

# **EFFECTOS DE LOS ASENTAMIENTOS EN LA ESTRUCTURA**

Por: Luis F. Orozco R.

## **1. INTRODUCCION**

El objeto de esta charla es contar algunos de los problemas que encontramos los Ingenieros de Suelos y Fundaciones, en nuestra relación con los Ingenieros Calculistas de las estructuras de edificaciones urbanas. Me referiré brevemente a los diferentes capítulos que interesan al Ingeniero Estructural en un estudio de suelos y de manera un poco más completa, al tratamiento que se le da usualmente a los asentamientos diferenciales y a los problemas que pueden derivarse de nuestro sistema de trabajo.

Las personas que tienen relación con el Ingeniero de Suelos para llegar al diseño y construcción de una cimentación son: el propietario de la obra, o quien contrata los trabajos; el Arquitecto, que define los volúmenes de los cuales depende realmente el sistema de cimentación que se escoja; el Ingeniero de Estructuras, con quien es necesario interactuar con el fin de escoger la fundación más favorable, tanto por su seguridad como por su economía; y finalmente el Constructor de la cimentación, quien debe estar de acuerdo y seguir fielmente las instrucciones del estudio de suelos para lograr una construcción segura y sin problemas.

Sin embargo, muchas veces ocurre que el propietario contrata al Ingeniero de Suelos contando tan sólo con unos planos de anteproyecto y exige del suelista la entrega de su estudio aún antes de contratar al Ingeniero Calculista. Si a esto se agrega que después el Ingeniero Calculista no se comunica con el Ingeniero de Suelos, puede resultar que la cimentación escogida no sea la más adecuada, o que sea o más altas que las que en realidad existirán, o que no se tengan en cuenta algunas de las recomendaciones que el Ingeniero de Suelos considera importantes.

Me ha ocurrido en algunas ocasiones que se aumenta la carga en las columnas con relación a lo previsto por nosotros con base en un anteproyecto, o que se cambia el nivel de sótano sin previa consulta (lo cual puede cambiar totalmente el sistema de cimentación), o que no se tiene en cuenta en el diseño de una losa flotante el sistema de excavaciones que exige que esta se construya por pedazos, o que el Ingeniero Calculista considera que no es muy importante el requisito de centrar la losa de fundación con las cargas, lo cual puede resultar en una inclinación de la edificación si se tienen suelos blandos y se esperan asentamientos altos.

A continuación enumero, en términos muy generales, los apartes de un estudio de suelos que deben interesar al Ingeniero Calculista:

1. Descripción del proyecto y magnitud de las cargas utilizadas en el análisis de suelos.
2. Perfil estratigráfico, con el fin de entender por qué se escogió un sistema de cimentación y cuáles son las posibles alternativas que existen.
3. Tipo de cimentación y capacidad de soporte para el diseño, así como otras recomendaciones que se presenten para dicho diseño o dimensionamiento de la fundación.
4. El valor de los asentamientos totales y diferenciales, de lo cual hablaré de manera más completa adelante.
5. Las recomendaciones constructivas de las excavaciones, pues de estas depende muchas veces la escogencia de un sistema de fundación, o el diseño estructural de dicha cimentación y muros de contención.
6. Los diagramas de presión de tierras para las diferentes etapas del proceso de construcción de muros y ejecución de excavaciones, así como durante la vida útil de la estructura.
7. El comportamiento sísmico del sistema suelo estructura, ya sea de acuerdo con la definición del Código, o con base en el espectro que resulta de analizar la

respuesta de amplificación de un suelo blando ante un sismo de diseño.

Todos estos son apartes o capítulos del estudio de suelos que deben ser tenidos en cuenta por el Ingeniero Calculista y muchas veces deben ser definidos por el Ingeniero de Suelos, teniendo muy en cuenta los criterios del Calculista.

## **2. EL PROBLEMA: ASENTAMIENTOS DIFERENCIALES**

Cuando el Ingeniero de Suelos calcula un asentamiento diferencial tiene dos posibilidades, a saber:

- a. Suponer que la estructura es totalmente flexible, esto es calcular los asentamientos únicamente en función de las cargas verticales previstas, sin tener en cuenta la redistribución de cargas que se lleva a cabo debido a la rigidez de la superestructura.
- b. Tener en cuenta la rigidez de la cimentación, ya sea de las vigas de amarre o de la losa de fundación como se hace en los análisis de interacción suelo estructura, o en los cálculos de losas rígidas de cimentación.

Sin embargo en ninguno de los dos cálculos los asentamientos diferenciales obtenidos son reales y pienso que en suelos blandos, al no tener en cuenta los esfuerzos y momentos que induce el diferencial en la superestructura, se puede estar diseñando un edificio que tiene una capacidad reducida para soportar un sismo, y aún en algunos casos para soportar sin agrietamientos, las cargas verticales vivas y muertas. Todavía más, me atrevería a decir que en algunos casos los esfuerzos inducidos son los culpables de agrietamientos que no tienen explicación clara y además pueden ocurrir a largo plazo por deformación plástica de los elementos estructurales (creep).

En la tabla No. 1 adjunta, presentada por Bjerrum en 1963, se muestran las deformaciones angulares límites que según él se pueden permitir en una estructura antes de que se presenten los problemas que menciona. Sin embargo me preocupa que al calcular la estructura sin tener en cuenta los esfuerzos debidos a movimientos diferenciales, segura-

mente no es posible predecir las deformaciones angulares y por lo tanto limitarlas a estos valores.

### 3. UN EJEMPLO DEL COMPORTAMIENTO DE UN EDIFICIO TENIENDO EN CUENTA LOS ASENTAMIENTOS

Con el fin de corroborar lo dicho atrás, procedimos a calcular los asentamientos de un edificio hipotético de seis pisos en Bogotá, apoyado en unas arcillas de consistencia media, similares a las que se encuentran en la zona de la Urbanización La Alhambra, pero además suponiendo que no tiene sótano, es decir que no hay alivio de cargas por flotación.

El Ingeniero Luis Guillermo Aycardi, de la firma PCA, nos ayudó muy amablemente, llevando a cabo los análisis del pórtico estructural y encontrando con distintos valores de la constante de resorte calculados a partir de los asentamientos, los diferentes diagramas de momentos y las cargas redistribuidas a nivel de cimentación. Se llevó a cabo por lo tanto un proceso de iteración en el que una vez hallados los asentamientos para una carga vertical estática determinada, se encontraba una constante de resorte (diferente para cada zapata), definida como,

$$K = \frac{Q}{\rho}$$

y con los valores de estas constantes se recalculaba el pórtico para obtener nuevos diagramas de momentos y nuevas cargas en las columnas.

Al principio dimos "palos de ciego", iniciamos con muchos edificios con alturas de dos a siete pisos, con dos tipos de suelos y con diseños de zapatas con una gran variedad de valores de capacidad de soporte. Sin embargo, llegamos a la conclusión de que esto implicaba una cantidad excesiva de trabajo y además las iteraciones convergían muy lentamente como veremos, por lo cual se requerirían muchos ciclos. Se resolvió entonces limitarnos al edificio de seis pisos, a un sólo perfil estratigráfico y a una

capacidad de soporte de  $8.0 \text{ T/m}^2$ , por lo cual las zapatas resultaron un poco más grandes de lo usual. (figura No. 1).

El perfil estratigráfico escogido aparece a grandes rasgos en la figura No. 2. Se aclara que se utilizó una repartición de esfuerzos de acuerdo con la teoría de Boussinesq (Integración de la ecuación de Boussinesq para cargas repartidas) y se tuvieron en cuenta los incrementos de esfuerzos debidos a todas las zapatas en cada punto de la masa de suelo. Así mismo se utilizó la teoría de la consolidación unidimensional de Terzaghi, para hallar los asentamientos sufridos por cada zapata, debidos a los esfuerzos causados por estas y se aclara que no se utilizó la corrección de Skempton-Bjerrum para tener en cuenta que la consolidación no es propiamente unidimensional, pues esta no se consideró necesaria para el caso que nos ocupa. Las ecuaciones utilizadas para el análisis de asentamientos aparecen en la tabla No. 2.

En la figura No. 3 aparecen los resultados del primer análisis del edificio. Las cargas obtenidas con el análisis estructural y los asentamientos basados en la teoría de la consolidación unidimensional. Allí se observa en el pórtico central un asentamiento diferencial de 3.71 cm. Este valor del asentamiento, que sería el que se presenta en el estudio de suelos, se utilizó para obtener los momentos que este tipo de formación diferencial induce en la estructura. Como se observa en la figura No. 4 este asentamiento es excesivo y resulta en momentos muy altos e improbables afectando la estructura.

En la figura No. 5 aparecen los momentos iniciales y los momentos finales calculados mediante el sistema de iteraciones sucesivas mencionado atrás, teniendo en cuenta la rigidez de la estructura y la compresibilidad del suelo simultáneamente. Como se ve allí los momentos en la viga, sobretodo los negativos, tienen cambios hasta del 80%, lo cual considero alto y seguramente resulta en disminución de la capacidad de soporte de la estructura ante cargas sísmicas y en general rotaciones y o deflexiones que podrían llegar a representar molestias. Sin embargo estos momentos no se parecen en nada a los que se obtienen de utilizar los asentamientos diferenciales calculados para una estructura totalmente flexible, (figura 4).

En las figuras 6 a 9 aparecen los comportamientos de los momentos en una viga, de los asentamientos diferenciales, de las cargas en pedestal y del módulo de resorte en función de los pasos de cada iteración. Aun cuando algunas de estas curvas no se comportaron de la manera esperada, sí se puede decir que a medida que se avanzaba en las iteraciones se llegaba a un valor relativamente constante (la curva se volvía paralela al eje horizontal). Por otra parte, los momentos en la viga de segundo piso, al igual que los momentos en otras vigas externas del edificio, aumentaban en el nudo de la columna de la izquierda, o nudo correspondiente a la columna externa y disminuían en el nudo de la columna derecha o columna interna.

Así mismo, en la figura 7 se ve como los asentamientos diferenciales que admite la estructura, dada su rigidez, son muy pequeños, inferiores a 1 cm, mientras que los asentamientos diferenciales calculados de acuerdo a la compresibilidad del suelo, son más altos, superiores a 2 cm para las cargas dadas. Pero también se ve como estos tienden a acercarse cada vez que avanza el número de iteraciones.

También es claro que al incrementar en el número de iteración, (figura 8) las cargas de las columnas externas tienden a aumentar y las cargas de las columnas internas tienden a disminuir, efectuándose así una redistribución de cargas debida a la rigidez de la estructura, tal y como se esperaba. En esta misma figura 8 aparece la redistribución de cargas en un análisis en que no se tuvo en cuenta la rigidez de la totalidad del edificio, sino solamente la rigidez de las vigas de amarre y se encontró el mismo tipo de redistribución, además con cargas muy similares.

El módulo de resorte, (figura No. 9) al comparar la columna externa y la columna interna, tuvo un comportamiento que no parece lógico, seguramente ha debido disminuir más rápidamente el módulo correspondiente a la columna interna, e incrementarse más rápidamente el módulo correspondiente a la columna externa. Estos módulos son los que se basan en la deformación obtenida del análisis de asentamientos.

Finalmente en la figura 10 aparece el comportamiento de los asentamientos diferenciales del pórtico central en un

análisis en el cual se tuvo en cuenta únicamente la rigidez de las vigas de amarre. La curva superior corresponde a los asentamientos calculados de acuerdo a la teoría de la consolidación y la curva inferior a los asentamientos basados en el módulo de resorte y permitidos por la rigidez de las vigas de amarre. Esta figura se puede comparar con la figura No. 7 en la cual los asentamientos diferenciales permitidos por la estructura son mucho más bajos.

Creo que estas gráficas demuestran la importancia de tener en cuenta los asentamientos diferenciales en el análisis estructural mediante un proceso iterativo que tienda en los últimos ciclos a simular el comportamiento real de la edificación.

#### 4. CONCLUSIONES

- a. Por todo lo anterior considero que es de gran importancia la "interacción" del Ingeniero de Suelos y del Ingeniero Calculista durante la etapa de diseño de la estructura. De esta manera se pueden confrontar ideas acerca del sistema de cimentación escogido o acerca del sistema de excavaciones previsto y se puede lograr un diseño estructural en el que se tenga más en cuenta la posibilidad de asentamientos diferenciales, sobre todo en suelos blandos como ocurre en la Sabana de Bogotá.
- b. De la conclusión anterior se deriva también la importancia de una comunicación durante la etapa de diseño con el Constructor de la cimentación, ya que del sistema de ejecución de excavaciones depende muchas veces el tipo de cimentación requerido y por lo tanto el análisis estructural.
- c. Los asentamientos diferenciales previstos por el Ingeniero de Suelos son calculados para una estructura totalmente flexible, o a lo sumo teniendo en cuenta la rigidez de la cimentación, por lo cual no son reales. Debe existir un proceso de iteración en el que se incluya la rigidez de la super-estructura y la compresibilidad del suelo, lo cual es cada vez más posible con los nuevos métodos de análisis por computador.

- d. La constante de resorte no es única. Resultan valores diferentes para las diversas cargas y posición de estas dentro de la estructura.
- e. Queda la duda de como se deben acometer los cálculos estructurales para tener en cuenta los esfuerzos y momentos que resultan de los posibles asentamientos diferenciales, sobretodo en suelos blandos como los de la Sabana. Esto seguramente, lo sabrán resolver los Ingenieros Calculistas.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar al Ingeniero Luis Guillermo Aycardi, quien como se mencionó atrás, llevó a cabo en su oficina los cálculos estructurales requeridos para las diferentes iteraciones, además de que colaboró con este trabajo aportando sus invaluable consejos. También agradezco al Ingeniero Alejandro Erasso, de P.C.A., y a los Ingenieros Marcela Salcedo y Juan Diego Díaz de mi oficina, quienes realizaron buena parte del trabajo requerido.

#### 6. REFERENCIAS

- Bjerrum, L. (1963). "Allowable Settlement of Structures," *Proceedings, European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Wiesbaden Germany, Vol. III,* pp. 135-137.
- G. Meyerhof (1947). "The Settlement Analysis of Building Frames". *The Structural Engineer*, Vol. 25, pp. 369-409.
- Skempton, A. W., and Bjerrum, L. (1957). "A contribution to Settlement Analysis of Foundations in Clay," *Geotechnique, London, Vol. 7,* p. 178.

TABLA N° I

**DISTORSION ANGULAR LIMITE según recomendación de Bjerrum (1963).**

TIPO DE DAÑO POTENCIAL

- Peligro para maquinaria sensible a asentamientos	1/750
- Peligro para marcos con diagonales	1/600
- Límite de seguridad para que no haya fisuras en edificios	1/500
- Se inicia agrietamientos en paneles y paredes divisorias	1/300
- Dificultades con grúas de construcción	1/300
- Inclinación de edificios altos y rígidos se hace visible	1/250
- Agrietamiento considerable de paneles y paredes de ladrillo	1/150
- Peligro de daño estructural de edificio	1/150
- Límite de seguridad para paredes flexibles de ladrillo $L/H > 4$	1/150

TABLA N° 2

### REPARTICION DE ESFUERZOS (Boussinesq).

Incremento de esfuerzos en la masa bajo la esquina de una carga rectangular uniforme :

$$\Delta \sigma_z = \frac{P * \left[ \text{ArcTan} \left( \frac{l * b}{Z * R_3} \right) + \frac{l * b * Z}{R_3} * \left( \frac{1}{R_1^2} + \frac{1}{R_2^2} \right) \right]}{2 * \Pi}$$

donde,

$$R_1 = \sqrt{l^2 + Z^2}$$

$$R_2 = \sqrt{b^2 + Z^2}$$

$$R_3 = \sqrt{l^2 + b^2 + Z^2}$$

### CONSOLIDACION UNIDIMENSIONAL (Terzaghi).

$$\rho = \frac{C_R * H}{1 + e_o} * \text{Log}_{10} \frac{(\sigma_{ov} + \Delta \sigma_z)}{\sigma_{ov}}$$

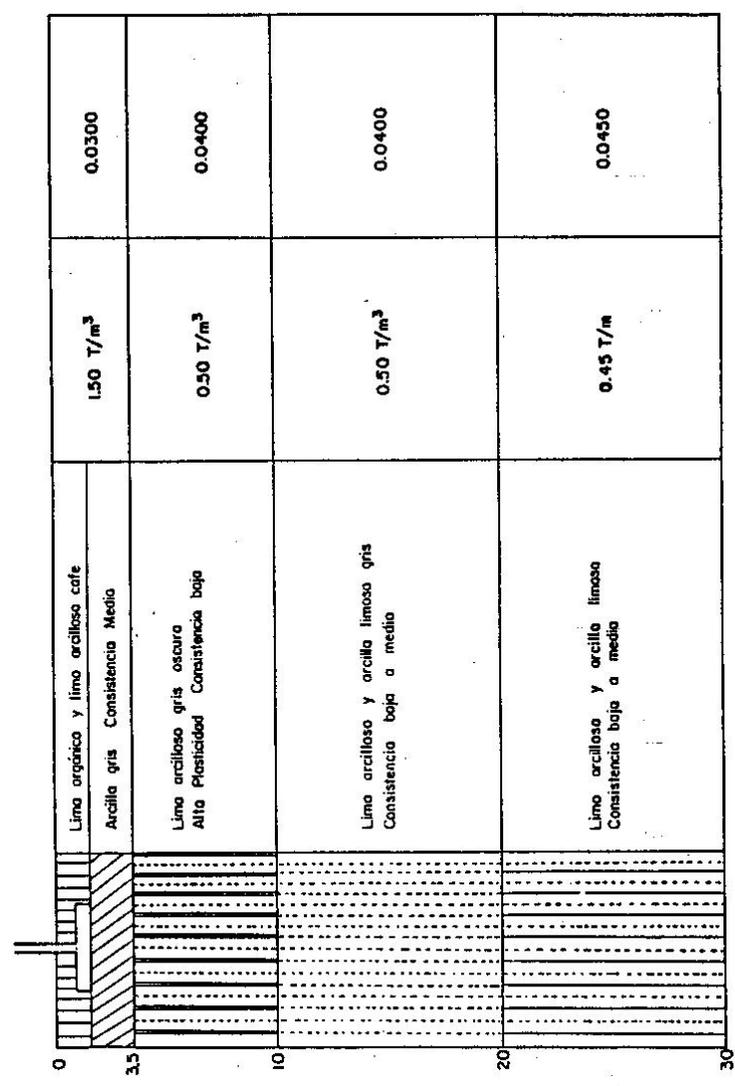


Cr/(1+e)

GAMA

DESCRIPCION

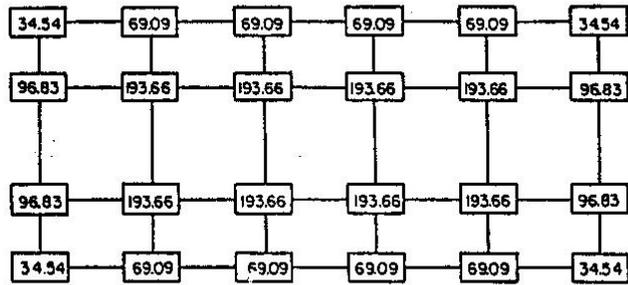
PERFIL



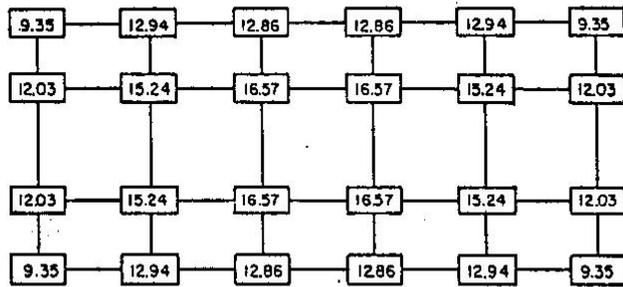
PERFIL ESTRATIGRAFICO

Fig N° 2

CARGAS (Ton)

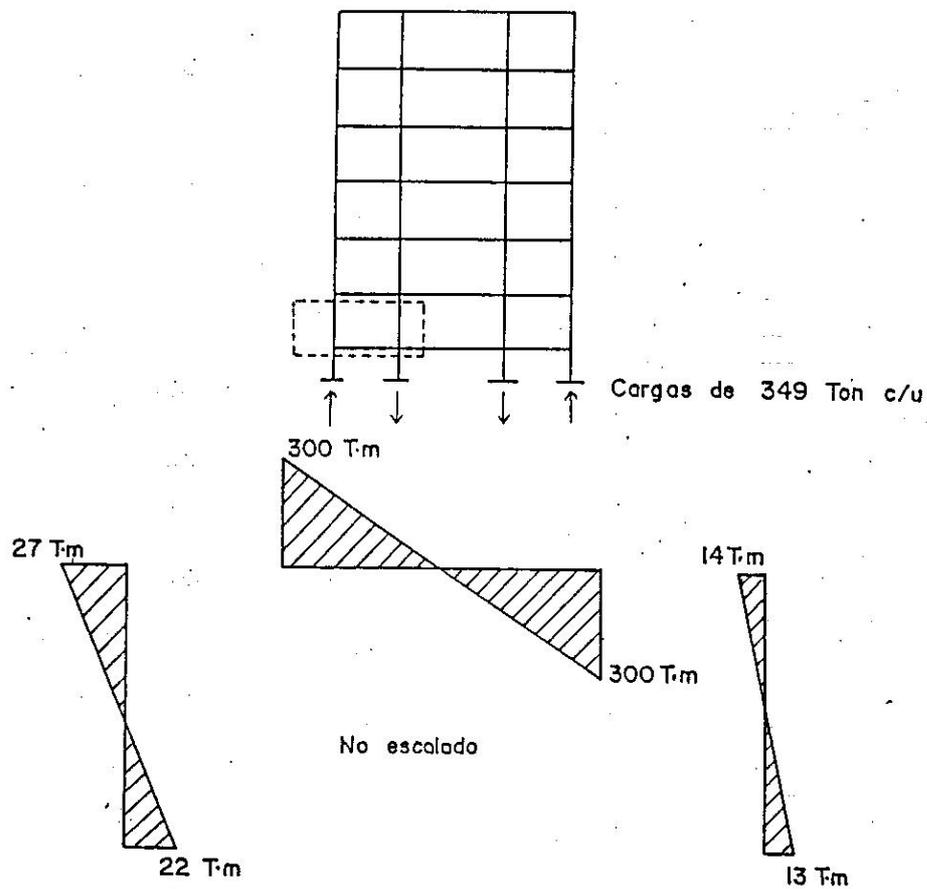


ASENTAMIENTOS (cm)



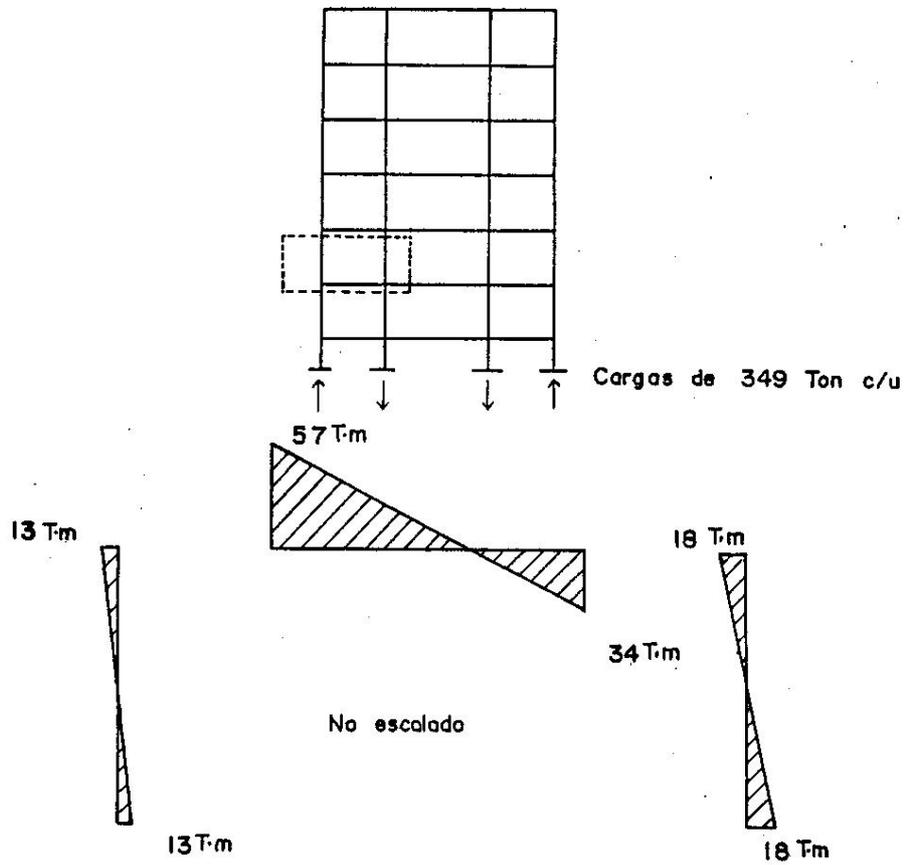
DATOS INICIALES

Fig N° 3



MOMENTOS INDUCIDOS POR EL ASENTAMIENTO DIFERENCIAL  
INICIAL

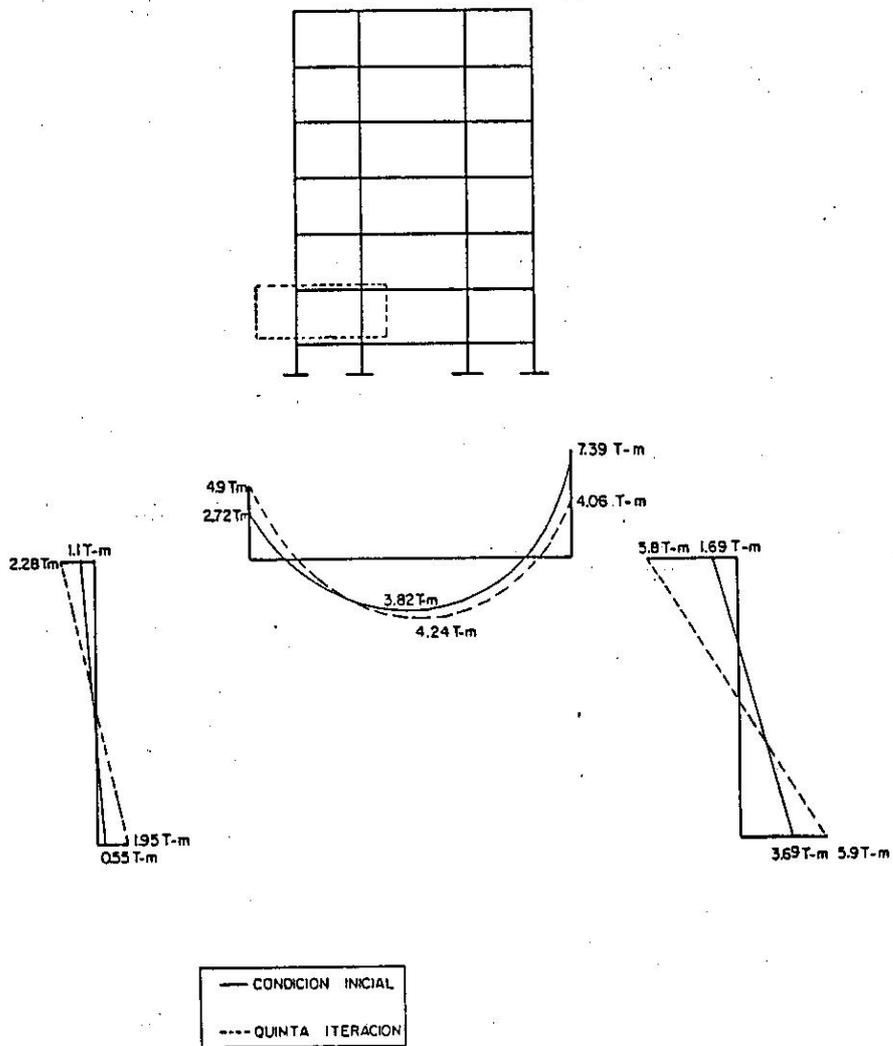
Fig N° 4



MOMENTOS INDUCIDOS POR EL ASENTAMIENTO DIFERENCIAL

fig. 4.a.

INICIAL



VARIACION DE LOS MOMENTOS POR ASENTAMIENTOS

Fig N<sup>o</sup> 5

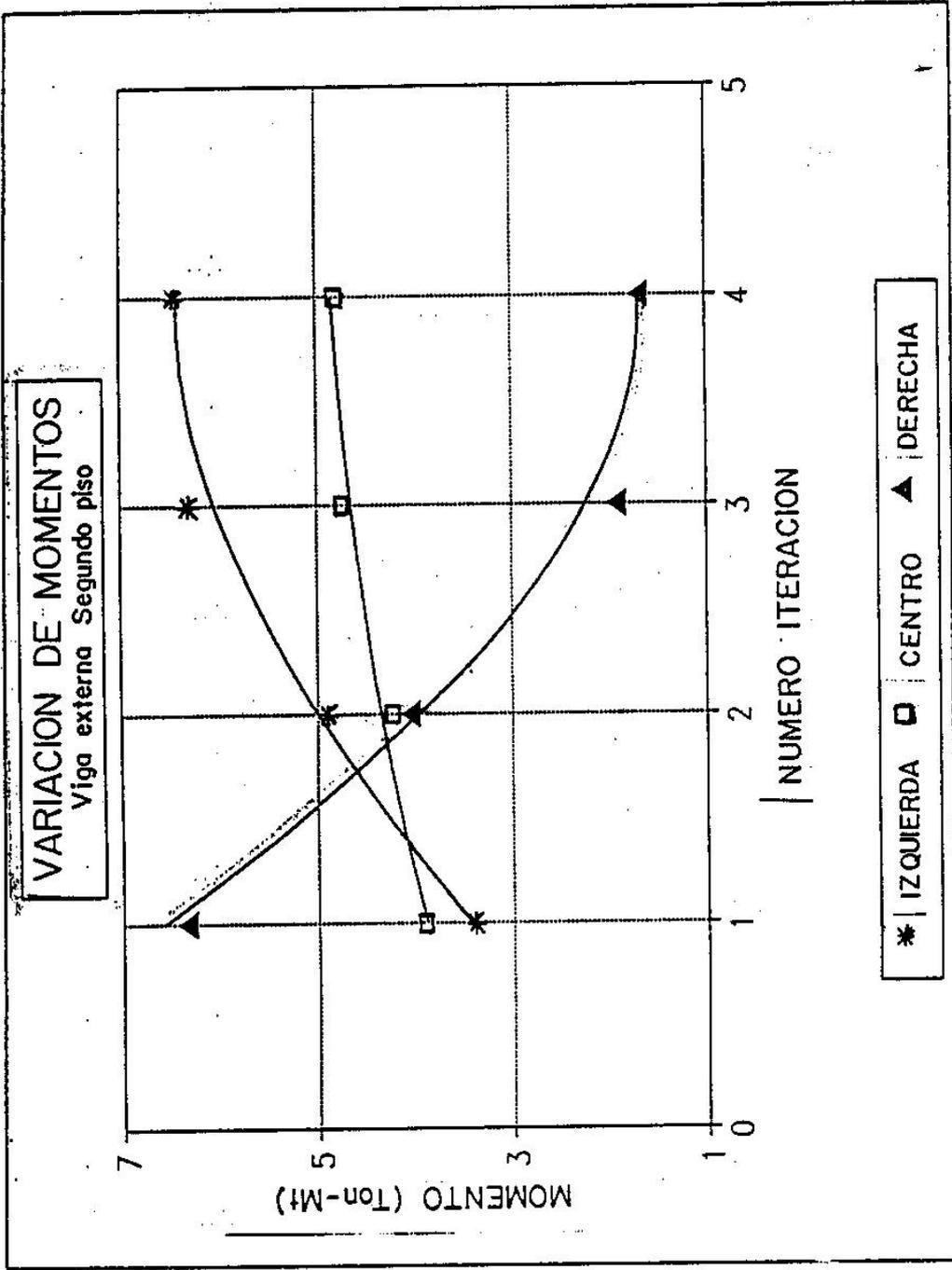


Fig Nº 6

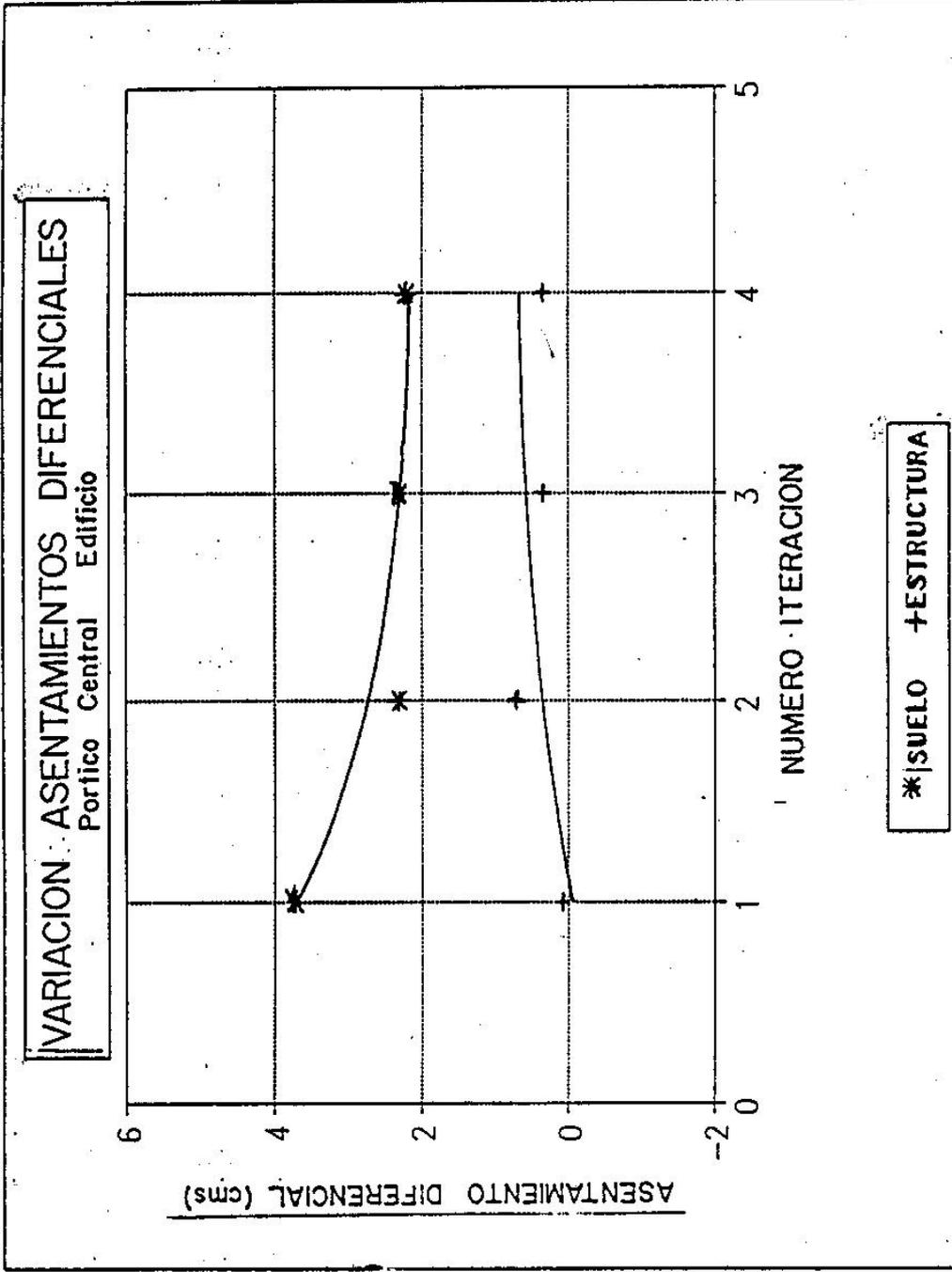


Fig N° 7

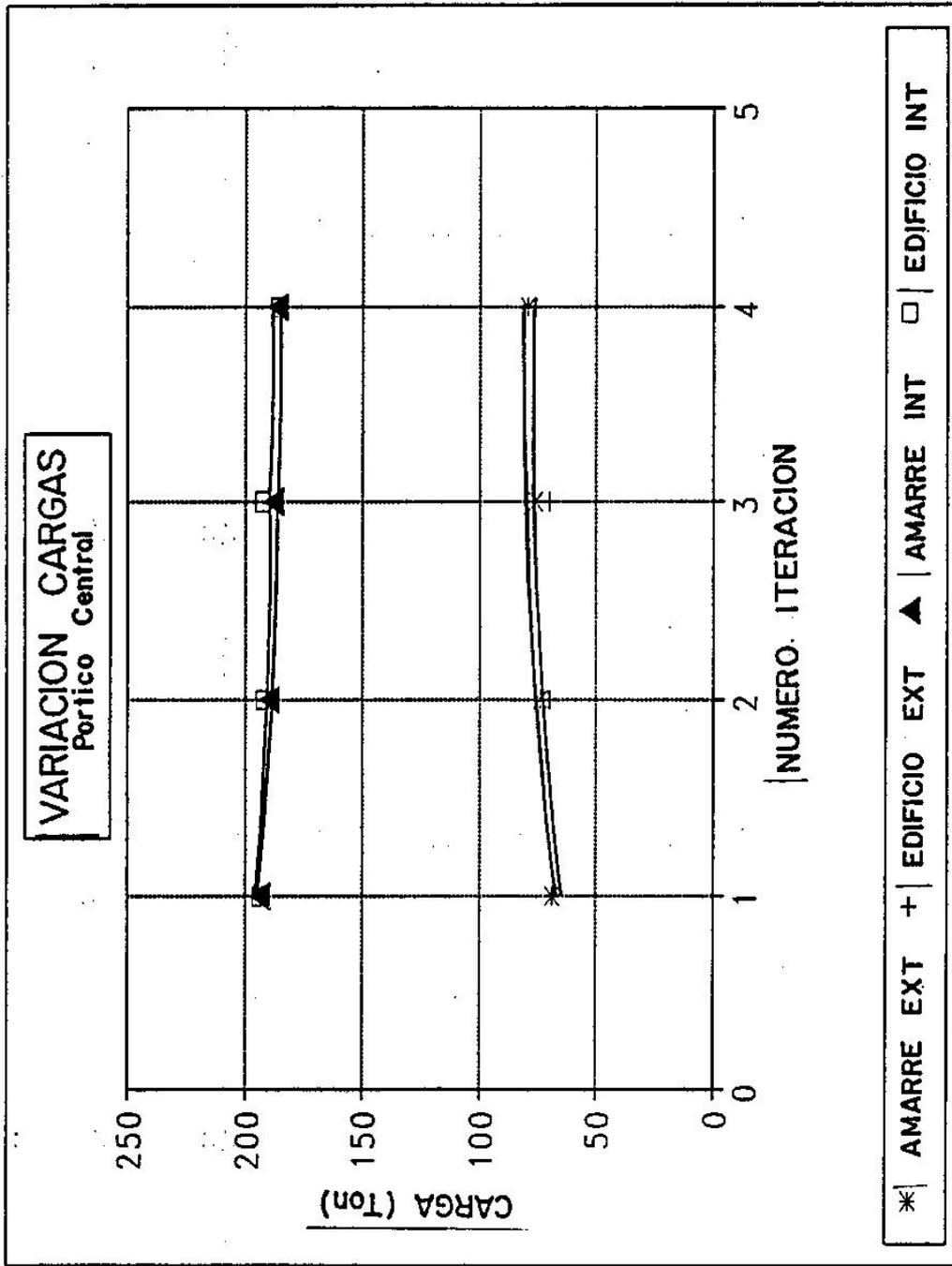


Fig N° 8

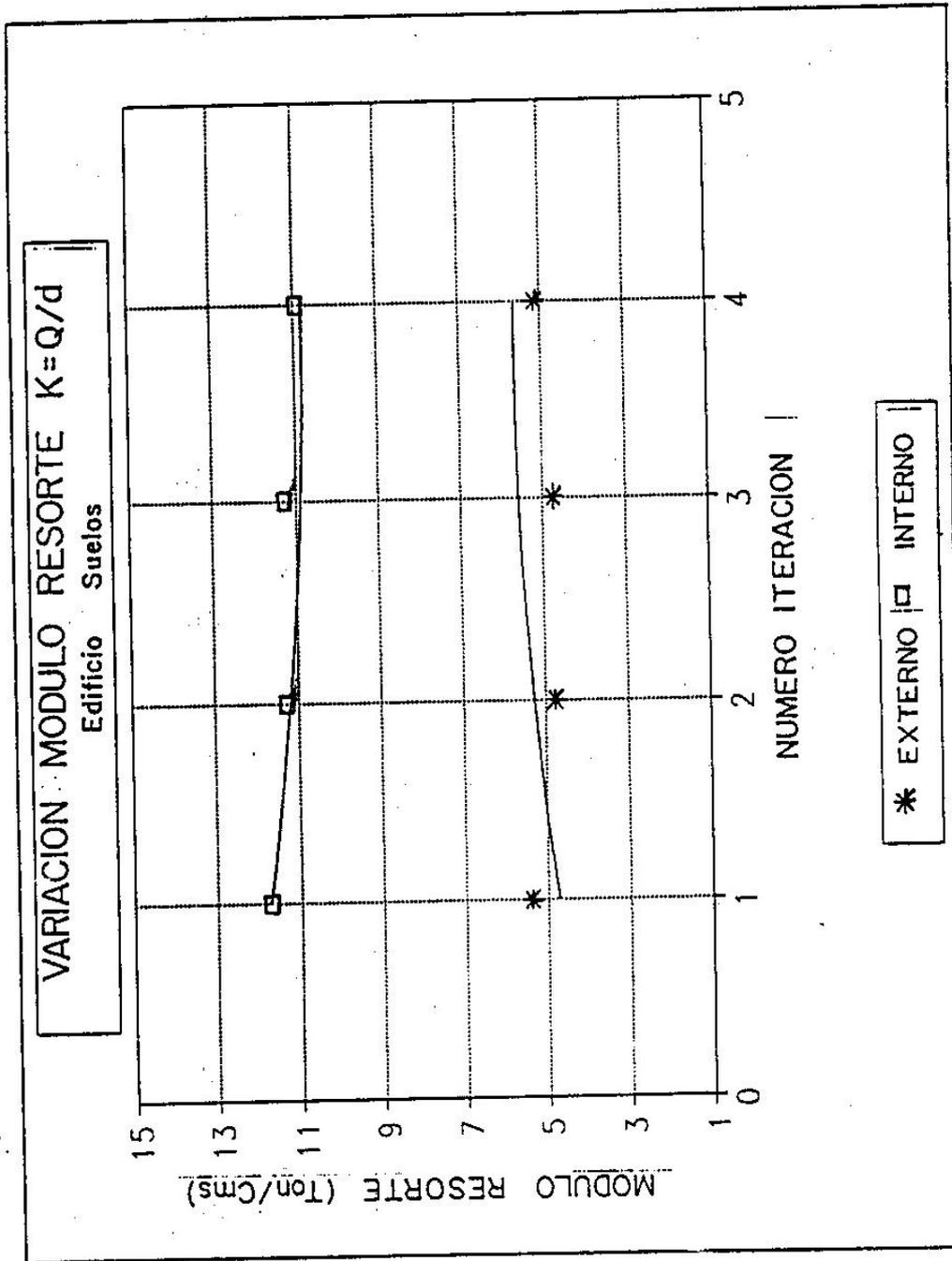


Fig. Nº 9

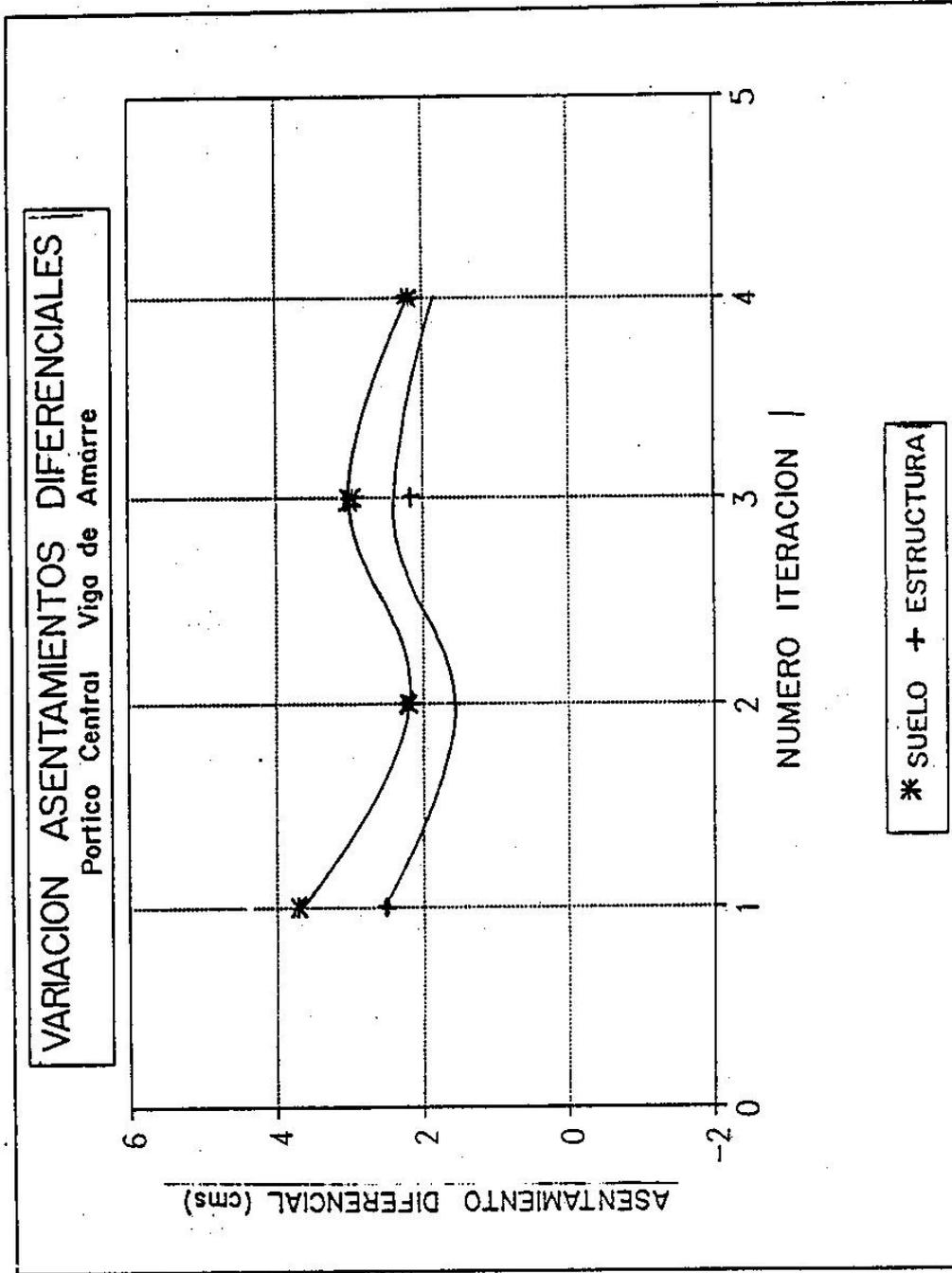


Fig. Nº 10