede apreciar esta solución en una Autopista.

Esta disposición permite limitar las excavaciones; y los macizos de tierra armada se adaptan bien a esta solución teniendo en cuenta su posibilidad de cimentación sobre terraplenes artificiales.

La tierra armada es hoy la única solución para la realización de muros de gran altura por la facilidad de montaje el interés económico que supone.

En trazados de montaña se producen zonas de inestabilidad de laderas que se acentúan a veces por la realización de grandes desmontes. La solución adoptada ha sido la construcción de unos contrafuertes de hormigón, apoyados en roca, y arriostrados en cabeza por un dintel, que evitan el deslizamiento del coluvial. Encima se sitúa un muro de tierra armada, de gran altura (15 m. sobre el dintel, y 21 m. sobre el T.N.) que contiene el terraplén de la autopista.

Para impedir los efectos sobre el paramento de los asentamientos diferenciales se ha intercalado una junta vertical entre la zona rígida apoyada sobre la viga y la zona de muro cimentado directamente sobre el terreno natural.

Cuando una carretera de montaña tiene que cruzar una vaguada es interesante muchas veces limitar el derrame del terraplén con el fin de evitar expropiaciones, limitando también la longitud de la obra hidráulica que debe permitir eliminar los caudales de la vaguada.

Como hemos señalado anteriormente se pueden producir en laderas escarpadas algunas inestabilidades locales.

### III.3.2 CARRETERAS Y AUTOPISTAS URBANAS

En las zonas urbanas donde se tienen que construir grandes obras de infraestructura como cinturones periféricos o nuevas avenidas, el costo elevado del terreno y la densidad de la construcción obligan normalmente a limitar los derrames de los terraplenes.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



El empleo de macizos de tierra armada, para solucionar este tipo de problema, aporta una solución elegante debido fundamentalmente a los argumentos siguientes:

- a) Facilidad de cimentación sobre cualquier tipo de terreno (eliminación de cimentaciones profundas siempre costosas y de realización delicada en zonas urbanas).
- b) Rapidez y comodidad de ejecución en espacios reducidos (se trabaja siempre por el interior de los macizos de tierra armada sin andamios y encofrados exteriores).
- c) Estética de los paramentos prefabricados de las escamas de concreto que puedan adaptarse a una decoración arquitectónica.

### III.3.3 CARRETERAS LITORALES Y MUROS INUNDABLES

La tierra armada se comporta perfectamente bien en la construcción de macizos (muros o estribos) que pueden ser inundados. Es el caso de las carreteras litorales o de las carreteras que bordean o cruzan un río las únicas precauciones que conviene tomar en este tipo de obras son las siguientes:

- a) Buen conocimiento de las cotas de máximas avenidas con el fin de tener en cuenta el peso del relleno saturado en caso de crecida.
- b) Tratamiento especial de las juntas entre escamas con empleo de productos filtrantes, con el fin de asegurar una buena permeabilidad del paramento y evitar así un desnivel hidrostático importante entre el interior y el exterior del macizo, sobre todo durante la bajada de la crecida.
- c) Asegurar una buena protección del pie del macizo (rastrillo de concreto, escollera o tetrápodos) con el fin de evitar un sifonamiento sólido por debajo de las escamas y protegerle de una posible erosión.

Muchas veces es aconsejable intercalar un filtro no-tejido entre la base del volumen armado y el apoyo del macizo.

- d) Dimensionar correctamente las armaduras para tener en cuenta una eventual corrosión en función del tipo de agua en contacto con el macizo.
- e) Seleccionar dentro de las normas tierra armada un buen material de relleno con el fin de obtener una buena drenabilidad del macizo.



Los principales criterios para la elección de la tierra armada en la construcción de este tipo de obra han sido:

Flexibilidad del macizo de tierra armada que se puede adaptar a las deformaciones y asentos del terraplén. Suponiendo que la costa está constituida por fondos inestables de rocas sueltas que son movidas por las corrientes litorales y el oleaje.

En la sección tipo se puede apreciar las disposiciones constructivas que se han detallado anteriormente.

Cada vez que sea posible es interesante apoyar el macizo tierra armada sobre una escollera lo que permite ejecutar el montaje del macizo en seco.

#### III.3.4 ESTRIBOS DE PUNTES

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

La técnica de tierra armada se adapta perfectamente a las realizaciones de estribos de puentes y viaductos. Las principales ventajas que se derivan del empleo de tierra armada en este tipo de estructuras son las siguientes:

- a) Adaptación a cualquier tipo de suelo de cimentación difícil y supresión de las costosas cimentaciones profundas
- b) Excelente comportamiento de estas estructuras frente a asentos importantes debido a la flexibilidad de la tierra armada
- c) Supresión del clásico escalón de entrada y salida del puente debido al asiento diferencial entre el estribo rígido y el terraplén de acceso flexible

En efecto, como el estribo tierra armada se construye al mismo tiempo que la rampa de acceso, tiene exactamente el mismo comportamiento geotécnico que el terraplén y por lo tanto se elimina por



completo cualquier asentamiento diferencial

Prueba de ello es que en los proyectos de tierra armada se suprime la tradicional losa de transición.

En la sección tipo se puede apreciar cómo el peso del tablero (vigas prefabricadas o losa de concreto in situ) se apoya en cabeza del macizo de tierra armada mediante un cargadero que permite transformar cargas puntuales en una carga uniformemente repartida. Como se busca siempre de una solución económica el empleo de la tierra armada en las soluciones mixtas es siempre ventajosa.

En las grandes obras de autopista es necesario la construcción de numerosos pasos bajo autopista para el establecimiento de comunicaciones, cruces de ferrocarril, etc.

La construcción de los estribos en tierra armada permite una integración total al movimiento de tierra armada, lo que mejora considerablemente su planificación.

### III.3.5 FERROCARRIL

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Las grandes sociedades nacionales ferroviarias en todo el mundo se han interesado por la tierra armada esencialmente por su excelente comportamiento ante las vibraciones y a las fuertes cargas.

Por otra parte las obras a realizar en la proximidad de instalaciones ferroviarias requieren siempre unas grandes medidas de seguridad.

La realización de estas obras en tierra armada permiten la eliminación de encofrados y andamios exteriores a la alineación de los paramentos al límite de los gálibos de seguridad.

Por otro lado la gran rapidez de ejecución disminuye los plazos y por tanto permite reducir las disminuciones de velocidad de trenes muchas veces necesarias en este tipo de obras.



Para un desdoblamiento de vía, se realizan los estribos de un puente sobre el río. La solución tierra armada ha sido adoptada por su rapidez de ejecución y su excelente comportamiento frente a una cimentación delicada.

### III.3.6 MERLONES DE PROTECCIÓN Y CUBETOS DE RETENCIÓN

Para la protección de las personas e instalaciones en zonas peligrosas es necesaria la construcción de estructuras especiales que tengan un buen comportamiento frente a riesgos de explosiones

La tierra armada por su flexibilidad y su carácter masivo responde a los criterios de seguridad exigidos por las normas internacionales siendo empleada con éxito para la realización de merlones de protección en fábricas (depósitos de explosivos o municiones, así como en instalaciones militares y en petroquímica

### ALMACENAJE DE SÓLIDOS

Está aumentando en el mundo la necesidad de disponer de mayor capacidad de almacenamiento para una infinidad de productos: carbón, minerales, productos agrícolas, etc.

Se pueden realizar en tierra armada tolvas con paramento inclinado que permiten un almacenamiento económico y una construcción rápida.

Sección tipo de una tolva en tierra armada para materiales sueltos permite una ejecución rápida con un costo mínimo.

### ESTACIONES DE CRIBADO Y MACHAQUEO

En las grandes explotaciones mineras o en las canteras es necesario la creación de desniveles importantes para la implantación de tolvas, instalaciones de cribado o de machaqueo.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Normalmente se suelen emplear en estas explotaciones medios de manutención de gran peso que transmiten fuertes cargas a las infraestructuras

El empleo de la tierra armada para la creación de estos desniveles supone una ventaja muy importante desde el punto de vista económico, rapidez de ejecución y excelente comportamiento mecánico frente a fuertes cargas y vibraciones.

Además la tierra armada permite un desmontaje económico y no una demolición en caso de cambio de sitio de estas instalaciones.

### **POLÍGONOS INDUSTRIALES**

Cerca de las grandes zonas industriales se desarrollan cada día nuevos polígonos e implantación de nuevas industrias.

El costo elevado del terreno en estas zonas y la necesidad de aprovechar al máximo los espacios aconsejan muchas veces la construcción de estructuras de contención para limitar terraplenes e instalar zonas de aparcamiento o de almacenamiento de materias primas alrededor de las fábricas.

El empleo de la tierra armada en este tipo de estructura aporta una solución económica, rápida y estética. Permite también resolver el famoso problema de la conservación estética e higiénica de los taludes en zona industrial.

#### **III.3.7 URBANISMO**

El desarrollo de las grandes ciudades, así como de las zonas turísticas en las costas o en las montañas (estaciones de esquí) requieren la creación de grandes infraestructuras de accesos, aparcamientos, vías de circulación, etc. con la necesidad de emplear cada día más los terrenos accidentados dejados de lado por los promotores hasta la fecha.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



La tierra armada aporta para todos estos problemas una solución interesante debido fundamentalmente a la estética de sus paramentos prefabricados y a la gran variedad de efectos arquitectónicos posibles.

Además este tipo de estructuras por su gran drenabilidad puede contribuir a la estabilización de laderas al límite del equilibrio.

La tierra armada presenta entre sus principales características las siguientes:

- Posibilidad de utilizar en grandes macizos con tratamiento similar al de un terraplén.
- Flexibilidad, que le permite adaptarse a terrenos con características geotécnicas mediocres. Generalmente se admiten asentamientos diferenciales del orden de un 1% para un muro de 6 mts. de altura; asentamientos completamente imposibles para estructuras rígidas.
- Experimenta mínimas deformaciones en el sentido de las armaduras, por lo que prácticamente las elimina del paramento.
- Tiene excelente comportamiento ante las vibraciones y temblores de tierra como ha sido demostrado en los ensayos efectuados sobre modelos por el laboratorio de los ferrocarriles japoneses y en las obras situadas en la región de Udine, en el norte de Italia.
- Precio reducido: el costo de una obra en tierra armada es inferior al de una obra clásica, siendo la diferencia más importante cuanto mayor es la altura. En el caso de obras de cimentación mediocre, la diferencia es todavía más notable debido a que la solución tierra armada suprime las cimentaciones especiales.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



#### IV. MÉTODOS DE DISEÑO

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



#### IV. 1. CONSIDERACIONES DE ANÁLISIS Y DISEÑO

En este capítulo se mencionaran los métodos para el diseño de estructuras de tierra armada. Las consideraciones básicas para la estabilidad interna estriban en la seguridad de los refuerzos tanto a tensión como a ruptura. Los resultados de pruebas tanto en modelos como a escala natural así como los análisis con distinto enfoques, entre ellos el método del elemento finito, han establecido las geometrías relevantes y las variaciones a esperar en los parámetros necesarios para un diseño práctico. Estos aspectos comprenden:

- I. Zonas de empuje activo y pasivo definidas como el lugar geométrico de las fuerzas máximas de tensión, según se muestra figura IV.3.4
- II. Variación del coeficiente de empuje horizontal,  $K$ , con la profundidad conforme a la ecuación IV.4.2.
- III. La variación del coeficiente de fricción aparente entre el suelo y refuerzos según las ecuaciones IV.4.6, IV.3.7 y en la Fig. IV.3.5.

El cálculo de un muro simple se puede realizar a mano aplicando las relaciones anteriores y las distribuciones de carga mostradas en la Fig. IV.1.1. El paramento del muro está empotrado hasta una profundidad de  $0.1H$  al pie de los rellenos horizontales y hasta  $0.2H$  si se trata de un relleno semi infinito. La especificación actual para que un relleno sea aceptable establece que el índice de plasticidad sea menor de 6 por ciento, que haya menos del 15 por ciento en peso de finos menores de  $15 \mu m$ , y que el ángulo de fricción determinado con el método AASHTO T-36 resulte mayor a 34 grados.

En la Fig. IV.1.1 se presentan las condiciones de carga y los factores de seguridad mínimos contra falla por volteo, deslizamiento y capacidad de carga en el pie.

Se considera aceptable un factor de seguridad de 2.0 contra falla por capacidad de carga en el pie, en vez del valor usual de 3.0 debido a la naturaleza deformable de muros de tierra armada.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

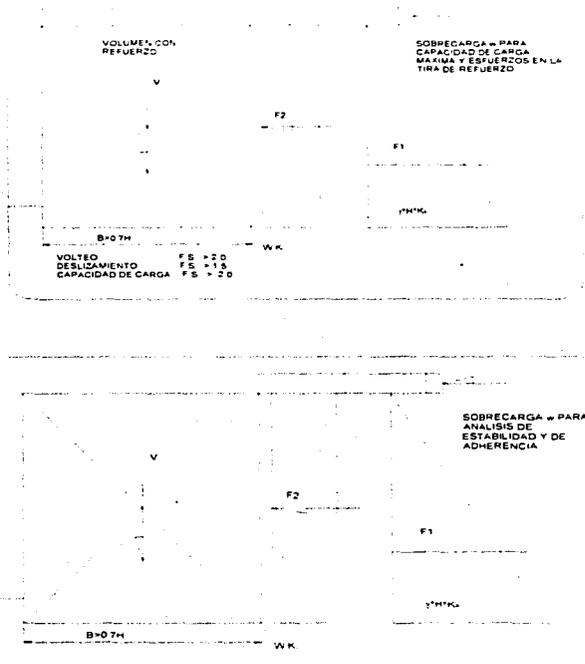


Figura IV.1.1 Geometría y fuerzas consideradas en el diseño de un muro de Tierra armada

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



La presión vertical de soporte a cualquier altura del muro se toma igual a

$$\sigma_v = \frac{\Sigma V}{B - 2e} \quad \text{Ec. IV.1.1}$$

Donde

$\Sigma V$  es la suma de fuerzas verticales a esa profundidad,

$B$  es el ancho de la zona reforzada

$e$  es la excentricidad de la resultante, dada a su vez por

$$e = \frac{\Sigma M_0}{V} \leq \frac{B}{6} \quad \text{Ec. IV.1.2}$$

La longitud efectiva de los refuerzos  $l_e$ , es la longitud del refuerzo a la derecha de la zona en estado activo que se muestra en la fig. IV.4.4. Se necesita aplicar un factor de seguridad mínimo de 1.5 contra extracción de las tiras, y el esfuerzo máximo de tensión en el refuerzo debe ser menor que el permisible para el tipo de material usado.

$$\frac{2h \cdot f' \cdot l_e \cdot \sigma_v'}{\sigma_n \cdot A_{tabl} + N} \geq 1.5 \quad \text{Ec. IV.1.3}$$

Donde:

$B$  es el ancho de la tira,

$\sigma_v' = \gamma \cdot h$ , siendo  $\gamma$  el peso volumétrico efectivo del relleno,  $h$  es la profundidad de la tira en cuestión.

$\sigma_n = K \sigma_v$ ,

$A_{tabl}$  Es el Área de cada tablero exterior y  $N$  es el número de refuerzos por tablero.

La sección crítica para fines de cálculo del esfuerzo máximo de tensión en las tiras de refuerzo se considera localizada en el paramento del muro. En este punto, la fuerza de tensión que se va a tomar se supone conservadoramente igual a 0.85 siendo  $T_{max}$  igual a  $(\sigma_n \times A_{tabl})/N$ . El área de la sección transversal del acero en el paramento del muro se toma como el área total de la sección transversal del refuerzo menos el área del barrenado de anclaje, descontando un cierto margen para tomar en cuenta la corrosión. El barrenado en el extremo de cada tira se usa para fijarla al conector del tablero exterior. Esta condición, en la que hay una reducción de área por el barrenado, es más crítica que en aquellos lugares donde la fuerza de tensión en el refuerzo es máxima.

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN



#### IV. 2 MÉTODOS DE DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE TIERRA ARMADA

Como resultado de las investigaciones realizadas en modelos a escala reducida y en pruebas a escala natural a lo largo de más de todos estos años, las compañías dedicadas a la tierra armada propusieron nuevos métodos de diseño para estructuras de este tipo. Se desarrollaron los dos métodos siguientes:

El "**método de esfuerzos de trabajo**" basado esencialmente en los resultados de experimentos a escala natural en estructuras reales bajo condiciones alejadas de la falla.

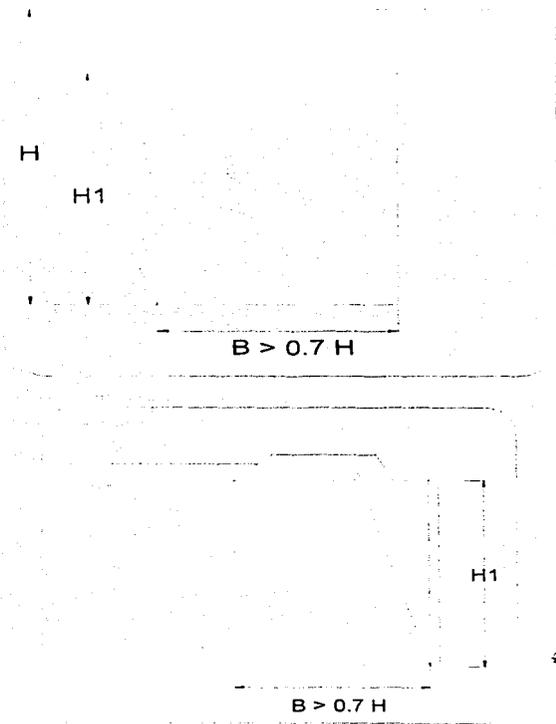
El "**método de los planos de falla**" basado en el concepto de superficies potenciales de falla y abarcando tanto la falla debida a la rotura del refuerzo como la producida por el deslizamiento de los refuerzos.

Estos dos métodos de diseño se adoptaron para las nuevas especificaciones y se publicó el gobierno de Francia. Se basan en los conceptos recientes semi-probabilísticos del coeficiente de seguridad.

#### IV. 3 MÉTODO DE ESFUERZOS DE TRABAJO

Con este método se pueden determinar separadamente las fuerzas máximas de tensión en las tiras de refuerzo y la longitud necesaria de adherencia para los refuerzos. Este método cubre el caso general, por lo que resulta ideal para el diseño de muros de contención tradicionales y de estructuras sujetas a cargas concentradas, como puede ser el caso de estribos para puentes. El diseño preliminar de una estructura de tierra armada involucra una masa de geometría rectangular con un ancho  $B$  igual a  $0.7 H$ , siendo  $H$  la altura total de la estructura (Fig. IV.3:1).

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Fig. IV 3.1 Analisis preliminar de una estructura de tierra armada



### IV.3.1 CÁLCULO DE LAS FUERZAS MÁXIMAS DE TENSIÓN EN LOS REFUERZOS

El valor de  $\tau_{max}$  se calcula considerando el equilibrio de un prisma de altura  $\Delta H$  (correspondiendo a la separación vertical entre dos lechos de refuerzos) formado por la capa reforzada y limitado en un extremo por el paramento exterior y en el otro por el punto M localizado sobre el lugar geométrico de las fuerzas máximas de tensión (Fig. Fig. IV.3.2).

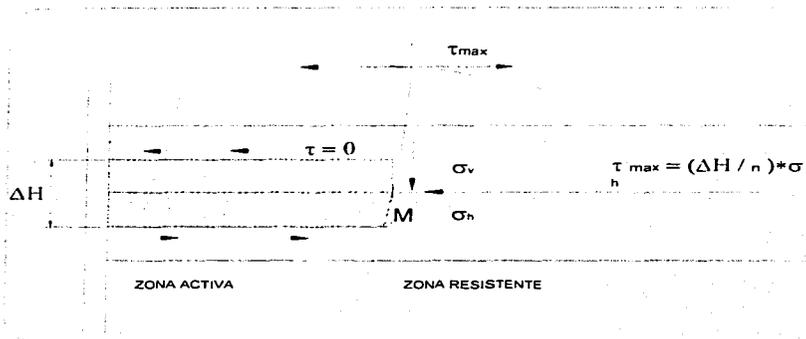


Fig. IV.3.2 Equilibrio de un prisma elemental y cálculo de  $\tau_{max}$ .

En el punto M no existen esfuerzos cortantes aplicados sobre el refuerzo por el suelo ( $\tau = \frac{dT}{dt} = 0$ ) y los esfuerzos verticales en este punto resultan verticales ( $\sigma_v$ ) y horizontales ( $\sigma_h$ ).

Además, por razones de simetría, se puede suponer que no hay esfuerzos cortantes actuando sobre las caras horizontales del prisma. Esta hipótesis se comprobó en forma aproximada en pruebas realizadas con modelos fotoelásticos.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



El equilibrio del prisma (1 m de ancho) muestra que los esfuerzos  $\sigma_n$  aplicados en la superficie del respaldo están balanceados por las fuerzas máximas de tensión ( $\tau_{max}$ ) actuando en las "n" tiras de refuerzos por metro lineal. De ahí se obtiene que:

$$\tau_{max} = \frac{1}{n} * \Delta H * \sigma_n \quad \text{Ec. IV.3.1}$$

La determinación del valor del esfuerzo horizontal  $\sigma_n$  es semiempírica. El esfuerzo  $\sigma_n$  es proporcional al esfuerzo vertical  $\sigma_v$ , según la siguiente ecuación:

$$\sigma_n = K * \sigma_v \quad \text{Ec. IV.3.2}$$

K es un coeficiente experimental deducido a partir de ensayos a escala natural y se puede expresar como sigue:

$$\begin{aligned} \text{Para } z < z_0 & \quad K = K_0 (1 - z / z_0) + K_a z / z_0 \\ \text{Para } z > z_0 & \quad K = K_a \end{aligned} \quad \text{Ec. IV.3.3}$$

Donde:

$$K_0 = 1 - \text{sen} \Phi, \quad \text{y } K_a = \tan^2 (\pi/4 - \Phi/2)$$

z = Profundidad abajo del borde superior del paramento

$z_0$  = Profundidad crítica = 6m

$\sigma_v$  = Esfuerzo vertical total

El esfuerzo vertical  $\sigma_v$ , se calcula con la distribución de Meyerhof, suponiendo el equilibrio los momentos de las fuerzas aplicadas en la porción de la masa de tierra reforzada arriba de las tiras de refuerzo. Por tanto, resulta mayor que la presión por sobrecarga  $\gamma z + q$ . En consecuencia, para el caso de un muro de contención con superficie libre horizontal, el valor de  $\sigma_v$ , está dado por la expresión:

$$\sigma_v = \gamma z \left[ 1 + K_a * \left( \frac{z}{l} \right)^2 \right] \quad \text{Ec. IV.3.4}$$

Donde:

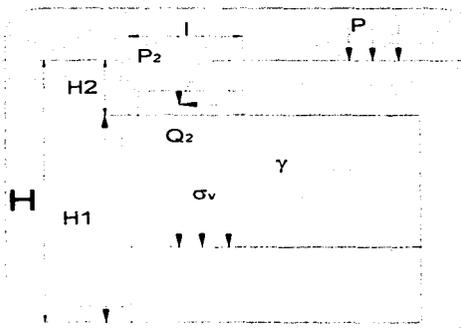
l es la longitud de los refuerzos.

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN



Para el caso de un estribo para puente, el valor del esfuerzo  $\sigma_v$  se calcula aplicando el principio de superposición indicado en la Fig. IV.3.3.

Este método de diseño a partir de esfuerzos de trabajo toma en cuenta el hecho de que en la parte superior del muro el estado de esfuerzos dentro del suelo se acerca más a la condición de 'reposo' y no al estado de falla. Esto se ha demostrado con estudios de laboratorio sobre el comportamiento de la tierra armada bajo condiciones de compresión triaxial, según se describió anteriormente.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

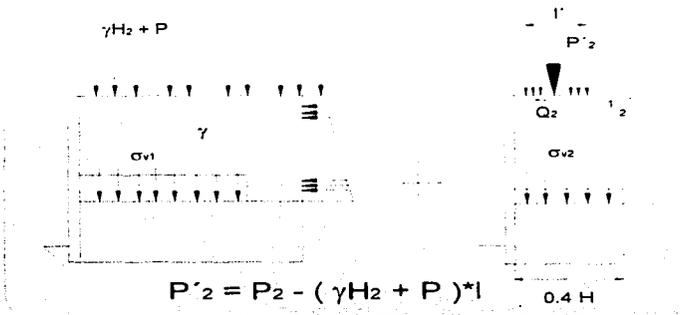


Fig. IV.3.3. Cálculo de los esfuerzos verticales en el estribo de un puente

Ante esfuerzos relativamente bajos, el estado del suelo entre las capas de refuerzo se acerca a la condición  $K_0$  y sólo a medida que los esfuerzos cortantes aumentan alrededor de los refuerzos, el suelo se acerca progresivamente a la condición de falla.

El procedimiento de cálculo de  $\sigma_n$  que se ha descrito toma en cuenta exclusivamente las fuerzas verticales aplicadas en la parte superior de la estructura. Sin embargo, las fuerzas  $\sigma_n$  pueden variar debido al efecto de una fuerza horizontal  $Q_2$  transmitida por una superestructura. En presencia de condiciones hidráulicas, se deberán tomar en cuenta las fuerzas de filtración y los empujes hidrostáticos inducidos por una diferencia de niveles en la superficie del agua dentro y fuera de la masa.

#### IV.3.2 CÁLCULO DE LA LONGITUD DE ADHERENCIA

Para la determinación de la longitud de refuerzo, se necesita conocer el lugar geométrico de las fuerzas máximas de tensión que divide la zona "activa" de la zona "resistente", ya que la longitud total  $L$  está dada por la ecuación:

$$L = L_0 + L_a \quad \text{Ec. IV.3.4.}$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

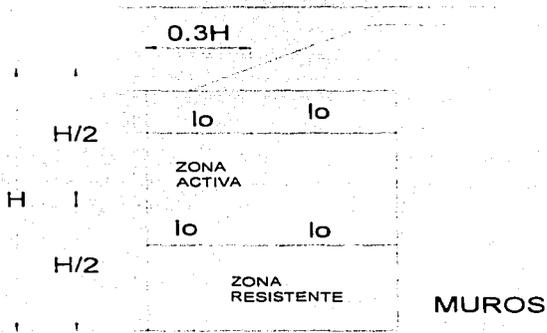


Donde:

$L_c$  = Longitud de la porción del refuerzo localizada dentro de la zona activa

$L_a$  = Longitud de adherencia correspondiente al tramo del refuerzo que cae dentro de la zona resistente

El lugar geométrico teórico de las fuerzas máximas de tensión adoptado para el diseño de muros y estribos para puentes, se muestra en la Fig. IV.3.4. Esta distribución se basa en mediciones efectuadas en pruebas con estructuras reales a escala natural así como en resultados teóricos obtenidos por Corte con el método del elemento finito. En cualquier caso, esta configuración corresponde a la posición mas desfavorable del lugar geométrico considerado.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

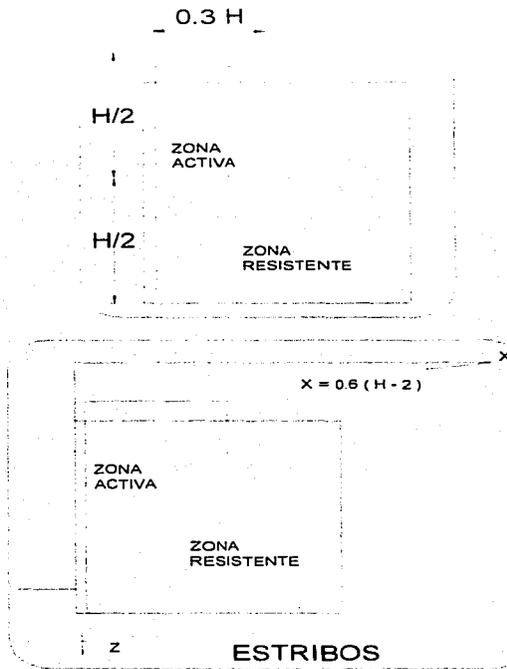


Fig. IV.3.4. Diagrama simplificado del lugar geométrico de las fuerzas máximas de tensión.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Para todas las tiras de refuerzo la longitud de adherencia debe satisfacer la desigualdad

$$T_{max} \leq \int_{x_1}^{x_2} 2h * n * \sigma_v'(x) * f' * dx \quad \text{Ec. IV.3.5}$$

Donde:

$f'$  = Coeficiente de fricción aparente considerando la presión por sobrecarga yz del suelo localizado arriba de las tiras de refuerzo consideradas

$\sigma_v'$  = Se supone igual a la suma de la presión por sobrecarga y la carga aplicada eventualmente por la vertical que pasa a través del punto considerado. Se supone que las cargas locales se transmiten verticalmente a la masa sin ninguna componente lateral

En consecuencia, el esfuerzo vertical  $\sigma_v'$  resulta diferente del valor  $\sigma_v$  calculado según la Ec. IV.3.3 usada para la determinación de las fuerzas máximas de tensión ( $T_{max}$ ) y que toma en cuenta el efecto de los momentos y de la distribución de la carga.

También debe mencionarse que el estado real de esfuerzos dentro de la masa de tierra armada es muy diferente del correspondiente al estado de esfuerzos de Rankine ( $\sigma_1 = \gamma z$ ;  $\sigma_3 = K_v \gamma z$ ). El esfuerzo vertical real  $\sigma_v'$  es variable a lo largo de la tira de refuerzo y en el punto donde la fuerza de tensión es máxima en la parte inferior del muro, siendo su magnitud menor que la presión por sobrecarga ( $\gamma z$ ) como se observa en las curvas de la 11.6.3.

Según se explicó la fricción en la tierra armada, el valor de  $f'$  varía en función de la rugosidad de la superficie de los refuerzos. De ahí que sea posible establecer la diferencia en el caso de tiras lisas y en el de tiras corrugadas.

Para tiras lisas:  $f' = 0.4$

Para tiras corrugadas. Tomando en cuenta la influencia de la presión por sobrecarga, se supone que  $f'$  varía conforme a la profundidad  $z$  de la tira considerada, de acuerdo a las siguientes expresiones

$$\text{Para } z \leq z_0: f' = \left(1 - \frac{z}{z_0}\right) + \frac{z}{z_0} \tan \phi$$

$$\text{Para } z > z_0: f' = \tan \phi \quad \text{Ec. IV.3.6}$$

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN



Siendo  $z_0$  la profundidad crítica ( $z_0 = 6 \text{ m}$ ) y  $f'$  el coeficiente de fricción en la superficie, dado a su vez por la ecuación:

$$f' = 1.2 + \log C_u \quad \text{Ec. IV.3.6}$$

Donde  $C_u$  es el coeficiente de uniformidad del material de relleno ( $C_u = D_{60}/D_{10}$ ).

La variación de  $f'$  para las tiras corrugadas se ilustra en la Fig. IV.3.5.

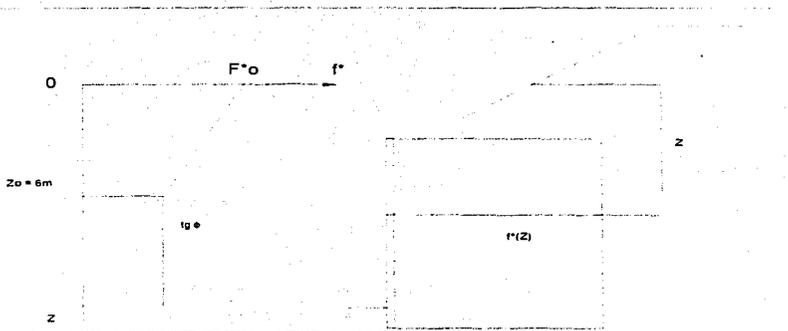


Fig. IV.3.5 Variación de  $f'$  con la profundidad de las tiras.

### IV.3.3 MÉTODO DE "LOS PLANOS DE FALLA" PRINCIPIOS

#### Principios

Este método considera el equilibrio de una cuña limitada por el paramento exterior y por una cierta superficie potencial de falla.

Cualquier cuña analizada está sometida a la acción de las siguientes fuerzas (Fig. IV.3.6):

- Peso  $W$
- Componentes vertical y horizontal de las cargas  $Q_v$  y  $Q_h$ .
- Empuje pasivo con sus componentes horizontal  $P_h$  y vertical  $P_v$ .

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



- Reacción del suelo R actuando sobre el plano potencial de falla, formando un ángulo  $\alpha$  con, respecto a la normal a este plano
- Suma de las fuerzas de tensión ( $\Sigma T_i$ ) movilizadas en los refuerzos que pasan a través del plano potencial de falla.

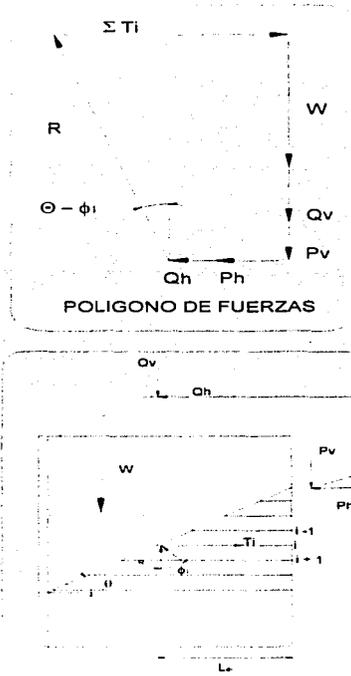


Fig. IV.3.6 Equilibrio de una cuña de falla potencial.



Del equilibrio de fuerzas se obtiene la siguiente expresión:

$$\Sigma T_i = (P_n + Q_n) + (W + Q_v + P_v) \tan(\theta - \Phi) \quad \text{Ec. IV.3.7}$$

Para cada capa de refuerzo, la fuerza  $T_i$  se considera igual al valor mínimo ya sea de la resistencia a la tensión del refuerzo o de su resistencia a la extracción, dividido por un cierto factor de seguridad, según la ecuación:

$$T_i = \min \left\{ n_i \cdot R_t \int_{l_1}^{l_2} 2h \cdot n_i \cdot \sigma_v^* \cdot f^* \cdot dx \right\} \quad \text{Ec. IV.3.8}$$

Donde:

$n_i$  = Número de tiras de refuerzo por metro lineal en la capa de refuerzos

$R_t$  = Resistencia a la tensión de los refuerzos

$B$  = Anchura del refuerzo

$\sigma_v^*$  = Presión por sobrecarga más cualesquiera esfuerzos debidos a las cargas actuando sobre los refuerzos

$f^*$  = Coeficiente de fricción aparente.

Resulta posible con este método verificar así la estabilidad de las distintas cuñas limitadas por los planos potenciales de falla considerados y diseñar la estructura (número de tiras de refuerzo por metro lineal y longitud de los refuerzos) analizando primero los planos que pasan por el extremo superior del paramento y después los planos que pasan por puntos cada vez más abajo del paramento exterior.

La determinación de  $\sigma_v^*$  y  $f^*$  se explica en el punto IV.3.2 dedicado al cálculo de la longitud de adherencia

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



#### IV. 4 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DEL MURO DE TIERRA ARMADA

La tierra armada es una asociación de tierra y elementos lineales capaces de soportar fuerzas de tensión importantes; estos últimos elementos suelen ser tiras metálicas o de plástico. El refuerzo de tales tiras da al conjunto una resistencia a tensión de la que el suelo carece en sí mismo, con la ventaja adicional de que la masa puede reforzarse única o principalmente en las direcciones más convenientes. La fuente de donde emana esta resistencia a la tensión es a fin de cuentas la fricción interna del suelo, puesto que las fuerzas que se producen en la masa se transfieren del suelo a las tiras de refuerzo por fricción.

La estabilidad de un muro de retención que se construya con tierra armada debe comprender principalmente dos clases de análisis.

En primer lugar el general del elemento como un conjunto, que no será diferente del de un muro convencional del tipo de gravedad.

En segundo lugar habrá que hacer un análisis de estabilidad interna, principalmente encaminado a definir la longitud de las tiras de refuerzo y su separación horizontal y vertical para garantizar que no se produzca el deslizamiento del material térreo respecto a las tiras. Además será necesario verificar otros aspectos secundarios, pero muy importantes, tales como el riesgo de corrosión en el caso de tiras metálicas o proporcionamiento de algún elemento frontal que al cubrir la superficie expuesta del muro de retención impida la fuga de la tierra entre las tiras de refuerzo. El drenaje se deberá planear con las mismas ideas que en los muros convencionales.

Hasta ahora se han hecho tres tipos de estudio diferentes en relación con la tierra armada.

1. Estudios con vistas a elaborar métodos de diseño. Por lo general se ha procurado aplicar al caso la metodología disponible, con aplicación de las teorías tradicionales del empuje de tierras.
2. Estudios de modelos bidimensionales en el laboratorio en los que la tierra se ha representado por

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



medio de barras metálicas de longitud relativamente grande en comparación con su diámetro. Las tiras de armado se han hecho con el mismo material usado en los prototipos. Se trata principalmente de modelos cualitativos y en ellos se estudiaron, sobre todo, los tipos de falla susceptibles de presentarse.

3. Mediciones en prototipos construidos para resolver problemas específicos de vías terrestres. Estos estudios han tenido lugar en Francia en forma casi única.

De los análisis y estudios anteriores parece concluirse que existe riesgo de que se presente una falla de cualquiera de los tres tipos siguientes:

1. Una falla en la cual la tierra armada colapsa como un conjunto, sin deformaciones importantes dentro de sí misma. Esta falla puede ocurrir por deslizamiento o volcadura y es análoga a la de un muro de retención convencional que falle por las mismas causas.
2. Falla por deslizamiento de la tierra en relación a las tiras de armado, acompañada de una desorganización dentro del cuerpo de tierra armada.
3. Falla por rotura de las tiras de refuerzo, que parece estar asociada a mecanismos de falla progresiva.

En lo referente a comportamiento de estructuras reales, es posible de que existe una razonable concordancia entre los resultados del análisis teórico y del comportamiento de los modelos con el de los prototipos construidos.

Un punto importante que se debe considerar es sin duda la elección del material terreo que haya de usarse. Hasta el presente siempre se ha escogido entre los de naturaleza friccionante. Sin embargo, se han construido estructuras con contenido de finos que pasaron la malla No. 200 del orden de 10 y 20%, usando materiales naturales, sin procesos especiales de fabricación.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



La Fig IV.4 1 permite establecer un procedimiento propuesto por Schlosser y Vidal para evaluar la estabilidad interna de la masa de tierra armada

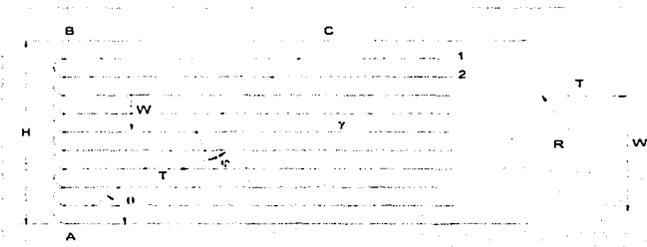


Fig. IV.4.1 Análisis de estabilidad interna de una masa de tierra armada

Se recomienda para la masa de tierra armada una sección próxima a la rectangular, en la que el ancho (en perfil) sea del orden de la altura del muro.

La superficie A-C limita una cuña de tierra armada, cuyo equilibrio se puede analizar extendiendo la idea que presiden el método de Coulomb para el caso convencional de empuje de tierras. El equilibrio de la cuña depende de las siguientes fuerzas: el peso  $W$ , conocido en magnitud y posición, la reacción  $R$ , resultante de los efectos normales y de fricción a lo largo de la superficie A-C, conocida sólo en dirección, y una fuerza  $T$ , resultante de todas las fuerzas de tensión en las tiras de refuerzo, que será horizontal. Con estas ideas, puede construirse el polígono dinámico de la cuña, lo que proporcionará el valor de  $T$ . Un análisis de tanteos, utilizando el número necesario de superficies de deslizamiento como la A-C, permitirá evaluar la  $T_{max}$ , susceptible de presentarse.

Para proseguir el análisis y distribuir la fuerza  $T_{max}$  entre las diferentes tiras de refuerzo, será preciso hacer una hipótesis sobre la distribución de las fuerzas de tensión en dichas tiras.



Se propone una hipótesis que sea de distribución Triangular, con la máxima tensión en la tira más baja y tensión cero en la más alta. De esta manera se conoce el esfuerzo de tensión actuante en cada hilera de tiras de refuerzo, el cual, multiplicado por la separación vertical entre las hileras de tiras, dará la fuerza de tensión que ha de tomar cada hilera (por metro de longitud de muro)

Ha de considerarse ahora cada hilera por separado, tomando en cuenta el ancho de las tiras en la dirección normal al plano del papel. Se conoce la presión normal actuante en la tira, la cual multiplicada por el área de la propia tira dará la fuerza normal total actuante sobre ella, y ésta, multiplicada por 2 veces el coeficiente de fricción entre la tira y el suelo, dará finalmente la fuerza de tensión que las tiras pueden soportar sin deslizamiento relativo al suelo. Este es el valor que ha de compararse con la fuerza de tensión actuante en cada tira, habida cuenta del número de tiras que entran por metro lineal del muro en la dirección normal al plano del papel.

La secuela anterior permite tantear la separación más conveniente de las tiras de refuerzo, tanto en la dirección vertical como en la horizontal. El factor 2 que se puso al coeficiente de fricción entre las tiras y el suelo obedece a que la fricción se desarrolla tanto en la superficie superior como en la inferior de la tierra.

La estabilidad interna de la masa de tierra armada puede también analizarse con base en la Teoría de Rankine, tal como se aplica a los problemas convencionales de empuje de tierras. En la Fig. IV.4.2 se presenta un croquis en que se ve la situación de la hilera  $i$ -ésima, a la profundidad  $H_i$ , siendo  $AH$  el espesor de relleno que corresponde a cada hilera de tiras de refuerzo.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

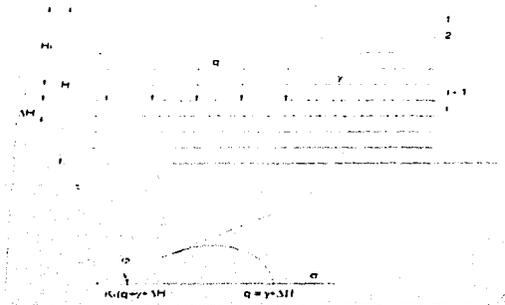


Fig. IV.4.2 Otro metodo para analizar la estabilidad interna de la tierra armada

El peso de la tierra armada en la profundidad  $H$  se considera como sobrecarga actuando en ese nivel. Si  $K_A$  es el coeficiente de presión de tierra, con que se aplica la teoría de Rankine, dicha sobrecarga produce un empuje

$$E_q = K_A \cdot q \cdot \Delta H$$

Además, a la profundidad  $H$  y en el espesor  $\Delta H$  actuará un empuje que vale, según la Teoría de Rankine y considerando al suelo como puramente friccionante

$$E_s = \frac{1}{2} K_A \cdot \gamma (\Delta H)^2$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

El empuje total al nivel  $H$  será entonces la suma de los dos valores anteriores; se considera aplicado sobre la tira de refuerzo y representa el valor que ha de ser neutralizado por la fricción que se

ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA



desarrolle entre el suelo y la tira de refuerzo, calculada esta última como se vio anteriormente en la aplicación del método de Coulomb.

Mucho falta por investigar en torno a la tierra armada y, concretamente, a la aplicación de las teorías clásicas de empuje de tierras a su cálculo. Por ejemplo, se ha discutido cuál debe ser el valor del coeficiente de empuje de tierras que se utilice en el último método de cálculo descrito, puesto que las tiras de refuerzo y la cobertura que se coloca sobre la tierra en el frente del muro parecen lo suficientemente fuertes como para producir una fuerte restricción a la deformación lateral del conjunto y, por tanto, parece difícil poder garantizar que el coeficiente de empuje de tierras llegue al valor mínimo. Se ha propuesto utilizar  $K_0$ , correspondiente al estado de reposo, por lo menos en la parte superior del muro, pues en la inferior actúan esfuerzos cortantes horizontales mayores, bajo los que el suelo puede deformarse más.

Es importante definir cuál debe ser el ángulo de fricción que se considere entre las tiras de refuerzo y el material friccionante que constituye el suelo. Para fomentar el desarrollo de la máxima fricción se ha recurrido al uso de materiales finamente corrugados. Que han demostrado que fallan a lo largo de superficies ligeramente fuera de la tira, dentro del material friccionante comportándose éste como solidario de la tira entre las corrugaciones. De esta manera es razonable considerar en este caso un ángulo de fricción igual al de resistencia del material friccionante. En cambio si la tira es lisa, el valor del ángulo de fricción entre ella y el material friccionante puede ser tan bajo como  $\frac{\phi}{2}$ .

Otro punto que ha de definirse con cuidado en el futuro es el de la compactación conveniente al formar una masa de tierra armada. Desde luego un acomodo conveniente aumentará la fricción interna de los rellenos y disminuirá el riesgo de desorganización del conjunto por asentamiento, pero una compactación excesiva podrá entrañar riesgos todavía más graves, pues presiones residuales de compactación podrían deformar mucho el frente del muro o, por lo menos, disminuir seriamente la eficiencia de las tiras de armado, obligándolas a invertir gran parte de su efecto en contrarrestar dichas presiones parásitas.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



#### IV.5 EJEMPLO DE APLICACIÓN DEL MÉTODO GRÁFICO DE CULMANN A RELLENOS FRICCIONANTES

Se aprovechará este ejemplo de aplicación para hacer una breve descripción del método gráfico de Culmann ya que dicho método no fue tratado en la exposición del texto. El método es una aplicación gráfica de la Teoría de Coulomb y permite resolver el problema sin necesidad de tanteos en rellenos arenosos.

Los datos correspondientes al muro y al relleno arenoso son los siguientes (Fig. IV.5.1)

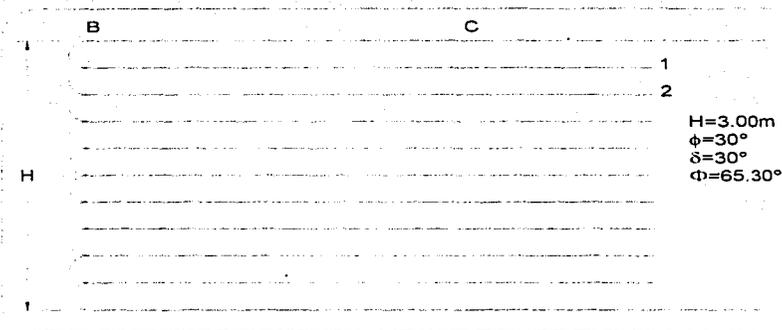


Fig. IV.5.1

H = altura del muro = 3.00 m.

$\phi$  = ángulo de fricción interna del material arenoso =  $30^\circ$

$\delta$  = ángulo de inclinación del empuje con relación a la normal al muro =  $\frac{2}{3} \phi = 20^\circ$ .

$\gamma$  = peso Volumétrico del relleno = 1.8 T *1m3*.

$\theta$  = lo primero que puede calcularse es el ángulo de inclinación del empuje, con relación a la vertical =

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



65° 30'. Se obtiene gráficamente

El método permite llegar fácilmente al valor máximo del empuje que ejerce un relleno arenoso contra un muro. Es general y se aplica a un relleno de forma cualquiera;

Por el punto A, de la base del muro se trazan la línea  $\phi$  y la  $\theta$ ; la primera formando un ángulo de 30° con la horizontal y la segunda a un ángulo de 65° 30' con la anterior.

A continuación, se escogen diferentes planos hipotéticos de deslizamiento  $A b_1, A b_2, \dots$  etc. El peso de las cuñas de deslizamiento se calcula multiplicando su área por el peso específico 1.8T/m<sup>3</sup>, de la arena que constituye el relleno (considerando una dimensión unitaria en la dirección normal al plano del papel).

$$W_1 = \frac{0.70 * 3}{2} * 1.8 = 1.85 \text{ Ton}_m$$

$$W_2 = \frac{1.55 * 3}{2} * 1.8 = 4.19 \text{ Ton}_m$$

$$W_3 = \frac{2.55 * 3}{2} * 1.8 = 6.89 \text{ Ton}_m$$

$$W_4 = \frac{3.15 * 3}{2} * 1.8 = 8.50 \text{ Ton}_m$$

$$W_5 = \frac{4.00 * 3}{2} * 1.8 = 10.80 \text{ Ton}_m$$

$$W_6 = \frac{4.84 * 3}{2} * 1.8 = 13.05 \text{ Ton}_m$$

$$W_7 = \frac{5.60 * 3}{2} * 1.8 = 15.15 \text{ Ton}_m$$

A una escala de fuerzas conveniente, estos pesos se llevan, a partir de A sobre la "línea  $\phi$ "; así se obtienen los puntos  $a_1, a_2, \dots$  etc.

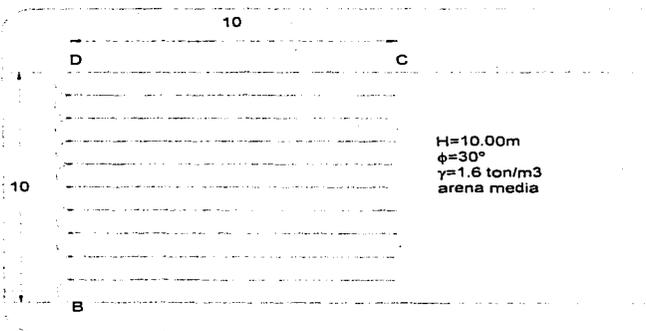
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Por estos últimos puntos se trazan paralelas a la "línea  $\theta$ " hasta cortar en los puntos  $C_1, C_2, \dots$  etc. a los respectivos planos de falla de las cuñas. Los segmentos  $a_1, C_1, a_2, C_2, \dots$  etc. representan, a la escala de fuerzas usada, los empujes que produce cada una de las cuñas arbitrariamente escogidas. En efecto, en la sección (b) de la Fig. IV.5.1 aparece un triángulo de fuerzas correspondiente a la cuña  $ABb_2$ . El empuje  $E$  y el peso  $W$  forman el ángulo  $\theta$ , puesto que éste por definición, es el ángulo formado por  $E$  y la vertical. Entre la reacción a lo largo del plano de falla,  $F$ , y  $W$  se forma el ángulo  $\beta - \phi$ , siendo  $\beta$  el que forma el plano de deslizamiento con la horizontal.

### PROPORCIONAMIENTO DE UN MURO DE TIERRA ARMADA

Se pretende construir una estructura de tierra armada, tal como se muestra en la figura. Calcule las condiciones de estabilidad del muro.



### CONDICIONES Y DATOS DE LA ESTRUCTURA DE TIERRA ARMADA

1. Se analiza la falla en la cual la estructura de tierra armada sufre un colapso en su conjunto.

Para el problema supuesto

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



$$P = \frac{1}{2} * K_a * \gamma * H^2$$

$$P = \frac{1}{2} * 0.333 * 1.6 * 10^2 = 26.64 \text{ ton}_m$$

El punto de aplicación se encuentra en:

$$e = \frac{H}{3}$$

$$e = \frac{10}{3} = 3.33m$$

por lo que se puede escribir :

$$b = H * \gamma * \left[ 1 + K_a * \left( \frac{H}{L} \right)^2 \right]$$

$$b = 10 * 1.6 * \left[ 1 + 0.33 * \left( \frac{10}{10} \right)^2 \right] = 21.28 \text{ ton}_m^2$$

$$a = H * \gamma * \left[ 1 - K_a * \left( \frac{H}{L} \right)^2 \right]$$

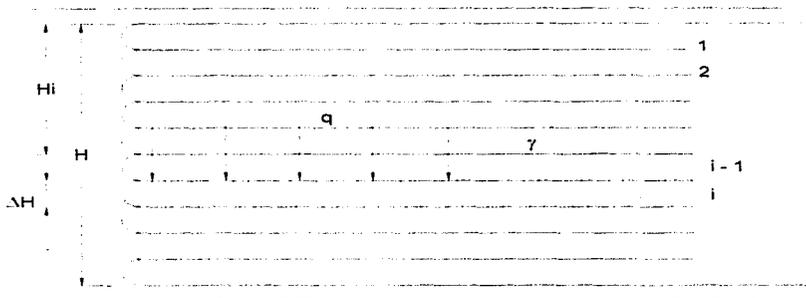
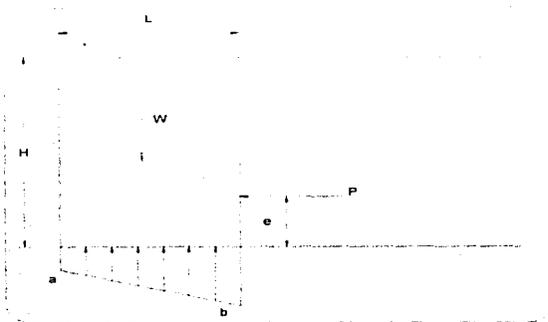
$$a = 10 * 1.6 * \left[ 1 - 0.33 * \left( \frac{10}{10} \right)^2 \right] = 10.72 \text{ ton}_m^2$$

por lo tanto como  $a > 0$ , el muro no se volcara.

II Se analizará la falla por rotura de las tiras de refuerzo.

1º tanteo. Se supondrán las tiras separadas  $\Delta H = 25$  cm. entonces las fuerzas de tensión en las tiras serán:

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



$$T_i = (K_d * q * \Delta H) + \left( \frac{1}{2} * K_d * \gamma * \Delta H^2 \right)$$

$$q = \gamma * H_i$$

$$T_i = 0.132 * H_i + 0.0165$$

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN



para valores diferentes de  $T_i$ , se tiene:

$H_i$ (m)	$T_i$ (ton/m <sup>2</sup> )
1	0.148
3	0.412
5	0.676
8	1.072
10	1.336

Se realizan tanteos para escoger los valores de las tensiones en las tiras más convenientes para el diseño.

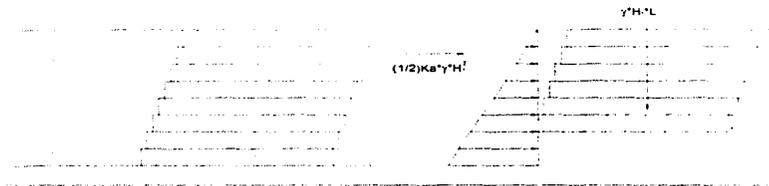
- III. Se analiza la falla por deslizamiento de la tierra en la relación a las tiras de armado, acompañada de una desorganización del cuerpo de tierra armada.

El factor de seguridad ( $F_s$ ) contra cualquier falla horizontal por esfuerzo cortante entre las tiras de armado y el suelo será:

$$F_s = \frac{2 * \tan \Phi * L}{K_a * H}$$
$$F_{s, \text{mín}} = \frac{2 * \tan 30 * 10}{0.33 * 10} = 3.5$$

en la obtención de estas fórmulas se supuso que el esfuerzo cortante se desarrolla sobre los planos horizontales a la mitad del espacio entre las tiras, como un sistema de bloques rígidos como se muestra en la figura siguiente.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Análisis para la prevenir la distorsión del conjunto.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
"ARAGÓN"



## V. PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO

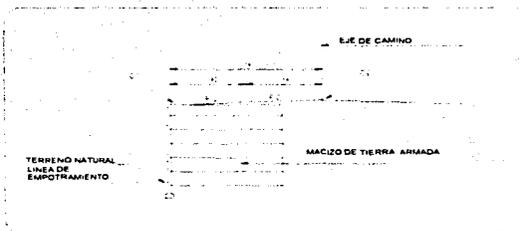
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



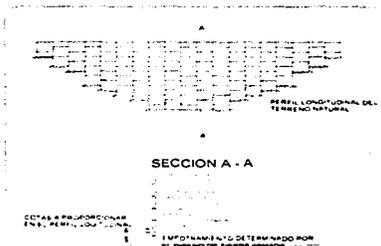
## V. 1 TRABAJOS DE CAMPO Y ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS PARA EL DESARROLLO DE UN PROYECTO DE TIERRA ARMADA

### Muros de contención sin talud

- 1.- Cotas de coronación del muro ( $C_1$ ) o datos necesarios para obtenerlas. Por ejemplo, si la plataforma es una calzada de carretera o autopista: Rasante ( $C_2$ ), distancia del muro al eje del camino ( $d$ ) y pendientes de proyecto, a considerar ( $P_1$  y  $P_2$ ).



- 2.- Perfil longitudinal del terreno natural correspondiente al paramento del muro, o la nivelación de donde obtenerlo.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



3 - Perfiles transversales al muro para definir el empotramiento necesario.

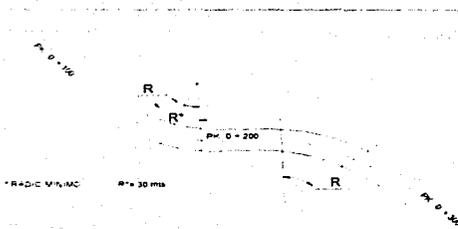
P - 1  
LOCALIZACION DEL PARAMENTO  
EXTERIOR DEL MURO

P - 2  
LOCALIZACION DEL PARAMENTO  
EXTERIOR DEL MURO

PLANO DE COMPARACION

PLANO DE COMPARACION

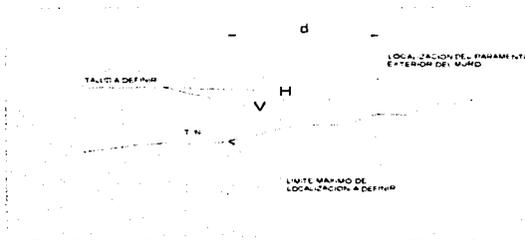
4.- planta de trazo del muro.



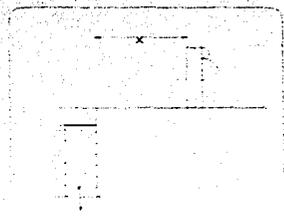
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



- 5.- Si el muro debe ir apoyado en el terraplén, definir el límite máximo de localización, el talud a considerar en el relleno y los datos de los puntos (1) y (4), no siendo necesarios evidentemente los (2) y (3).



- 6.- Sobrecargas necesarias de diseño en la plataforma, ya sean sobrecargas uniformes o puntuales. Si la plataforma es una calzada de autopista o carretera y salvo indicación en contrario, se toman  $1.2 \text{ ton/m}^2$ .
- 7.- Definir si lleva o no barrera de seguridad, tipo a emplear y situación con respecto al paramento del muro.  
Si  $x = 0.50 \text{ m}$  no es necesario sobredimensionar el macizo de tierra armada



- 8.- Capacidad de carga del terreno.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



### Muros de contención con talud

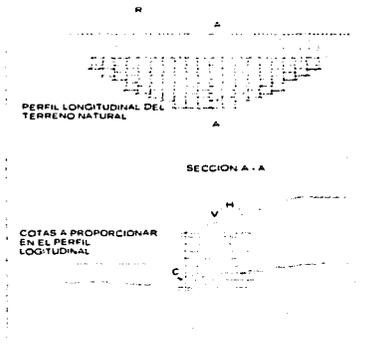
1. Cotas de coronación de muro o datos necesarios para obtenerlas. Por ejemplo, si va una carretera en coronación del talud, rasante, distancia del muro al eje del camino o referencia, peraltes a tener en cuenta y tipo del talud.



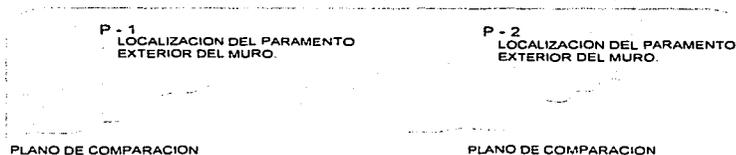
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



- 2 Perfil longitudinal del terreno por el paramento del muro, en el que se reflejará también el longitudinal de la rasante de la plataforma superior (R).



- 3.- Perfiles transversales al muro para definir el empotramiento necesario.

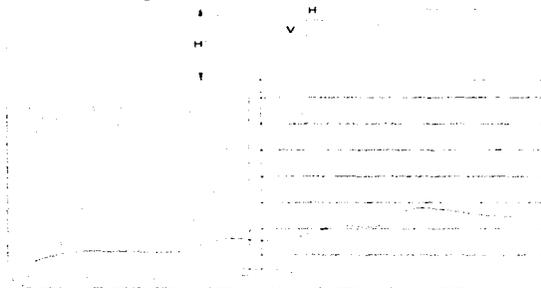


TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

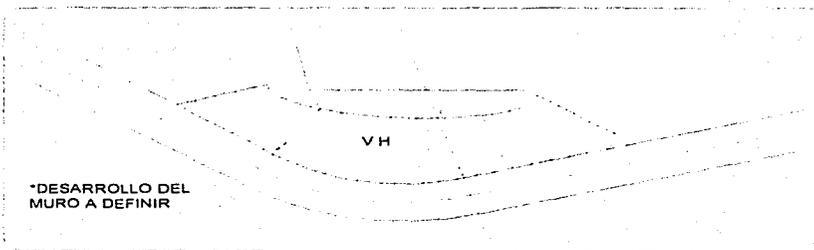


4 - Sección tipo con indicación de la altura y tipo del talud (2:1, 3:2, etc.).

TALUD A DEFINIR



5.- Planta del trazo de muro.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



6. Si el muro debe ir apoyado en el terraplén definir el límite máximo de localización, el talud a considerar en el relleno y los datos de los puntos (1) y (4), no siendo necesarios evidentemente los (2) y (3)



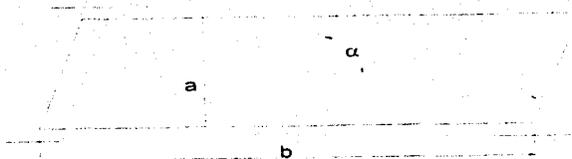
7. Sobrecargas necesarias de diseño en la plataforma, ya sean sobrecargas uniformes o puntuales. Si la plataforma es una calzada de autopista o carretera y salvo indicación en contrario se toman  $1.2 \text{ ton/m}^2$ .
8. Capacidad de carga del terreno.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



### Estribo de puente

1. Geometría en planta del tablero y localización de los paramentos de los estribos, ancho del tablero, esviaje, etc. Cadenamiento del eje de los apoyos o de paramento.



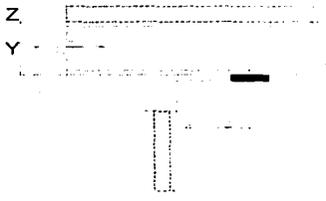
2. Posibilidad de la forma de las aletas.





- 3 Cotas de apoyo de las traves
- 4 Definición geométrica del tablero

- Peralte de la trabe (y)
- Peralte de la losa de compresión (z)
- El número de traves y su separación entre ejes



- 5 - Longitudinales del terreno natural a lo largo de estribo y aletas o la cota de la rasante.

(N)

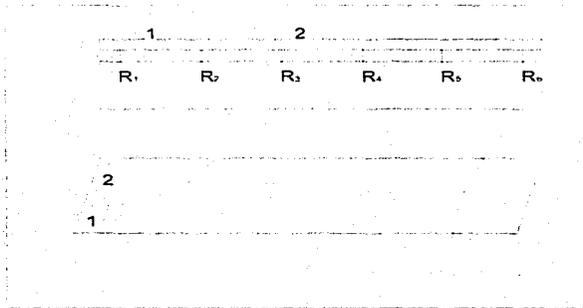
(N) FONDO DE CUNETETA INTERIOR.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



- 6 - Talud de relleno de proyecto
- 7 - Perfiles transversales perpendiculares al paramento.
- 8 - Sobrecargas del tablero según las siguientes hipótesis:



- a. Reacción por ml. de estribo debido a peso propio.
- b. Reacción por ml. debido a cargas muertas.
- c. Diferentes reacciones de las vigas ( $R_1$ ,  $R_2$  ... etc.) en la hipótesis (1) del croquis, incluyendo sobrecarga de uso.
- d. Diferentes reacciones de las vigas ( $R_1$ ,  $R_2$  ... etc.) en la hipótesis (2). Incluyendo sobrecarga de uso.
- e. Los apartados anteriores pueden sustituirse por la reacción media entre la reacción máxima y la reacción en el centro por ml. Calculando el cargadero como trabe sobre medio elástico haciendo la hipótesis de coeficiente de balasto más adecuada al relleno que se va a emplear.
- f. Reacción horizontal por ml. debida a frenado, fluencia, etc.
- g. Carga viva y carga muerta, de reacciones vertical y horizontal
- h. capacidad de carga del terreno.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



## MUROS INUNDABLES

Tanto en el caso de muros de contención, como de estribos de puentes, si pueden ser inundados, se debe especificar si es agua de mar o especialmente agresiva, o bien agua dulce, y proporcionar la cota de máxima avenida indicando si es anual, centenaria, etc.

Salvo datos en contra consideraremos un posible desnivel hidrostático de 1 metro en el interior y exterior del macizo de tierra armada, en caso de posibilidad de descenso rápido de agua.

En todas las obras será necesario un informe geotécnico que en una primera instancia ayude a determinar si cabe la posibilidad de algún problema de estabilidad externa que haga necesario un estudio más profundo por parte del contratista.

### V.2. REQUISITOS MÍNIMOS PARA DESARROLLAR UN PROYECTO DE TIERRA ARMADA

#### Tipo de organización

La ejecución de estructuras de tierra armada debe ser organizada como una obra de movimiento de tierra.

El rendimiento en el montaje del paramento y la colocación de las armaduras depende muy directamente de una buena organización del movimiento de tierras.

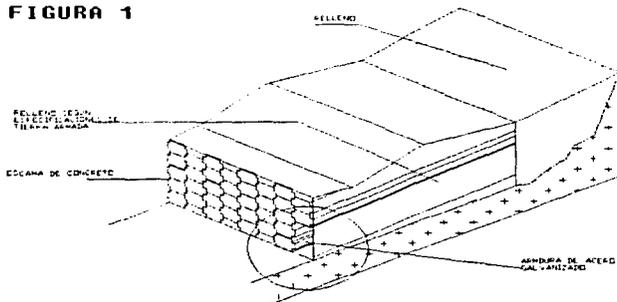
El espesor de las tongadas es de 37.5 cm. y el volumen de cada una de ellas viene determinado por la longitud del muro y la longitud de las armaduras.

En el caso de existir terraplén de acceso y/o derrame en el lado opuesto del paramento, habrá que sumarlo al volumen del macizo armado, sin que dicho incremento de tierras deba necesariamente cumplir las condiciones específicas impuestas por los macizos de tierra armada figura 1.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



FIGURA 1



VISTA GENERAL DE UN MURO DE TIERRA ARMADA

### Estimación del equipo necesario para el montaje

El equipo humano que estimamos necesario es:

- 1 Jefe de equipo o similar
- 1 oficial carpintero, albañil o similar
- 3 o 4 peones

### Elementos necesarios suministrados por Tierra Armada, SA.

Además de todos los elementos prefabricados que constituyen la estructura de tierra armada y que se suministran a obra sobre camiones, Tierra Armada, SA. Facilitará el siguiente material de montaje.

- Eslinga para descarga de escamas Fig. V.2.1.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

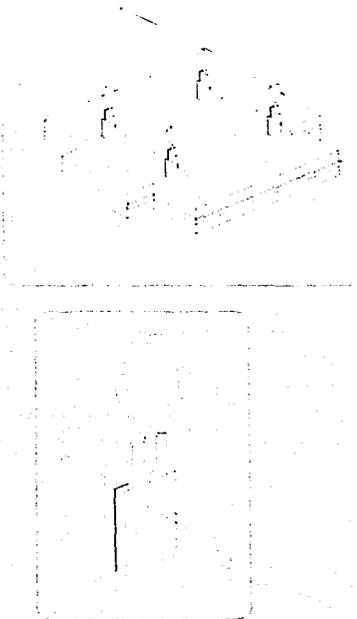


Fig. V.2.1. Eslinga para descarga.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



- Eslinga de montaje con anillo especial de enganche a la grúa Fig. V.2.2.

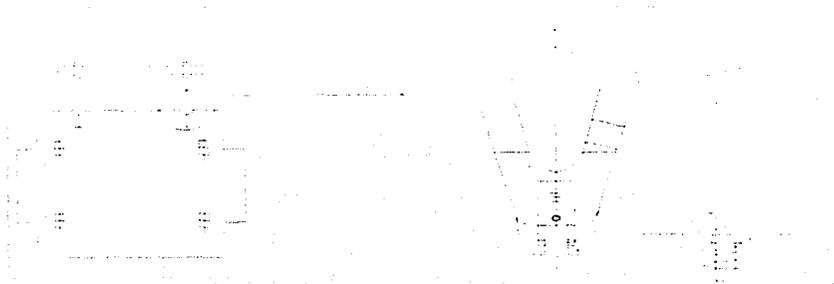


Fig. V.2.2 Plantilla de galibo

- Plantilla de galibo Fig. V.2.3.



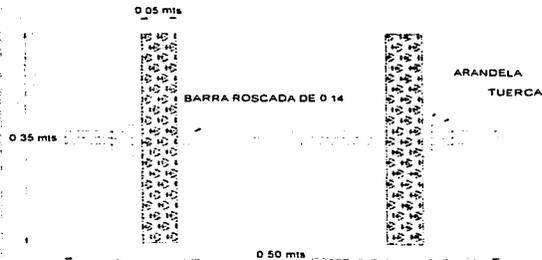
Fig. V.2.3 Plantilla de galibo

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



### EQUIPO MECÁNICO Y ACCESORIOS A DISPONER POR EL CONTRATISTA

- Una pequeña grúa móvil de 2 ton. De potencia
- Gatos para rigidización de *escamas* durante el montaje Fig. V.2.4

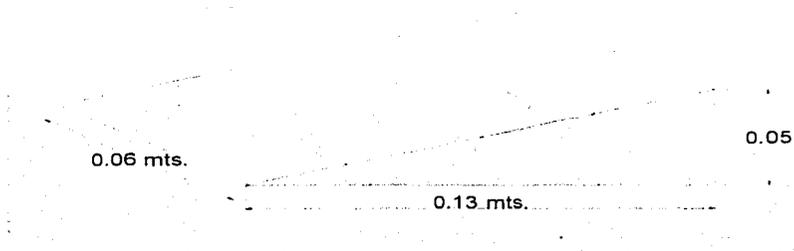


0.20 mts.

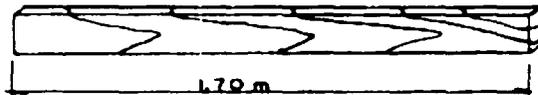
The diagram shows a square frame with a diagonal cross-brace. The side length of the square is 0.20 mts.



➤ Cuñas de madera Fig. V.2.5



- Llaves fijas del 20
- Barras de uña
- Regla metálica de 2.5 a 3 m.
- Nivel y plomada
- Madera para apuntalar la primera fila de escamas
- Largueros de madera para el acopio de escamas Fig. V.2.6





### Rendimiento

Con los equipos que hemos señalado se deben realizar todas las operaciones necesarias de descarga, acopio, montaje, reglaje de escamas y colocación de las armaduras.

Un rendimiento normal de montaje, en condiciones aceptables de acceso a la obra y de la longitud de la misma, puede cifrarse entre 40 y 50 m<sup>2</sup>/día de paramento terminado, una vez finalizada la colocación de la primera fila que es, la más laboriosa

### Material de relleno

Antes del comienzo de la obra, es necesario enviar a Tierra Armada, S.A. un saco de 50 Kg. Del material que se piensa utilizar en el relleno armado de la estructura, con el fin de proceder su ensayo y aprobación.

Además de las especificaciones técnicas generales de terraplenes y rellenos, las condiciones que deberá cumplir el material de relleno para su uso en los macizos de tierra armada con armaduras especiales de alta adherencia serán las siguientes:

### Condiciones Mecánicas

- a) El tamaño máximo del material de relleno no será mayor de 250 mm.
- b) El material de relleno no deberá tener más de 15% de finos que pasen por la malla 200 (80 micras).
- c) Si se tuviera el caso de que el material de relleno no cumpliera con la condición mencionada en el inciso 'b', se tendrá que cumplir con los siguientes requisitos.

1. El porcentaje de partículas menores a 15 micras será de un máximo de 10%. Determinado por la prueba de velocidad de sedimentación.

2. Si el porcentaje de partículas menores a 15 micras está comprendido en el rango de 10% a 20%, el material puede emplearse siempre y cuando el ángulo de fricción interna real sea mayor a 25 grados

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



### CONDICIONES ELECTRO-QUÍMICAS

Los terrenos serán válidos para utilizar en rellenos armados cuando:

- A. La actividad en iones hidrógeno o PH del material de relleno debe estar comprendido entre los valores de 5 a 10.
- B. Resistividad eléctrica (medida sobre celda normalizada de tierra armada)
  - Para obras fuera de agua (en seco): Mayor de 1,000 ohms por centímetro.
  - Para obras dentro de agua (inundables): Mayor de 3,000 ohms por centímetro.
- C. Contenido de sales solubles

Se determinará en los materiales con resistividad comprendida entre 1,000 y 5,000 ohms por centímetro. Y para los materiales de origen industrial, los cuales se podrán utilizar si cumplen con las siguientes condiciones.

- Para obras en seco, el contenido de cloruros (CL) debe ser menor a 200 Mg/Kg. Y el contenido de sulfatos menor de 1,000 Mg/Kg.
- Para obras inundables, el contenido de cloruros debe ser menor a 100 Mg/Kg. Y el contenido de sulfatos menor a 500 Mg/Kg En algunos casos se deberá estudiar el contenido de sulfuros de materia orgánica, así mismo su actividad biológica en función al origen del material y de la obra.

### DESCARGA Y ACOPIO DE LOS ELEMENTOS PREFABRICADOS

Es muy aconsejable disponer de un acopio de elementos prefabricados mínimo para 8-10 días de montaje, en previsión de posibles inconvenientes derivados fundamentalmente del transporte.

### ARMADURAS

Las armaduras llegarán a obra generalmente en camiones de gran tonelaje (25 t) en paquetes de 50 a 75 unidades, con un peso aproximado de 1.5 ton.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Se descargarán con ayuda de una grúa y los paquetes de las armaduras de más de 6 m. De longitud se deberán descargar y manipuladas con ayuda de un perfil.

En general es necesario evitar doblar las armaduras para no dañar el galvanizado del acero.

En cuanto al acopio de las armaduras, es muy interesante, para evitar posteriores errores, y facilitar el montaje, almacenarlas por longitudes, con una tabilla que indique la dimensión y tipo de cada acoplo Fig. V 2.7



Fig. V.2.7

Las armaduras no deben colocarse directamente sobre el suelo, sino sobre madera para evitar el contacto con el agua, sobre todo cuando el periodo de almacenamiento pueda ser prolongado.

La tortillería debe almacenarse en local cerrado para evitar su pérdida. No se pueden emplear otros tornillos que los suministrados por Tierra Armada, S.A. siendo especialmente peligroso utilizar tornillos comerciales sin autorización expresa de Tierra Armada S.A.



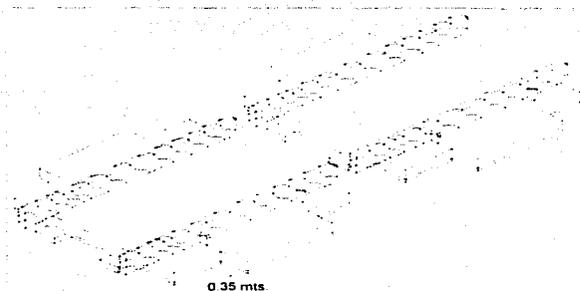
## ESCAMAS

Las escamas prefabricadas de concreto llegarán a obra en trailers de gran tonelaje (25 ton). por lo que el acceso a obra deberá ser el adecuado.

Tanto el transporte como el almacenaje se hace con las escamas en posición horizontal y los arranques hacia arriba. La descarga y colocación de las escamas en el acopio se realiza con ayuda de estlingas especiales de descarga.

El acopio se realiza según el croquis de la Fig. V.2.8

Las pilas no deberán tener, en altura, más de 6 escamas de concreto.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



0.15 mts.

#### ANCLAS MIRANDO HACIA EL MISMO LADO

Fig. V.2.8

Los arranques no deben doblarse en ningún caso, apoyando unas sobre otras.

Las piezas de madera necesarias para el almacenaje en obra de las escamas, serán por cuenta del cliente. (Secciones de polín de 4" x 4" x 30 cm.), y se requerirán dos piezas por metro cuadrado de paramento.

La escama inferior de cada pila debe de ser protegida al contacto con el suelo.

Las escamas de la misma pila deben ser separadas unas de otras por medio de polines (4" x 4" x 30 cm). Durante estas operaciones se tendrá mucho cuidado de no rayar o manchar la cara visible del paramento y de no doblar los arranques de la escama inferior.

#### JUNTAS

Las escamas quedan separadas por juntas que dan la holgura necesaria para soportar los asentamientos diferenciales que pudiesen ocurrir.

Las juntas verticales son de espuma de poliuretano de células-abiertas y su función es la de permitir el paso del agua, impidiendo el de los finos del material de relleno. Su sección es de 4 x 4 cm. y la longitud aproximada de cada tira es de 2m.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



En los casos en que la estructura de tierra armada pueda permanecer inundada temporal o permanentemente se emplearán juntas verticales tipo "textil no tejido" pegadas a las escamas, en sustitución de las juntas de poliuretano. La disposición vendrá definida en los planos de proyecto

Las juntas horizontales entre escamas son unas tiras de corcho aglomerado con resina epoxi, que permiten un asiento flexible entre las escamas Fig. V.2.9.

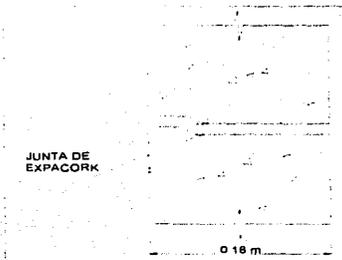


Fig. V.2.9.

En principio y salvo indicación contraria se emplearán juntas de 6 cm. de anchura bajo las escamas tipo 18 y de 8 cm. Bajo las escamas tipo 18F Fig. V.2.10.

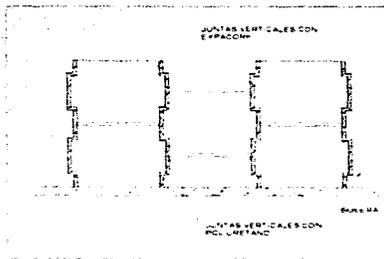


Fig. V.2.10

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



### V. 3 OPERACIONES DE MONTAJE

#### Descripción de los elementos

Un macizo de tierra armada esta constituido por:

- Una piel de escamas de concreto
- Armaduras de alta adherencia, colocadas en capas horizontales
- Rellenos friccionantes

a) Escamas de concreto Fig. V.3.1

Las escamas del paramento de concreto prefabricado forman una-cuadrilla de 1.50 m x 1.50 m dispuestas en forma cruciforme y montadas por filas horizontales. Están ensambladas las unas con la otras, por un sistema de "Barra-Tubo" que van ahogadas en el concreto (escama).

Están dotadas de: Arranques de acero galvanizado, en los cuales se atornillan las armaduras (un tornillo por arranque). Insertos de izaje, que permiten la presentación de la escama en posición vertical durante su colocación.

Las filas inferior y superior de los macizos llevan escamas de media altura (medias escamas tipo "C").

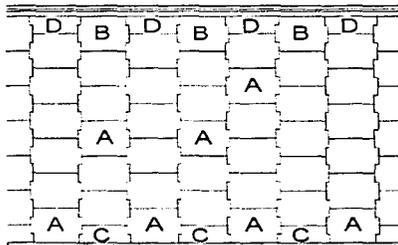


Fig. V.3.1

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



### a1) Superficie de los paramentos

La superficie de paramentos de tierra armada se obtendrá tomando como base, la superficie unitaria de las siguientes escamas

Escamas enteras tipo:	A Y B	= 2.25 m <sup>2</sup>
Escamas medias tipo:	C Y D	= 1.125 m <sup>2</sup>
	SP1	= 0.80 m <sup>2</sup>
	SP2	= 1.45 m <sup>2</sup>
	SF3	= 1.75 m <sup>2</sup>
	SF4	= 2.00 m <sup>2</sup>
	SF5	= 2.50 m <sup>2</sup>
	SF6	= 2.75 m <sup>2</sup>

Todas las escamas serán de concreto armado, con una resistencia de  $f'c = 250 \text{ Kg./cm}^2$ .

### b) Juntas entre las escamas

Las juntas horizontales son de corcho aglomerado por una resina insensible al agua, o bien por tacones de neopreno sólido. Las juntas verticales son de poliuretano de sección cuadrada 4 cm. x 4 cm. En las obras marítimas o fluviales, las cuales son sometidas a cambios rápidos de tirante de agua, se adiciona una protección de un geotextil de 50 cm. de ancho, que va adherido en la parte posterior de la escama, en el caso de este tipo de junta será especificada en los planos y en el proyecto.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN





Es fundamental que su ejecución sea extremadamente cuidadosa y con una buena horizontalidad en sentido longitudinal y transversal. Es la base de un buen montaje posterior Fig. V.3.3.

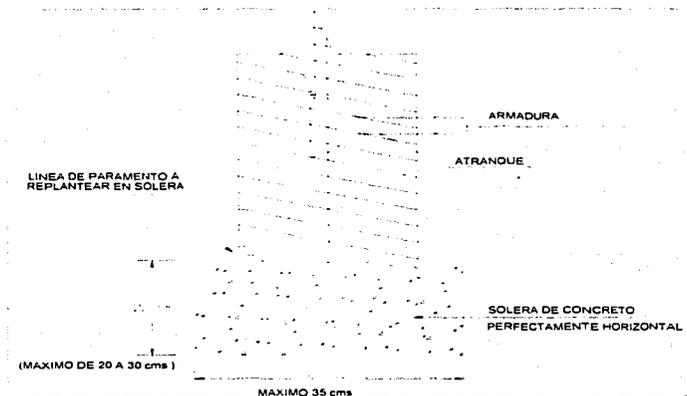


Fig. V.3.3

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Sobre la solera se deberá replantear la línea exterior del paramento, pintándose la alineación sobre la superficie de la solera, no dejándose nunca una cuerda como referencia.

Cuando en el proyecto figuren diferentes escalones de solera, se construirán según el croquis de la Fig. V.3.4.

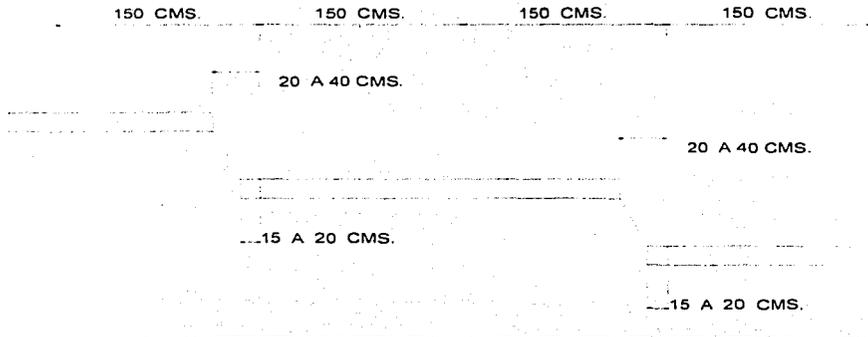


Fig. V.3.4.

Las primeras escamas (fila inferior) se apoyan sobre la solera de concreto simple, usualmente de 100 a 150 Kg./cm<sup>3</sup> sin armado. Esta solera deberá tener como mínimo 0.35 m de ancho y 0.10 m de altura.

En el momento en que la solera este lista y la estructura replanteada sobre ella, se deberá avisar a Tierra Armada, S.A. con una antelación de 48 hrs. para que un supervisor de montaje acuda a obra, para dirigir el montaje de las primeras escamas e instruya al personal de la obra.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



### Colocación de la primera fila de escamas

Una vez marcado sobre la solera el punto inicial de replanteo longitudinal, que normalmente viene definido en el proyecto, se procede al montaje de las primeras dos medias escamas.

El orden de operación es:

- 1.- Colocación de escama 1
- 2.- Colocación de escama 2
- 3.- Comprobación con regla de galibo Fig. V.3.5.
- 4.- Verificación de la horizontalidad con regla metálica Fig. V.3.5.

VERIFICACION DE NIVEL

VERIFICACION DE ESPACIO DE 1.50 MTS  
NIVEL

REGLA L = 4.00 MTS

GALIBO

SOLERA

Fig. V.3.5

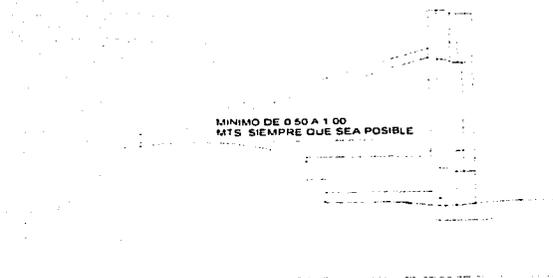
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



5 - Aplomado de las escamas (con plomada nunca con nivel) Fig. V.3.6.



6 - Apuntalamiento Fig. V.3.7.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Fig. V.3.7

Seguidamente se continúa el montaje en el siguiente orden:

- 1.- Colocación de la escama 3 Fig. V.3.8

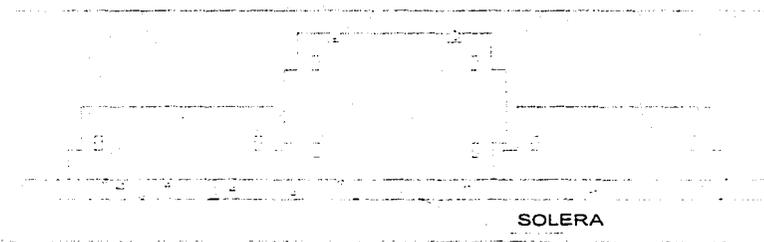


Fig. V.3.8

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



- 2- Horizontalidad y aplomado de la escama 3 e inmediato apuntalado.
- 3- Verificación de las juntas horizontales, deben quedar de 2 cm.
- 4- Colocación de la escama media 4 con los criterios expuestos en el anterior orden.
- 5- Colocación de la escama 5 Fig. V.3.9



Fig. V.3.9

- 6- Verificación de galibo entre las escamas 3 y 5.
- 7.- Horizontalidad y aplome de la escama 5.
- 8- Verificación de las juntas horizontales (2 cm.).
- 9.- Verificación con regla y nivel de la horizontalidad de las escamas 3 y 5.
10. Apuntalamiento de la escama 5.
- 11.- Colocación por el trasdos de las juntas verticales de poliuretano.
- 12.- Colocación de los gatos en la escama Fig. V.3.10

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



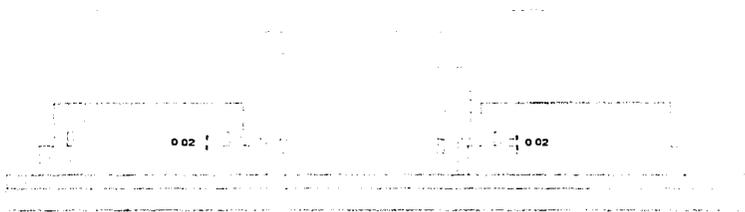
Fig. V.3.10

- 13.- Repetición de las operaciones con las escamas sucesivas hasta completar la primera fila de ellas.
- 14.- Comprobación de que la alineación es correcta.

El aplomado de las escamas se hace siempre con plomada, nunca con nivel, dejando un desplome hacia el interior de 1 cm. en las escarías enteras y 0.5 cm. en las escamas medias. Este desplome será recuperado cuando se extienda y compacten las tierras de relleno. En algunos casos y dependiendo del material de relleno el desplome indicado se deberá corregir tras las primeras comprobaciones de verticalidad que se efectúen.

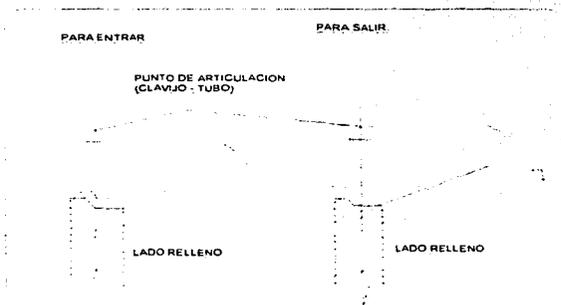
Las correcciones de horizontalidad y la junta de 2 cm. de las escamas se realizarán mediante el empleo de cunas de madera Fig. V.3.11.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



.Fig. V.3.11. Cuñas en caso de ser necesarias para nivelar o conseguir los 2 cm de la Junta

Los pequeños desplazamientos que haya que dar a las escamas una vez posicionadas sobre la solera o sobre otras escamas se realizará con la utilización de barras de uña Fig. V.3.12.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



La aplicación de la barra de uña no debe hacerse sobre las articulaciones en hombros de la escama sino en la base de la misma.

#### Terraplenado y colocación de las armaduras

Una vez colocadas y apuntaladas las escamas de la primera fila y rigidizadas con los gatos necesarios, se procederá al terraplenado y compactado. De acuerdo con los niveles que se indican en la Fig. V.3.13.



Fig. V.3.13

Una vez terraplenado el nivel 1 se procederá al compactado de esta tongada. El acabado de la tongada será el normal de cualquier terraplén para que las armaduras apoyen completamente sobre el relleno, cuidando de que esto ocurra igualmente en la zona de unión del arranque con la armadura.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Se procede ahora a la colocación de las armaduras correspondientes a este nivel Fig V.3.14

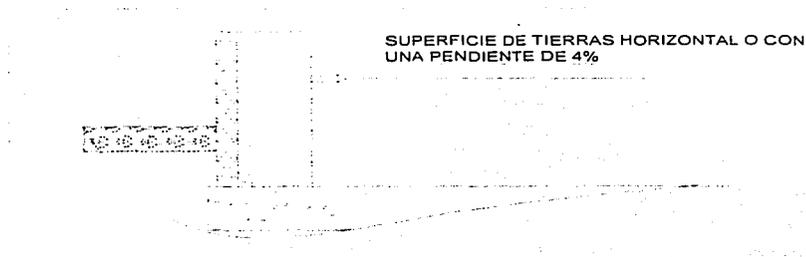


Fig. V.3.14

Las armaduras se colocan perpendiculares al paramento del muro y se unen a los arranques mediante los tornillos y tuercas correspondientes ( $\frac{1}{2}$ " x  $1\frac{1}{2}$ ".).

Colocando este primer nivel de armaduras, se extiende y compacta la tongada 2.

Se indican una serie de sugerencias para facilitar la realización del terraplenado de los macizos de tierra armada y que su ejecución no interfiera con la calidad del montaje del paramento.

La forma ideal para el extendido de las tierras será:

Extender en primer lugar en el centro del macizo armado, avanzar posteriormente hacia la zona final de las armaduras y finalmente por franjas, hacia el paramento.

La marcha de extendido debe ser siempre paralela al paramento en todas sus fases. Nunca debe extenderse la tierra perpendicularmente a las escamas y aún menos avanzando hacia ellas. Fig. V.3.15

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Fig. V.3.15

Si el terraplén se hace con máquinas de orugas, éstas no deben apoyarse directamente sobre las armaduras para no dañar su galvanizado.

El compactado, en cuanto a su calidad, no es una exigencia intrínseca de la tierra armada y viene determinado por la utilización de la estructura que irá sobre el macizo armado, cuyas exigencias de limitación de asentamientos son siempre superiores a las necesarias para el funcionamiento mecánico de la tierra armada. Habitualmente se suele utilizar el mismo grado de compactación de los terraplenes de la obra de que se trate.

La única limitación que impone la tierra armada es la relativa al compactador a utilizar en el metro y medio más próximo al paramento, franja en la que no se deben utilizar grandes compactadores dinámicos que pueden provocar ligeros desórdenes en las escamas, fundamentalmente desplomes. En esta zona es recomendable emplear bandejas vibrantes o rodillos vibrantes de alrededor de 7 Kg/cm. de carga estática.

La humedad de las tierras, sobre todo en suelos finos, no debe ser superior a la del óptimo proctor ya que durante la compactación puede provocarse el desplome de las escamas.



La tongada que se deja al final de la jornada es fundamental darle pendiente hacia la parte posterior del macizo, al igual que longitudinalmente. Con objeto de evacuar el agua en caso de lluvias intensas. Si a pesar de todas las precauciones, se saturase esta capa, deberá escarificarse y retirarse, o bien iniciarse el trabajo con una capa de material bien drenante.

#### COLOCACIÓN DE LA SEGUNDA Y SUCESIVAS FILAS DE ESCAMAS

Una vez compactadas las tierras del nivel 2 Fig. V.3.16, se verificará de nuevo la verticalidad de las escamas enteras, comprobando si ha habido desplome, midiéndolo en su caso, como consecuencia del compactado de las tierras.

La segunda fila de escamas se montará, teniendo en cuenta el desplome producido.

El aplomado de las escamas de esta segunda fila se efectuará igualmente, con plomada, tirándola desde la parte superior de las escamas hasta la inferior de la fila precedente.

Las fases a seguir en la colocación de la segunda fila de escamas son las que siguen: Fig. V.3.16

- 1.- Verificación del galbo entre las escamas ya colocadas con la regla correspondiente.
- 2.- Colocación de la junta horizontal de expacork.
- 3.- Colocación de la escama.
- 4.- Nivelación y aplomado. Utilizando cuñas si fuera necesario.
- 5.- Colocación de la junta vertical de poliuretano por el paramento interior.
- 6.- Colocación de gatos.
- 7.- Comprobación de que la alineación es correcta.
- 8.- Continuar extendiendo y compactando las sucesivas tongadas y colocando las armaduras en los niveles correspondientes.

El resto del montaje se continúa con las mismas prescripciones que las señaladas para la segunda fila de escamas, tirando siempre la plomada hasta la parte visible más baja del muro.

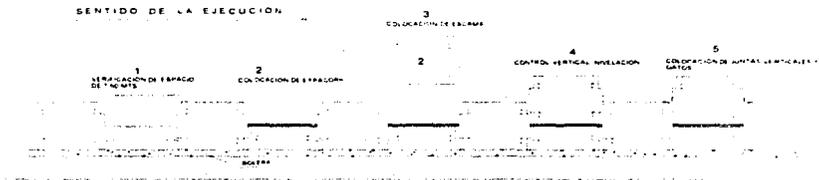
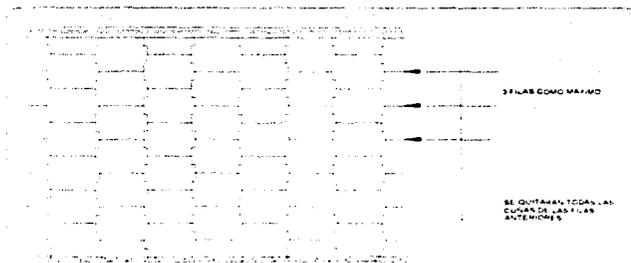


Fig. V.3.16

#### Acuñado de las escamas

En los casos necesarios para nivelar y aplomar las escama's, se utilizan cuñas de madera.

Las cuñas se colocarán siempre en las crucetas de las escamas sobre la cara exterior del paramento Fig. V.3.17





Durante el montaje del muro las cuñas no deben permanecer colocadas en más de tres filas, eliminando sistemáticamente las existentes en filas inferiores.

Concluido el montaje del muro no debe quedar ninguna cuña en el paramento.

La no extracción de las cuñas puede llegar a ocasionar, en caso de asientos del muro, la rotura de las esquinas de las escamas. A excepción de en la solera, jamás deben ponerse cuñas en el interior del paramento Fig V 3 17

### Empotramiento de la estructura

El apuntalamiento de las escamas inferiores se puede eliminar una vez que las tongadas compactadas alcancen una altura de 1.50 metros es decir, cuando ha quedado superada la escama entera del arranque.

El comienzo de relleno del empotramiento debe hacerse cuando el macizo armado alcance los tres metros a efectos de poder aplomar la escama superior con su correspondiente inferior figuras Fig. V 3 18 y Fig V 3 19

RELLENO COMPACTADO,

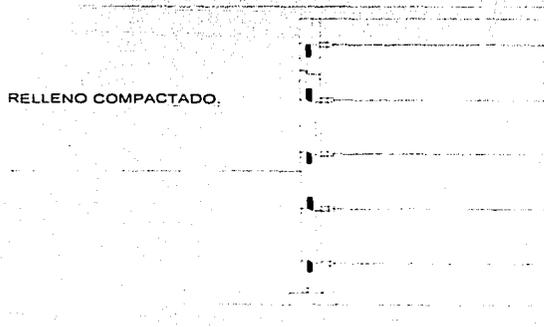


Fig. V.3.18

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



RELLENO COMPACTADO.



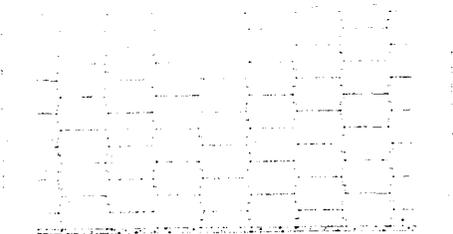
Fig. V.3.19

MUROS TIPO DE LA TIERRA ARMADA

MURO SOBRE TERRENO HORIZONTAL

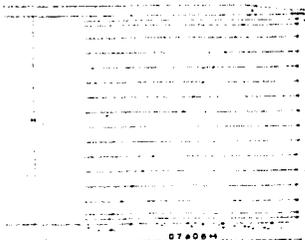


TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



MURO SOBRE TALUD

ARMADURAS DE ACERO  
GALVANIZADO



PARAMENTO CON  
ESCAMAS DE CONCRETO

1.2813 m

0.7608 m

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
"ARAGÓN"



MURO SOBRE ROCA SANA

07.00 H

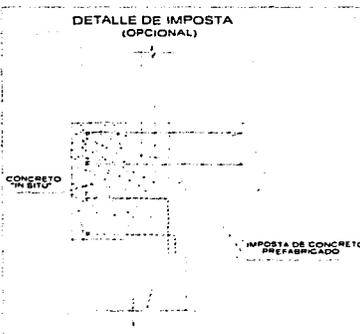
IMPOSTA  
OPCIONAL



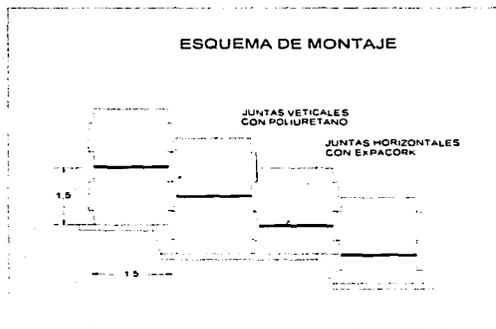
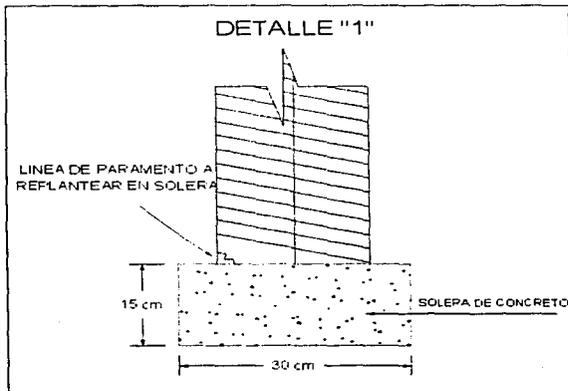
DETALLE

04.00 H

DETALLE DE IMPOSTA  
(OPCIONAL)



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
"ARAGÓN"



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## VI. CONCLUSIONES Y BIBLIOGRAFÍA



## CONCLUSIONES

Para desarrollar un proyecto de tierra armada se recomienda que desde los estudios preliminares se tenga en cuenta que este sistema se adapta a todo tipo de suelo independientemente de la estratigrafía que se presente sin embargo se deberán realizar todos los estudios de mecánica de suelos (pruebas físicas y mecánicas) convencionales para conocer el tipo de material que se tiene para considerar su posible uso debido a que este método está diseñado principalmente para los suelos de tipo friccionante.

Para poder calcular debidamente una estructura de este tipo se tendrá que tenerse especial cuidado en el tipo de estratigrafía de la zona. El subsuelo donde se ubicará la obra de tierra armada deberá definirse como un suelo de la zona de Lomas, Transición, Lago.

Definiendo si se trata de roca (tipo) o si se van presentando en forma gradual estratos de limos arenosos o de arcillas comprensibles. Así como la capacidad de carga del estrato resistente obtenida de las pruebas de laboratorio.

Uno de los puntos importantes para decidir sobre el uso de la tierra armada es el del análisis de estabilidad del suelo en el que se apoyará la estructura, debido a que la capacidad de carga gobierna en el comportamiento de las rampas.

Para el uso de la tierra armada bajo condiciones de zona de lago y en general de todas las zonas se deberán efectuar por lo menos tres tipos de análisis:

1. La estabilidad a largo plazo del talud del macizo que soportará la rampa de tierra armada.
2. Los asentamientos a largo plazo que se generarán por la presencia de los estratos arcillosos blandos del subsuelo.

En el centro del país deberá tenerse presente el estudio de los asentamientos que puedan presentarse en el lugar donde se pretende construir, sobre todo cuanto debe existir continuidad con



otro tipo de estructuras más rígidas, no olvidando que este estudio es igualmente válido para la construcción de terraplenes y rampas con procedimientos constructivos convencionales

3. La capacidad de carga del subsuelo de apoyo bajo la acción de la carga del terraplén.

Por otra parte el análisis de asentamientos se efectuara basado en la teoría de consolidación considerando la compresibilidad propia de los estratos críticos, obteniéndose un asentamiento máximo.

El análisis de la capacidad de carga del terraplén se lleva a cabo empleando la teoría de capacidad de carga de Terzaghi y considerando que la capa más resistente produce un efecto de distribución de la carga.

El uso de la tierra armada en la zona del Lago y en general en Zonas muy compresibles debe revisarse cuidadosamente, debido a los asentamientos que pueden presentarse sobre todo cuando debe existir continuidad con otro tipo de estructuras más rígidas. Desde luego esta recomendación también es válida para terraplenes y rampas de tierra no armada.

El uso de la tierra armada nos da la ventaja de por tener paramentos acordes con la arquitectura que se tiene en el lugar donde se pretende construir esta estructura.

Como se puede apreciar la tierra armada tiene grandes ventajas sobre los métodos convencionales para la realización de muros y terraplenes tales como:

- a) Facilidad de cimentación sobre cualquier tipo de terreno (eliminación de cimentaciones profundas siempre costosas y de realización delicada en zonas urbanas).
- b) Rapidez y comodidad de ejecución en espacios reducidos (se trabaja siempre por el interior de los macizos de tierra armada sin andamios y encofrados exteriores).
- c) Estética de los paramentos prefabricados de las escamas de concreto que puedan adaptarse a una decoración arquitectónica.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Dentro de la aplicación de la tierra armada tenemos que es un procedimiento constructivo en el cual el montaje es una operación muy simple que se realiza por el contratista elegido por el cliente

La simplicidad y la rapidez de construcción han sido factores en el desarrollo de la tierra armada. Las placas que forman el paramento se suponen entre sí. Esta forma de montaje no necesita de ademes ni apuntalamiento. La puesta en obra de las armaduras y de tierra, así como su compactación, se realiza por capas sucesivas, como las tongadas de un terraplén tradicional, utilizando la maquinaria habitual de movimiento de tierras.

Para la manipulación de las placas se utiliza una grúa ligera.

Antes de iniciar los trabajos, la sociedad local de explotación de la tierra armada facilita al contratista encargado de los trabajos y al maestro de obras encargado de la supervisión todos los consejos necesarios para la correcta ejecución del montaje. Las tierras de relleno son objeto de especificaciones claras y pruebas de control bien definidos.

Personal especialmente formado ayudan al contratista en la organización de los trabajos necesarios y en la formación de equipos durante el comienzo de las operaciones de montaje. Posteriormente y durante la ejecución de los trabajos, pueden intervenir en la obra, por su propia iniciativa o a simple requerimiento del contratista o del maestro de las obras.

Este conjunto de prestaciones ofrecido por cada una de las sociedades, permite realizar las obras económicamente y en plazos muy cortos, con todas las garantías de calidad y durabilidad exigidas por este tipo de obras

Otro aspecto que vale la pena mencionar en este procedimiento constructivo es que reduce los tiempos de ejecución comparado con soluciones tradicionales de muros y rellenos debido a lo mencionado en un inicio.

En cuanto a las condiciones del material de relleno es recomendable tener en cuenta aspectos tales como que el tamaño máximo sea de 1 pulgada y solo se aceptara hasta un 15% de material fino, el material tendrá humedad óptima para su compactado y bajo las recomendaciones que se dieron o las especificaciones que se obtengan de la sociedad de tierra armada.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Por lo antes expuesto el uso de la tierra armada se ha venido desarrollando rápidamente en el mundo. en México su aplicación se esta dando principalmente en la aplicación de estribos para puentes

Para obtener el mejor resultado de este sistema es conveniente que se tenga un buen estudio del drenaje que se tendrá en la estructura debido a que este esta muy relacionado con la fricción que se desarrolla entre las partículas de suelo del material de relleno y el propio material.

Esto debido a que generalmente en la tierra armada se utiliza material de tipo friccionante obteniendo se así una condición drenada.

Si se utiliza este tipo de material friccionante tal como la arena se tendrá una estructura de tierra armada que trabajara como un dren.

En la práctica hay veces se tiene que utilizar el material de la localidad, el cual resulta con un alto porcentaje de finos, en este caso se tendrá que evitar a toda costa la saturación del material de relleno con un buen drenaje por abajo y detrás de la estructura.

Y si se tienen los recursos necesarios para poder tener un nivel medio en cuanto al material de relleno seria conveniente mezclar el material existente en la localidad y material limpio para tener un equilibrio del material y evitar gastos innecesarios en la implementación de drenes.

Para tener el máximo de eficiencia en el desarrollo de la tierra armada es necesario contar con una supervisión con la capacidad técnica para detectar los posibles errores en que el encargado de la obra incurra desde la colocación de la solera hasta el compactado de las tortugas.

Otro aspecto que se debe tener especial cuidado es tener correctamente suministrado las escamas para no tener retrasos en la obra, hay que recordar que estas son suministradas únicamente por las sociedades de tierra armada locales en México una de las principales suministradoras de las escamas es FREYSSINET, existiendo otras empresas que tienen concesión para distribuir este producto.

Finalmente, es necesario mencionar que la forma de calcular los factores que afectan a los muros de tierra armada son los mismos que afectan a las estructuras que tienen este mismo fin. En el punto de los métodos de diseño hasta el momento se consideraran los convencionales para su calculo.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



BIBLIOGRAFIA

Mecánica de suelos  
Juárez Badillo  
2000

Norma AASHTO  
Especificaciones Estándar para Puentes Carreteros  
Estados Unidos

Norma P-54-220  
Refuerzo de suelos Obras de suelos reforzado con armaduras o membranas inextensibles.  
Francia 1992

Las obras de Tierra Armada – Recomendaciones Reglas del Arte.  
Ministerio del Transporte de Francia  
1972

Tecnología la construcción  
Baud. G  
Barcelona Ed blome. 1978

Curso Practico de Mecánica de Suelos  
Ceslet J y Sanglerat G  
Ed. Omega 1996

Simposio sobre Geotextiles  
Sociedad Mecánica de Suelos A. C.  
1990

Folleto sobre el Desarrollo Mundial de la Tierra Armada.  
Tierra Armada S A

Manual sobre Relacion de Muros de Contención y Estribos de Puentes Construidos en México.  
Tierra Armada S A

Manual sobre Normas para el Montaje de Obras de Tierra Armada.  
Tierra Armada S A

Pelicula de Proceso Constructivo de la Tierra Armada.  
Tierra Armada S A

Manual sobre Datos Necesarios para la Ejecución del Proyecto de Tierra Armada S.A.  
Tierra Armada S A

Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres  
Carreteras, Ferrocarriles y aeropuertos  
Alfonso Rico y Hemilo del castillo  
Ed. Limusa

Vías de Comunicación  
Ing. Carlos Crespo  
Limusa 2001

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN