

## *Falla estructural de una edificación educativa emplazada en la provincia de Entre Ríos. Análisis de las causas*

Lorena Broche<sup>1</sup>, Leandro Marcó Munilla<sup>1</sup>, Fabio Calvo<sup>1</sup> y Pamela Fank<sup>1</sup>

[lorenabroche@gmail.com](mailto:lorenabroche@gmail.com)

<sup>1</sup> UTN Facultad Regional Concepción del Uruguay, Depto Ing. Civil, Ing Pereyra 676, Concepción del Uruguay, Entre Ríos, Argentina

RESUMEN: La edificación en estudio se encuentra emplazada en Concepción del Uruguay, ciudad caracterizada por presentar un gran porcentaje de suelos arcillosos con diferentes niveles de expansividad. Esta obra fue construida en la década del '30 y desde entonces ha presentado una serie de daños estructurales significativos que llevaron al desalojo. El fin de este trabajo es determinar las posibles causas de la problemática. El suelo de fundación fue evaluado a través de estudios geotécnicos que revelaron un manto de arcilla tipo CL según SUCS -de 4 m de profundidad- asociado a un Índice de Plasticidad mayor a 25 y pasante tamiz #200 mayor a 60%, indica la presencia de un suelo potencialmente expansivo. Ensayos específicos ejecutados sobre el suelo extraído a 2 m de profundidad indicaron un contenido de arcilla del 26% conformado por un 90% de esmectita, un nivel de expansión libre mayor al 2% y un grado de actividad de Skempton medio a alto. Se concluye que los daños edilicios identificados fueron producto del tipo de suelo existente a nivel de fundación (1,2 a 1,8 m) que, al estar expuesto a focos de humedad, ha experimentado cambios de volumen provocando asentamientos diferenciales de la cimentación corrida.

Palabras clave: ARCILLAS - EXPANSIVIDAD - HINCHAMIENTO - FISURACIÓN - CIMENTACIÓN.

## 1 INTRODUCCIÓN

### 1.1. Edificio. Generalidades.

El edificio en estudio se encuentra emplazado en la ciudad de Concepción del Uruguay, provincia de Entre Ríos - Argentina, específicamente en la manzana comprendida entre las calles J.J. Millán, Boulevard 12 de Octubre, Chacabuco y Santa Teresita. En esta edificación funcionaba el Colegio Primario N° 75 Don Bosco y se trata de una construcción antigua que data de los años '30, sobre la cual se llevaron a cabo dos ampliaciones, una en el año 1967 y otra en el año 1983.

La edificación abarca en su totalidad una extensión de 1600 m<sup>2</sup> en planta y fue ejecutada en un solo nivel con paredes de mampostería portante de ladrillo común, de altura comprendida entre los 3,2 m y los 5,5 m, que descargan sobre vigas de encadenado inferior de hormigón armado apoyadas sobre cimientos corridos de mampostería, los que a su vez descansan sobre un hormigón ciclópeo ejecutado con roca calcárea altamente cementada de la zona (piedra mora), alcanzando una profundidad de fundación que va desde los 1,2 m a los 1,8 m dependiendo del sector.

Con el correr de los años el edificio comenzó a presentar una infinidad de problemas, entre los que se pueden destacar fisuras a 45° desde antepechos de ventanas, grietas verticales en las esquinas, levantamiento de veredas perimetrales y hundimiento de pisos (ver Fig. 1). Esto derivó al desalojo en el año 2016, luego de que un peritaje determinara el riesgo estructural de la construcción.



**Figura 1.** Izq.: Fisuras a 45° en muros. Centro: Grietas en esquinas. Der.: Rotura de veredas.

Las figuras antes expuestas se condicen con daños típicos por asentamientos diferenciales del edificio, lo cual debe atribuirse a que la estructura no ha podido adaptarse a las características del terreno real Ref. [1,2,3], lo cual es lógico porque al momento de la construcción de esta obra no se contaba con estudios para conocer el tipo de suelo de fundación y así adoptar la cimentación más conveniente.

Datos relevados de estudios de suelos realizados en la ciudad de Concepción del Uruguay por parte de la Facultad Regional Concepción del Uruguay de la Universidad Tecnológica Nacional (FRCU-UTN) entre los años 1994 y 2013 Ref. [4] revelaron una preponderancia de suelos arcillosos superficiales y a poca profundidad, mientras que aproximadamente a partir de los 3 m se observaron mantos limo arcillosos, de arenas y gravas.

Datos específicos de la zona donde se encuentra emplazada la edificación en estudio fueron obtenidos recién en el año 2018 gracias a la aprobación de un proyecto de recuperación y refuncionalización del edificio, llevándose a cabo el primer estudio de suelos. Los resultados del mismo arrojaron un suelo plástico con presencia de materia orgánica hasta los 1,2 m de profundidad, arcilla inorgánica de baja a

mediana plasticidad (clasificadas como CL según el Sistema Unificado de Suelos de Casagrande) con escaso contenido calcáreo en la franja de 1,2 a 4,0 m, arcilla limosa orgánica de baja plasticidad en la franja de 4,0 a 4,5 m y finalmente arena limosa sin plasticidad a partir de los 4,5 m hasta los 4,8 m de profundidad, donde se halló el nivel freático y se detuvo la perforación.

Teniendo en cuenta la profundidad de fundación del edificio y los resultados del estudio de suelo, se puede inferir que el mismo ha sido fundado en un manto de arcilla. Los daños estructurales registrados se condicen con los señalados por Ayala Carcedo et al. Ref. [5] al analizar los riesgos por expansividad de arcillas en España, por lo tanto también pueden considerarse como un posible indicador de la presencia de arcillas con cierto potencial de expansión. En consecuencia, a continuación se hará referencia a los suelos arcillosos, focalizando también en las arcillas expansivas y sus efectos sobre las construcciones civiles.

### 1.2. Suelos arcillosos

Los minerales arcillosos se forman por el proceso de erosión química y su composición es distinta a la de las rocas de que proceden. Son materiales de naturaleza silícea donde se destacan principalmente los silicatos de aluminio, hierro y magnesio Ref. [1,6]. La estructura de estos minerales es generalmente cristalina y complicada, con sus átomos dispuestos en forma laminar, por lo que las partículas poseen una gran superficie específica. Las uniones químicas que presentan las arcillas generan diferencias en su comportamiento ante las partículas de agua, distinguiéndose tres grupos básicos: Caolinita, illita y montmorillonita Ref. [7].

La caolinita es relativamente estable en presencia de agua -tiene baja susceptibilidad a la retracción y expansión- porque la unión entre todas las retículas es suficientemente firme para no permitir la penetración de moléculas de agua entre ellas. Estas arcillas suelen formarse en climas tropicales drenados y tienen propiedades estables en el tiempo. La illita, por su parte, es la especie mineralógica más abundante y su estructura no es expansiva ya que no admite la entrada de átomos de agua entre sus capas. Estas arcillas suelen formarse en climas secos y fríos. La montmorillonita, en contraste a las anteriores, es un mineral de arcilla con capacidad expansiva perteneciente a la familia de las esmectitas. Se caracteriza por presentar una débil unión entre las retículas de mineral por lo que las moléculas de agua pueden introducirse en la estructura con relativa facilidad, otorgándole características de hinchamiento por hidratación y dispersión coloidal. Esto conlleva a un incremento del volumen de los cristales, lo que se traduce en una gran inestabilidad frente a la variación de la humedad Ref. [6,7].

Como no todos los minerales arcillosos pueden experimentar modificaciones volumétricas, la posibilidad de que un suelo tenga carácter expansivo dependerá primariamente del tipo de arcilla existente Ref. [5], en consecuencia, los suelos que contengan al grupo de las montmorillonitas serán los más activos. Este fenómeno será más importante cuanto menor resulten los granos de la estructura mineral de la arcilla ya que las fuerzas intergranulares que aparecen serán más potentes, éstas tenderán a comprimir al suelo cuando éste se seca (disminución de volumen) y a una relajación de la compresión interna al incrementarse su contenido de humedad (expansión) Ref. [8].

### 1.3. Arcillas expansivas

Las arcillas expansivas se caracterizan por tener partículas capaces de absorber grandes cantidades de agua, por lo tanto, experimentan cambios de volumen cuando se modifica su contenido de humedad. Es por ello que los suelos expansivos pueden hincharse al entumecerse y retraerse cuando se desecan. Juárez Badillo y Rico Rodríguez Ref. [7] sostienen que este cambio de volumen no es uniforme y tampoco constante, además que responde a las condiciones físicas, ambientales y esfuerzos que muchas veces no se pueden predecir. Por su parte Lopez Rodriguez *et al.* Ref. [8] señalan que la expansividad dependerá del tamaño de las partículas, composición mineralógica de las mismas, variación de la humedad (estado de humedad inicial), del clima (variaciones estacionales, lluvias, inundaciones) y del terreno

(permeabilidad). También Ayala Carcelo *et al.* Ref. [5] indican que para que un suelo pueda exhibir expansividad son necesarios dos requisitos fundamentales: i) deben existir y entrar en funcionamiento ciertos mecanismos que a nivel microescalar produzcan la inestabilidad volumétrica del suelo y ii) deben estar presentes unas fuerzas capaces de transferir la humedad de un punto a otro del suelo, lo que implica un desequilibrio de la humedad natural del entorno. Por su parte Llorca Aquesolo Ref. [3] indica que las condiciones medio ambientales vinculadas básicamente al clima, a la posición del nivel freático, vegetación, profundidad, estratos, etc., actuando en mayor o menor proporción, controlan el equilibrio de humedad del suelo, del que en definitiva dependen sus cambios de volumen.

En síntesis, el hecho de que un suelo arcilloso se reconozca como potencialmente expansivo por su composición mineralógica (presencia de esmectitas) sólo constituye una parte del problema, pues para que efectivamente se produzca un cambio en su volumen, éste necesariamente debe experimentar cambios de humedad. Es por ello que las variaciones del potencial expansivo, aún dentro de una zona calificada como de muy alta expansividad, pueden ser importantes Ref. [5].

Los problemas más comunes que provocan estas variaciones son asentamientos diferenciales de la cimentación, lo que puede llevar a la estructura a soportar esfuerzos superiores a los previstos en el cálculo y por ende producir patologías no admisibles, que pueden ser la generación de grietas verticales e inclinadas en ambos sentidos, fisuración y rotura de elementos estructurales, rotura de la cimentación, abombamiento de la protección superficial (pisos internos, aceras, drenajes, etc.) y rotura de las redes de agua y saneamiento Ref. [1,7]. La inspección cuidadosa de las deformaciones y daños que afectan a una construcción, en general, permite definir su origen con suficiente claridad. No obstante, cada uno de estos detalles por separado puede ser debido a otras causas ajenas a la expansividad.

Con ensayos de laboratorio se busca la definición de las propiedades expansivas de un suelo, siendo los límites de Atterberg -para cada estado de consistencia- el punto de partida para la estimación de la expansividad Ref. [1], previéndose una alta actividad en suelos con un Índice Plástico mayor a 25. El contenido de arcilla y limo también es un indicador de actividad (mayor contenido de arcilla equivale a una mayor expansividad) y se lo determina a través del método del Hidrómetro. El ensayo de expansión libre unidimensional, por su parte, sirve para corroborar la expansión del suelo en presencia de agua, éste varía de acuerdo al porcentaje de humedad inicial. El estudio de la mineralogía se utiliza para clasificar el grupo de arcilla presente en el suelo (caolinita, illita o montmorillonita-esmectita) por lo que constituye otro indicador de expansividad, siendo el ensayo de difracción de Rayos X (método directo) y la técnica de azul de metileno (método indirecto) los usualmente empleados Ref. [6,9].

Con la investigación del predio donde se encuentra emplazado el edificio se busca determinar si durante los años de vida útil del mismo se han dado las condiciones necesarias para que se manifieste la posible expansividad del suelo Ref. [3]. Es decir, rotura y filtraciones de las redes de agua y saneamiento, acumulación de agua, períodos de lluvia y sequía, la condición de la protección superficial, entre otros.

También es necesario comprobar la viabilidad de la cimentación adoptada teniendo en cuenta que, por lo general, las arcillas expansivas afectan de modo especial a estructuras livianas como ser pequeñas edificaciones de mampostería donde se utilizan fundaciones (zapatas aisladas, pilotines o zapatas corridas) de poca profundidad. Como las cargas transmitidas son bajas para hacer frente a las presiones de hinchamiento que puede transmitir el suelo Ref. [1] que se recomienda el empleo de cimentaciones rígidas y en caso de ser corridas deben ir armadas. A su vez, para evitar daños y fallas estructurales la profundidad de cimentación debe ser tal que sobrepase la zona en la que se verifican los máximos cambios volumétricos periódicos, es decir, mayor que la denominada zona o capa activa. La estimación de la profundidad de esta capa no es sencilla ya que depende del clima de la zona, del potencial de succión del terreno, posición del nivel freático, etc. En España suele variar entre 2 y 4 metros, en el valle de Guadalquivir en Córdoba puede tomarse como 4 m Ref. [5] y en Concepción del Uruguay podría estimarse someramente en 3 m considerando la base de datos disponible, la cual involucra 121 estudios geotécnicos en diferentes puntos de la ciudad (estudios de suelos UTN Ref. [4]) de los cuales 29 revelaron arcillas con

un índice plástico mayor a 25 en los primeros 3 m de profundidad, siendo insignificante su aparición en profundidades mayores.

#### 1.4. Objetivo del trabajo

El objetivo de este trabajo consiste en determinar las posibles causas del daño estructural registrado en el edificio que llevaron a su desalojo. Con tal fin y teniendo en cuenta la preponderancia de un suelo arcilloso en la zona donde se encuentra emplazada la edificación más los mecanismos de agrietamiento y fisuración registrados en la construcción, se llevará a cabo i) el estudio geotécnico para verificar la eventual presencia de arcillas expansivas, ii) investigación del entorno constatando cambios del flujo de humedad en el suelo y iii) análisis de viabilidad de la cimentación adoptada.

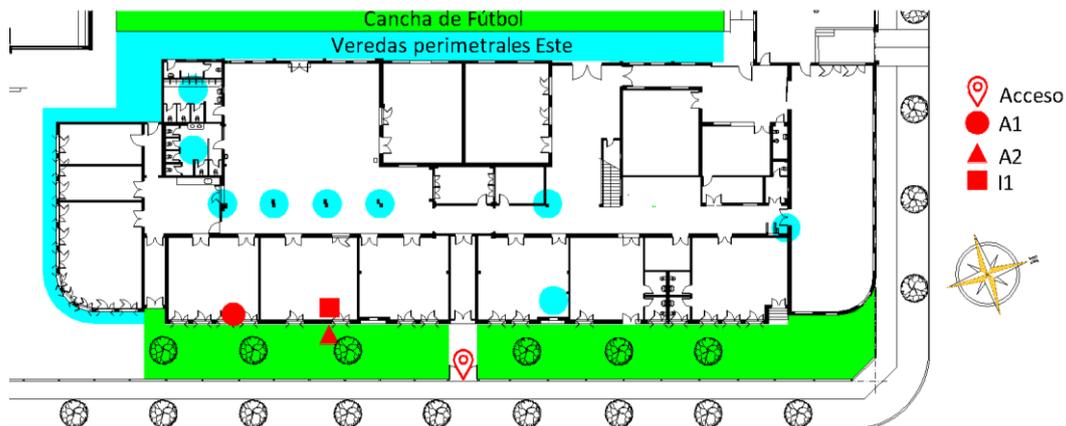
## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Materiales

El material analizado en la presente investigación se compone de 3 muestras de suelo obtenidas del predio donde se encuentra ubicado el Colegio Don Bosco en la ciudad de Concepción del Uruguay (Entre Ríos). En la Tabla 1 se presentan datos generales de las muestras mientras que en la Figura 2 se indican los puntos exactos de la planta del edificio donde las mismas fueron extraídas (ubicación georeferenciada del acceso principal: 32°28'26.7"S 58°14'26.0"W).

**Tabla 1.** Muestras

Identificación	Profundidad (m)	Tipo
I1	2,0	Inalterada
A1	2,0	Alterada
A2	4,0	Alterada



**Figura 2.** Ubicación de los puntos de extracción de las muestras de suelo.

Las muestras alteradas (Muestra A1 y Muestra A2) fueron obtenidas de perforaciones y profundidades diferentes como se indica en la Figura 2 y Tabla 1. En ambos casos fue aprovechado el movimiento de

suelo que se estaba realizando en la obra para el recalce del edificio. El equipo utilizado para la extracción fue una hoyadora con mecha sin fin de 30 cm de diámetro, 3 tramos y con capacidad de alcanzar los 4,20 m de profundidad. Al alcanzarse la cota adoptada para cada muestreo, se retiró la mecha de la perforación y el suelo fue tomado del sin fin teniendo el recaudo de que no estuviera contaminado por otros estratos. Esta tarea no presentó mayor dificultad por tratarse de un suelo cohesivo con una humedad tal que permitió la extracción de bloques enteros. Una vez obtenidas las muestras fueron guardadas en bolsas independientes para su posterior transporte al laboratorio.

La muestra inalterada (Muestra I1) fue extraída mediante un sacamuestras (barrena) conformado por un cilindro de 76,2 mm de diámetro y 120 mm de altura. Al alcanzar la profundidad de muestreo (ver Tabla 1), el sacamuestras se posicionó sobre el suelo y fue hincado mediante golpes de una maza de 3 kg hasta producir el rebote del mismo, lo que indicó cilindro lleno. En ese momento se giró el mango en T para cortar el suelo y retirar la muestra, la que inmediatamente fue guardada en una bolsa hermética para impedir la pérdida de humedad durante su transporte hacia el laboratorio. Con la finalidad de remover el suelo alterado contiguo a las caras del cilindro –debido al proceso de hincado–, un espécimen concéntrico a la muestra fue extraído con el aro del edómetro, cuyo diámetro (63 mm) es menor al del cilindro del sacamuestras (76,2 mm).

## 2.2. Métodos

Los ensayos fueron llevados a cabo en el Laboratorio de Ingeniería Civil de la Facultad Regional Concepción del Uruguay perteneciente a la Universidad Tecnológica Nacional. Las pruebas realizadas son las presentadas en la Tabla 2, en la cual también se indican las muestras involucradas.

**Tabla 2.** Pruebas realizadas sobre las muestras

Muestra	Especimen	Ensayo
A1	C1	Caracterización de suelos
	PE1	Determinación del peso Específico
	H1	Prueba del Hidrómetro
	E1, E2, E3	Expansión Unidimensional
	AM1	Prueba de Azul de Metileno
	DRX1	Difracción de Rayos X
A2	C1	Caracterización de suelos
	PE1	Determinación del peso Específico
	H1	Prueba del Hidrómetro
	E1	Expansión Unidimensional
	AM1	Prueba de Azul de Metileno
	DRX1	Difracción de Rayos X
I1	E1	Expansión Unidimensional

### 2.2.1. Caracterización de suelos

Las muestras de suelo fueron clasificadas de acuerdo a la carta de plasticidad propuesta por la Norma ASTM D 2487 Ref. [10]. La granulometría por tamizado fue realizada como lo indica la Norma ASTM C 136 Ref. [11]. El límite líquido (*LL*) fue determinado siguiendo el Método A (o Método multipunto) propuesto por la Norma ASTM D4318 Ref. [12] y el límite plástico (*LP*) de acuerdo al Método Manual propuesto por la misma norma Ref. [12]. La diferencia entre ambos límites determinó el Índice de Plasticidad ( $IP = LL - LP$ ).

También fue obtenido el límite de contracción (*LC*), parámetro necesario para predecir el potencial expansivo de las muestras mediante el método USBR Holtz y Gibbs Ref. [13]. Como el procedimiento de

ensayo para la determinación del  $LC$  especificado en la Norma ASTM D 427 Ref. [14] involucra el empleo de mercurio, sustancia prohibida en nuestro país a partir del año 2020 según Ley N° 27356 que aprueba el Convenio de Minamata (proteger la salud humana y el medio ambiente de las emisiones y liberaciones antropogénicas de mercurio y sus compuestos), éste índice fue calculado mediante la expresión empírica (1) propuesta por Carter y Bentley Ref. [15], la cual se indica a continuación:

$$LC = \frac{46,4LL - 43,5IP}{IP + 46,4} \quad (1)$$

Siendo:

$LL$ : Límite Líquido, en %.

$IP$ : Índice Plástico, en %.

### 2.2.2. Determinación del Peso específico

El método adoptado para determinar el peso específico del suelo se encuentra especificado por la norma ASTM D 854 Ref. [16]. En la Figura 3 puede observarse el picnómetro o matraz aforado (500 ml de capacidad) empleado en esta prueba, el cual debió ser calibrado antes de que se realizara el ensayo propiamente dicho.



**Figura 3.** Colocación del espécimen en matraz 500ml

### 2.2.3. Análisis granulométrico por el método del hidrómetro o Sedimentometría

Para conocer el porcentaje de partículas de limo y arcilla del suelo se adoptó el método propuesto por la norma ASTM D 422 Ref. [17], éste se fundamenta en la ley de Stokes determinando cuantitativamente la distribución de los tamaños de las partículas a través de su velocidad de sedimentación.

El contenido de arcilla del suelo es aquel que se encuentra por debajo de los 0,002 mm de diámetro de partícula. Con este valor se determina la actividad de la arcilla ( $A_c$ ) según la expresión (2).

$$A_c = \frac{IP}{\% \text{Arcilla}} \quad (2)$$

Siendo:

$IP$ : Índice Plástico (ver Apartado 2.2.1)

$\% \text{Arcilla}$ : porcentaje de la fracción de tamaño arcilloso (porcentaje de granos más finos que 0,002 mm, en peso)

El valor del contenido de coloides (partículas menores a 0,001 mm que se mantienen en suspensión) se emplea para predecir el potencial expansivo a través del uso de la Tabla del método USBR Ref. [13].

#### 2.2.4. Ensayo de expansión libre unidimensional

La expansión unidimensional fue determinada a través del ensayo de expansión en edómetro siguiendo los lineamientos del método A propuesto por la norma ASTM D 4546 Ref. [18]. El mismo consistió en colocar en el molde del edómetro un espécimen de suelo, una piedra porosa humedecida en contacto con cada cara del mismo y una placa de carga capaz de transmitir una presión de 0,01 kgf/cm<sup>2</sup> al conjunto. Al inundar el molde, gracias a la presencia de las piedras porosas, el suelo fue adsorbiendo agua y expandiéndose verticalmente (único movimiento posible). Los valores de deformaciones fueron registrados a través de un comparador mecánico de precisión 0,01 mm en los períodos de tiempo que estipula la norma antes señalada. Cada una de las pruebas llevadas a cabo se dio por finalizada cuando varios registros sucesivos no presentaron cambios sustanciales en sus valores (estabilización de las deformaciones).

La preparación de cada espécimen varió de acuerdo al tipo de muestra, si ésta era alterada o inalterada. Para el primer caso, en los especímenes procedentes de muestras alteradas, se llevaron a cabo ensayos de expansión con diferentes porcentajes de humedad inicial. En todos los casos se partió de 300 g de suelo pasante tamiz #40 seco en horno a peso constante. Con dicho valor se estimó el peso de agua necesario a ser incorporado al suelo para lograr el porcentaje de humedad inicial buscado. Cada espécimen fue moldeado sobre una superficie de vidrio mezclando el suelo seco más la cantidad de agua estimada. Para evitar la aparición de intersticios de aire, la mezcla suelo-agua extendida fue cortada con el aro metálico, asegurándose que ambas caras queden completamente lisas y planas, sin depresiones ni protuberancias, para que garanticen contacto completo con las piedras porosas (ver Fig. 5.Izq.).

En cuanto a la muestra inalterada, el espécimen fue obtenido cortando un disco del suelo extraído del cilindro sacamuestras, como puede observarse en la Figura 5.Der. Este disco fue acondicionado reduciendo su diámetro de 75 mm a través de un corte concéntrico al del aro del edómetro (63 mm), nivelando las caras para que quedaran lo más planas posible.



**Figura 5.** Izq.: Espécimen moldeado en el aro de ensayo. Der.: Extracción del espécimen E1-1I del cilindro sacamuestras

Una vez que se realizó el ensayo se calcularon dos parámetros de expansión, el primero se trata de la expansión total, es decir el incremento de altura de la muestra registrado mediante el comparador, que se presenta como porcentaje de la altura inicial. El segundo es el parámetro expansión 24 h, que constituye una medida de la virulencia con la que reaccionó el espécimen, y se expresa como porcentaje de la expansión total a las 24 h de iniciado el ensayo.

### 2.2.5. Ensayo de adsorción de Azul de Metileno

Esta prueba consiste en una sucesiva adición de pequeñas dosis de solución colorante al suelo hasta encontrar el volumen requerido, denominado valor de azul ( $MB$ ), y fue llevada a cabo siguiendo los lineamientos de la Norma UNE - EN 933-9 Ref. [19].

La solución colorante se conformó por azul de metileno en estado sólido ( $M_{am}$ ) -seco en horno a peso constante- y agua destilada ( $V_{sam}$ ) a razón de 0,01 g/ml, mientras que la solución de suelo fue preparada disolviendo en 500 ml de agua destilada, 30 g ( $M_1$ ) de pasante tamiz #100 -seco en horno a peso constante- según Anexo A de la norma UNE - EN 933-9 Ref. [19].

En primer lugar, se añadió una dosis de 5 ml de solución colorante en el vaso de precipitado donde se encontraba la solución de suelo, y con la ayuda de una varilla de vidrio se agitó la solución suelo-colorante por el lapso de un minuto. Al cabo de ese tiempo se depositó una gota sobre el papel filtro (Whatman 40) y se observó si en la mancha aparecía una aureola de azul claro persistente en la zona húmeda alrededor del depósito central (ver Fig. 6). En las primeras aplicaciones la aureola desaparecía dentro de los primeros 4 min, por lo que se fue añadiendo otros 5 ml de solución colorante ante cada aplicación. Cuando la aureola comenzó a desaparecer entre el cuarto y quinto minuto, fue añadido solo 2 ml de solución colorante tal como especifica la norma Ref. [19].

En todos los casos la solución suelo-colorante se continuó agitando por un minuto antes de cada aplicación sobre el papel filtro. El ensayo se dio por finalizado cuando la aureola formada se mantuvo durante 5 min en dos colocaciones de gota consecutivas, instancia en la cual se procedió a registrar el volumen total en ml de solución añadida ( $V_1$ ).



**Figura 6.** Ensayo de adsorción de Azul de Metileno

El valor de la superficie específica ( $S_e$ ) expresada en  $m^2/g$  fue determinado por medio de la expresión (3) propuesta por Santamarina *et al.* Ref. [20], quienes en su investigación exponen una tabla con los valores límites  $S_e$  que se asocian a cada mineral arcilloso.

$$S_e = \frac{M_{am}}{V_{sam}} \times \frac{1}{M_1} \times V_1 \times A_{am} \times \frac{1}{P_{am}} \times N_{av} \quad (3)$$

Siendo:

$M_1$ : Masa de la muestra de ensayo, en g.

$V_1$ : Volumen total de la solución colorante añadido, en ml.

$M_{am}$ : Masa de Azul de metileno, en g.

$V_{sam}$ : Volumen de la solución de azul de metileno, en ml.

$A_{am}$ : Área cubierta por un catión de azul de metileno,  $1,3 \times 10^{-18} m^2/molécula$ .

$P_{am}$ : Peso molecular del azul de metileno, 319,79 g/mol.

$N_{av}$ : Número de Avogadro,  $6,022 \times 10^{23}$  moléculas/mol.

### 2.2.6. Ensayo de Difracción de Rayos X

Con el fin de identificar y cuantificar las especies minerales, un espécimen de suelo asociado a cada profundidad fue enviado al Centro de Tecnología de Recursos Minerales y Cerámica (CETMIC) para ser ensayado a través de la técnica de Difracción de Rayos X (DRX).

Los difractogramas se realizaron en el difractómetro Bruker D8 Advance A25 con diseño DAVINCI y un controlador PW 3710, empleando radiación Cu-Ka, filtro de Ni, 50 kV-80mA. El barrido fue realizado entre 3º y 70º con paso de 0,5 seg/paso. La cuantificación se basa en el trabajo de Biscayne (1965) Ref. [27].

## 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para determinar si el edificio se fundó sobre un suelo expansivo, se exponen en primer lugar los resultados del estudio geotécnico de las muestras de suelo extraídas del lugar (ver Tabla 1). Posteriormente se presenta una evaluación de focos de humedad que se pudieron haber generado en el edificio y actuado como posible detonante de la expansión del suelo de fundación; y por último se analiza la cimentación adoptada.

### 3.1. Análisis del suelo de Fundación

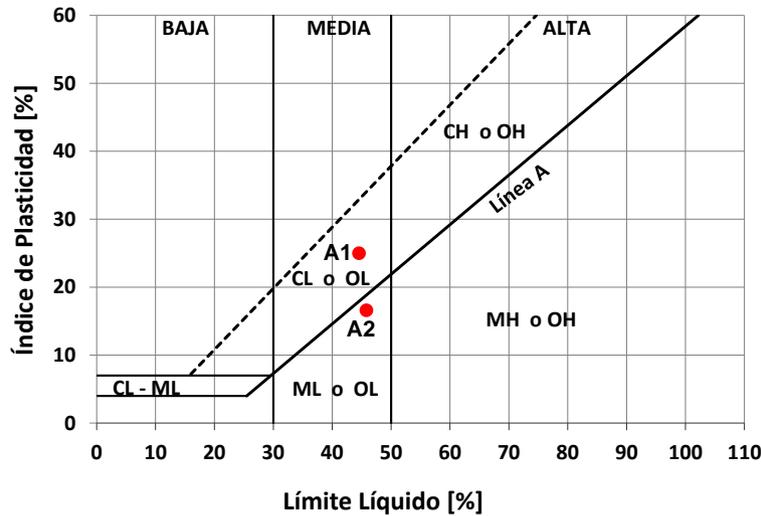
#### 3.1.1. Caracterización de los suelos

El porcentaje pasante tamiz #200 Ref. [11] resultó superior al 50 %, tanto para la muestra A1 como para la muestra A2, lo que indica suelo de grano fino según Norma ASTM D2487 Ref. [10]. Los valores obtenidos del límite líquido (LL), límite plástico (LP), límite de contracción (LC) e índice plástico (IP) correspondientes a cada muestra analizada se exponen en la Tabla 3. En la carta de plasticidad de Casagrande -sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS)- con el valor de LL e IP de cada muestra fue determinado el tipo de suelo como puede verse en la Tabla 3 y Figura 7.

**Tabla 3.** Caracterización de los suelos según ASTM D 2487 Ref. [10].

PARÁMETRO	Muestra A1	Muestra A2
Límite Líquido [%]	44,55	45,81
Límite Plástico [%]	19,57	29,21
Límite de Contracción [%]	13,74	22,28
Índice Plástico IP [%]	24,98	16,60
Pasante tamiz #200 [%]	75,35	74,14
Clasificación SUCS	CL	ML - OL
Tipo de suelo SUCS	Arcilla inorgánica de baja a mediana plasticidad	Arcilla limosa orgánica de baja plasticidad

La muestra A1 se clasifica como CL, arcillas inorgánicas de mediana a baja plasticidad. Mientras que la muestra A2 se puede clasificar como un limo arcilloso orgánico de baja plasticidad o como una arcilla limosa orgánica de baja plasticidad. Ésta última sería la más apropiada por su cercanía a la Línea A de la carta (ver Fig. 7). Ambas muestras presentaron una coloración marrón claro, siendo este uno de los colores predominantes de las arcillas expansivas Ref. [8].



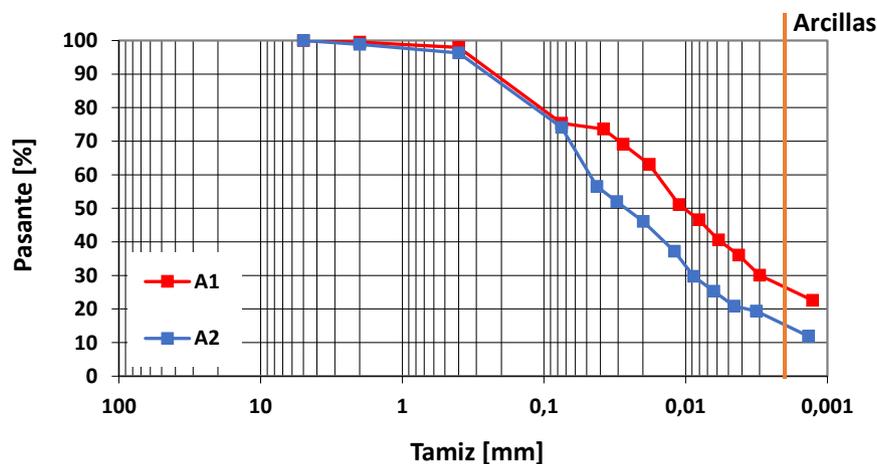
**Figura 7.** Ubicación de las muestras A1 y A2 en la Carta de Plasticidad Ref. [10]

3.1.2. *Peso específico*

El peso específico ( $G_{20^{\circ}C}$ ) del espécimen A1-PE1 resultó 2,67 g/ml, lo cual es congruente con el valor de peso específico mostrado en la norma ASTM D 854 Ref. [16] para suelos CL. Por otra parte, el peso específico ( $G_{20^{\circ}C}$ ) del espécimen A2-PE1 resultó 2,64 g/ml, lo que indica mayor similitud a un suelo arcilloso ( $G_{20^{\circ}C} = 2,67$  g/ml) que a uno limoso ( $G_{20^{\circ}C} = 2,72$  g/ml) de acuerdo a la norma ASTM D 854 Ref. [16].

3.1.3. *Análisis granulométrico*

La curva de granulometría por tamizado hasta el tamiz #200 (0,075 mm) y la curva de granulometría resultante de la aplicación del método del hidrómetro para suelo pasante tamiz #200, fueron graficadas en un mismo eje de coordenadas para obtener la curva de granulometría completa, la misma es representada en la Figura 8 para ambas muestras alteradas, A1 y A2, mientras que en la Tabla 4 se indican los valores correspondientes.



**Figura 8.** Curva de distribución granulométrica completa

Del análisis granulométrico por el método del hidrómetro se puede ver claramente que el suelo A1 es un suelo más fino que el A2, ya que con la granulometría por tamizado no se evidenciaba tal diferencia. De la curva granulométrica completa se obtuvieron el pasante tamiz #200, el contenido coloidal y la fracción de arcillas (%Arcilla). Éste último valor junto al índice de plasticidad (ver apartado 3.1.1) se utilizó para calcular la actividad de Skempton Ref. [21], cuyos resultados se exponen en la Tabla 5. Das Ref. [22] en su obra indica valores típicos de actividades ( $A_c$ ) para varios minerales arcillosos, las illitas presentan un rango de actividad comprendido entre 0,5 y 1,0, mientras que las montmorrillonitas se encuentran comprendidas en un rango  $A_c$  de 1,0 a 7,0. En base a estos límites, los valores obtenidos de  $A_c$  (ver Tabla 5) indican que la muestra A1 se encuadra como illita, mientras que la muestra A2 como montmorrillonita. Cabe destacar que ambas muestras acusan una actividad similar y se encuentran en el límite entre ambos minerales arcillosos.

**Tabla 4.** Granulometrías completas para las muestras A1 y A2

Muestra A1			Muestra A2		
Tamiz		Pasante	Tamiz		Pasante
[N°]	[mm]	[%]	[N°]	[mm]	[%]
#4	5,000	100,00	#4	5,000	100,00
#10	2,000	99,53	#10	2,000	98,81
#40	0,400	97,96	#40	0,400	96,26
#200	0,075	75,35	#200	0,075	74,14
Método del Hidrómetro	0,038	73,61	Método del Hidrómetro	0,042	56,49
	0,028	69,10		0,031	52,03
	0,018	63,09		0,020	46,09
	0,011	51,07		0,012	37,17
	0,008	46,57		0,009	29,73
	0,006	40,56		0,006	25,27
	0,004	36,05		0,005	20,81
	0,003	30,04		0,003	19,33
	0,001	22,53		0,001	11,89

**Tabla 5.** Valores de Actividad de Skempton para las muestras A1 y A2

Parámetro	Muestra A1	Muestra A2
Contenido Coloidal [%]	22,53	11,89
%Arcilla	26,29	15,61
Actividad $A_c$	0,95	1,06

Por otra parte, a través del gráfico de Skempton Ref. [21] ingresando con el valor de actividad ( $A_c$ ) y el índice de plasticidad ( $IP$ ), se obtuvo que la muestra A1 se clasifica como de alta actividad mientras que la A2, de media actividad. En la misma línea, aplicando el Método de Seed, Woodward y Lundgren Ref. [23] para predecir el potencial expansivo de una arcilla, se determinó que la muestra A1 se condice con un suelo de alto grado de actividad mientras que la A2, de medio grado de actividad. Según el método USBR de Holtz y Gibbs Ref. [13] que involucra el contenido coloidal, el índice de plasticidad y el límite de contracción (ver Tabla 3 y 5) para predecir el comportamiento expansivo de los suelos, también la muestra A1 se clasifica como un suelo de grado de expansión medio y la muestra A2 de grado de expansión bajo. De acuerdo a estos resultados, se puede prever un potencial expansivo mayor del suelo A1 respecto del A2.

### 3.1.4. Ensayo de expansión libre

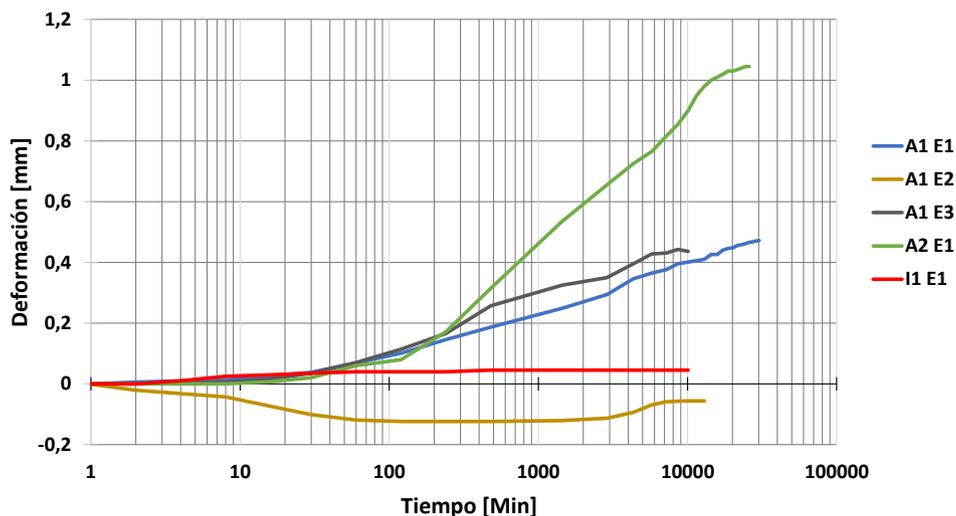
Los resultados de los ensayos de expansión libre unidimensional se exponen en la Tabla 6 y en la Figura 9. Cabe aclarar que el período de ensayo se refiere al número de días que fue sometido cada espécimen a la prueba de expansión hasta alcanzar su estabilización, es decir, superar la expansión primaria según lo indica la norma ASTM D 4546 Ref. [18].

Los resultados del ensayo para los tres especímenes de la muestra A1 (ver Tabla 6) confirman que a menor humedad inicial la expansión primaria se produce en un período de tiempo menor acusando un porcentaje de expansión más elevado Ref. [8].

**Tabla 6.** Cuadro comparativo de los parámetros del Ensayo de Expansión Unidimensional

Especímen	Humedad Inicial ( $H_0$ )	Humedad Final ( $H_f$ )	Gradiente ( $H_0 - H_f$ )	Período ensayo	Expansión 24 h	Expansión total
	[%]	[%]	[%]	[Días]	[%]	[%]
A1-E1	35,03	39,35	4,32	21	52,75	2,36
A1-E2	50,36	50,16	-0,20	9	-46,28	-0,28
A1-E3	28,33	30,74	2,41	7	74,54	2,18
A2-E1	34,23	38,25	4,02	18	51,20	5,23
I1-E1	24,91	28,81	3,90	7	100,00	0,23

Es de notar que el espécimen A1-E2, el cual fue sometido a ensayo con una humedad inicial mayor al límite líquido de la muestra A1 (ver Tabla 3), obtuvo un valor de expansión negativo, es decir, una contracción. Si bien, como puede verse en la Figura 9, a partir de las 24 horas el espécimen comienza a expandir, no alcanza a superar la altura inicial.



**Figura 9.** Superposición de curvas de Expansión Unidimensional

Como puede observarse en la Tabla 6, el espécimen A2-E1 ha resultado ser el más expansivo, el valor de su expansión total es más del doble que la del espécimen A1-E1, con el cual es comparable por tener similar humedad inicial (aproximadamente 35%). Cabe destacar que el suelo que conforma la muestra A2,

además de diferenciarse en su caracterización, posee una consolidación natural superior a la de la muestra A1 por haberse extraído a una mayor profundidad (4,0 m). Los resultados obtenidos para el espécimen A2-E1 podrían relacionarse no con una genuina expansión del suelo sino como una relajación de las fuerzas intergranulares de consolidación, puesto que la prueba de laboratorio involucró una presión ínfima respecto al estado de esfuerzos al que estaba sometido el suelo en su estado natural Ref. [24]. Posiblemente si con el mismo espécimen se realizaran varios ciclos de ensayos de expansión, se produciría la fatiga del mismo, tal como lo indica Torres García Ref. [24], convergiendo a un comportamiento expansivo acorde a su baja plasticidad y bajo contenido de arcillas (ver Tabla 3 y 5). Lo que podría conducir a un resultado congruente con el obtenido en el Apartado 3.1.3.

Por otra parte, para analizar el comportamiento de un suelo inalterado respecto de uno alterado, se comparan los resultados obtenidos para el espécimen I1-E1 (muestra inalterada) con los del espécimen A1-E3 (muestra alterada) considerando que ambos presentan una humedad inicial similar y provienen de muestras extraídas a igual profundidad. Los resultados indican que I1-E1 (muestra inalterada) experimentó tan solo un 10 % de la expansión total del A1-E3 (muestra alterada). Esto puede deberse a que, en el espécimen alterado, las caras expuestas a la saturación presentan poros abiertos debido al moldeo creando una estructura dispersa Ref. [25], lo que facilita el ingreso del agua. Mientras que al espécimen inalterado (no moldeado) no fue posible saturarlo totalmente durante el ensayo, situación que se dio por la baja permeabilidad del suelo en su estado original de consolidación Ref. [24]. Esto provocó que la expansión registrada sea la que se condice con el suelo ubicado casi exclusivamente en las caras expuestas del espécimen, lo que justifica además que se diera una expansión 24 h del 100 %.

#### 3.1.5. *Ensayo de adsorción de Azul de Metileno*

Los resultados del ensayo de azul de metileno arrojaron un valor de superficie específica ( $S_e$ ) de 149 m<sup>2</sup>/g para el espécimen A1-AM1 y, un valor levemente superior, de 171 m<sup>2</sup>/g para el espécimen A2-AM1. Las mediciones de superficie específica efectuadas en cada una de las muestras permiten estimar el grupo mineralógico predominante. Santamarina Ref. [20] propone un rango  $S_e$  de 10 a 20, de 80 a 100 y de 400 a 800 m<sup>2</sup>/g para caolinitas, illitas y montmorillonitas, respectivamente. En la misma línea, Juárez Badillo Ref. [7] y Das Ref. [22] indican valores  $S_e$  aproximados de 10 m<sup>2</sup>/g para caolinitas, 80 m<sup>2</sup>/g para illitas y 800 m<sup>2</sup>/g para montmorillonitas. A través del análisis de la  $S_e$ , al igual que lo obtenido en el Apartado 3.1.3, ambas muestras se encuentran en el límite entre las illitas y las montmorillonitas sugiriendo un mineral arcilloso con cierta capacidad de expansión.

El suelo obtenido de la muestra A1, más fino respecto del A2 (ver Fig. 8), presentó una superficie específica menor, lo que resulta contradictorio ya que una menor  $S_e$  se relaciona con un mayor tamaño de partícula Ref. [7,20,22]. No obstante, la diferencia registrada entre los valores de  $S_e$  de la muestra A1 respecto de la A2 no supera el 13 %. Un caso similar expone Codevilla Ref. [26] al estudiar las arcillas superficiales del Gran Buenos Aires.

#### 3.1.6. *Ensayo de Difracción de Rayos X*

El resultado de la composición mineralógica sobre la fracción arcilla a través del ensayo de DRX muestran un 90 % y 60 % de esmectita y un 10 % y 40 % de illita para el espécimen A1-DRX1 y el A2-DRX1, respectivamente Ref. [27]. En ambos casos la presencia de impurezas fue escasa, destacándose principalmente cuarzo, plagioclasa y clionoptilolita.

La cuantificación mineral permitió observar que en ambos especímenes la fase dominante sobre la fracción arcilla es la esmectita. Teniendo en cuenta que este mineral pertenece a la familia de arcillas expansivas -donde aparece la montmorillonita-, se puede deducir que el suelo extraído a 2 m de profundidad presenta una mayor capacidad expansiva puesto que a tal cota tanto el porcentaje de esmectita como así también de la fracción de arcilla (ver Tabla 5) son superiores respecto al suelo ubicado a mayor profundidad (4 m).

La muestra A1 presenta un 26,29 % de arcilla, donde el 90 % se corresponde con el mineral esmectita, es decir, aproximadamente el 24 % del suelo tiene capacidad expansiva. Por otra parte, la muestra A2 contiene un 15,61 % de arcilla, donde el 60 % está representado por esmectita, es decir, tan solo un 9 % del suelo tiene capacidad expansiva.

### 3.1.7. Conclusión respecto del tipo de suelo

Teniendo en cuenta los resultados de los ensayos de laboratorio llevados a cabo, se concluye que el suelo de fundación puede considerarse una arcilla de media plasticidad, con predominio del grupo mineralógico montmorrillonita -perteneciente a la familia de la esmectita- con cierta actuación del mineral illita, lo que le confiere un grado medio a alto de expansividad.

Gracias a la técnica de difracción de rayos X se pudo corroborar que el suelo extraído a menor profundidad (2 m) es notoriamente más susceptible a sufrir cambios de volumen ante la presencia de agua que aquel dispuesto a 4 m. Lo cual está en línea tanto con lo obtenido a través del gráfico de Skempton como aplicando los métodos de Seed, Woodward y Lundgren, y de Holtz y Gibbs (USBR).

### 3.2. Evaluación de potenciales focos de humedad

Para que un suelo expansivo produzca un cambio en su volumen éste necesariamente debe experimentar cambios de humedad Ref. [5,8], por lo que resulta fundamental investigar los posibles focos de humedad que podrían haberse generado en las cimentaciones del edificio en estudio durante el transcurso de los años.

Se observaron los siguientes puntos críticos:

- Existencia de una cancha de fútbol próxima a la edificación en el margen Oeste (ver Fig. 2), cuya pendiente hacía llegar el escurrimiento pluvial superficial hasta las veredas perimetrales del edificio. Por la inexistencia de un sistema colector pluvial, el agua podía filtrarse fácilmente a través de las grietas y juntas abiertas de las veredas deterioradas (ver Fig. 1. Der.).
- Descarga pluvial de la cubierta a través de: i) bajadas laterales con desagote directo sobre las veredas perimetrales de la edificación, sumando otro punto de ingreso de agua a través de las fisuras de éstas; ii) embudos ubicados en la zona central del edificio desde donde el agua de lluvia era evacuada por medio de cañerías subterráneas que pasaban a través de los cimientos, cabe destacar que este sistema presentó fallas por roturas recurrentes.
- Sistema de desagües cloacales con falencias, debieron llevarse a cabo sucesivos arreglos de las cañerías debido a roturas.
- Patio verde al frente de la edificación (fachada Este) con árboles de gran porte, lo cual generó un ambiente húmedo al verse obstruido el paso de la luz solar.
- Inexistencia de veredas perimetrales en la fachada Este del edificio.

Todos estos factores contribuyeron a la formación de focos de humedad (ver Fig. 2), y en línea con lo señalado por López Rodríguez *et. al* Ref. [8], los daños registrados en edificaciones fundadas sobre suelos expansivos pueden verse agravados por la situación de las redes de saneamiento (roturas permanentes de las instalaciones sanitarias), el inadecuado diseño de la red pluvial, falta de pavimentación perimetral o escasa impermeabilización de las superficies y la existencia próxima de jardines y masas de árboles.

Sumado a lo antedicho, el edificio presenta una planta de forma rectangular alargada (ver Fig. 2) alcanzando una longitud aproximadamente de 70 m en la dirección Norte-Sur y de 22 m en la dirección Este-Oeste, lo que contribuyó a crear situaciones muy disímiles entre los paramentos Este y Oeste. Este gradiente de humedad detectado podría haber activado la expansión de las arcillas por sectores, lo que conduce a asientos diferenciales en las cimentaciones y el consecuente daño estructural del edificio.

### 3.3. Viabilidad de la cimentación adoptada

La cimentación se conforma por una viga de encadenado inferior con altura variable (15 a 23 cm), de hormigón de baja calidad (presumiblemente H13 o inferior) y armadura tanto inferior como superior constituida por 2 hierros lisos, a excepción de tan solo algunos sectores donde aparecen 4 barras. Esta viga descarga sobre un cimiento de mampostería de ladrillos comunes de mayor espesor (sobre ancho de aproximadamente 15 cm), el que a su vez se apoya sobre un dado de hormigón ciclópeo de piedra mora, alcanzando una profundidad de fundación que varía entre 1,2 m y 1,8 m.

Ayala Carcedo *et al.* Ref. [5] señalan que, ante la presencia de suelos expansivos, las cimentaciones deben ser rígidas y, en caso de ser del tipo corridas, deben ir armadas para poder absorber los eventuales movimientos que puedan generarse por los cambios de humedad a lo largo de la vida útil de la obra. Ayala Carcedo *et al.* Ref. [5] también indican que la profundidad de cimentación debe ser tal que sobrepase la zona en la que se verifican los máximos cambios volumétricos periódicos (capa activa).

Al analizar las características del edificio se advierte una estructura de gran extensión en planta sin juntas constructivas haciéndolo susceptible al fallo ante asentamientos diferenciales, por lo que la cimentación adoptada puede considerarse inadecuada (poco rígida) teniendo en cuenta el tipo de suelo presente a nivel de fundación. Resulta oportuno señalar que la cota de fundación debiera ser tal que la carga transmitida al suelo supere la presión de hinchamiento generada, como no fue posible llevarse a cabo este tipo de ensayos en la presente investigación, no se puede dar una conclusión al respecto.

## 4 CONCLUSIONES

Del estudio geotécnico se determinó que el suelo de fundación presenta un potencial de expansión medio a alto que aumenta en sentido inverso a la profundidad.

De la investigación del entorno se constataron varios focos de humedad que se alimentan por las condiciones propias de escurrimiento del lugar sumado a la existencia de cañerías rotas.

Del análisis de viabilidad de la cimentación adoptada se confirmó que la solución materializada no fue la más conveniente para el tipo de suelo de fundación, situación agravada por la baja rigidez estructural del edificio.

En síntesis, el gradual y continuo deterioro que llevó al desalojo del edificio obedece a movimientos relativos entre las distintas partes estructurales. Se puede afirmar que los mecanismos de fisuración detectados en los muros del edificio se correlacionan con los asentamientos de las veredas y los pisos interiores, los que a su vez se vinculan con las condiciones de drenaje superficial como con la infiltración continua de fluidos.

Se concluye que los daños edilicios identificados fueron producto del tipo de suelo existente a nivel de fundación (1,2 m a 1,8 m) que, al estar expuesto a focos de humedad, ha experimentado cambios de volumen provocando asentamientos diferenciales de la cimentación corrida.

## REFERENCIAS

- [1] ASEFA, *Patologías por arcillas expansivas, naturaleza y comportamiento*. Artículo técnico. Construcción. Página web: <https://www.concretonline.com/construccion>. 2018.
- [2] Jiménez Salas, J., *Geotecnia y cimientos III: Cimentaciones, excavaciones y aplicaciones de la geotecnia. Primera Parte*. España, Madrid: Editorial Rueda, 1980, p.650.
- [3] Llorca Aquesolo, J., *Sobre la edificación en arcillas expansivas*. Informes de la Construcción N° 321. Vol. 33, 1980, pp: 71-82.
- [4] Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Concepción del Uruguay. Laboratorio Construcciones. Grupo de Estudio de Suelos (1994-2013). Estudio de Suelos (T1-6). Concepción del Uruguay, Entre Ríos.

- [5] Ayala Carcedo, F.J., Ferrer Gijon, M., Oteo Mazo, C., Salinas Rodríguez, J.L., *Mapa predictor de riesgos por expansividad de arcillas en España a escala 1:1.000.000*, Informe del Instituto geológico y minero de España, 1986, p.60.
- [6] Jiménez Salas, J., De Justo Alpañés, J., *Geotecnia y Cimientos I: Propiedades de los suelos y de las rocas*, Editorial Rueda, España, 1975, p.466.
- [7] Juárez Badillo, E., Rico Rodríguez, A., *Mecánica de Suelos. Tomo 1: Fundamentos de la Mecánica de Suelos*, Editorial LIMUSA, México, 1973, p.499.
- [8] López Rodríguez, F., Rodríguez Rodríguez, V., Santa Cruz Astorqui, J., Torreño Gomez, I., Ubeda de Mingo, P., *Manual de Patología de la edificación. Tomo 1: El lenguaje de las grietas. Patología y recalces de las cimentaciones*. Universidad Politécnica de Madrid, España, 2004, p.171.
- [9] Girbert Llanés Y., Martínez Silva, R., Ordaz Hernandez, A., *Evaluación de la expansividad de las arcillas en la ciudad de Pinar del Río*, Centro de Información y Gestión Tecnológica, Avances N°1, Vol. 21, 2019, pp:79-88.
- [10] ASTM D 2487, *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. Pensilvania, Estados Unidos de América. 2000.
- [11] ASTM C 136, *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. Pensilvania, Estados Unidos de América, 1996.
- [12] ASTM D 4318, *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. Pensilvania, Estados Unidos de América. 2000.
- [13] Holtz, W.G., Gibbs, H.J., *Engineering properties of expansive clays*. ASCE 121, Transact. 1956, pp: 641-677.
- [14] ASTM D 427, *Standard Test Method for Shrinkage Factors of Soils by the Mercury Method*. Pensilvania, Estados Unidos de América. 1998.
- [15] Carter M., Bentley S. *Correlations of Soil Properties*. Pentech Press Publishers, Reino Unido. 1991, p.130.
- [16] ASTM D 854, *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*. Pensilvania, Estados Unidos de América, 2014.
- [17] ASTM D 422, *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*. Pensilvania, Estados Unidos de América, 1963 (Reapproved 2002)
- [18] ASTM D 4546, *Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Settlement Potential of Cohesive Soils*. Pensilvania, Estados Unidos de América, 2014
- [19] UNE - EN 933-9, *Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos*. Parte 9: Evaluación de los finos. Ensayo de azul de metileno. Norma Europea. Madrid, España, 2010
- [20] Santamarina J.C., Klein K.A., Wang Y.H., Prencke E., *Specific surface: determination and relevance*. NRC Canadá, 2002, pp: 233-241
- [21] Skempton, A.W., *The colloidal activity of clays*. Proceedings 3rd International Conference of Soil Mechanics Foundation Engineering. Vol. 1, Suiza. 1953. pp 57
- [22] Das, B.M., *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*, Brooks Cole, Estados Unidos, 2002, p.589
- [23] Seed, H. B., Woodward, R. J., and Lundgren, R., *Prediction of swelling potential for compacted clays*, Journal of the Soil Mechanics Foundation Division, ASCE, Vol. 88, N° SM4, 1962, pp: 53–87.
- [24] Torres Gracia, J., *Estudio de fatiga de expansión en suelos arcillosos*. Tesis. Facultad de Ingeniería. Maestría en Ciencias. Universidad Autónoma de Querétaro, México 2005, P. 97
- [25] López Lara, T., *Estudio fisicoquímico de la modificación de suelos arcillosos*. Tesis. Facultad de Ingeniería. Doctorado. Universidad Autónoma de Querétaro, México 2002, P. 155
- [26] Codevilla M., *Arcillas expansivas del Gran Buenos Aires*. Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires. XIX CAMSIG, 2008.
- [27] CETMIC, *Difracción DRX con Identificación de fases e Identificación y cuantificación de las fases minerales en la fracción arcilla*. Informe de Ensayo N° 44322/21 I.P1 Centro de Tecnología de Recursos Minerales y Cerámica. Fecha: 01/09/2021.