

**Universidad del Valle de Guatemala
Facultad de Ciencias y Humanidades
Departamento Ingeniería Civil**

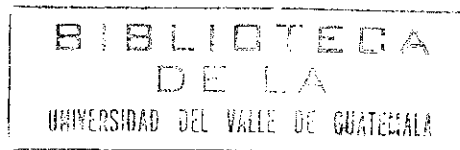
**Estudio de Fricción Entre el Bulbo de Anclajes Pasivos y Cuatro Diferentes Tipos de
Suelos en Guatemala**

FERNANDO RAFAEL CALLEJAS BENITEZ

**Guatemala
2001**

**Universidad del Valle de Guatemala
Facultad de Ciencias y Humanidades
Departamento Ingeniería Civil**

**Estudio de Fricción Entre el Bulbo de Anclajes Pasivos y Cuatro Diferentes Tipos de
Suelos en Guatemala**



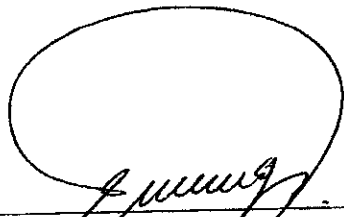
FERNANDO RAFAEL CALLEJAS BENITEZ

**Trabajo de graduación presentado para optar al grado de:
Licenciatura en Ingeniería Civil**

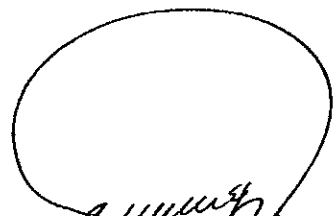
Guatemala

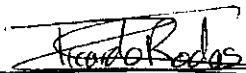
2001

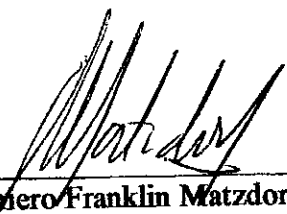
Vo. Bo.

(f) 
Ingeniero Pedro Lemus Dahinten
Asesor

Tribunal

(f) 
Ingeniero Pedro Lemus Dahinten
Asesor

(f) 
Ingeniero Ricardo Emilio Rodas
Jefe de Departamento de Diseño y Proyectos
SWISSBORING OVERSEAS

(f) 
Ingeniero Franklin Matzdorf Monroy
Director, Departamento de Ingeniería Civil
Universidad del Valle de Guatemala

Fecha de aprobación: Mayo de 2001

INDICE

RESUMEN

I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	3
A. Objetivos generales	3
B. Objetivos específicos	3
III. ASPECTOS TEÓRICOS	5
A. Suelo enclavado (Soil nailing)	5
B. Clasificación de las inclusiones	7
C. Elementos que componen el suelo enclavado	8
1. Inclusiones	8
2. Revestimiento	9
D. Ventajas del uso del suelo enclavado	10
E. Desventajas del uso del suelo enclavado	11
F. Aplicaciones del suelo enclavado	11
G. Capacidad resistente	14
H. Ensayos de tracción	16
1. Equipo necesario	17
2. Preparación del equipo a utilizar	17
3. Procedimiento del ensayo de tracción	18
4. Interpretación de los resultados	19

IV. ESTUDIO EXPERIMENTAL	21
A. Tipo de suelo e inclusiones	21
B. Equipo y personal empleado en el ensayo	23
C. Diseño experimental	24
1. Preparación del sistema para el ensayo	24
2. Ensayo de tracción	25
3. Descripción de la prueba	26
D. Resultados de las pruebas de tracción	29
E. Interpretación de los resultados de las pruebas de tracción	42
F. Calculo de la fricción de la inclusión con el suelo	42
V. CONCLUSIONES	45
VI. RECOMENDACIONES	47
VII. BIBLIOGRAFÍA	49

RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo principal determinar la fricción entre el cuerpo de las inclusiones y diferentes tipos de suelos. Con este propósito se realizaron ensayos de tracción para cuatro inclusiones, construidas especialmente con este fin. Así mismo se obtuvo la descripción física de los suelos en los que se construyeron las inclusiones sujeto de este estudio.

Como resultado de estos ensayos de tracción se obtuvieron los valores de carga límite entre el cuerpo de la inclusión y el suelo. También se realizaron los gráficos de tensión de desplazamiento lento crítico, curvas de desplazamiento lento para todas las inclusiones y las curvas de tensión crítica de desplazamiento lento crítico para los cuatro diferentes suelos.

Derivado del análisis de la información obtenida y del análisis de los gráficos se determinó la tracción límite entre el suelo y el cuerpo de la inclusión. Los valores obtenidos de fricción, únicamente representan un parámetro para la optimización del diseño de las inclusiones, y no deben ser tomadas como un valor absoluto que describa el comportamiento entre el suelo y el cuerpo de la inclusión. Cabe mencionar que para este estudio los valores presentados no tienen ningún tipo de factor de seguridad, por lo que si son utilizados en algún cálculo se les debe aplicar dicho factor.

De acuerdo a lo observado en la ejecución y análisis de resultados de la prueba se presentan recomendaciones para la realización de futuros ensayos, resaltando los factores que se deben de tomar en cuenta para mejorar la precisión de la información que se obtiene de la prueba, tales como el diámetro y longitud de la inclusión, y la resistencia de la lechada.

I. INTRODUCCION

La utilización de inclusiones, como en el suelo enclavado (soil nailing), como recurso para la estabilización de suelos y taludes se ha comenzado a popularizar en nuestro país en el transcurso de la década pasada. Esto debido a la versatilidad de aplicaciones y a las ventajas que ofrece respecto a los métodos convencionales de estabilización de suelos (muros de gravedad, muro en voladizo).

El diseño de las inclusiones se relaciona directamente con las propiedades del suelo y la interacción con el. El conocimiento de esta interacción es de gran importancia para la elaboración de un diseño que brinde seguridad y a su vez economía. Una de las propiedades de mayor interés para el diseño es la fricción que se produce entre el cuerpo de la inclusión y el suelo, esta interacción entre el suelo y el cuerpo de las inclusiones es el motivo de este estudio.

El presente estudio determina la fricción entre el cuerpo de una inclusión y cuatro diferentes tipos de suelos, por medio de la realización de una prueba de tracción. La prueba de tracción es la más utilizada para la determinación de la fricción en este tipo de casos, ya que ofrece resultados más confiables.

Este estudio consta de una parte teórica donde se desarrolla el tema de la técnica del suelo enclavado, sus aplicaciones y la prueba de tracción. En la siguiente parte se detalla el procedimiento realizado en la prueba de tracción, resultados obtenidos, los gráficos y finalmente, las conclusiones de este estudio.

II. OBJETIVOS

A. OBJETIVOS GENERALES

Proporcionar información de la interacción entre el suelo y el cuerpo de una inclusión con diferentes tipos de suelos, para la optimización del diseño de esta técnica de refuerzo del suelo.

B. OBJETIVOS ESPECIFICOS

1. Determinar la fricción entre la zona con lechada de una inclusión (nail) y cuatro tipos diferentes de suelos.
2. Determinar la relación que existe entre el tipo de suelo y la fricción con el cuerpo de las inclusiones.
3. Proporcionar una descripción general de la técnica del suelo enclavado.
4. Elaborar gráficos que permitan facilitar y generalizar la comprensión de los valores obtenidos en este estudio.

III. ASPECTOS TEÓRICOS

A. Suelo enclavado (soil nailing)

El suelo enclavado es una técnica para reforzar el suelo in situ. El sistema consiste en una cubierta o revestimiento de concreto lanzado, construido regularmente de arriba hacia abajo y un arreglo de inclusiones (miembros reforzados o “nails”) perforadas o insertadas en una masa de suelo. El suelo enclavado se compone de tres elementos, el suelo in situ, el refuerzo y la cubierta o revestimiento (aunque ésta no siempre se utiliza).

Más específicamente, el procedimiento de construcción se realiza como sigue:

1. Se realiza un corte inicial en el cual el suelo pierde su estabilidad, pero no a tal punto en el que las inclusiones no lo puedan estabilizar.
2. Las cunetas y/o los drenajes horizontales son instalados si es necesario.
3. Inmediatamente después de la excavación, la superficie recientemente expuesta es cubierta con una capa de concreto lanzado.
4. Las barras del refuerzo son instalados en ubicaciones predeterminadas con la longitud e inclinación especificadas, utilizando los métodos de perforación y colocación de lechada apropiados para el suelo en el cual serán construidos.
5. Las inclusiones son pre-esforzadas a un pequeño porcentaje de sus cargas de trabajo, contra unas platinas aseguradas en la capa inicial de concreto lanzado. La carga de pre-esfuerzo usualmente no excede el 20 % de la carga de trabajo.
6. Una segunda capa de concreto lanzado es aplicada. El drenaje vertical debe colocarse antes de realizar el lanzado.
7. El proceso se repite para todos los niveles subsecuentes.

Cuando se les aplica pre-esfuerzo a las inclusiones se efectúa normalmente por medio de gatos hidráulicos, o mediante llave dinamométrica si la cabeza dispone de rosca. La acción se puede ejercer, según los casos, sobre la totalidad de las inclusiones (parte superior) o bien sobre uno o varios de los elementos que componen la masa de suelo enclavada.

La transferencia de los esfuerzos de las inclusiones al terreno se realizará directamente a través de la lechada de inyección, o indirectamente a través de tuberías metálicas, o de otros materiales. El comportamiento de las inclusiones cuando la fuerza exterior actúa sobre la placa de apoyo, depende de las características de rigidez, longitud, inclinación de la inclusión y del terreno.

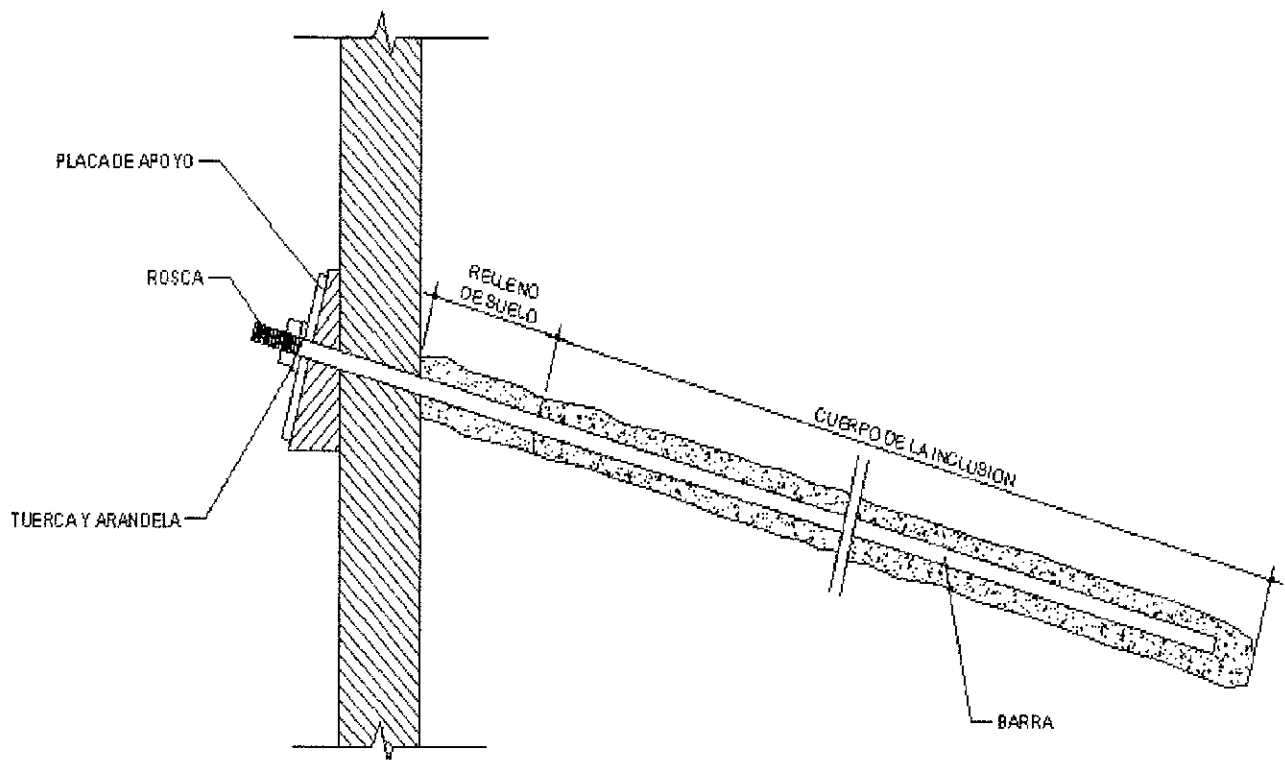


Fig. 1 Detalle típico de suelo enclavado

B. Clasificación de las inclusiones

La disposición de las inclusiones puede efectuarse para actuar durante un tiempo de servicio más o menos prolongado, por lo que cabe distinguir entre:

1. Inclusiones provisionales.
2. Inclusiones permanentes.

Las primeras tienen el carácter de medio auxiliar, y proporcionan las condiciones de estabilidad a la estructura durante el tiempo necesario para disponer otros elementos resistentes que los sustituyan. Las inclusiones permanentes se dimensionan, evidentemente, con mayores coeficientes de seguridad.

Las inclusiones de acero reforzado se pueden clasificar como:

1. Inclusiones clavadas
2. Inclusiones llenadas con lechada
3. Jet grouted nails
4. Inclusiones encapsuladas protegidas contra la corrosión.

C. Elementos que componen el suelo enclavado

1. Inclusiones: Las inclusiones son elementos cortos o largos que se incrustan o colocan en el suelo para formar retículas, estabilizar y reforzar el suelo. Las inclusiones en el suelo enclavado trabajan como refuerzo y la carga es transmitida a todo lo largo de la inclusión. Estas pueden ser según el método constructivo que se use clavadas, llenadas con lechada, jet grouted y encapsuladas.
 - a. Las inclusiones clavadas son adecuadas para construcciones temporales y usan barras de acero # 5 a # 11 o angulares estructurales para mayor rigidez de clavado. Las barras de acero, tienen resistencia del orden de 60 a 85 kg/mm², con límite elástico convencional de 50 a 70 kg/mm². Es importante que todos estos tipos de acero sean dúctiles, con alargamientos en rotura superiores al 4% para evitar la rotura frágil, y facilitar, en caso necesario, un reajuste de esfuerzos. Estos tienen una separación corta de 2 a 4 nail por cada 10 pies² (0.9 m²) que crean una masa de suelo homogénea y reforzada.

Las inclusiones son clavadas utilizando vibro percusión neumática o martillos hidráulicos. Esta técnica de instalación es rápida y económica (3 a 5 inclusiones por hora, pero está limitada por la longitud de la inclusión instalada, por consideraciones de equipo y adicionalmente por las condiciones del suelo (en gravas y rocas intemperizadas no es posible su uso).

- b. Las inclusiones llenadas con lechada son adecuadas para construcciones temporales y permanentes. Estas son colocadas en perforaciones realizadas con perforación rotativa, perforación por percusión, perforación con auger (barrena helicoidal) o con entubado de protección (casing). La lechada de cemento (grout) es introducida por gravedad o inyectada a bajas presiones desde el fondo del agujero perforado. El espaciamiento es típicamente ancho, desde 4 a 6 pies (1.2 a 1.8 m) entre centros. El diámetro de la perforación varía entre 3.5 pulg. (9 cm) a 12 pulg. (30 cm) cuando se usan barrenas helicoidales.

- c. Los jet grouted nails son inclusiones compuestas, hechas de un suelo lechado con un refuerzo central de acero, instalado simultáneamente. Estos son utilizados para aplicaciones temporales y también pueden ser utilizados para aplicaciones permanentes si la necesidad de protección contra la corrosión es pequeña. El refuerzo puede ser instalado utilizando el clavado con vibro-percusión a altas frecuencias (arriba de 70 Hz) y presiones de inyección de lechada extremadamente altas (mayores a 2,000 psi). El grout bajo esta técnica es inyectado a través de un canal de diámetro pequeño en el refuerzo o a través de un delgado tubo de acero soldado al refuerzo, bajo una presión lo suficientemente alta para causar la fractura hidráulica del suelo perimetral. Esta técnica está cubierta por una patente europea.

La técnicas de jet grouting proporcionan además, recompactación del suelo perimetral y en suelos granulares pueden incrementar significativamente la resistencia al corte y a la tracción del suelo

- d. Las inclusiones encapsuladas y protegidas contra la corrosión son utilizadas para estructuras permanentes con necesidades altas de protección contra la corrosión. La encapsulación se puede llevar a cabo al insertar la barra de refuerzo en un tubo plástico o de acero y llenando los vacíos con grout, antes o durante la perforación del agujero. Muchas formas de encapsulación están patentadas.

2. Cubierta o Revestimiento

La función del revestimiento es asegurar la estabilidad local del suelo entre los refuerzos, limitar la descompresión inmediata después de la excavación y proteger el suelo retenido en su superficie de la erosión y los efectos del intemperismo. El tipo de cubierta que se utiliza depende en mayor parte de los requerimientos estéticos de la estructura ya que esta será la única parte de la estructura que quedará visible.

Dependiendo de la aplicación las siguientes cubiertas han sido utilizadas:

a. Malla de alambre soldado

La malla de alambre soldado puede utilizarse para aplicaciones temporales y permanentes. Es utilizada en estratos de roca intemperizada o en suelos granulares fuertemente cementados, donde la erosión de la superficie no se considera significativa. Para aplicaciones permanentes, galvanizar la malla es necesario generalmente.

b. Concreto lanzado

El lanzado de concreto es ampliamente utilizado tanto para estructuras temporales como permanentes. El lanzado provee una capa superficial continua y flexible que puede rellenar vacíos y grietas de la superficie excavada. Para aplicaciones permanentes, siempre se refuerza con malla de alambre soldado con el espesor necesario con capas sucesivas de lanzado, cada una de 2 a 4 pulg. (5 a 10 cm) de espesor.

Aplicaciones temporales han sido construidas utilizando malla de alambre soldado o fibras de refuerzo y concreto lanzado. Colocar la malla de alambre soldado o las fibras de refuerzo tiene el fin de dar mayor flexibilidad a la estructura y reducir la propagación de rajaduras. La durabilidad del lanzado depende en gran medida de mantener la relación agua-cemento alrededor de 0.4 y utilizar una entrada de aire adecuada.

c. Paneles prefabricados

Los paneles prefabricados son utilizados en aplicaciones permanentes para proveer un acabado al producto que satisfaga los diversos requisitos estéticos, ambientales y de durabilidad. Estos también proveen un drenaje continuo atrás del revestimiento. Los paneles prefabricados pueden ser adjuntados a las inclusiones o ensamblados a la cabeza de la inclusión por medio de diferentes dispositivos.

D. Ventajas del uso del suelo enclavado

El suelo enclavado tiene ventajas técnicas y económicas sobre las técnicas más convencionales de corte y retención. Estas ventajas incluyen las siguientes:

1. Bajo costo, la relativa rapidez de instalación de las inclusiones no esforzadas, la cual es considerablemente más corta que la de los anclajes y la capa de lanzado que relativamente es más delgada.
2. Únicamente se necesita de equipo liviano de construcción para colocar las inclusiones así como equipo simple de lanzado e inyección de lechada. El llenado de las perforaciones con lechada generalmente se hace por gravedad. Esta característica puede ser de particular importancia en lugares de difícil acceso.
3. Debido al gran número de inclusiones, la falla de alguna no es determinante, ni afecta la estabilidad del sistema, como es el caso de los anclajes convencionales.
4. En suelos heterogéneos con gravas y zonas intemperizadas o roca dura, se ofrece la ventaja de perforaciones de diámetro pequeño para instalar las inclusiones.
5. Las estructuras con suelo enclavado son más flexibles que las estructuras rígidas convencionales. Consecuentemente estas estructuras pueden conformar un terreno perimetral con capacidad de soportar mayores movimientos diferenciales del terreno en todas direcciones.
6. Las deformaciones superficiales pueden ser controladas por medio de la instalación de inclusiones adicionales o al esforzar las inclusiones del nivel superior a un pequeño porcentaje de sus cargas de trabajo.

7. Los volúmenes de corte, relleno y acarreo producto de la construcción de muros de contención convencionales se eliminan.

E. Desventajas del uso del suelo enclavado

El suelo enclavado comparte con las otras técnicas de corte y retención las siguientes desventajas:

1. Los sistemas de drenajes para aguas subterráneas pueden ser difíciles de construir y es difícil de asegurar su efectividad a largo plazo.
2. En áreas urbanas, el espaciado corto de las inclusiones puede interferir con construcciones cercanas. Además los desplazamientos horizontales pueden ser mayores que con los anclajes activos la cual puede causar distorsiones inmediatas a construcciones adyacentes.
3. La capacidad de la inclusión puede correr riesgo de no desarrollarse económicamente en suelos cohesivos sujetos a desplazamiento lento (creep), incluso con niveles de carga relativamente bajas.

F. Aplicaciones del suelo enclavado

La tecnología del suelo enclavado puede ser considerada ventajosa para cualquier corte de excavación ya sea temporal o permanente, en lugar de cualquier otro método convencional pero especialmente cuando se plantea la utilización de muros anclados. El ahorro comparado con los métodos convencionales de estabilización está en un rango de 10 a 30%. La utilización de las inclusiones se ha extendido ampliamente con finalidades diversas, que pueden agruparse, en los siguientes campos principales de aplicación:

1. Estructuras de retención en corte
 - a. Cortes verticales o cuasi verticales.
 - b. Portales de túneles.
 - c. Estribos o confinamiento de puentes.
2. Reparación y reconstrucción de estructuras existentes
 - a. Muros de contención de mampostería o concreto reforzado después o justo antes de la falla por deflexiones excesivas.
 - b. Muros anclados por falla, sobrecarga o corrosión en los tendones de los cables.

- c. Muros de tierra armada (mecánicamente estabilizada) para proveer estabilidad horizontal a la masa que la ha perdido por la corrosión de las mallas o baja calidad del relleno.
3. Estabilización de taludes
- a. Estabilización de taludes potencialmente inestables donde un pequeño o ningún movimiento ha ocurrido pero el factor de seguridad es inaceptable.
 - b. Estabilización de taludes con movimiento lento (creep), donde el movimiento está ocurriendo a una tasa inaceptable.
 - c. Cosido de macizos rocosos fisurados con desprendimientos.
 - d. Deslizamientos de taludes en roca o terrenos sueltos.

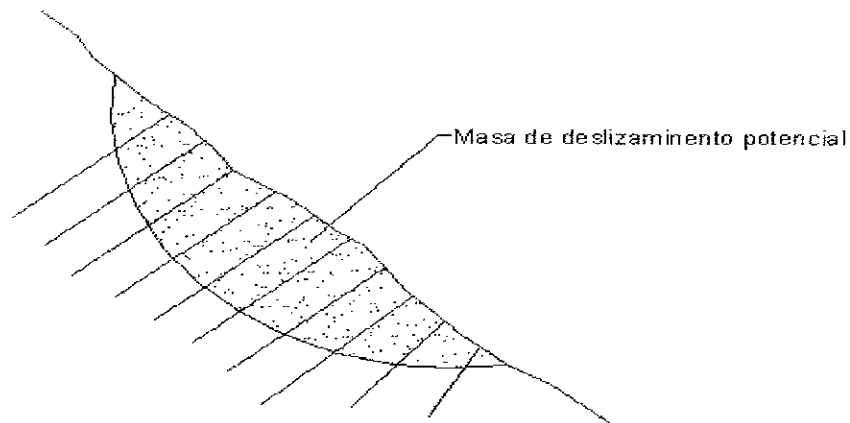


Fig. 2 Aplicación del suelo enclavado en deslizamientos de tierra

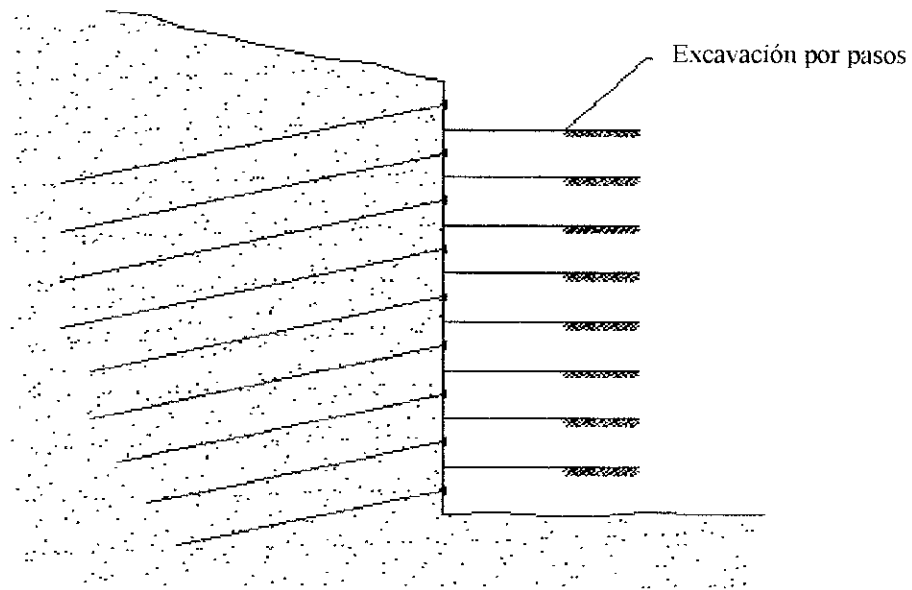


Fig. 3 Suelo enclavado como estructura de contención

1. Método convencional

2. Método Austriaco

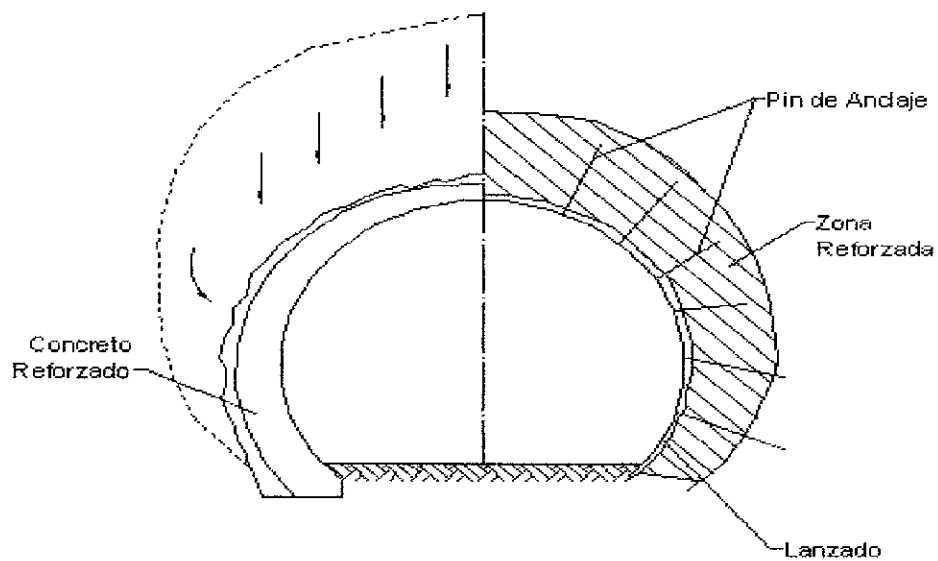


Fig. 4 Aplicación de suelo enclavado en estructuras de retención en corte (Portales de túneles)

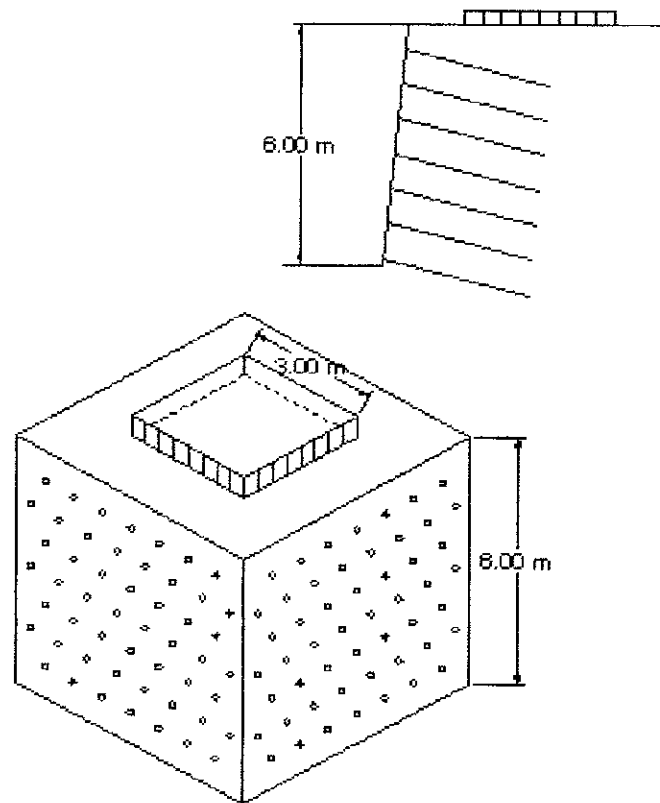


Fig. 5 Confinamiento

G. Capacidad resistente de las inclusiones

La capacidad resistente de las inclusiones viene determinada por la resistencia del refuerzo de acero, y la resistencia en el cuerpo de la inclusión, en la que se transmiten los esfuerzos al terreno.

La resistencia de la armadura determina la sección necesaria de acero. En una inclusión se suelen definir los conceptos de carga límite y carga admisible.

Se entiende por carga límite, T_L , el producto de la sección de acero A por la resistencia de cálculo que suele ser el límite elástico convencional N_e , para un alargamiento permanente del 2 por 1,000, siempre que sea inferior al 90% de la carga de rotura.

$$T_L = A \cdot N_e$$

La carga admisible T_a es igual a la carga límite multiplicada por un coeficiente de seguridad $K < 1$.

$$T_a = K \cdot T_L$$

El coeficiente de seguridad, K, depende del carácter que deban tener las inclusiones, y de la confianza de la hipótesis y método de cálculo utilizado para la determinación de los esfuerzos. Suele utilizarse un valor de 0.6 en el caso de inclusiones permanentes o provisionales con un plazo de utilización superior a 2 años, y un valor de 0.75 para inclusiones provisionales con período de servicio inferior a un año (hasta 2 años en algunos casos).

La resistencia del cuerpo de la inclusión viene determinada, en primer lugar, por la adherencia entre el acero y la lechada de cemento. En segundo lugar, por la posibilidad de deslizamiento entre la inclusión y el terreno que lo rodea.

Salvo que se tenga experiencia con el tipo de inclusión y en un determinado terreno, lo más conveniente para definir la resistencia media al deslizamiento y, por tanto, la longitud de la inclusión, es efectuar ensayos «de adecuación» con inclusiones construidas para determinar los parámetros resistentes. A los resultados se les aplica un coeficiente de seguridad que suele ser de 1.75 a 2.0 para inclusiones provisionales, y de 2.5 a 3.0 para inclusiones permanentes. Con estos coeficientes la resistencia de la zona de anclaje resulta igual a la carga límite, T_L , multiplicada por un factor comprendido entre 1.3 y 1.5 en caso de inclusiones provisionales, y entre 1.5 y 1.8 en el caso de nails permanentes.

A continuación, y con carácter orientativo, se recogen algunos valores de la resistencia media al deslizamiento de inclusiones, en distintos tipos de terreno:

Capacidad de tracción estimada en roca

Método Constructivo	<u>Tipo de roca</u>	Fricción última f_1 (lb/pie²)
Perforación rotativa	Granito / caliza	6,000 - 8,000
	Pillita	2,000 - 6,000
	Creta	10,000 - 12,000
	Dolomitas suaves	8,000 - 12,000
	Dolomita fisurada	12,000 - 20,000
	Areniscas intemperizadas	4,000 - 6,000
	Basalto	10,000 - 12,000

Capacidad de tracción estimada en suelos sin cohesión (inclusiones llenadas con lechada)

Método Constructivo	<u>Tipo de terreno</u>	Fricción última f_1 (lb/pie²)
Perforación rotativa	Limo arenoso	2,000 - 4,000
	Limo	1,200 - 1,600
	Coluvio fino	1,500 - 3,000

Perforación rotativa en húmedo	Coluvio grueso	2,000
	Arena / Grava	6,000 - 9,000
Perforación con entubado	Arena	6,000
Perforados con Barrena Helicoidal (Augered)	Coluvio	2,000 - 4,000
	Relleno de limo arenoso	400 - 600
	Limo y arena fina	1,700 - 2,200
	Limo arcilloso arenoso	2,500 - 5,000

Capacidad de tracción estimada en suelos cohesivos

Método Constructivo	Tipo de terreno	Fricción última f_1 (lb/pie²)
Perforados con Barrena Helicoidal (Augered)	Loess	500 - 600
	Arcilla suave	400 - 600
	Arcilla dura	800 - 1,200
	Limo arcilloso	800 - 2,000
Perforados con entubado	Arcilla limosa calcárea	4,000 - ,6000
	Arcilla limosa	3,600
Perforación rotativa	Limo arcilloso	1,800 - 3,000
	Arcilla limosa	700 - 950

(Soil Nailing for Stabilization of Highway Slopes and Excavations)

H. Ensayos de tracción

La finalidad de realizar inclusiones de ensayo es definir cuál va a ser el coeficiente de seguridad sobre las mismas y averiguar si las hipótesis tomadas en cuenta por el proyecto se verifican.

Las inclusiones de ensayo se hacen antes de hacer la obra y dichas inclusiones se deben tensar hasta su falla, quiere decir que en ningún caso se deben incluir en el sostenimiento de la obra.

Dichas inclusiones nos van a permitir conocer:

1. Cuál es la tensión de rotura del sellado y por ende, cuál es el valor que podemos tomar en cuenta sobre el proyecto, para tomar en cuenta un coeficiente de seguridad
2. Cuál es el valor del fluaje del terreno.

1. Equipo necesario

Es necesario un equipo que pueda tensar la inclusión, una bomba para alimentar el equipo de tensado, un manómetro para medir la presión del tensado y uno o varios medidores de deformación. El equipo de tensado (gato hidráulico) debe ser capaz de tensar toda la inclusión a la carga especificada para la prueba preferiblemente de un tirón. No se permite esforzar y probar múltiples inclusiones con un solo gato.

El equipo debe ser capaz de tensar la inclusión a la carga máxima especificada para la prueba ($0.90 F_y$) con una tasa de capacidad de $0.10F_y$. La bomba debe ser capaz de aplicar cada incremento de carga en menos de 60 segundos.

El equipo debe permitir a la inclusión ser esforzada en intervalos, tal que la carga en la inclusión pueda ser aumentada o disminuida de acuerdo con las especificaciones de la prueba.

El equipo de tensado debe estar recientemente calibrado con una precisión del $\pm 2\%$ antes de usar. El certificado de calibración y la gráfica deben estar disponibles en el sitio todo el tiempo. El manómetro debe tener graduaciones no mayores de 100 psi (0.7MPa).

El deformímetro debe ser colocado de tal forma que permita medir el movimiento total de la inclusión en cada incremento de carga, con una precisión de 0.001 pulg. (0.03 mm). El deformímetro debe tener suficiente carrera para registrar el movimiento total de la inclusión con la carga de prueba sin que se tenga la necesidad de reiniciarlo en un punto intermedio.

2. Preparación del equipo a utilizar

El equipo de tensado, su secuencia, y el procedimiento para cada operación de tensado debe ser determinado por el equipo de planificación del proyecto. El equipo se debe utilizar estrictamente de acuerdo con las instrucciones de operación del fabricante.

El tensado no debe empezar antes de que la lechada haya alcanzado su resistencia nominal.

Antes de ajustar el deformímetro se debe aplicar la carga de alineación a la inclusión. La magnitud de la carga de alineación depende de las características de la inclusión. La carga de alineación típicamente varía de 5 a 25% de la carga de diseño, la más común es el 10%. La carga de alineación se aplica para fijar todos los componentes durante el tensado y para asegurar que el momento residual es precisa y consistentemente determinado cuando se descarga durante el ensayo.

El deformímetro debe ser empujado por la cabeza del gato y su pistón debe ser coaxial con la dirección de la inclusión. El deformímetro debe ser soportado sobre un marco fijado independiente, como en un trípode, el cual no se debe mover como resultado del tensado u otra actividad constructiva durante la operación.

3. Procedimiento del ensayo de tracción

Los procedimientos de la prueba son independientes del tipo de suelo. El procedimiento seguido para hacer estos ensayos de campo se compone de los siguientes pasos.

- a. Se aplican incrementos de carga de $0.10 F_y$, manteniendo constante esta carga de tracción entre 10 y 60 minutos en cada uno de estos incrementos de carga ($0.10 F_y$) hasta que se llega a un máximo de $0.90 F_y$, siendo F_y la resistencia del acero al punto cedente. Esta carga es aplicada a las varillas de la inclusión por medio de un gato hidráulico alimentado por una bomba manual. Durante cada uno de los incrementos de carga se llevan a cabo mediciones de elongación por medio de un medidor de deformaciones análogo, fijado al cuerpo del gato y colocado de tal manera que la deformación fuera medida directamente de la cabeza del mismo gato. Estas mediciones se realizan a los 0.0, 0.5, 1.0, 3.0, 5.0 y 10.0 minutos después de aplicar los incrementos de carga de $0.10 F_y$. Dependiendo de la deformación registrada entre los minutos 1.00 y 10.00 se deciden los intervalos de aplicación de la carga, si la deformación es menor de 1.0 cm (0.4 in) en los 10 primeros minutos, se prosigue a aplicar el siguiente ciclo de carga en intervalos de 10 minutos, de no haber sido así se tiene que dejar el ciclo de carga constante durante los siguientes 50 minutos y realizar las mediciones a cada 10.0 minutos, si se produjera una deformación mayor .
- b. Los incrementos de carga ($0.10 F_y$) son aplicados hasta llegar al ciclo correspondiente a los $0.90 F_y$ según las especificaciones o hasta la carga de la falla, definiendo la carga de falla como la que manteniéndose constante produjera en un período de 60.0 minutos o menor una deformación de 2.00 cm.
- c. La aplicación de la carga se lleva a cabo por medio del gato hidráulico mencionado anteriormente, el cual se coloca sobre una placa de acero apoyada directamente sobre la cara exterior del suelo, la cual no está tratada ni recubierta a fin de minimizar el efecto del revestimiento de concreto lanzado utilizado como pantalla.

Nota:

Durante el tensado, las precauciones de seguridad son esenciales. Operadores y observadores deben estar en los lados del equipo de tensado y nunca pasar enfrente cuando está bajo carga.

4. Interpretación de los resultados

A partir de todos los datos obtenidos durante la tensión hasta $0.9F_y$ se hace el siguiente gráfico sobre papel semi-logarítmico (Figura 8.4.1).

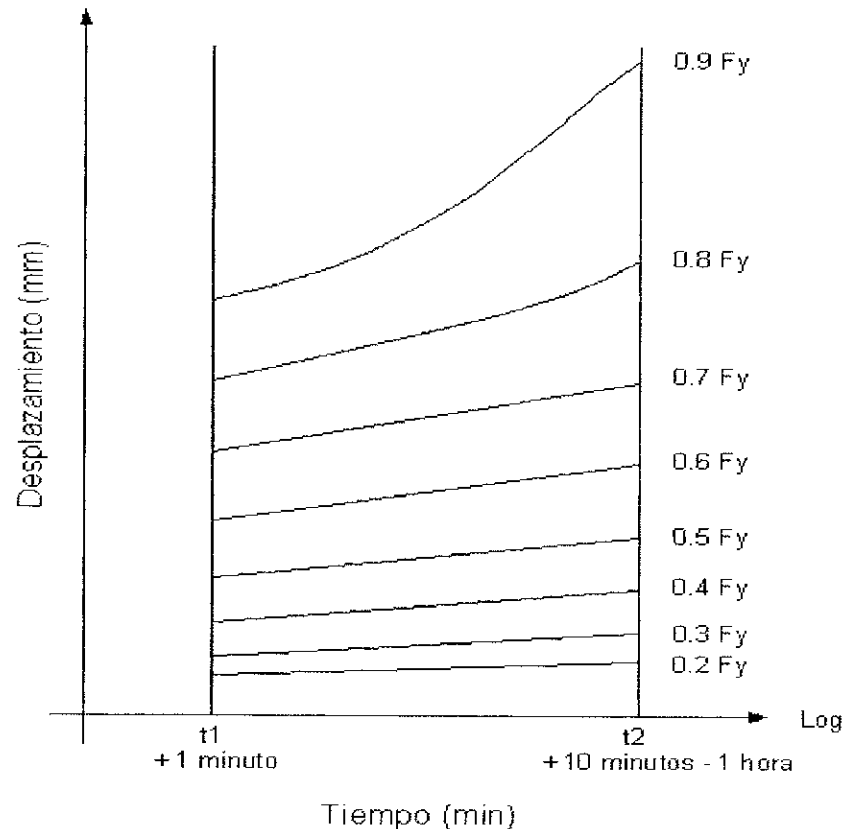


Fig.6 Gráfico de desplazamiento lento

El examen de dicho gráfico (figura 6) presenta 3 posibilidades:

- Todas las curvas están casi rectas, como las curvas $0.2F_y$ hasta $0.7F_y$ de la figura 8.4.1., quiere decir que no hemos obtenido la tracción límite del sellado (T_L).
- A partir de KF_y , (K entre 0.2 y 0.7 (figura 8.4.1)) obtenemos una curva con curvatura importante y rápidamente creciente (curva $0.9F_y$ sobre la figura 8.4.1). En tal caso hemos alcanzado a la rotura entre $(K - 0.1) F_y$ y KF_y por lo tanto definimos la tracción límite $T_L = (K - 0.1) F_y$
- Sí la curva de $0.9F_y$ presenta una pequeña curvatura la rotura hubiese sido alcanzada en un valor intermedio entre $0.9F_y$ y F_y , en tal caso $T_L = 0.9F_y$.

A partir de ese gráfico semi-logarítmico, se hace un segundo gráfico (aritmético), al colocar sobre el eje Y la pendiente de las curvas obtenidas sobre el dibujo semi-logarítmico y sobre

el eje 0X, los valores de diferentes escalones de carga sin importar los intervalos de tiempo utilizados en el ensayo para cada intervalo de carga (Figura 8.4.2).

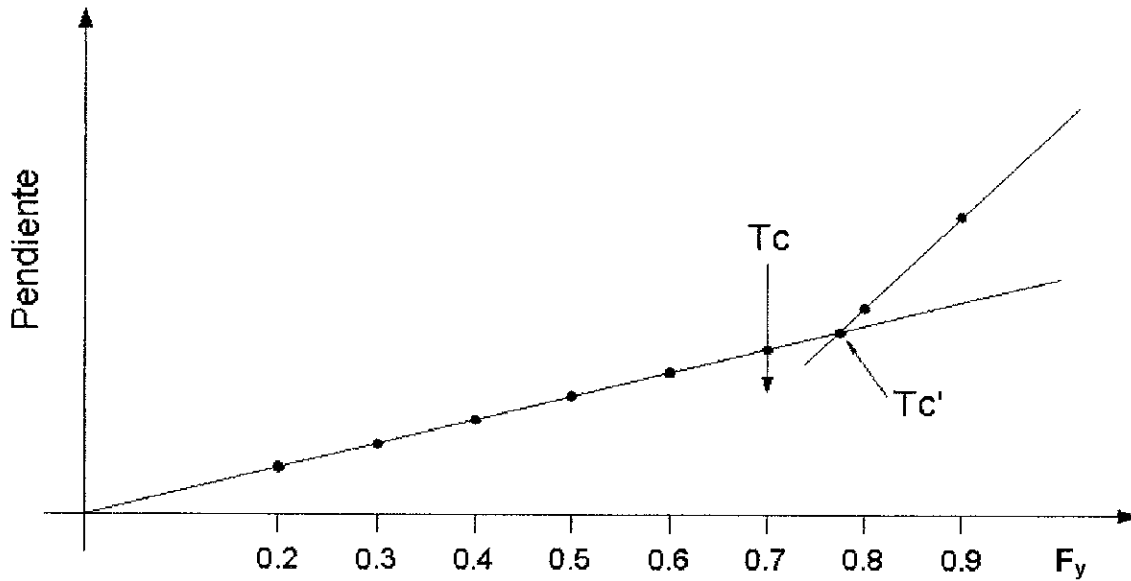


Figura 7 Gráfico de tensión de desplazamiento

Sí la tensión crítica se obtuvo, el dibujo presenta una serie de puntos alineados a partir de los cuales se puede hacer una recta que pasa por el origen y tiene validez si un mínimo de 3 puntos están sobre la recta que pasa por el origen. Después el gráfico presenta un marcado cambio de pendiente, el punto donde se presenta este cambio de pendiente define la tensión crítica $T_{c'}$ como lo muestra la figura 7

Entonces la tensión crítica se define como $T_c = 0.9T_{c'} = 0.9(0.8F_y)$, la reducción del 10% en la tensión $T_{c'}$ se aplica como factor de seguridad para efectos del diseño.

IV ESTUDIO EXPERIMENTAL

A. Tipos de suelo e inclusiones

En el presente estudio se utilizaron cuatro diferentes suelos, descritos en la siguiente tabla.

Tabla No. 1: Tipo de suelo utilizado en el estudio

Suelos	Descripción
Suelo 1	Caliza esquistosa, micácea, muy fracturada, poco a intemperizada. gris y gris verdoso, muy duro (fracturas más o menos horizontales), algunas veces con incrustaciones grandes de calcita
Suelo 2	Fragmentos de esquisto micáceo muy fracturados, laminados y angulares, parcialmente o completamente muy intemperizados, con arena gruesa a fina limosa, esquistosa con trazas de poca arcilla café amarillento y beige gris, poco o ligeramente plástico, medio compacto o duro
Suelo 3	Arena media a fina con limo o arena fina limosa volcánica beige amarillento, con trazas de piedra pómez pequeña, muy denso con partes algunas veces denso a medio denso (ceniza volcánica). Arcilla limosa con poca arena, café plástico, compacto.
Suelo 4	Esquisto micáceo muy fracturado y laminado, parcialmente intemperizado, ocasionalmente con trazas de arena gruesa a fina limosa con trazas de arcilla esquistosa, café beige, ligeramente a no plástico duro a muy duro

Así mismo las inclusiones se construyeron de la siguiente manera:

Tabla No. 2: Descripción de inclusiones

Inclusión	J de perforación	Inclinación	Longitud (m)	Lechada de (psi)	Fecha Fundición	Fecha de la Prueba	En suelo No.
1	11.43 cm	15°	12.00	3,500	13/07/00	27/07/00	1
2	11.43 cm	15°	9.00	3,500	13/07/00	27/07/00	2
3	11.43 cm	15°	9.00	3,500	13/07/00	28/07/00	3
4	11.43 cm	15°	12.00	3,500	13/07/00	29/09/00	4

B. Equipo y personal empleados en los ensayos

Para la realización de la prueba se contó con un encargado que dirigió la construcción de las inclusiones y la colocación del sistema para las pruebas. El personal utilizado en la realización del ensayo constó de un operador de bomba, una persona encargada de revisar la presión en el manómetro y dos personas que tomaron las mediciones.

En la tabla siguiente se muestra el equipo utilizado en el ensayo

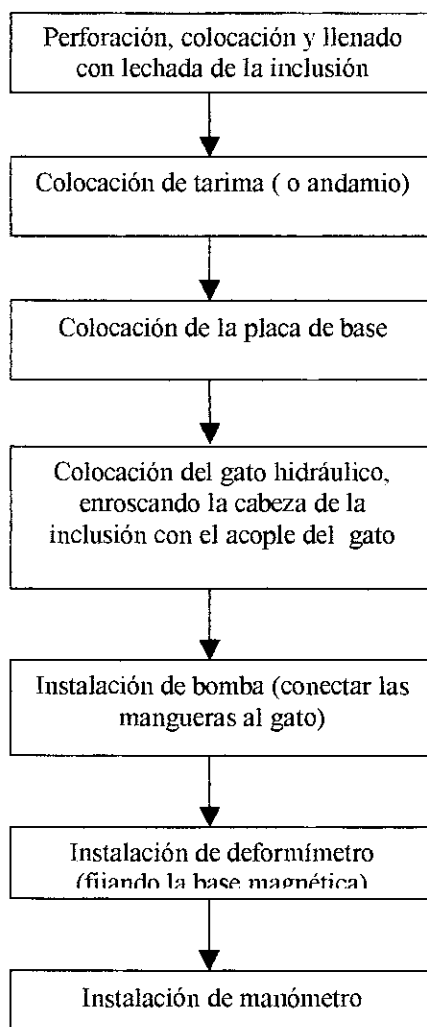
Tabla No. 1 Equipo utilizado en el ensayo

Equipo	Marca	Descripción
Gato Hidráulico	Freyssinet	
Deformímetro 1	Mitutoyo	Precisión de 0.01 mm
Deformímetro 2	Baty, Wykeham Farrance Eng	Precisión de 0.0001”
Bomba	SPX Power Team No. 9500	
Manómetro	Test Gauge	Escala de hasta 10,000 psi, precisión de 50 psi
Base magnética	Mitutoyo	Brazo de 18 cm
Cronometro 1	Casio	Precisión de 0.01 seg.
Cronometro 2	Ultimate	Precisión de 0.01 seg.

C. Diseño experimental

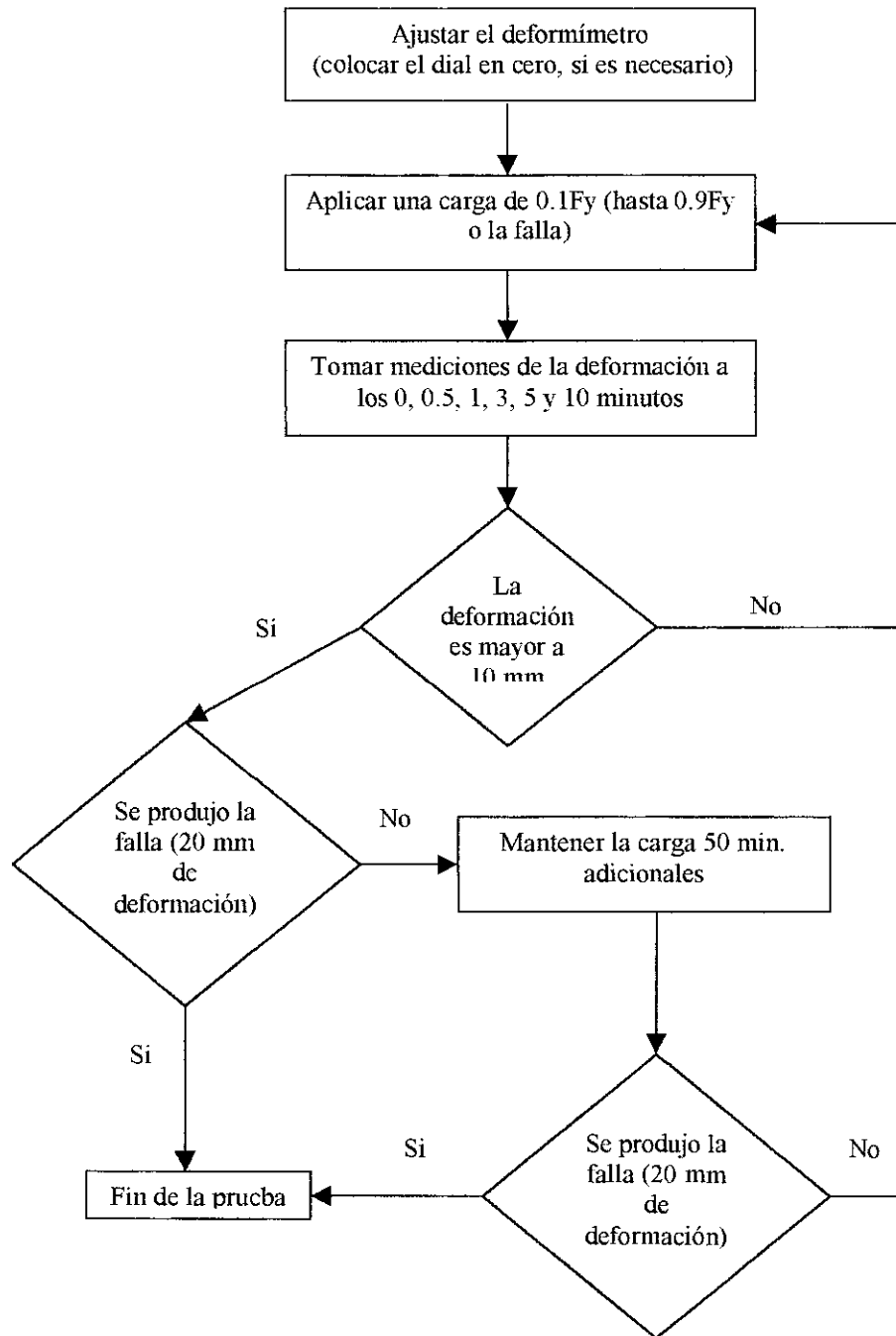
1. Preparación del sistema para el ensayo

A continuación se presenta un diagrama de flujo de las actividades realizadas para la preparación del equipo:



2. Ensayo de tracción

A continuación se presenta un diagrama de flujo de las actividades realizada en el ensayo de tracción:



3. Descripción de la prueba

Después de la colocación del equipo se colocan los instrumentos y se ajustan, la colocación de los instrumentos se debe realizar con el cuidado de que pueda realizar una buena lectura de los mismos. La base en la que se coloca el deformímetro se debe fijar al cuerpo del gato (cilindro fijo a la placa) para evitar que un movimiento de esta base influya en la medición. Cuando esta preparado todo el equipo se aplica la carga por medio de una bomba, estos incrementos de carga se aplican en intervalos de 0.10 Fy, manteniendo constante esta carga de tracción por 10 minutos (hasta 60 minutos si fuera necesario) en cada uno de estos incrementos de carga (0.10 Fy) hasta que se llega a un máximo de 0.90 Fy, siendo Fy la resistencia del acero al punto cedente (Fy tenía un valor de 60,000 libras por pulgada cuadrada). Esta carga fue aplicada a las varillas de la inclusión por medio de un gato hidráulico (marca Freyssinet) alimentado por una bomba manual (marca SPX power team).

Durante cada uno de los incrementos de carga se llevan a cabo mediciones de elongación por medio de un medidor de deformaciones análogo (marca Mitutoyo o Bati), fijado al cuerpo del gato y colocado de tal manera que la deformación fuera medida directamente de la cabeza del mismo gato. Estas mediciones se realizaron a los 0.0, 0.5, 1.0, 3.0, 5.0 y 10.0 minutos después de aplicar los incrementos de carga de 0.10 Fy. Como la deformación registrada entre los minutos 1.00 y 10.00 no fue mayor de 1.0 mm (0.04 in) en las cuatro pruebas, por lo que se prosiguió a aplicar el siguiente ciclo de carga. De no haber sido así se habría tenido que dejar el ciclo de carga constante durante los siguientes 50 minutos y realizar las mediciones a cada 10.0 minutos.

Los incrementos de carga (0.10 Fy) fueron aplicados hasta llegar al ciclo correspondiente a los 0.90 Fy, para tener también como último ciclo de carga el que manteniéndose constante produjera en un período de 60.0 minutos una deformación de 2.00 cm, caso que no presentó en las cuatro pruebas realizadas

La aplicación de la carga se llevó a cabo por medio del gato hidráulico mencionado anteriormente, el cual se colocó sobre una placa de 1.20m x 1.20m y $\frac{3}{4}$ " de espesor apoyada directamente sobre la cara exterior del suelo, la cual no estaba tratada ni recubierta a fin de minimizar el efecto del revestimiento de concreto lanzado, utilizado como pantalla.

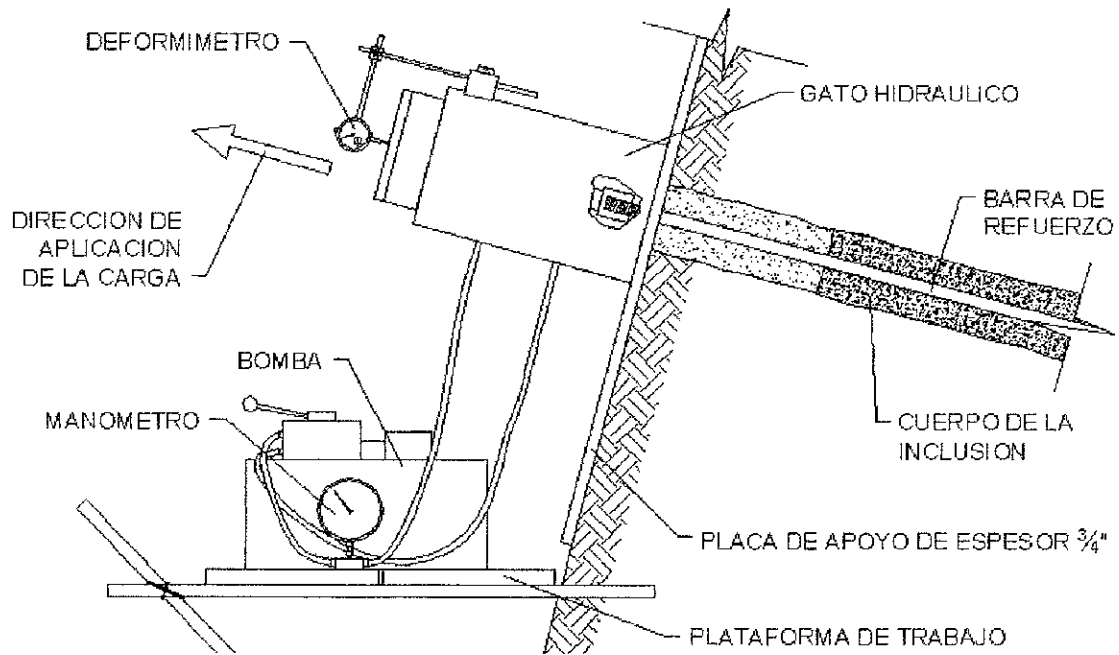


Figura 8 Esquema del sistema armado para la prueba de carga

D. Resultados de las pruebas de tracción

Prueba No. 1: Inclusión de 12.00 metros de longitud localizada en el suelo 1

Tabla 1.

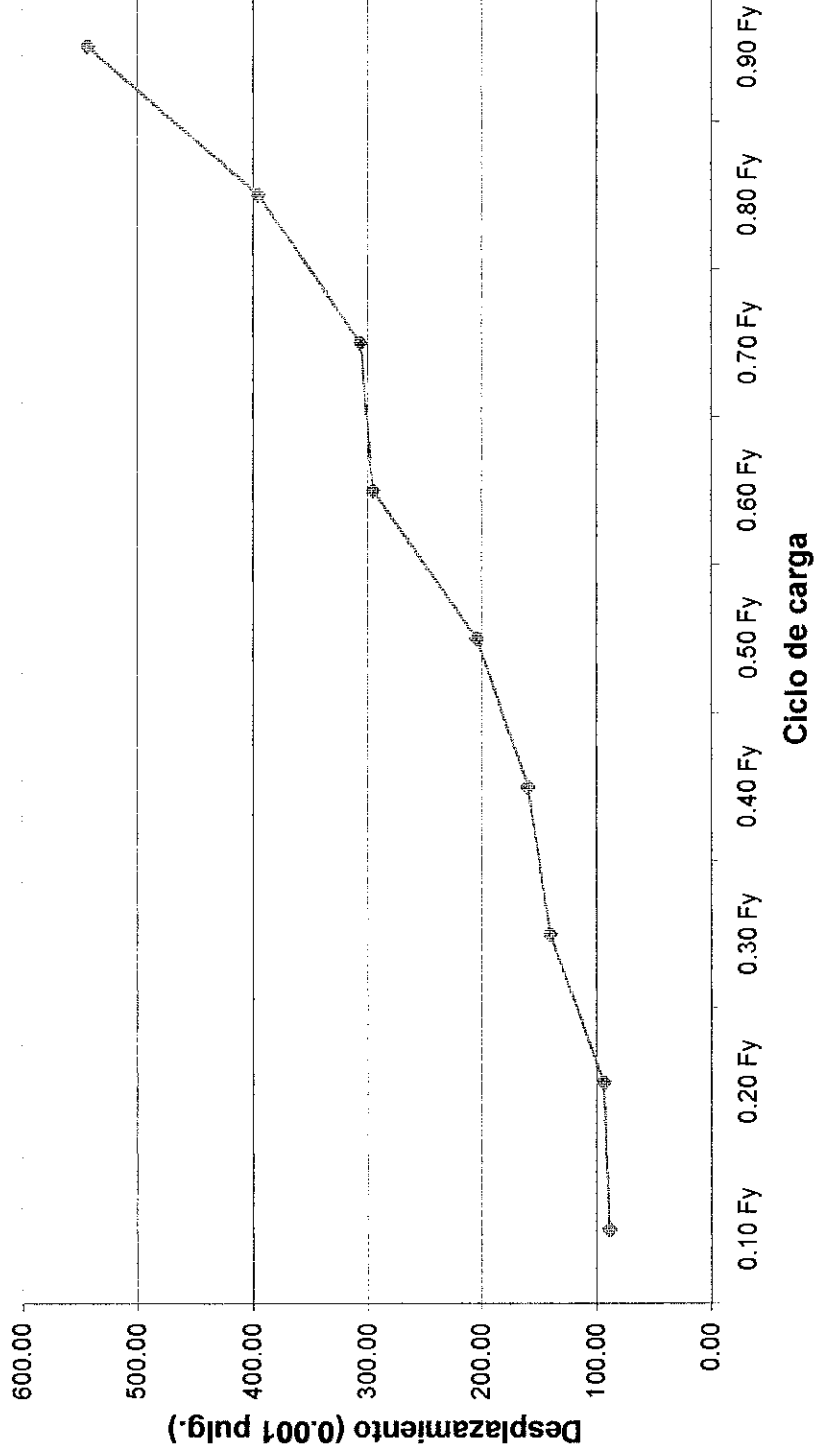
Carga (ton)	2.14	4.28	6.42	8.56	10.7	12.84	14.98	17.12	19.26
Tiempo (minutos)	0.10Fy	0.20Fy	0.30Fy	0.40Fy	0.50Fy	0.60Fy	0.70Fy	0.80Fy	0.90Fy
0.00	82.00	153.00	436.00	889.00	1001.20	1346.20	1593.00	1895.20	2395.20
0.50	82.00	153.20	436.20	889.00	1001.20	1346.40	1593.20	1896.20	2395.20
1.00	82.00	153.20	436.20	889.00	1001.20	1346.70	1593.70	1896.20	2395.20
3.00	82.00	153.50	436.50	889.00	1001.20	1346.90	1594.20	1896.20	2395.20
5.00	82.00	153.50	436.50	889.20	1001.70	1346.90	1594.20	1896.70	2395.20
10.00	82.00	153.50	436.50	889.20	1002.20	1347.20	1594.20	1974.20	2395.20

Prueba No. 2: Inclusión de 9.00 metros de longitud localizada en el suelo 2

Tabla 2

Carga (ton)	2.14	4.28	6.42	8.56	10.7	12.84	14.98	17.12	19.26
Tiempo (minutos)	0.10Fy	0.20Fy	0.30Fy	0.40Fy	0.50Fy	0.60Fy	0.70Fy	0.80Fy	0.90Fy
0.00	82.00	153.00	436.00	889.00	1001.20	1346.20	1593.00	1895.20	2395.20
0.50	82.00	153.20	436.20	889.00	1001.20	1346.40	1593.20	1896.20	2395.20
1.00	82.00	153.20	436.20	889.00	1001.20	1346.70	1593.70	1896.20	2395.20
3.00	82.00	153.50	436.50	889.00	1001.20	1346.90	1594.20	1896.20	2395.20
5.00	82.00	153.50	436.50	889.20	1001.70	1346.90	1594.20	1896.70	2395.20
10.00	82.00	153.50	436.50	889.20	1002.20	1347.20	1594.20	1974.20	2395.20

Tensión de desplazamiento lento crítico Prueba No. 2

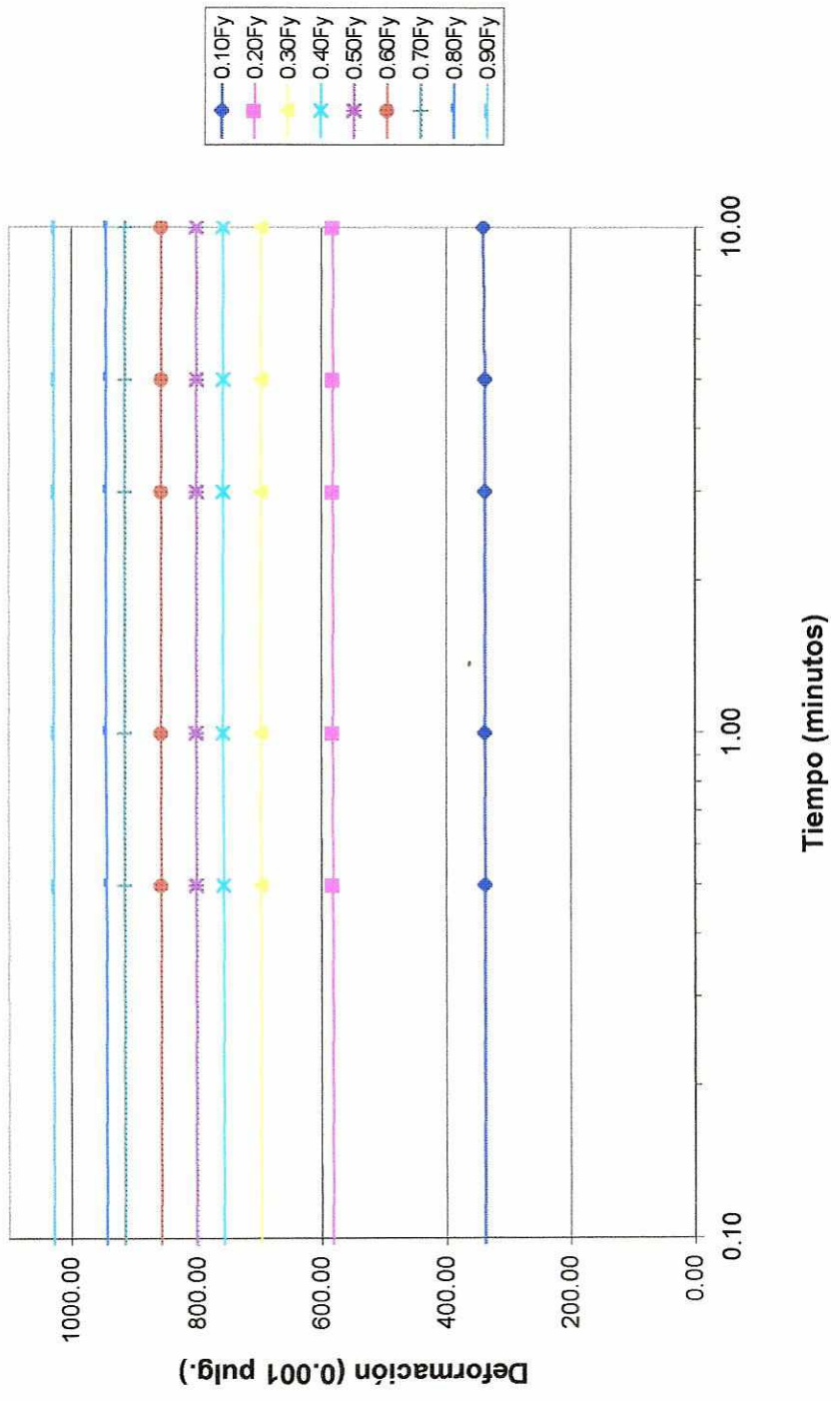


Prueba No. 3: Inclusión de 9.00 metros de longitud localizada en el suelo 3

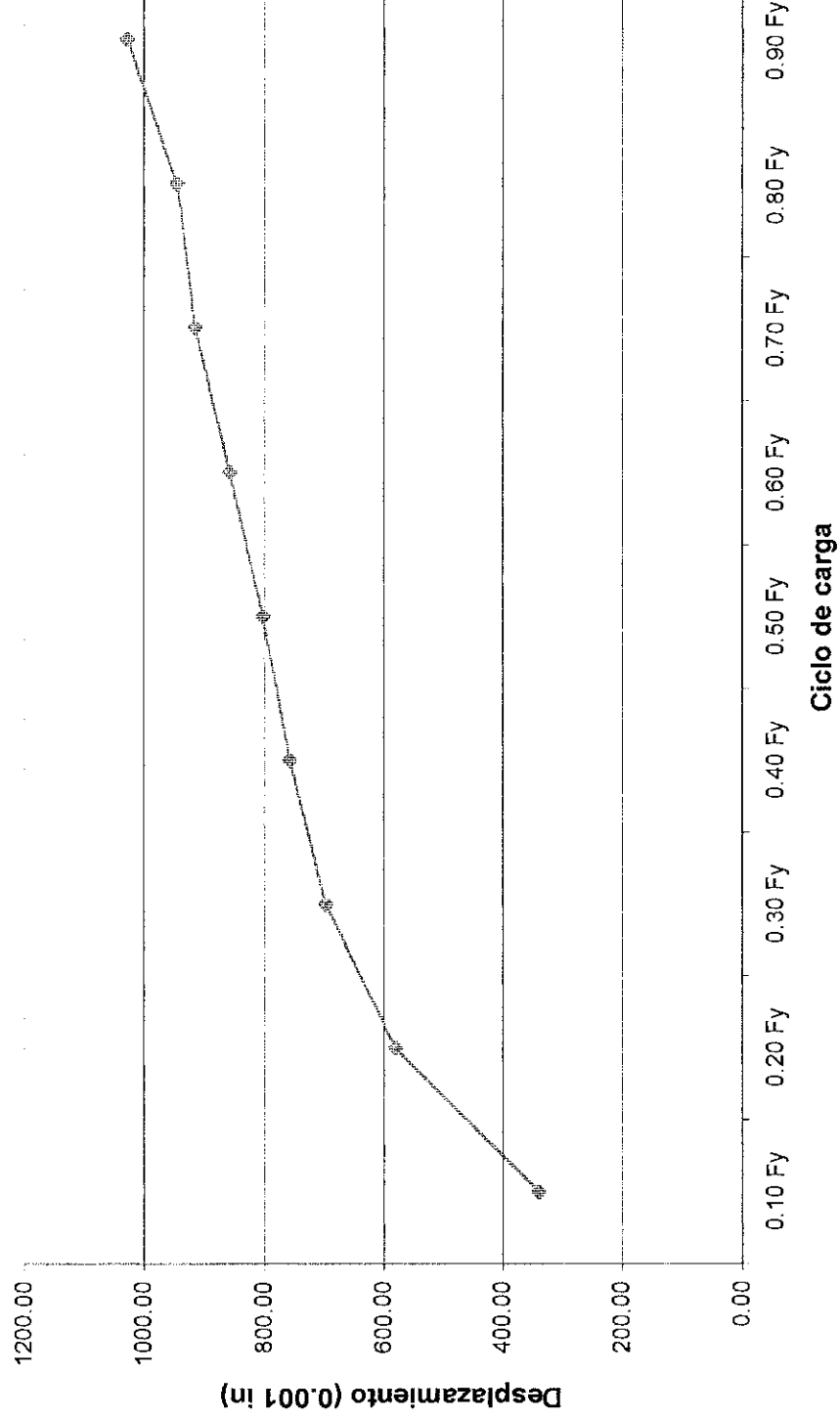
Tabla 3

Carga (ton)	2.14	4.28	6.42	8.56	10.7	12.84	14.98	17.12	19.26
Tiempo (minutos)	0.10Fy	0.20Fy	0.30Fy	0.40Fy	0.50Fy	0.60Fy	0.70Fy	0.80Fy	0.90Fy
0.00	338.00	581.00	697.00	757.00	802.00	857.00	915.00	944.50	1027.50
0.50	338.00	581.00	697.00	758.00	802.00	858.00	916.50	945.00	1028.00
1.00	338.00	581.00	697.50	758.50	802.50	858.00	916.50	945.50	1028.00
3.00	338.00	581.00	697.50	759.00	802.50	858.00	916.50	945.50	1028.00
5.00	338.00	581.00	697.50	759.00	802.50	858.00	916.50	945.50	1028.00
10.00	341.00	581.00	697.50	759.00	802.50	858.00	916.50	945.50	1028.00

Curvas de desplazamiento lento Prueba No. 3



Tensión de desplazamiento lento crítico Prueba No. 3

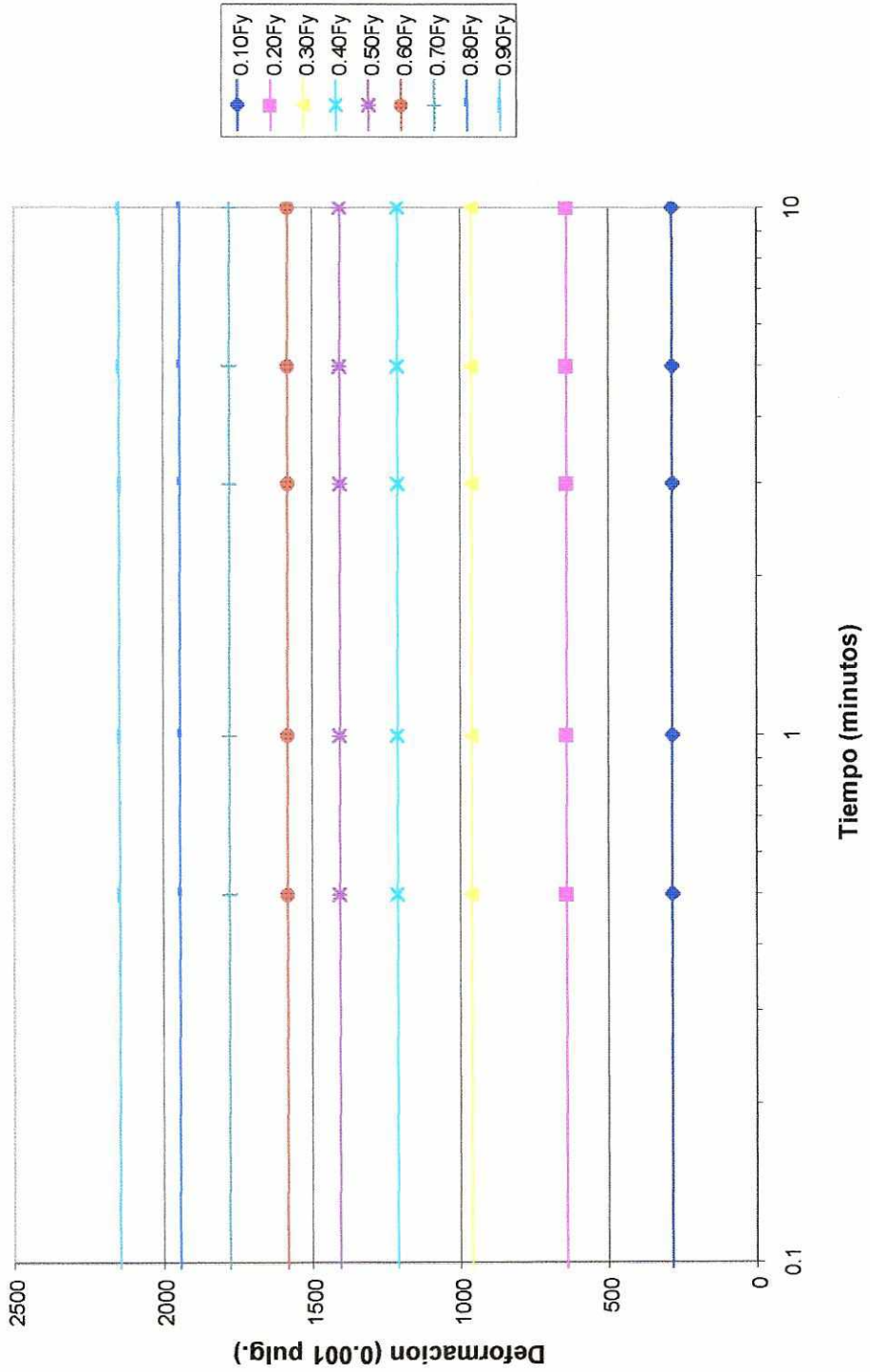


Prueba No. 4: Inclusión de 12.00 metros de longitud localizada en el suelo 4

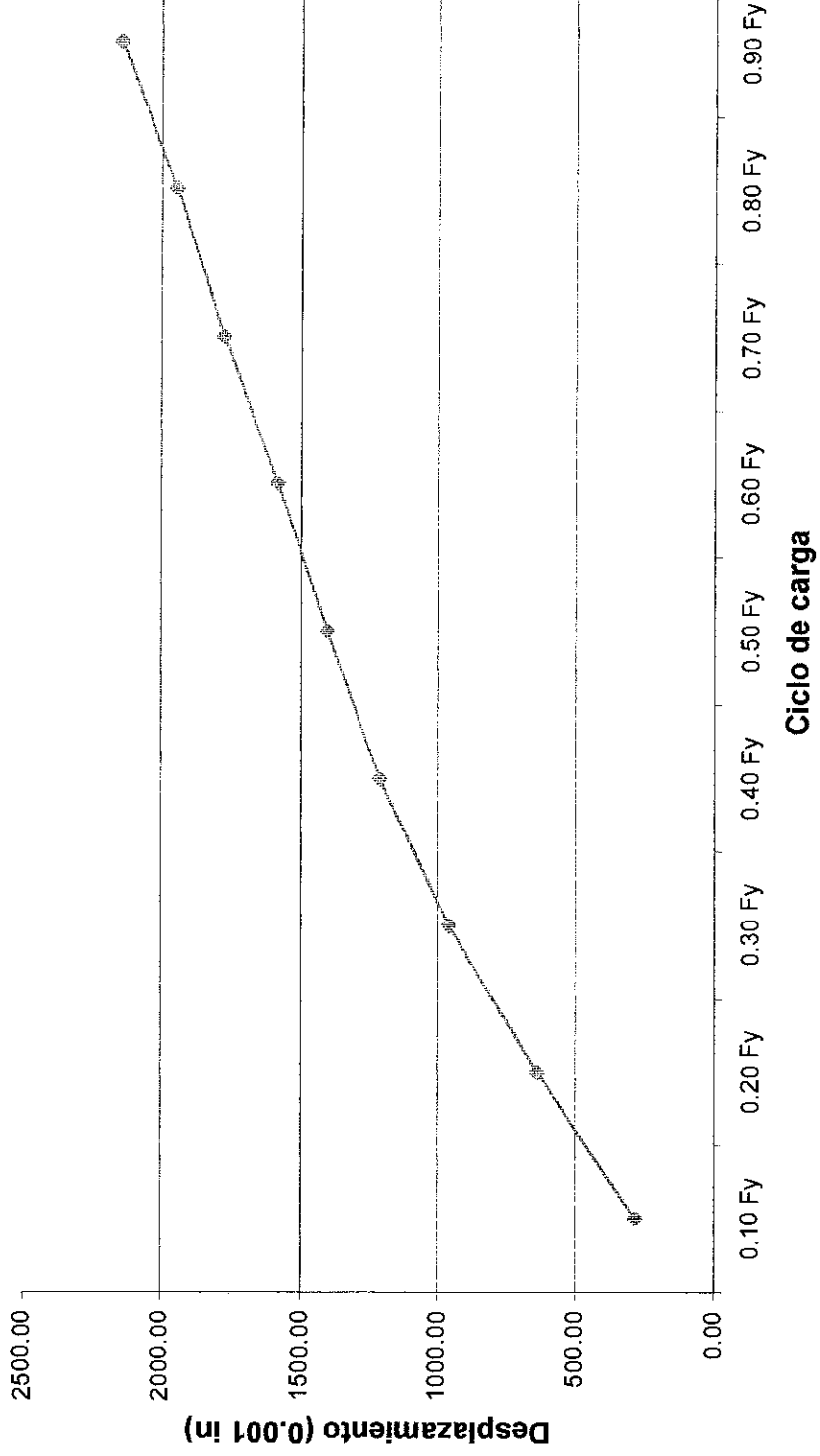
Tabla 4

Carga (ton)	2.14	4.28	6.42	8.56	10.7	12.84	14.98	17.12	19.26
Tiempo (minutos)	0.10Fy	0.20Fy	0.30Fy	0.40Fy	0.50Fy	0.60Fy	0.70Fy	0.80Fy	0.90Fy
0.00	283.80	640.60	960.70	1209.90	1404.50	1582.40	1777.00	1943.10	2143.50
0.50	284.90	640.70	961.10	1210.60	1405.60	1583.80	1778.20	1944.10	2144.20
1.00	285.20	640.70	961.30	1211.50	1405.80	1584.00	1778.60	1944.70	2145.00
3.00	285.20	640.70	961.30	1211.50	1405.90	1584.30	1778.90	1945.00	2145.30
5.00	285.20	640.70	961.30	1211.50	1405.90	1584.30	1779.20	1945.40	2146.00
10.00	287.60	641.00	961.70	1211.50	1405.90	1584.30	1779.40	1945.60	2146.50

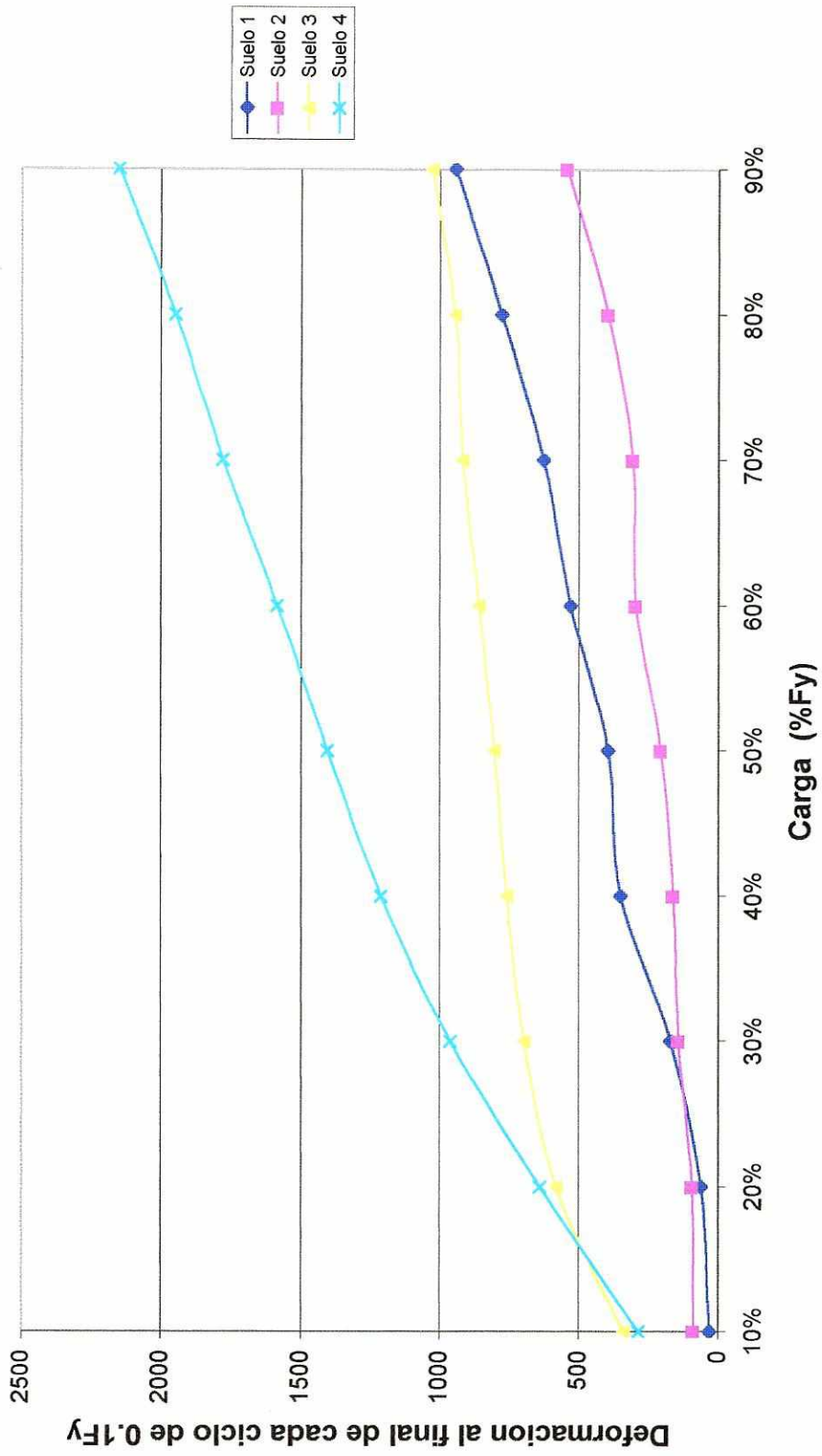
Curvas de desplazamiento lento Prueba No. 4



Tensión de desplazamiento lento crítico Prueba No. 4



Curvas de tension critica de desplazamiento lento crítico



E. Interpretación de los resultados de las pruebas de tracción

El análisis de los resultados de las pruebas se realiza de forma individual para cada prueba observándose un comportamiento similar en las cuatro pruebas. Haciendo un análisis de los gráficos de las cuatro pruebas se puede observar claramente la tendencia lineal de las curvas en los gráficos de deformación contra tiempo (graficado en escala logarítmica) de todas las pruebas. Cuando se presenta el caso todas las curvas están casi rectas quiere decir que no se ha obtenido la tracción límite (T_L).

Tomando en cuenta todo lo anterior se puede afirmar que el valor mínimo de la tracción en todas las pruebas es al menos el cien por ciento de la carga aplicada (21.4 ton). Cabe mencionar que para propósitos de diseño la carga queda restringida hasta un 90 por ciento de la carga límite.

F. Cálculo de la fricción de la inclusión con el suelo

La carga que resiste una inclusión se puede calcular con la siguiente expresión:

$$T = T_M * J * K * L * f_1$$

Donde T es la carga que resiste el anclaje (tracción), J es el diámetro de la perforación, K es un factor de expansión del cuerpo de la inclusión respecto del diámetro de la perforación (para el caso del presente ensayo su valor es 1.00 ya que la inclusiones no fueron llenadas a presio), L es la longitud del cuerpo de la inclusión y f_1 es la fricción entre el cuerpo de la inclusión y el suelo.

Entonces

$$f_1 = T / T_M * J * K * L$$

Inclusión No. 1

$$J = 11.43 \text{ cm} = 4\frac{1}{2} \text{ pulg.} = 0.375 \text{ pies}$$

$$T = 21.4 \text{ ton} = 42,800 \text{ lbs.}$$

$$L = 12.00 \text{ m} = 39.37 \text{ pies}$$

$$K = 1.00$$

$$f_1 = 42,800 / (3.141593 * 0.375 * 1.00 * 39.37) = 922.78 \text{ lb/pie}^2$$

Inclusión No. 2

$$J = 11.43 \text{ cm} = 4\frac{1}{2} \text{ pulg.} = 0.375 \text{ pies}$$

$$T = 21.4 \text{ ton} = 42,800 \text{ lbs.}$$

$$L = 9.00 \text{ m} = 29.53 \text{ pies}$$

$$K = 1.00$$

$$f_1 = 42,800 / (3.141593 * 0.375 * 1.00 * 29.53) = 1230.27 \text{ lb/pie}^2$$

Inclusión No. 3

$$J = 11.43 \text{ cm} = 4\frac{1}{2} \text{ pulg.} = 0.375 \text{ pies}$$

$$T = 21.4 \text{ ton} = 42,800 \text{ lbs.}$$

$$L = 9.00 \text{ m} = 29.53 \text{ pies}$$

$$K = 1.00$$

$$f_1 = 42,800 / (3.141593 * 0.375 * 1.00 * 29.53) = 1230.27 \text{ lb/pie}^2$$

Inclusión No. 4

$$J = 11.43 \text{ cm} = 4\frac{1}{2} \text{ pulg.} = 0.375 \text{ pies}$$

$$T = 21.4 \text{ ton} = 42,800 \text{ lbs.}$$

$$L = 12.00 \text{ m} = 39.37 \text{ pies}$$

$$K = 1.00$$

$$f_1 = 42,800 / (3.141593 * 0.375 * 1.00 * 39.37) = 922.78 \text{ lb/pie}^2$$

V. CONCLUSIONES

- A. Se ha determinado, por medio del ensayo de tracción que la fricción entre el cuerpo de una inclusión (ver tabla 9.2) y un suelo tipo 1 (ver tabla 9.1) es de cuando menos 922.78 lb/pie².
- B. Se ha determinado, por medio del ensayo de tracción que la fricción entre el cuerpo de una inclusión (ver tabla 9.2) y un suelo tipo 2 (ver tabla 9.1) es de cuando menos 1230.27 lb/pie².
- C. Se ha determinado, por medio del ensayo de tracción que la fricción entre el cuerpo de una inclusión (ver tabla 9.2) y un suelo tipo 3 (ver tabla 9.1) es de cuando menos 1230.27 lb/pie².
- D. Se ha determinado, por medio del ensayo de tracción que la fricción entre el cuerpo de una inclusión (ver tabla 9.2) y un suelo tipo 4 (ver tabla 9.1) es de cuando menos 922.78 lb/pie².
- E. Los factores que influyen en la resistencia de una inclusión son el diámetro de la perforación (J), el factor de expansión del cuerpo de la inclusión respecto al diámetro de la perforación (K), la longitud del cuerpo de la inclusión y la fricción entre el cuerpo de la inclusión y el suelo.
- F. Para obtener resultados de la prueba de tracción que proporcionen un valor más exacto de la fricción entre el cuerpo de la inclusión y el suelo es necesario limitar la longitud de las inclusiones para así reducir el área del cuerpo de la inclusión en contacto con el suelo.
- G. El ensayo de tracción es mejor método para obtener el valor real de la fricción entre el cuerpo de una inclusión y el suelo.
- H. Para el buen desarrollo de una prueba de tracción se deben seguir las normas de seguridad recomendadas y utilizar equipo que cumpla con los requerimientos de precisión y exactitud.

VI. RECOMENDACIONES

- A. Realizar ensayos de tracción en inclusiones limitado la longitud de las mismas para así obtener valores más exactos de la fricción entre el cuerpo de la inclusión y el suelo.
- B. Realizar ensayos futuros cambiando la resistencia de la lechada para observar su influencia en la interacción del suelo y el cuerpo de la inclusión.
- C. Realizar más ensayos de tracción con diferentes suelos tanto para obtener mayor información que amplíe los valores obtenidos en este estudio.
- D. Realizar otros experimentos incrementando el diámetro de la barra de refuerzo, para obtener un valor más exacto de la fricción sin modificar la longitud de la inclusión.

VII. BIBLIOGRAFÍA

BACHY Y ASOCIADOS S.A.

Tirantes
Venezuela, Bachy, 1989.

B. R. CHRISTOPHER, ET AL

Reinforced soil structures Volume II. Summary of research and systems information
EEUU., National Technical Information Service (NTIS), 1989.

DEEP FOUNDATIONS INSTITUTE

Soil nailing desing an applications A collection of papers
EEUU., Deep Foundations Institute (DFI), 1991.

DIN

Norma DIN 4125 Parte 1: Anclajes provisionales inyectados en el terreno, calculo,
ejecución y ensayo.
España, DIN, 1978.

DIN

Norma DIN 4125 Parte 2: Anclajes permanentes inyectados en el terreno, calculo,
ejecución y ensayo.
España, DIN, 1978.

EARTH ENGINEERING AND SCIENCES, INCORPORATED BALTIMORE, MD

Soil nailing for stabilization of highway slopes and excavations
EEUU., National Technical Information Service, 1991

J. A. JIMÉNEZ, ET AL

Geotecnia y cimientos III segunda parte.
España, Editorial Rueda, 1980.

POST-TENSIONING INSTITUTE

Recommendation for prestressed rock and soil anchors
EEUU., Post-Tensioning Institute, 3era ed, 1996.

STS CONSUSLTANTS, LIMITED NORTHBROOK, IL

Reinforced soil structures Volume I. Design and construction guidelines.
EEUU., National Technical Information Service (NTIS), 1989.