

DISEÑO GEOTECNICO - ESTRUCTURAL DE PANTALLAS ANCLADAS

Nelson J. Rodríguez D.: Ingeniero Geotécnico Consultor
Profesor de Diseño de Obras de Tierra, U.C.V.

SUMARIO

Desde el punto de vista estructural, las pantallas ancladas en forma activa son losas de concreto armado apoyadas en forma continua contra el terreno y solicitadas normalmente a sus planos por el sistema de anclajes, cuyo diseño constituye un típico problema de interacción suelo-estructura.

En este artículo se resumen los resultados obtenidos de un amplio **ESTUDIO PARAMETRICO** efectuado mediante un código de cálculo numérico por elementos finitos, y como conclusión de dicho estudio se presenta una metodología de rápida y fácil aplicación, que permite optimizar técnica y económicamente el diseño de este tipo de obra, considerando la influencia relativa de los principales factores o elementos interaccionantes: terreno, estructura y anclajes.

La metodología propuesta es aplicable sólo a pantallas simplemente apoyadas en el pie (sin empotramiento) y ancladas con varias filas de tirantes activos (pretensados), dispuestos con espaciamientos regulares tanto en dirección vertical como horizontal.

Finalmente se incluye un ejemplo de aplicación de la metodología propuesta.

PLANTEAMIENTO GENERAL DEL PROBLEMA

Las pantallas en concreto armado ancladas en forma activa, son sistemas estructurales de estabilización que permiten introducir solicitaciones externas a un talud, con el propósito de incrementar su grado de estabilidad. Dichas pantallas están constituidas por:

- el sistema de anclajes y
- la losa de concreto armado.

Los anclajes son elementos de tracción cuya función es aplicar la fuerza externa estabilizadora al terreno, mientras que la losa de concreto armado, tiene las múltiples funciones de repartir las fuerzas de los anclajes en toda la superficie del talud, contener los volúmenes más superficiales del terreno, y proteger los materiales contra fenómenos como la erosión y la meteorización.

El diseño de la pantalla se inicia una vez que se ha determinado, mediante apropiados análisis de estabilidad, la magnitud de la carga externa que debe ser aplicada mediante el sistema de anclajes, necesaria para proveer el factor de seguridad requerido para el talud. Este aspecto previo del proceso de diseño, queda fuera del alcance del presente artículo.

Generalmente, el diseño definitivo del sistema estructural Pantalla Anclada exige una etapa de optimización técnica-económica, ya que las soluciones teóricamente equivalentes son muchas, pudiéndose combinar el espaciamiento de los anclajes con su carga de trabajo, para conseguir la fuerza de estabilización total requerida.

En este proceso de optimización técnica-económica, interviene también la losa de concreto, toda vez que sus características estructurales de espesor y refuerzo están íntimamente ligadas a los mencionados parámetros de carga y separación de los anclajes.

Finalmente interviene el terreno como tercer elemento, con sus características de rigidez, para la definición completa del comportamiento estructural del conjunto terreno-pantalla-anclajes.

De allí la idea fundamental que motivó el presente trabajo, de correlacionar las características y propiedades de cada uno de estos elementos interaccionantes, para efectuar con mayor propiedad el diseño estructural, evitando la práctica simplista de considerar la losa como una viga continua sobre apoyos discretos rígidos (anclajes), solicitada por la reacción del terreno supuesta uniformemente distribuida, y de estimar los momentos flectores máximos tanto positivos como negativos, usando un coeficiente de momento de 1/10.

En efecto, tal forma simple de proceder ofrece poca confianza, ya que en algunos casos sobrestima las sollicitaciones de flexión en la placa (encareciendo el diseño) y en otros las subestima, poniendo en entredicho la integridad estructural de la pantalla.

Para cumplir con el objetivo señalado se llevó a cabo un amplio análisis paramétrico utilizando un código numérico de elementos finitos, modelando todos los principales elementos que intervienen en la definición del fenómeno de la interacción que se desarrolla en una pantalla en concreto armado anclada.

METODOLOGIA DE ANALISIS Y VARIABLES CONSIDERADAS

El análisis se realizó asimilando la pantalla anclada a una losa maciza de espesor uniforme (t), apoyada en un medio elástico, y solicitada con cargas puntuales por los anclajes.

En particular se discretizó un paño típico de losa, mediante elementos finitos prismáticos caracterizados por su geometría y por sus propiedades físicas elásticas. En la Figura -1- se presenta el modelo, convenientemente codificado, utilizado para el análisis.

El citado modelo representa un paño de esquina simétrico con respecto a los bordes internos vertical y horizontal, es decir, un cuarto de losa del total. Dicho modelo está constituido por 136 elementos y 77 nodos, para simular con discretización satisfactoria el sistema de carga, y la losa de concreto armado.

El terreno fué modelado como un semi-espacio de Winkler, bajo la hipótesis de comportamiento mecánico de tipo isótropo, elástico y lineal, por medio de elementos monodimensionales prismáticos de sección constante (dispuestos normales al plano de la losa de concreto armado) capaces de transmitir solamente sollicitaciones axiales de compresión, caracterizados por su rigidez axial $K = AE/L = KSA$, siendo A la sección transversal del elemento (área de influencia de cada nodo en el modelo) y K_s el módulo de reacción del terreno.

La anterior hipótesis considera una relación lineal entre esfuerzos normales y desplazamientos ($\sigma = K_s \delta$), que puede ser aceptada como una buena aproximación del comportamiento real que ocurre en este tipo de estructuras en análisis, ya que bajo las magnitudes generalmente reducidas de esfuerzos aplicados, las deformaciones permanecen en campo elástico.

La losa de concreto armado fué caracterizada por su espesor (t) a través de su correspondiente rigidez flexional ($E_c I_c$), siendo E_c el módulo de elasticidad del concreto e I_c el momento de inercia de su sección transversal ($I_c = bt^3/12$).

La rigidez relativa entre la masa del terreno y la pantalla fué introducida en los análisis a través de la relación:

$$\sqrt[4]{K_s/4E_c I_c}$$

Para el sistema de anclajes se usaron como variables el espaciamiento (S) y la magnitud de las cargas de tensión correspondientes (T).

ANALISIS PARAMETRICO

Para cada una de las variables definidas, se consideraron los siguientes rangos de valores, que reflejan los casos más frecuentes de interés práctico, a saber:

K_s : Módulo de reacción del terreno: 100, 500, 1000, 5000, 10000 ton/m³.

t: Espesor de la placa: 0.10, 0.20, 0.30, 0.40 m.

S: Espaciamiento entre los anclajes: 1, 2, 3, 4, 5 m.

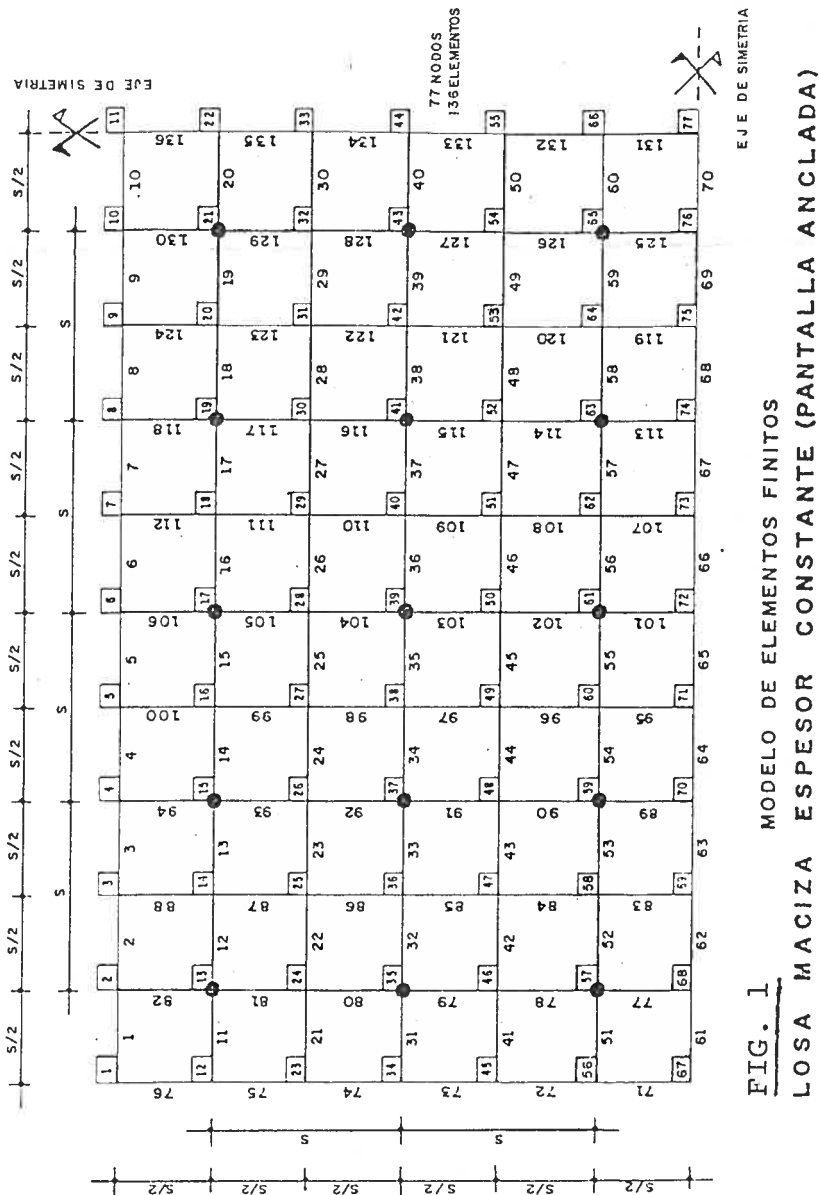


FIG. 1 MODELO DE ELEMENTOS FINITOS LOSA MACIZA ESPESOR CONSTANTE (PANTALLA ANCLADA)

T: Tensión de los anclajes: En cuanto a esta variable se refiere, cabe destacar que dada la linealidad existente entre solicitaciones internas y cargas aplicadas (para un mismo espaciamiento S), dichas solicitaciones internas pueden ser "normalizadas", dividiéndolas por el valor de la carga aplicada. Esta condición permitió efectuar los análisis paramétricos considerando en todos los casos una carga unitaria ($T = 1$ ton) para los anclajes.

Debe insistirse que la condición antes expuesta, es sólo válida para comportamiento elástico lineal tanto del suelo como de la estructura, como son las premisas del caso que nos ocupa.

El análisis paramétrico se llevó a cabo con el objeto de estudiar la influencia de la variación de cada uno de estos parámetros sobre las solicitaciones internas en la losa de concreto de las pantallas:

Para cada valor de rigidez relativa terreno-estructura, definida por combinaciones entre módulo de reacción y rigidez flexional de la losa, se efectuó un análisis del sistema estructural haciendo variar el espaciamiento entre anclajes, siempre solicitados con una carga unitaria.

Este proceso fué repetido hasta cubrir las 100 combinaciones previstas entre los valores antes asignados para cada parámetro básico en consideración.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y GRÁFICOS DE DISEÑO

Los resultados de cada cálculo efectuado para el análisis paramétrico, comprenden: las magnitudes de los momentos flectores, torsores, y esfuerzos cortantes, los valores de las deformaciones de rotación y los desplazamientos normales a la superficie de la losa.

Dado que el diseño estructural de este elemento atiende fundamentalmente a verificaciones por flexión, el alcance del presente trabajo se limitó a correlacionar los valores máximos de los momentos flectores positivos y negativos, con los parámetros de caracterización seleccionados para el terreno, la estructura y el sistema de anclajes.

Estas correlaciones se presentan convenientemente procesadas, en los gráficos de las Figuras -2- y -3-, en las cuales se reportan respectivamente los Momentos Positivos y Negativos Máximos Normalizados (M_{max}/T) correspondientes a cada Separación de anclajes (S), en función de la Rigidez Relativa terreno-estructura

El uso de estos gráficos para el diseño, se ilustra posteriormente con un ejemplo de aplicación práctica.

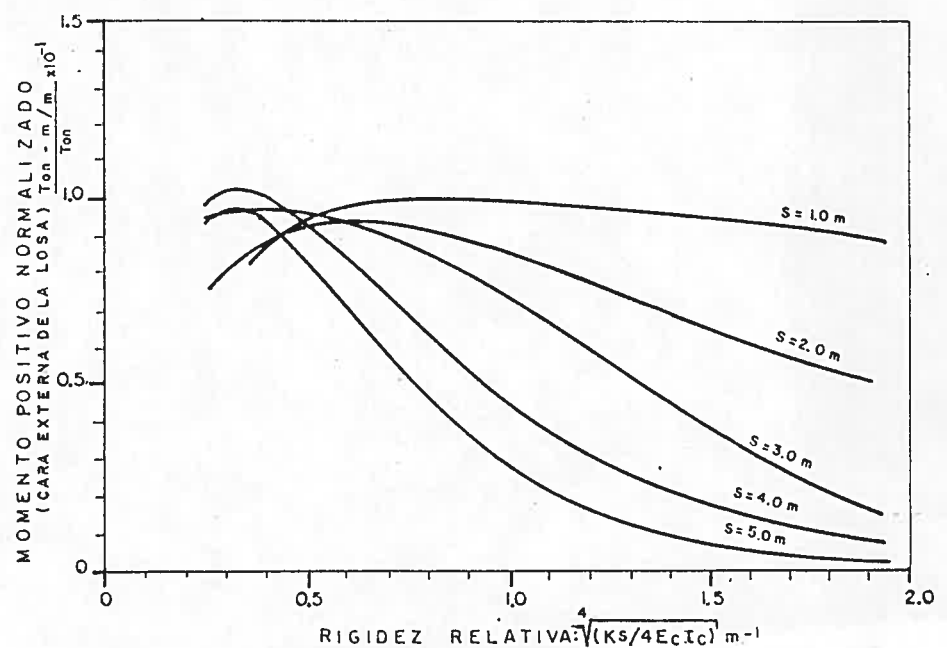


FIG-2- MOMENTO MÁXIMO POSITIVO NORMALIZADO Vs. RIGIDEZ RELATIVA.

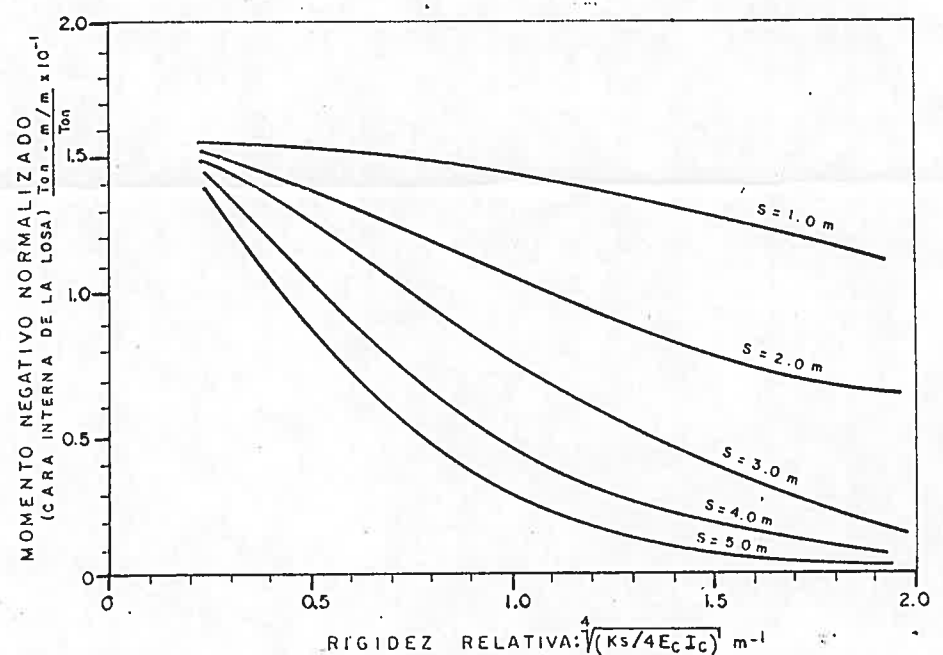


FIG-3- MOMENTO MÁXIMO NEGATIVO NORMALIZADO Vs. RIGIDEZ RELATIVA.

CONCLUSIONES:

- 1) El diseño de las pantallas de concreto armado ancladas en forma activa, es un típico problema de rigidez relativa y de interacción terreno-estructura.
- 2) Utilizando un código de cálculo numérico por elementos finitos, que considera con fidelidad el fenómeno de la interacción, se realizó un estudio paramétrico, que permitió la obtención de curvas de correlación entre las principales variables utilizadas para caracterizar dicho complejo estructural.

- 3) Para caracterizar el terreno se usó el concepto de módulo de reacción (K_s); para la losa de concreto armado consideramos su rigidez flexional ($E_c I_c$), mientras que para el sistema de anclajes se utilizaron como variables el espaciamiento (S) y la magnitud de las cargas de tensión correspondientes (T).
- 4) Las Curvas de Correlación obtenidas (Figuras 2 y 3), bien pueden ser usadas para efectuar estimaciones satisfactorias, de los valores de solicitaciones de momentos flectores en la losa de concreto armado, proporcionando al proyectista una metodología sencilla para optimizar técnica y económicamente el diseño de estos sistemas estructurales de contención, logrando la combinación más conveniente de carga y separaciones de anclajes, espesor de losa y cuantías de refuerzos de acero correspondientes.
- 5) El estudio paramétrico realizado constituye en cierta medida, un análisis de la sensibilidad de las distintas variables que intervienen en el diseño de una pantalla anclada.

En la Tabla siguiente, se muestra en forma de puntuación, el grado de influencia relativa deducida del análisis, antecedido por un signo que indica aumento o decremento de las deformaciones y momentos máximos en la placa:

INFLUENCIA RELATIVA DE LOS PARAMETROS

PARAMETRO	DEFORMACIONES NORMALES A LA PANTALLA	MOMENTO POSITIVO	MOMENTO NEGATIVO
- MÓDULO DE REACCIÓN DEL TERRENO (K_s)	+ 3	+ 1	+ 2
- RIGIDEZ FLEXIONAL DE LA LOSA ($E_c I_c$)	+ 1	+ 2	+ 3
- RIGIDEZ RELATIVA TERRENO- ESTRUCTURA ($\sqrt[4]{K_s/4 E_c I_c}$)	+ 2	+ 2	+ 3
- CARGA DE ANCLAJES (T)	+ 2	+ 2	+ 3
- SEPARACIÓN ENTRE ANCLAJES (S)	- 1	- 2	- 3

- (1) Influencia menor (+) Incremento
(2) Influencia mayor (-) Decremento

- 6) El parámetro módulo de reacción, que hemos considerado para caracterizar el terreno, incide en forma significativa en la rigidez relativa, y consecuentemente en la magnitud de las solicitaciones de flexión en la losa, por lo tanto, de una adecuada determinación y/o una estimación razonablemente correcta de dicho parámetro, depende en buen grado la exactitud en la evaluación de las solicitaciones de momentos y por supuesto la calidad del diseño.

EJEMPLO DE APLICACION

Con el objeto de ilustrar el uso de los gráficos (Figuras 2 y 3) para el diseño de una pantalla anclada, se presenta a continuación un ejemplo de aplicación práctica.

Una vez definida las solicitaciones de momento mediante la metodología propuesta, el diseño en flexión de la losa se recomienda sea desarrollado por teoría de rotura siguiendo el flujograma incluido en el anexo.

EJEMPLO DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE UNA PANTALLA DE CONCRETO ARMADO ANCLADA

SEA EL CASO DE DISEÑAR ESTRUCTURALMENTE UNA PANTALLA ANCLADA PARA ESTABILIZACIÓN DE UN TALUD EXPUESTO EN UNA MASA DE SUELO QUE PUEDE SER CARACTERIZADA CON UN MÓDULO DE REACCIÓN $K_s = 5.000$ (TON/M³). PARA LOGRAR EL FACTOR DE SEGURIDAD DESEADO, DEL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD EFECTUADO PREVIAMENTE, SE ESTIMÓ QUE UNA DE LAS ALTERNATIVAS FACTIBLES ES A BASE DE ANCLAJES DE $T = 35$ TON DE CARGA DE SERVICIO CON ESPACIAMIENTOS REGULARES DE $S = 2.00$ M TANTO EN SENTIDO VERTICAL COMO HORIZONTAL.

PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA PANTALLA SE UTILIZARÁN MATERIALES DE LAS SIGUIENTES CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS Y ELÁSTICAS:

- CONCRETO PROYECTADO: $f'_c = 210$ KG/CM²
 $E_c = 15000 \sqrt{f'_c} = 2.1 \times 10^5$ KG/CM²
- ACERO: $f_y = 4200$ KG/CM²
 $E_s = 2.1 \times 10^6$ KG/CM²

VERIFICACIÓN DE UNA LOSA DE $t = 0.30$ M DE ESPESOR (FLEXIÓN)

ALTURA ÚTIL $d = 0.275$ M (RECUBRIMIENTO MÍNIMO 0.025 M)

$$t = 0.30 \text{ M} \quad \text{INERCIA } I_c = bt^3/12 = 2.25 \times 10^3 \text{ M}^4$$

$$b = 1.00 \text{ M} \quad \text{RIGIDEZ FLEXIONAL } E_c I_c = 4725 \text{ TON-M}^2$$

PARA EL VALOR DE RIGIDEZ RELATIVA $\sqrt[4]{K_s/4 E_c I_c} = 0.72 \text{ M}^{-1}$

RESULTAN LOS SIGUIENTES MOMENTOS NORMALIZADOS (FIGURAS 2 Y 3 PARA $S = 2.00$ M):

$$\text{MOMENTO MÁXIMO POSITIVO NORMALIZADO: } m^+/T = 0.925 \times 10^{-1} \frac{\text{TON-M/M}}{\text{TON}}$$

(CARA EXTERNA)

$$\text{MOMENTO MÁXIMO NEGATIVO NORMALIZADO: } m^-/T = 1.25 \times 10^{-1} \frac{\text{TON-M/M}}{\text{TON}}$$

(CARA INTERNA)

MOMENTOS ACTUANTES:

$$m^+ = 0.925 \times 10^{-1} \times 35 = 3.24 \text{ TON-M/M} = 3240 \text{ KG-M/M}$$

$$m^- = 1.25 \times 10^{-1} \times 35 = 4.38 \text{ TON-M/M} = 4380 \text{ KG-M/M}$$

MOMENTOS ÚLTIMOS (FACTOR DE MAYORACIÓN DE 1.4):

$$M_u^+ = 3240 \times 1.4 = 4536 \text{ KG-M/M}$$

$$M_u^- = 4380 \times 1.4 = 6132 \text{ KG-M/M}$$

MOMENTOS ESPECÍFICOS:

$$\mu^+ = 0.0286$$

$$\mu^- = 0.0386$$

CUANTÍA BALANCEADA: $w_b = 0.434$

$$w^+ = 0.0648 < w_b \rightarrow \rho^+ = 0.0032 > 0.0018 \rightarrow A_s^+ = 8.8 \text{ CM}^2/\text{M}$$

$$w^- = 0.0880 < w_b \rightarrow \rho^- = 0.0044 > 0.0018 \rightarrow A_s^- = 12.1 \text{ CM}^2/\text{M}$$

REPARTICIÓN DE ACERO PROPUESTA: CARA EXTERNA: $\emptyset 1/2'' @ 15$ CM C/S
CARA INTERNA: $\emptyset 1/2'' @ 10$ CM C/S

VERIFICACIÓN DE LA LOSA A CORTE-PUNZONADO:

$$v_c = 1.06 \phi \sqrt{f'_c} ; \phi = 0.85$$

$$f'_c = 210 \text{ KG/CM}^2$$

$$v_c = 13 \text{ KG/CM}^2$$

$$v_u = \frac{1.4 T}{4(b+d) a} ; T = 35 \text{ TON}$$

$$b = 0.20 \text{ M (LADO DE LA PLANCHA DE APOYO DE ANCLAJES)}$$

$$a = 0.275 \text{ M}$$

$$v_u = \frac{1.4 \times 35}{4(0.20+0.275)0.275} = 93 \text{ TON/M}^2 = 9.3 \text{ KG/CM}^2 < v_c$$

BIBLIOGRAFIA

BOWLES, J. (1977). "Foundation analysis and design". Mc. Graw - Hill, Inc. U.S.A.

CENTENO W., R. (1980): "Interacción Suelo-Estructura en obras de contención y estructuras enterradas". VI Seminario de Mecánica de Suelos. Sociedad Venezolana de Mecánica del Suelo e Ingeniería de Fundaciones. Caracas.

PARK, R. y PAULAY, T. (1983): "Estructuras de concreto reforzado" Editorial Limusa. México.

FERRI, G. (1983): "El método de los Elementos finitos en las Aplicaciones Geotécnicas". Universidad Central de Venezuela, Caracas.

SCHNEEBELLI, G. (1974): "Muros Pantalla". Técnicas de realización. Método de Cálculo. Editores Técnicos Asociados, S.A. Barcelona. España.

A N E X O

FLUJOGRAMA A SEGUIR PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE LA LOSA DE CONCRETO ARMADO (TEORIA DE ROTURA).

