

# Comportamiento de edificaciones ligeras construidas sobre arcillas expansivas. Técnicas de diseño y rehabilitación

## *Behaviour of built light construction on expansible clays. Technical of design and rehabilitation*

L. ARRIETA<sup>(\*)</sup>, F. SÁNCHEZ NAVEDA<sup>(\*\*)</sup>

<sup>(\*)</sup>Escuela Comunitaria de Vivienda. Facultad de Ingeniería Civil. Univ. C. O. Lisandro Alvarado

<sup>(\*\*)</sup>Fundasoletudios C. A. Univ. Francisco de Miranda

Fecha de recepción: 15-XII-02

Fecha de aceptación: 14-V-03

VENEZUELA

### RESUMEN

*La patología de construcción de viviendas construidas sobre arcillas expansivas constituye uno de los temas más investigados debido a la gran cantidad de casos identificados con fallos, sobre todo en viviendas de interés social. Se presenta una visión de las alternativas de solución que se vienen aplicando en Venezuela y, específicamente, en las ciudades de Barquisimeto y Coro donde se presentan las características de expansión más perjudiciales registradas en la literatura mundial. Esta población está ubicada al norte del país, frente al mar Caribe, con clima árido, nivel frático profundo, perfil arcilloso apreciable y régimen hídrico deficitario. La metodología de la investigación utilizada y algunos procedimientos comprobados para el diseño de cimentaciones en viviendas ligeras y para la rehabilitación de edificios dañados, están basados en los resultados obtenidos por parte de los dos autores y sus equipos de investigación, con más de 20 años de experiencia en el campo práctico. Se muestran tres casos, dos de ellos con valor histórico en el diseño de viviendas de interés social, y uno de edificaciones gravemente afectadas y rehabilitadas con éxito. Finalmente, se proporcionan algunas recomendaciones prácticas a considerar en la elaboración de proyectos relacionados con la construcción de viviendas ligeras en suelos expansivos.*

**PALABRAS CLAVE:** arcillas expansivas, patología, diseño, rehabilitación, construcción ligera.

### 1. INTRODUCCIÓN

En Venezuela, las arcillas expansivas en suelos de fundación han sido consideradas entre los factores de vulnerabilidad o riesgos de fallas estructurales más

### SUMMARY

*The construction pathology of housing built on expansible clays is one of the most requested topics to be investigated in order to obtain solutions mainly in housing of social interest. A vision of the solution alternatives is presented that are being applying in Venezuela and specifically in the cities of Barquisimeto and Coro where the most harmful expansion characteristics are presented registered in the world literature. This population is located to the north of the country in front of the Caribbean Sea with arid climate, deep phreatic level, appreciable loamy profile and water deficit. The investigation methodology and some proven procedures for the design of foundations in light housings and for the rehabilitation of damaged buildings are supported with the results of the researches on the part of the two authors and their research teams coming from two different Universities and with 20 years of experience in the practical field. 3 cases are illustrated, two of them with historical value in the design of housings of social interest and one of severely affected constructions and actually rehabilitated with success. Finally some practical recommendations are provided to be considered in the elaboration of projects related with the construction of light housings on expansible floors.*

**KEYWORDS:** expansible clay, pathology, design, rehabilitation, light construction.

### 1. INTRODUCTION

*The expansible clays in foundation floors have been considered between the vulnerability factors and risks of more important structural flaws in the construction*

importantes en la construcción de edificaciones ligeras; en la actualidad, si se consideran los volúmenes existentes, toma aún más relevancia, constituyéndose en un crecimiento aparente de la patología de la construcción en viviendas de interés social y, en casos menores, en viviendas de costo relativamente considerado.

Tal vez la razón de este crecimiento se deba a varias causas: a) la utilización de terrenos que anteriormente se consideraban no aptos, b) el incremento en la construcción masiva de viviendas c) la ausencia de normativa en nuestro país en la rama constructiva de edificaciones en este tipo de suelos difíciles, cuya tecnología no ha alcanzado una estructura científica que permita divulgar y aplicar conceptos de interacción suelo-estructura bajo la nueva visión de la geotecnia de los suelos no saturados, la cual se viene desarrollando intensamente desde 1976 (1).

El problema de cimentar viviendas ligeras en suelos expansivos está en predecir los cambios volumétricos espontáneos que se producen en el suelo de apoyo por efecto de los cambios en el contenido de humedad natural. Adaptar la estructura de la vivienda para que interactúe con el suelo en la época de lluvias o de verano, más aún cuando los cambios de humedad se producen por riego de jardines, rotura de tuberías, drenajes incontrolados de sistemas de climatización o escurrimiento superficial, y la presencia de árboles.

En Venezuela existen muchas poblaciones tales como Coro, Barquisimeto, Calabozo, Valle de la Pascua, Puerto La Cruz, Charallave, San Cristóbal, Maracaibo, Punto Fijo y Trujillo, donde se están acentuando los problemas en desarrollos urbanísticos para viviendas de interés social. Los mismos se están convirtiendo en situaciones problemáticas de patología de la construcción, en las cuales se involucran los sistemas constructivos de cimentación, las consideraciones geotécnicas y la tecnología de los materiales.

Uno de los propósitos de las investigaciones que han sido generadas en las dos universidades mencionadas, es la de identificar y experimentar las técnicas disponibles para estudiar las causas, medir la gravedad de los daños, establecer el diagnóstico y fijar la posible necesidad de rehabilitación y refuerzo. Adicionalmente, el de identificar también los criterios básicos de diseño y rehabilitación para recuperar las estructuras afectadas. Como conclusión de los resultados de este trabajo se presentan, al final, algunas recomendaciones para construir, adecuadamente, sobre este tipo de suelo.

*of light buildings in great quantity of Venezuelan cities; nowadays taking more relevance being constituted in an apparent growth of the construction pathology in housing of social interest and in smaller cases in housing costs relatively considered.*

*Perhaps, the reason of the growth is due to several causes: a) the use of lands that previously were not considered adaptable, b) today they are built more housing than it has never been built, c) the absence of normative in our country in the constructive branch of constructions in this type of difficult floors, whose technology has not reached a scientific structure that allows to disclose and to apply concepts of interaction floor-structure, under the new vision of the geotechnics of the not saturated floors which one comes developing intensely from 1976 (1).*

*The problem of laying the light housing foundations on expansible floors is the spontaneous volumetric changes that take place in the supporting floor for effect of the changes in the content of natural humidity. To adapt the structure of the housing with the floor in the rainy season and dry season, even more when the changes of humidity take place for watering of gardens, break of pipes, not regulated drainages of air conditioning systems, superficial glide and presence of trees.*

*In Venezuela many populations as Coro, Barquisimeto, Valle de La Pascua, Puerto La Cruz, Charallave, San Cristóbal, Maracaibo, Punto Fijo and Trujillo, the technical problems are being increasing because of the urban developments for housing of social interest. The same ones are becoming problematic situations of construction pathology, in which the foundation systems, the geotechnical factors and the materials are involved.*

*One of the purposes of the research that have been generated in the two mentioned Universities, is to identify and to experience the available techniques, to study the causes, to measure the damages, to establish the diagnosis, and the basic approaches of design rehabilitation of the affected structures. As conclusion of the results of this work some recommendations are presented to build appropriately on this floor type.*

## 2. MARCO TEÓRICO

Las arcillas expansivas no son, en realidad, un terreno ni un grupo de terrenos. Son más bien un fenómeno que se origina en la conjugación de un terreno arcilloso con unas condiciones ambientales que produzcan cambios apreciables de humedad. Esto se encuentra principalmente en las dos zonas del globo terrestre que podemos llamar monzónicas, en las que las estaciones son muy marcadas, con períodos secos prolongados. Con características diferentes también aparecen en las zonas semidesérticas o sahelianas, situadas entre las monzónicas y las tropicales (2).

Todos los suelos arcillosos experimentan variaciones de volumen según el grado de humedad, correlativas con la variación de la succión y el esfuerzo efectivo. Estas variaciones serán tanto más importantes cuanto mayor sea la proporción de partículas inferiores a 2 micras y también cuanto más activa sea la especie mineralógica componente de esta fracción (montmorillonita, vermiculita, etc.).

Sin embargo, las variaciones de humedad dependen del clima, y también de las variaciones que, en el equilibrio entre el suelo y el ambiente, favorezca la estructura que se construya. En los sitios donde se presenta el fenómeno expansivo en Venezuela predomina el clima saheliano, es decir, semiárido, combinado con un nivel freático profundo y un perfil arcilloso considerable. En este clima el terreno se halla profundamente desecado. La evaporación supera a la precipitación prácticamente todo el año. En consecuencia, la construcción de la edificación, al cubrir el terreno e impedir la evaporación, provoca un aumento de la humedad bajo el mismo, mayor en el centro que en los bordes, tardando a veces varios años (de tres a siete) en manifestarse claramente. En ocasiones, el primer signo que se aprecia, aun antes de ver la primera fisura, es que las puertas rozan con el piso, al cabo de unos pocos años de haber sido construido.

El levantamiento del terreno puede ser en el centro de la edificación, en forma lenta y progresiva, otras veces puede ser en los bordes y esquinas (diferencial), adaptándose a cambios “estacionales” cíclicos. En forma general, los movimientos no tienen un patrón fijo, la distribución de las grietas en las edificaciones afectadas, es, casi siempre, difícil de explicar.

Las fugas en las tuberías de agua son con frecuencia causa de daños importantes, y dichas fugas son muchas veces simples procesos multiplicadores: los movimientos del terreno han roto las tuberías, agravando así un fenómeno existente.

## 2. BACKGROUND

*The expansible clays are not, in fact, a land neither a group of lands. They are rather a phenomenon that originates in the conjugation of a loamy land with some environmental conditions that induce appreciable changes of humidity. This is mainly in the two areas world wide, that we can call monzónicas, in those that the stations are very marked, with lingering dry periods. With characteristic different they also appear in the sahelianas and semi-desertic areas, located between the monzónicas and the tropical ones (2).*

*All the loamy floors suffer variations of volume according to the grade of humidity, and these are related with the variation of the suction and the effective effort. These variations will be more important as much as bigger is the proportion of inferior particles to 2 microns and also as much as the more active it is the species mineralogical component of this fraction (montmorillonita, vermiculita, etc.).*

*However the variations of humidity depend on the climate, and also of the variations that in the balance between the floor and the atmosphere which affects to the structure that is built. In the places where the expansible phenomenon is presented in Venezuela prevails the saheliano climate (semi-arid), combined with a deep phreatic level and a considerable loamy profile. In this climate the land is deeply dried up. The evaporation overcomes to the precipitation practically the whole year. In consequence, the construction of buildings when covering the land limit the evaporation, inducing an increase of the humidity under the same one, bigger in the center than in the borders, sometimes taking several years (from three to seven) in showing clearly. In occasions the first sign that is appreciated at the same time that the first fissure appears, it is that the doors touch with the floor, a few years of having been built which does not let the door opens.*

*The rising of the land can be in the center of the building, in slow and progressive form, other times it can be in the borders and corners (differential) adapting to recurrent changes «seasonal». In general form the movements don't have a fixed pattern, the distribution of the cracks in the affected constructions, is almost always difficult to explain.*

*The water flights in the pipes are frequently cause of important damages, and this flights multiply many times. The movements of the land have broken the pipes, increasing an existent phenomenon.*

## 2.1. La zona activa

El suelo desecado tiene una difusividad  $D$ , es decir, una «permeabilidad» con relación al gradiente de succión nula. Se define, por tanto, una zona del suelo donde, potencialmente, ocurren los cambios de humedad durante las variaciones estacionales del clima. Bajo una losa de piso ocurren equilibrios entre la evapotranspiración, el gradiente térmico y la succión del suelo que se encuentra en condición hidrostática por encima del nivel freático. Se obtiene un espesor de suelo donde se activa la arcilla, Figura 1 (3).

Por debajo de esa frontera (zona activa) no se producirán cambios volumétricos en la masa del suelo. Éste es un parámetro importante en el diseño de cimentaciones en suelos expansivos.

## 2.2. Medida de succión in situ

La succión es una variable del estado de esfuerzos que controla el comportamiento del suelo no saturado. Físicamente representa la diferencia entre la presión del aire ( $u_a$ ) y la presión del agua en los poros ( $m_w$ ) y se designa como succión mátrica ( $u_a - u_w$ ). De tal manera que cuando el valor  $u_w$  se aproxima a  $u_a$ , la succión mátrica decrece y el grado de saturación se incrementa. En términos prácticos se puede entender como Índice de Desecación, relacionando la humedad natural en que se encuentra el suelo con su humedad en el límite plástico, es decir, a mayor valor indica mayor succión en el suelo y, por ende, mayor potencialidad de hinchamientos o cambios volumétricos grandes. Los suelos más expansivos exhiben en el campo medidas de succión entre 15 a 1.500 psi (100 y 10.000 kPa).

## 2.1. The active area

The dried up floor has a diffusivity  $D$ , that is to say a «permeability» with relationship to the gradient of null suction. It is defined an area of the floor, therefore where potentially they suffer the changes of humidity during the seasonal variations of the climate. Under the concrete slab of floor there is balances among the evapotranspiration, the thermal gradient and the suction of the floor that it is in hydrostatic condition above the phreatic level. A floor thickness is obtained where the clay is activated, Figure 1(3).

Below this frontier (active area) volumetric changes won't take place in the mass of the floor. This is an important parameter in the design of foundations in expansive floors.

## 2.2. Suction measure in place

The suction is a variable of the state of efforts that controls the behavior of the not saturated floor. Physically it represents the difference among the pressure of the air ( $u_a$ ) and the pressure of the water ( $m_w$ ) in the pores and it is designated as suction mátrica ( $u_a - u_w$ ). In such a way that when the value  $u_w$  approaches to  $u_a$  the suction mátrica it falls and the saturation grade is increased. In practical terms it can understand each other as Index of Drying relating the natural humidity in that, meets the floor with their humidity in the plastic limit, that is to say to more value it indicates bigger suction in the floor and so bigger swelling, potentiality or big volumetric changes. The floors more expansible show in the measured field of suction among 15 to 1500 psi (100 and 10000 kPa).

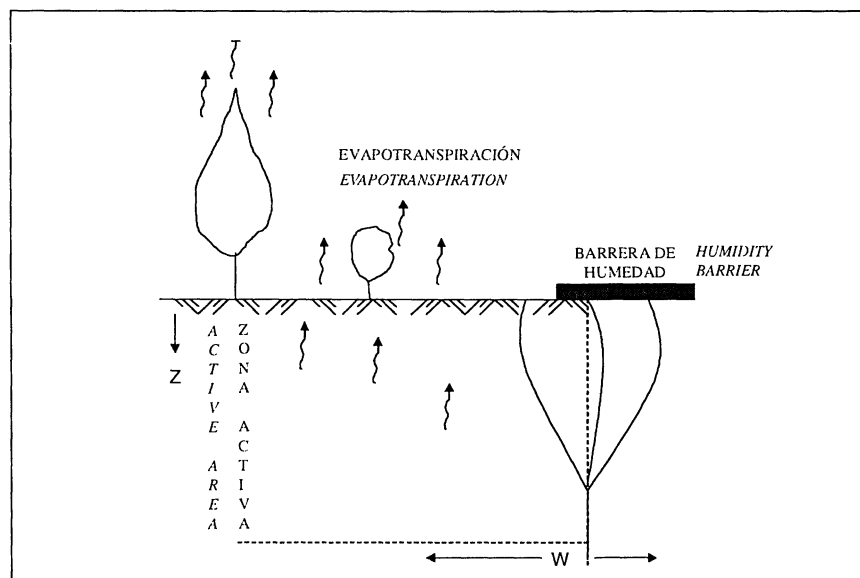


Figura 1.- Zona activa.  
Figure 1.- Active area.

### 2.3. Predicción de hinchamientos

Existen métodos basados en pruebas odométricas, realizadas en equipos sencillos de laboratorio y en los cuales se pueden aplicar conceptos de una matriz de succión equivalente (4, 5). Actualmente se están empleando equipos más sofisticados, como el consolidómetro con succión controlada, para la obtención de parámetros de expansión para ser utilizados en el diseño de cimentación mediante zapatas y pilotes.

## 3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Los objetivos principales de los estudios realizados fue la caracterización de las fallas originadas por el comportamiento físico y mecánico de los suelos. En este sentido, se realizaron diferentes tipos de pruebas y ensayos de laboratorio (más de 4.000) aplicados a muestras seleccionadas en cada uno de los casos descritos de acuerdo al Método Probabilístico Estratificado, lo cual dio como resultado la clasificación de diferentes Mecanismos de Falla con diferentes niveles de intensidad y de acuerdo al potencial de expansión del suelo en cada uno de los casos, permitiendo, así, adecuar las técnicas de reparación según fuera el tipo de mecanismo de fallo a la que respondiera la edificación. Las edificaciones fueron equipadas con instrumentos de nivelación para evaluar su comportamiento antes, en y después de la aplicación de los tratamientos de rehabilitación. Los resultados de estas mediciones se trasladaron a unos gráficos y, en base a éstos, se realizaron los ajustes correspondientes hasta comprobar la estabilidad de las edificaciones lo cual se logró en un 99% de los edificios de las muestras y comprobado más tarde, después de varios años de estar en funcionamiento.

### 3.1. Procedimientos para el diseño y rehabilitación de viviendas

En Venezuela, para el diseño y rehabilitación de viviendas ligeras apoyadas en suelos expansivos se utiliza el siguiente procedimiento:

#### 3.1.1. Diseño de cimentaciones

Se utiliza la técnica de reconocimiento de campo mediante sondeos exploratorios con ensayo SPT (ASTM D 1586) hasta una profundidad mínima de 4 metros para definir la estratigrafía, zona activa, índice de desecación y el estado potencial de succión del suelo.

Se caracteriza el suelo expansivo mediante ensayo con azul de metileno para identificar el tipo de mineral

### 2.3. Prediction of swelling

*Methods based on oedometer tests exist, carried out in simple teams of laboratory and which concepts of a womb of equivalent suction can be applied (4, 5). At the moment, more sophisticated teams are using, as the consolidometer with controlled suction, for the obtaining of expansion parameters to be used in the foundation design by means of foundation and piles.*

## 3. METHODOLOGY OF THE RESEARCH

*The main objectives of the carried out studies were the characterization of the flaws originated by the physical and mechanical behavior of floors. In this sense they were carried out different types of tests and laboratory rehearsals (more than 4000), applied to samples selected according to the Stratified Probabilistic Method, which gave the classification of different Mechanisms of Flaw as a result with different levels of intensity and according to the potential expansion of the floor in each one of the cases, allowing to adapt the repair techniques to the type of flaw mechanism which the building responded. The buildings were equipped with leveling instruments to evaluate their behavior, during and after the application of the rehabilitation treatments. The results of these mensurations were graphed. Based on these graphics, they were carried out the corresponding adjustments until checking the stability of the buildings, which was achieved in 99% of the samples, checked later, after several years of being in operation.*

### 3.1. Procedures for the design and rehabilitation of housing

*In Venezuela, for the design and rehabilitation of light housing founded on expansible floors, the procedure is the following:*

#### 3.1.1. Design of foundations

*The technique of recognition is used through exploratory polls with rehearsal SPT (ASTM D 1586) until a minimum of 4 meters depth to define the stratigraphy, active area, drying index and the potential state of the floor suction.*

*The expansible floor is characterized through "blue of metileno" rehearsal to identify the type of predominant*

arcilloso predominante y, mediante ensayo de doble odómetro ASTM D 4546-96, se definen las propiedades mecánicas, siendo:  $\epsilon_{v\text{máx}}$ , deformación volumétrica unitaria máxima obtenida bajo un esfuerzo normal  $\sigma_0 = 0,23 \text{ kg/cm}^2$  y  $\sigma_{\text{eq}}$ : esfuerzo de equilibrio expansivo. Se encuentra el valor de la deformación volumétrica para cualquier estado de esfuerzo bajo una losa o zapata con la expresión:

$$\epsilon_v = \epsilon_{v\text{máx}} \left[ 1 - \frac{\text{Log}(\sigma_{\text{eq}}/\sigma_v)}{\text{Log}(\sigma_{\text{eq}}/\sigma_0)} \right] \quad [1]$$

El valor de hinchamiento bajo una losa o zapata, será:  $\delta e = \epsilon_v \cdot d_i$ , siendo  $d_i = D_f - Z_a$ .

Donde:

$D_f$  = profundidad

$Z_a$  = espesor de la zona activa

Para el diseño de los pilotes se utiliza la fórmula de fuerza total de levantamiento del pilote U (6):

$$U = 2\Pi r f u \cdot Z_a \quad [2]$$

U: fuerza total de levantamiento

$u = \sigma_{\text{eq}}$  = presión de equilibrio expansivo.

f: coeficiente de levantamiento suelo-pilote (0,08).

La fórmula racional para la longitud total del pilote se deriva de la igualación de la fuerza total de levantamiento y la fuerza de equilibrio o necesaria para contrarrestarla desarrollando un fricción de anclaje en el tramo (L-Za), siendo L la longitud total del pilote, así se tiene:

$$L = \frac{1}{s} \left[ f \cdot \sigma_{\text{eq}} \cdot Z_a - \frac{p}{4} \right] \cdot Z_a \quad [3]$$

donde s: fricción lateral del pilote; p: carga axial transmitida por la estructura al pilote.

### 3.1.2. Estabilización electroquímica y estabilización a través de inyecciones de agua y aceite y barreras de protección

Para la estabilización electroquímica se utiliza aceite sulfonado, el cual es un derivado de la fracción naftaleno del refinado del petróleo. Líquido espeso, de color gris oscuro, con peso específico de  $1,15 \text{ g/cm}^3$ ; pH alrededor de 1,25. De alta actividad en solución acuosa y viscosidad ligeramente menor a la del agua, soluble en ésta, en la que ioniza con extrema rapidez. Este agente tiene un alto potencial de intercambio catiónico. El aceite sulfonado actúa rompiendo el vínculo electroquímico existente entre el agua pelicular y las partículas de arcillas haciéndolas drenar como agua libre, lo cual permite reducir al mínimo la estructura porosa capilar del

loamy mineral and through "double odometer" rehearsal ASTM D 4546-96, so the mechanical properties are defined:  $\epsilon_{v\text{máx}}$  maximum unitary volumetric deformation obtained under a normal effort  $\sigma_0 = 0.23 \text{ kg/cm}^2$  and  $\sigma_{\text{eq}}$ : effort of expansible balance. We find the value of the volumetric deformation for any state of effort under a foundation with the expression:

The value of low swelling foundation will be  $\delta e = \epsilon_v \cdot d_i$ ,  $d_i = D_f - Z_a$ .

Where:

$D_f$  = depth

$Z_a$  = thickness of the active area

For the design of the piles, the formula of total force of pile rising U(6) is used:

U: rising total force

$u : \sigma_{\text{eq}}$  = pressure of expansible balance.

f: coefficient of rising floor-pile (0.08).

The rational formula for the total pile longitude is derived of the equalization of the total rising force and the balance force necessary to counteract the rising force, developing an anchorage friction in the tract (L-Za), where L is the total longitude of the pile:

where s: lateral friction of the pile; p: axial loads transmitted by the structure to the pile.

### 3.1.2. Electrochemical stabilization and stabilization through oil and water injections and protection barriers

For the electrochemical stabilization oil is used, which is a derived from a fraction part of petroleum called naftaleno. Thick liquid of dark gray color with specific weight of  $1.15 \text{ g/cm}^3$ ; pH around 1.25. It has high activity in water solution and lightly smaller viscosity if compared to the water, it is soluble in this, which ionizes with extreme speed. This agent has a high potential of cationic exchange. The oil acts breaking the existent electrochemical bond between the particular water and the particles of clays making them flow like free water, which allows to reduce to the

suelo, aumentando su densidad, resistencia al esfuerzo cortante y disminuyendo las propiedades mecánicas de expansión (7). En investigaciones realizadas en las arcillas de Coro, el valor  $\sigma_{eq}$  disminuyó más del 60% y el  $\varepsilon_{v,max}$  en el 40% después de transcurrido mes y medio de iniciada la acción electroquímica o la mezcla de arcilla con aceite sulfonado (8).

Se interpreta que la acción, por efecto del intercambio catiónico, fija un espacio interbasal específico, el cual no sufre una variación volumétrica por acción climatológica y geomorfológica, logrando una solidificación de los granos, transformando la arcilla en un material "pseudo granular" esto indica que el agua que pasa entre el suelo drena gravitacionalmente sin producir efecto expansivo en la arcilla tratada.

La técnica utilizada para la estabilización de las arcillas expansivas, utilizando agua y barreras de protección, se basó en inyecciones de agua para la humectación del suelo hasta lograr los valores de humedad óptima debajo de los edificios, la construcción de barreras horizontales se conformaron por losas de hormigón de 1,5x1,5 m y 14 cm, separadas por juntas de ladrillo y provistas de malla de acero de 6"x6" de espesor y barreras verticales de 1,8 m de altura, formada por una lámina de polietileno y una de geotextil, ubicadas en el perímetro de los edificios. Además, se excavaron zanjas perimetrales, rellenas con material impermeable y se desforestaron los árboles no apropiados, sustituyéndolos por especies adecuadas

### 3.1.3. Barreras de control de humedad

Son fronteras horizontales y verticales, fundamentalmente impermeables, que se construyen para aislar el terreno de arcilla natural de la entrada o salida de humedad. Con esto se logra que se atenúen los cambios volumétricos. La combinación de una barrera vertical, combinada con una barrera horizontal mitiga los efectos de succión capilar, filtraciones desde el exterior, etc. Dependiendo de la difusión térmica ( $\psi$ ) de las arcillas y del período crítico ( $Po$ ) para los cambios de temperatura, el cual en zonas tropicales suele ser estimado en 24 horas se puede calcular el orden de la profundidad afectada por estos cambios ( $Za =$  zona activa) y, por lo tanto, estimar la profundidad adecuada de la barrera vertical de protección:

$$Za = 2\sqrt{\psi\alpha Po} \quad [4]$$

### 3.1.4. Rehabilitación de viviendas dañadas

Los daños más comunes en las viviendas corresponden a agrietamientos en paredes y pisos, levantamiento de baldosas y desniveles en pisos. Para atacar el problema

*minimum the capillary porous floor structure, increasing its density, resistance to the sharp effort and reducing the mechanical properties of expansion (7). In investigations carried out in the clays of Coro, the value  $\sigma_{eq}$  decreased in 60% and the  $\varepsilon_{v,max}$  in 40% after one and a half months of have started the electrochemical action (clay mixture with oil) (8).*

*We understand that the solution for effect of the cationic exchange stands a specific interbase space, which doesn't suffer a volumetric variation for weather and geomorphological action, achieving a solidification of the grains, transforming the clay in a material «pseudo granulate», this indicates that the water that passes among the floor, flows vertically without producing expansible effect in the treated clay.*

*The technique used for the stabilization of the expansible clays using water and protection barriers was based on water injections for the floor humidity, until achieving the values of good humidity under the buildings, the construction of horizontal barriers conformed by concrete foundation of 1.5x1.5 m and 14 cm, separated by brick joints and provided of mesh of steel of 6"x6" and vertical barriers of 1.8 m height conformed by a polyethylene sheet and geotextil located in the perimeter of the buildings. Gutters perimetrales were also dug, padded with waterproof material and they cut out the non appropriate trees, substituting them for appropriate species.*

### 3.1.3. Barriers of control of humidity

*They are opposite horizontal and vertical fundamentally waterproof that are built to isolate the land of natural clay from the entrance or exit of humidity. With this, it is possible to attenuate the volumetric changes. The combination of a vertical barrier, combined with a horizontal barrier mitigates the effects of capillary suction, filtrations from the exterior and others. Depending on the clays thermal diffusion ( $\Psi$ ) and the critical period ( $Po$ ) for the changes of temperature, which is usually estimated in 24 hours in tropical areas. We can calculate the order of the depth affected by these changes ( $Za =$  active area) and therefore to estimate the appropriate depth of the vertical barrier of protection using the following formula:*

### 3.1.4. Rehabilitation of damaged housings

*The most common damages are the crackings in walls and floors, rising of tiles, differences in floors level. In the Figure 4 the characteristic cracking of walls is*

se hace una búsqueda de las fuentes de humedad (tuberías rotas, descargas de equipos de climatización de ambientes) empleando sondeos con taladros manuales (Auger) en sitios estratégicos hasta la profundidad máxima de 2,50 m. Se recuperan muestras y se llevan al laboratorio para determinación de humedades y clasificación del tipo de suelos. Se realiza un relevamiento de grietas en toda la vivienda y, de ser posible, se levanta una maqueta a escala para interpretar el mecanismo de fallo y el agrietamiento característico de paredes, como se aprecia en la Figura 4.

Con esta interpretación y la evidencia de las fuentes de humedad se hacen las correcciones y se establece un proyecto de rehabilitación donde se construyen barreras verticales, inyección de estabilización con aceite sulfonado o con inyección de agua para homogenizar y lograr el porcentaje óptimo de humedad en el suelo, refuerzo de paredes e inyecciones en los agrietamientos, etc., según el caso.

#### 4. ESTUDIO DE CASOS

##### A. Parcelamiento Los Tinajeros en Coro, Estado Falcón

Se construyeron en 1983 42 viviendas pareadas sobre Arcillas Expansivas, utilizando un diseño denominado Sistema Estabilizador (9). Las viviendas continúan sin daños en paredes ni pisos. En ese sector el esfuerzo de equilibrio expansivo  $\sigma_{eq} = 1,05 \text{ kg/cm}^2$  y  $\epsilon_s = 0,5\%$ , la zona activa a 3 metros, el clima es árido. En las Figuras 2 y 3 se presenta en corte y planta el sistema estabilizador utilizado, el cual está constituido por inyecciones de aceite sulfonado con una dosis de 0,3 litros por cada inyección hasta una profundidad de 80 cm, la distribución de las retículas es de 3x3m.

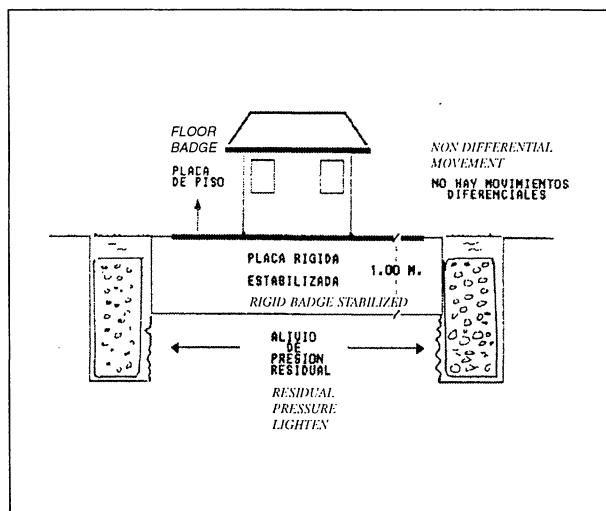


Figura 2.- Sistema estabilizador.  
Figure 2.- Stabilizer system.

shown. To attack the problem, it is necessary to search the humidity sources (broken pipes, flowing water from air conditioning equipments) using polls with manual drills (Auger) in strategic places to the maximum depth of 2.50 m. We obtain the samples and take them to the laboratory to determinate humidities and to classify the type of floors. We make a report of cracks in the whole building and if possible we build a scale model rises to interpret the flaw mechanism, like it is appreciated in the Figure 4.

With this interpretation and the evidence of humidity sources, the corrections are made and we set a rehabilitation project where vertical barriers are built, including stabilization injection with oil, or injection of water to homogenize and to achieve the good percentage of humidity in the floor, reinforcement of walls, injections in the crackings, etc., according to the case.

#### 4. STUDY OF CASES

##### A. In Los Tinajeros, Coro, Falcon State

Forty two twin houses were built in 1983, using a method called stabilizer system (9). The houses continue without damages in walls or floors. In that sector the effort of balance expansible  $\sigma_{eq} = 1.05 \text{ kg/cm}^2$  and  $\epsilon_s = 0.5\%$ , the active area is 3.00 meters and the climate is arid. In the Figures 2 and 3 it is presented a view from top and front of stabilizer system which is constituted by injections of oil with a dose 0.3 liters for each injection until a depth of 80 cm, the distribution of the reticles is 3x3m.

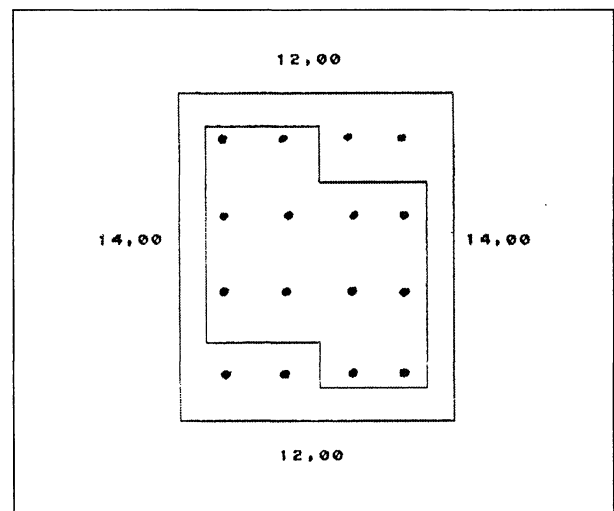


Figura 3.- Planta de inyecciones.  
Figure 3.- Injection front.



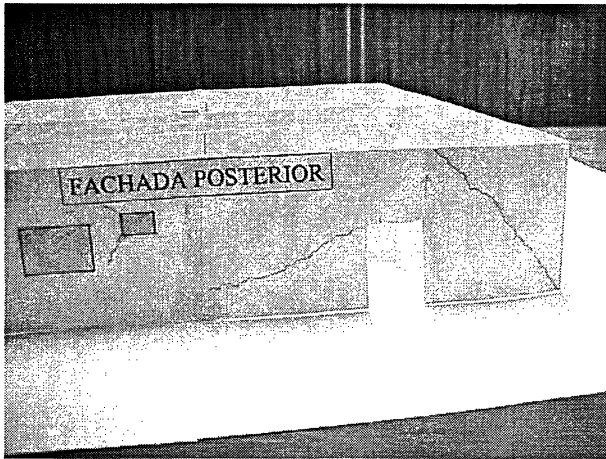


Figura 4.- Mecanismo de fallo y agrietamiento.  
 Figure 4.- Flaw mechanism and cracking.

Se construyó también una barrera vertical de control de humedad excavada en forma perimetral, con un ancho de 0,70 m y profundidad 1,50 metros, rellena con grava gruesa envuelta en tela de polietileno permeable (Geotex 140) la cual, basándose en el principio de presión atmosférica cero, intercepta cualquier flujo de agua. El mecanismo de trabajo es el siguiente: se asume que la fuente del agua que afecta los cambios volumétricos proviene de la superficie. La zanja perimetral intercepta cualquier recorrido de agua de penetración y/o el agua desplazada por la acción del aceite sulfonado. La estabilización electroquímica produce una especie de placa rígida de 0,80 m de suelo, aumentando su densidad y la inercia de la losa de apoyo, la cual viene a adquirir prácticamente el espesor de un metro, es decir, 0,20 m de hormigón armado y 0,80 m de suelo estabilizado.

La zanja perimetral recoge el agua, homogeneiza la humedad en el subsuelo a la vez que impide la desecación de la arcilla. Si por cualquier circunstancia cambia el contenido de humedad por debajo de un metro de la vivienda, cabe la posibilidad de producirse una activación de la arcilla, la cual no podrá, en parte, desarrollar su desplazamiento vertical hacia arriba. Por tanto, la presión residual de expansión se desarrollará lateralmente y las paredes de la zanja perimetral estarán aptas para absorber este desplazamiento horizontal, liberándose la presión de expansión ocuriente.

## B. Urbanización La Coromoto

Corresponde a la construcción de una urbanización con 158 viviendas unifamiliares, el terreno se ubica en el este de la ciudad de Coro, con características de suelo expansivo  $\sigma_{eq} = 4,7 \text{ kg/cm}^2$   $\epsilon_{v \text{ máx}} = 4,91\%$ . La solución



Figura 5.- Urbanización La Coromoto. Construcción de barrera horizontal de humedad.  
 Figure 5.- La Coromoto neighborhood. Construction of horizontal barrier of humidity.

A vertical barrier for control of humidity was also built dug in the perimeter with a width of 0.70 m and depth 1.50 meters, stuffed with thick gravel wrapped in permeable polyethylene (Geotex 140) which intercepts any flow of water being based on the principle of atmospheric pressure zero. The work mechanism is the following one: it is assumed that the water source that affects the volumetric changes comes from the surface. The perimetral gutter intercepts any line of water penetration or the water displaced by the action of the oil. The electrochemical stabilization produce kind of a rigid badge of 0.80 m, increasing their density and the inertia of the supportive foundation, which acquires practically the thickness of 1 meter: 0.20 m concrete and 0.80 m stabilized floor.

The gutter perimetral picks up the water; it homogenizes the humidity at the same time in the underground that it limits drying of the clay. If for any circumstance it changes the content of humidity below a meter, takes place an activation of the clay which will be partially limited from developing their vertical displacement up. Therefore the residual expansion pressure will be developed laterally and the walls of the gutter perimetral, will be capable to absorb this horizontal displacement, being liberated the pressure of expansion.

## B. La Coromoto neighborhood

It corresponds to a 158 houses neighborhood, is located in the east of Coro city, with expansible floor  $\sigma_{eq} = 4.7 \text{ kg/cm}^2$ ,  $\epsilon_{v \text{ máx}} = 4.91\%$ . The foundation of the houses is a concrete floor supported on an inert

de cimentación de la vivienda es una losa de piso, apoyada sobre un material inerte (rango de GW-SC), con un espesor de 60 centímetros, colocado sobre una barrera horizontal de humedad constituida por una geomembrana de 500 micras de espesor. Fue terminada en el año 2000 y, hasta la fecha, las viviendas no presentan ningún tipo de agrietamientos, es decir, la solución de prevención de aparición de humedad ha funcionado satisfactoriamente.

### C. Caso Río Lama

Formado por 552 apartamentos de interés social, distribuidos en 43 edificaciones de tres y cuatro plantas, construidos en 1982 en el noreste de la ciudad de Barquisimeto y rehabilitados entre 1986 y 1997 con resultados satisfactorios. Las presiones de expansión del suelo se identificaron entre 0,25 y 3,80 kg/cm<sup>2</sup>, con cambios volumétricos en el orden de 0,4 y 4,75% y humedad promedio de 19%. Debido a la configuración H usada para estos edificios y a los cambios de humedad originados por filtraciones de tuberías y otras causas, la potencialidad de expansión de las arcillas aumentó, causando daños severos en la estructura, sometida a asentamientos diferenciales hasta de 47 mm, lo cual es mucho para sistemas constructivos realizados en hormigón armado. Se registraron también desplazamientos laterales hasta de 45 mm, con separación de un cuerpo del edificio respecto al núcleo de circulación y se detectó también un efecto de rotación de las estructuras de los edificios que originaron tracciones importantes hasta de 250 t en las vigas del último piso. La estabilidad de la estructura se alcanzó con un sistema de barreras horizontales y verticales y con inyecciones, similar al del primer caso referido, con la diferencia que el fluido utilizado fue agua. Las fisuras y agrietamientos en las estructuras originadas por los grandes esfuerzos de tracción en las mismas, fueron reparadas utilizando técnicas de inyección en base a resinas epóxicas con el fin de recuperar la rigidez de los elementos estructurales (10).

## 5. RECOMENDACIONES PRÁCTICAS PARA PROYECTOS DE VIVIENDAS LIVIANAS EN SUELOS EXPANSIVOS

Para estas viviendas se recomienda la utilización de losas de cimentación, por lo menos en edificaciones de hasta dos niveles de piso, ya que resultan más controlables sus movimientos diferenciales. El apoyo de la losa de piso se recomienda sobre un material inerte (no expansivo), cuyo espesor mínimo será de 60 cm, el cual se colocará sobre una geomembrana de un espesor mínimo de 500 micras; ésta funcionará como barrera horizontal de humedad impidiendo la activación del suelo expansivo subyacente.

*material (range of GW-SC) with 60 centimeters thick, placed on a horizontal barrier of humidity constituted by a geotex sort of fabric of 500 microns thick. The project ended in the year 2000 and until the date the houses don't present any type of crackings, it reflects that the solution of humidity entrance prevention has worked very well.*

### C. Río Lama Case

*Conformed by 552 apartments of social interest, distributed in 43 buildings of three four plants, built in 1982 in the northeast of Barquisimeto city and rehabilitated between 1986 and 1997, with satisfactory results. The pressures of expansion of the floor were identified between 0.25 and 3.80 kg/cm<sup>2</sup>, with volumetric changes in the order of 0.4 and 4.75% and humidity average of 19%. due to the configuration H used for these buildings and to other causes that are specified in the Chart 1, the potentiality clays expansion was magnified, causing severe damages in the structure, subjected to differential floor level of 47 mm in some cases, which is severe for constructive systems in concrete. They also registered lateral displacements of 45 mm with the separation of part of the building from the nucleus. It was also detected an effect of rotation of the buildings structures that originated important tractions of 250 t in the top floor beams. The fissures and crackings in the structures originated by the big traction efforts, were repaired using technical of injection based on epoxical resins with the purpose of recovering the rigidity of the structural elements (10).*

## 5. RECOMMENDATIONS LIGHT HOUSING PROJECTS ON EXPANSIBLE FLOOR PRACTICES

*For these houses the use of concrete floor foundation is recommended for 1 and 2 floor houses, at least, since its differential movements are more controllable. The support of the concrete floor is recommended using inert material (not expansible) whose minimum thickness will be of 60 cm which will be placed on a geotex fabric of a minimum thickness of 500 microns; this will work as horizontal barrier of humidity impeding the activation of the underlying expansible floor.*

Como sistema constructivo se determinó que el sistema basado en pantallas de hormigón armado de espesores delgados resultó mucho más sensible que el sistema tradicional aporcionado. Investigaciones basadas en el estudio analítico de los movimientos capaces de causar daño a estructuras similares a las utilizadas en el último caso de estudio (11), indican que éstas aceptan movimientos entre 0,96 y 1,28 cm, lo cual es menor que los 2,5 cm aceptado como tope límite en pórticos de hormigón armado. Por lo tanto se recomienda utilizar este segundo sistema.

Con respecto a las tuberías de servicios, éstas deberán ubicarse en sectores de fácil acceso para reparación o reposición, es decir, su trayectoria no debe atravesar longitudinal ni transversalmente las dimensiones de la vivienda. Además, sus juntas deberán ser flexibles, las tuberías serán plásticas, que soporten los movimientos del suelo en caso de presentarse. Es muy importante que se realicen las pruebas hidrostáticas correspondientes, tanto en aguas blancas como de servicio, con lo cual se evalúan fisuras, agujeros o defectos en los materiales de estas tuberías.

Se recomienda la construcción de aceras perimetrales con un ancho mínimo de 2 metros y un brocal externo de unos 30 cm de profundidad mínima. Garantizar los drenajes de lluvia y de agua de superficie para evitar encharcamientos.

Si se dispone de equipos de climatización de ambiente, se recomienda su drenaje en el sistema de aguas de servicio.

En los jardines se recomienda evitar que el agua de riego se infiltre bajo la vivienda. Con respecto a los árboles, su siembra debe ser seleccionada según su tipo de raíces y cuidar que su posición quede alejada por lo menos a una distancia de 3,5 metros de la vivienda. Las especies recomendadas como producto de una investigación sobre vegetaciones apropiadas para estos tipos de suelo son Pesjua, Flor de la Reina, Urape, Trinitaria y Sagú. Las especies identificadas que ocasionaron efectos más severos fueron las siguientes: Eucaliptos, Jabillo, Almendrón, Barba de Caballero, Pum, Jabillo, Anima, Caoba, Mango, Aguacate, Flamboyant, Sauce y Siempre Verde, las cuales, por su naturaleza intrínseca, extraen del suelo altas cantidades hídricas. En los casos que se tenga que construir en la proximidad de árboles adultos ya existentes, donde sea imposible la deforestación, conviene crear alrededor de la edificación una barrera antirraíces que puede estar formada por un muro vertical de unos 2,5 m de profundidad y 0,75 de anchura, formada, a su vez, por tres capas verticales: una, de arena, con sal hacia los árboles, una hoja de polietileno de 4 mm y una última capa de arena estabilizada con cemento (12).

*As constructive system it was determined that the system based on thin concrete walls was much more sensitive than the traditional system. Researches based on the movements capable to cause damage to similar structures to those used in the last case of study (11), indicate that these accept movements between 0.96 and 1.28 cm which is smaller than 2.5 cm accepted as limit in concrete frames. Therefore this second system is recommended to use.*

*Referred to the pipes of services, they will be located in sectors of easy access for repairing or reinstatement their trajectory. It should not go across longitudinal neither transversely the dimensions of the housing. Their joints will also be flexible, the pipes will be plastic that they support the movements of the floor. It is very important that are carried out the corresponding hydrostatic tests clean and served pipes in order to evaluate fissures, holes or defects.*

*The construction of sidewalks is recommended with a minimum of 2 meters width and an external curb of about minimum 30 cm depth to guarantee the rain drainages.*

*If having air conditioning, their drainage is recommended to evacuate in the system of served waters.*

*Referred to the vegetation, if gardens are used, avoid that the watering infiltrates under the housing. The trees should be selected according to its type of roots and place them far away at least at a distance 3.5 meters of the house. The species recommended as a research result for these floor types are Pesjua, Flor de la Reina, Urape, Trinitaria y Sagú. The identified species that caused more severe effects were the following ones: Eucaliptos, Jabillo, Almendrón, Barba de Caballero, Pum, Jabillo, Anima, Caoba, Mango, Aguacate, Flamboyant, Sauce y Siempre Verde. In the cases that one has to build in the vicinity of existent trees, where it is impossible the deforestation, it is better to create around the construction a barrier anti-roots that can be formed by a vertical wall of about 2.5 m depth and 0.75 width formed by three vertical layers: one of sand with the trees, a leaf of polyethylene of 4 mm. And a last layer of sand stabilized with cement (12).*

Finalmente, considerando la naturaleza de estos suelos, se recomienda, para construcciones y rehabilitaciones de viviendas en suelos de este tipo, la implantación de un sistema riguroso de Aseguramiento de la Calidad que garantice el manejo adecuado de las técnicas descritas.

Finally considering the nature of these floors, is recommended for constructions and rehabilitations of houses in floors of this type, the installation of a rigorous system of Insurance of the Quality that guarantees the appropriate handling of the described techniques.

## BIBLIOGRAFÍA

- (1) D. G. Fredlund, N.R. Morgenster: *Constitutive relations for volume change in soils*. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 103 GT5 (1976).
- (2) J. A. Jiménez Salas: *Geotecnia y Cimientos III*. Primera parte capítulo 5. Editorial Rueda. Madrid. España. (1980)
- (3) J. D. Nelson, D. J. Millar: *Expansive Soils Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering*. John Wiley & Son Inc. New York (1992).
- (4) A. Poster, J. D. Nelson: *Strain Controlled Testing of soils*. Proc. 4th. Inst. Conf. Expansive Soils. ASCE and Inst. Soc. Soil Mech. Found. Eng. Denver. June: 34-44 (1980).
- (5) D. G. Fredlund, H. Rahardjo: *Soil mechanics for Unsaturated Soils*. John Wiley & Sons Inc. New York (1993).
- (6) F. H. Chen: *Foundation on Expansive Soils*. Elsevier Scientific Publishing Company. New York (1975).
- (7) D. R. Escobar: *Estabilización Electroquímica de Suelos*. Earth Science Products Corporation. Organization Condor (1984).
- (8) Ch. Castillo, G. Narváez: *Una investigación sobre la Estabilización Electroquímica en las Arcillas del Estado Falcón*. Tesis de Grado. Universidad Francisco de Miranda. Coro, Venezuela (1995).
- (9) F. Sánchez Naveda: *Sistema Estabilizador. Una solución experimental para viviendas livianas en arcillas expansivas*. III Encuentro Nacional de la Vivienda. Barquisimeto. Venezuela (1995).
- (10) L. Arrieta de Bustillos: *Patología de Edificaciones Residenciales de Interés Social en el Área Metropolitana de Barquisimeto*. Modelo Alternativo de Calidad. Universidad Centrooccidental Lisandro Alvarado. Barquisimeto. Venezuela (1996).
- (11) M. Pardo, E. Chollet: *Estudio de Estabilización suelo-estructura. Diagnóstico Preliminar*. Urbanización Río Lama. Barquisimeto. Venezuela (1987).
- (12) M. Fernández Cánovas: *Patología Y Terapéutica del Hormigón Armado*. Editorial Dessat. Madrid. España (1988)..

\* \* \*