

Pontificia Universidad Católica del Perú
Facultad de Ciencias e Ingeniería

Proyecto de Investigación en Albañilería
“Ensayos de Albañilería en Sillar”

Presentado por:
Juan Carlos Lara Galindo

PARA OPTAR EL GRADO DE:
INGENIERO CIVIL

Asesor: Ing. Ángel San Bartolomé

Lima – Perú
1988

“Ensayos de albañilería en Sillar”

RESUMEN

Se realizó un estudio preliminar que consistió en una recopilación bibliográfica, definición de objetivos, elaboración de una propuesta de investigación de la adherencia y características del bloque de sillar, ensayos de control de materiales y comportamiento a carga lateral cíclica de dos muros confinados.

Luego de aprobada nuestra propuesta se procedió a la elaboración de los planos y detalles de la construcción de los especímenes a ensayar (11 pilas para el ensayo de corte directo, 8 para el ensayo de compresión axial, 11 muretes para el ensayo de compresión diagonal y 2 muros confinados), planos y detalles de los dispositivos mecánicos y de medición a utilizar en los ensayos, detalles de la ejecución de ensayos y un cronograma de la construcción y ensayos de especímenes.

El programa experimental consistió en la supervisión de la construcción de los especímenes, el trabajo y el montaje en el lugar de ensayo y luego la supervisión de los ensayos.

Finalmente, se procesó, graficó e interpretó los resultados obtenidos para así poder obtener nuestras conclusiones, recomendaciones y las líneas futuras de investigación.

La variable estudiada en todos los ensayos fue el tipo de mortero más eficiente para solucionar el problema de la adherencia, problema crítico en las construcciones con sillar.

A MIS PADRES: FELIX Y SUSANA
A MIS HERMANOS: FELIX, CARLOS, LUIS
VERONICA Y NELLY
A MIS SOBRINOS: ENRIQUE Y SUSANITA

AGRADECIMIENTO:

A través de estas líneas quiero manifestar mi más sincero agradecimiento a quienes me dieron la oportunidad de desarrollar esta tesis.

A la PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ, mi Alma Mater; a los Profesores que me forjaron en mi profesión; así también a su Laboratorio de Estructuras, bien, representado por la ingeniero Gladys Villa García; a su equipo técnico de diseño y planta que me mostraron una especial estimación: a Marcelo, Miguel, Ismael, Roxana, Javier, Ángel, Hugo, Víctor, a los Maestros Huambachano y Florez.

AL INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN Y NORMALIZACIÓN DE LA VIVIENDA, a su equipo técnico y administrativo; en especial a los Ingenieros Isabel Moromi, Urbano Tejada, Aníbal Díaz, José Soto y Francisco Rosales; quienes me asesoraron y apoyaron en la elaboración de mi trabajo.

A mi Maestro Ángel San Bartolomé, más que un profesor, mi amigo, por todo el apoyo y enseñanza que me brindó durante mi carrera y elaboración de la presente Tesis.

A mis compañeros de estudios, que me alentaron y apoyaron en toda mi carrera.

Y, finalmente, al Dios Todopoderoso que nunca me abandona.

INTRODUCCIÓN.-

En la actualidad, en la búsqueda de una solución para el problema de la vivienda popular se han rescatado sistemas constructivos tradicionales, como son: el adobe y la quincha.

Es en este contexto que se ubica el presente trabajo, es decir también trata de buscar una futura alternativa para la solución de la vivienda económica en Arequipa. El Sillar es una piedra natural de origen volcánico que abunda en el departamento de Arequipa, y que ha sido bastante utilizada en la mayoría de las edificaciones de 1 y 2 pisos de I zona, es decir ha demostrado grandes cualidades para la construcción en una región de alta sismicidad. Indudablemente que es un material con limitaciones, una de estas es la baja adherencia que revela el tipo de falla observada en las edificaciones existentes en Arequipa, además que su uso ha disminuido ya que tiene un gran competidor: el ladrillo de arcilla cocida y por otro lado el transporte que es lo que eleva el costo del bloque del sillar.

El Instituto Nacional de Investigación y Normalización de la Vivienda (ININVI) y el Laboratorio de Estructuras Antisísmicas de la Pontificia Universidad Católica del Perú, continuando en la línea de sus investigaciones de las tecnologías tradicionales de construcción en nuestro país, apoyan la presente investigación la que fundamentalmente tratará de verificar y cuantificar las cualidades y defectos de la albañilería en sillar, para lo cual realizaremos ensayos en especímenes a pequeña escala y en muros a escala natural, tratando de asimilar las características constructivas que reutilizan actualmente en Arequipa (uso de cal, tipos de morteros, refuerzos, etc.) para de esta manera poder determinar los parámetros más importantes de la albañilería, obviamente que el número de ensayos no serán suficientes para establecer una norma para piedras naturales, pero si constituye un primer paso para su logro.

CONCLUSIÓN

Finalmente, quiero mencionar, al margen del interés científico de este proyecto que el costo del sillar es uno de los factores que ha hecho que este material entre un poco en desuso, siendo desplazado por el ladrillo. Por lo cual, se propone investigar la mejor forma de aprovechar este recurso natural, haciendo un mejor estudio de extraer, transportar y comercializar a este producto.

I. EL SILLAR

a) Formación

Existen varias teorías sobre la formación del sillar. Una de ellas pertenece al Dr. William F. Jenks (1), que considera que el sillar es una roca originada a raíz de una gran erupción volcánica, hace más de 800,000 años. Dice el Dr. Jenks, que una masa de lava, cargada de gas, fue empujada por fuerzas enormes hacia el exterior a través de las quiebras o fisuras situadas en las faldas del Chanchani. Al llegar a la superficie el gas se expandió violentamente y la lava se desmenuzó en pequeñísimos fragmentos vítreos, pero manteniéndose próximos al suelo, ya que se encontraban cargados de partículas rocosas finas. Esta masa móvil mezcla de gases y material sólido a elevada temperatura se expandió a gran velocidad a través del valle que hoy ocupa Arequipa y Yura; así se fueron llenando las depresiones en su totalidad, pero por su gran peso la nube fue perdiendo velocidad y llegó al reposo, al pie de las barreras formadas por la cadena de "La Caldera" y las montañas situadas al N.O. del río Yura; dejando en toda esta zona un manto de material parecido al de la ceniza y las partículas rocosas se asentaron y comenzaron a consolidarse.

El calor de la masa depositada era todavía muy elevada, algunas de las partículas se fundieron conjuntamente, dando lugar al endurecimiento del material originalmente suelto, y que dio lugar al sillar.

Las erupciones del tipo descrito se sucedieron rápidamente unas a otras, cubriendo repetidas veces la llanura, llegando a 250 m el espesor del sillar.

El Dr. Clarence N. Fenner (2) discrepa con Jenks, en lo que respecta a la manera como sale el magma a la superficie, Fenner a diferencia de Jenks señala que el magma parece haber rebalsado por los orificios de la corteza terrestre, en forma de una masa de partículas disgregados por la acción de los gases puestos en libertad, masa que ha corrido después, como un derrame incandescente.

Una de las características notables de los depósitos de sillar –dice Fenner– es la manera heterogénea como se mezclan los componentes (fragmentos de vidrio semejantes a polvo, junto con pedazos de piedra pómex y bloque de lava densa), se halla raras veces seleccionada por tamaños o sea estratificada, como es el caso de la acción fluvial o de la caída de materiales heterogéneos desde una cierta altura de la atmósfera, pues los materiales están, al contrario, uniformemente mezclados. Así también el Dr. Fenner distingue entre sillares antiguos o pre-glaciares y sillares recientes, la mayoría del sillar de los alrededores de Arequipa es anterior a la época glaciar y que por lo menos un solo depósito parece haber sido formado durante esta época o después de ella.

Es interesante mencionar que la composición del sillar ofrece contraste con la del material resultante de derrames lávicos de los volcanes de la región. En las lavas son las andesitas, las rocas que predominan grandemente; en el sillar en cambio domina un material muy silíceo, una riolita.

En otros países se ha encontrado que los depósitos de las inundaciones o derrames de material incandescente se originaron en algunos casos en los orificios volcánicos principales y en otros por rebalses a través de fisuras recién abiertas en la corteza terrestre, pero en toda la región de Arequipa no se encuentran evidencias concretas acerca de los puntos en donde se produjo la salida del material incandescente que originó el sillar.

En cuanto al sillar reciente, es un material de caracteres algo diferentes a las de cualquiera de los viejos sillares ya citados, pues está completamente inconsolidado y encierra una cantidad considerable de bloques de lava; esto unido al hecho de presentarse desordenado, es decir, sin agrupamiento de tamaños; en algunos lugares se ve que estas masas de sillar joven, reposan sobre capas sueltas de piedra pómex, que difícilmente habría podido soportar la acción de un glaciar que se hubiere deslizado encima de ellas. Aunque por ciertos aspectos este material difiere de los depósitos más antiguos, a los que el término "sillar" es aplicable con mayor propiedad, se asemeja mucho a partes de los grandes incandescentes.

De lo anterior, podríamos clasificar al sillar con una roca efusiva (roca fundida) que se ha derramado sobre la superficie terrestre y se ha enfriado rápidamente.

b) Yacimientos (ref. 6)

En Arequipa

- La Pampa, situada al Norte de Miraflores, sillar de mala calidad (pesado y poco resistente a la compresión), gran eflorescencia, lo que malogra los tartajeos de yeso, es el de mayor uso en las antiguas construcciones de Arequipa.
- Pampa Chica, cerca de la anterior, sillar duro, es el que se ha utilizado en el Puente Bolognesi, presenta dificultad para su extracción y por eso que actualmente está abandonado. Es un sillar amarillento.
- Añashuayco, en el N.O. de Arequipa, tiene el aspecto de una gran muralla, en una longitud de 18 km aproximadamente, y es de fácil corte. Aquí podemos encontrar sillar blanco.
- Los Quicos, corre paralela a la quebrada de Añashuayco.
- Yura, Quishuarani y Añashuayco, proporcionan el sillar rosado (éste es el que se presenta en el Palacio Episcopal de Arequipa).

De estas variedades de sillar, los más cotizados son : el sillar blanco y el sillar rosado.

c) Composición mineralógica (ref. 6)

Un estudio sobre la composición mineralógica del sillar que fuera realizado en el Laboratorio de Geología y Geomorfología Aplicada de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería, ha llegado a las siguientes conclusiones:

Estudio Macroscópico:

- Color	blanquísmo
- Estado	ligeramente intemperizada
- Grano	fino
- Textura	vitro fragmental
- Minerales	plagioclasas, biotita, vidrio volcánico

Estudio Microscópico:

Minerales	Observaciones:
Plagioclasas ($\text{Na}_\text{Si}_\text{O}_3$)	En cristales fragmentados y frescos, parece corresponder a una variedad ácida. La cristalización de los individuos es incompleta.
Biotita ($\text{Si}_\text{O}_3 (\text{OH}) \text{F}_\text{e}$)	En pajillas sueltas, así como en fragmentos de cristales.
Vidrio volcánico (Si_O_2)	Constituye toda la matriz donde se asocian íntimamente.
Esquirla	Conforman parte de la matriz, son abundantes.
Material Devitrificado (Si_O_2)	Constituido por esferolitos posiblemente despóticos.
Trozos líticos ($\text{Na}_\text{Si}_\text{O}_3$)	De naturaleza volcánica de texturas variadas.

d) Forma de extracción

Dice F. Arredondo (3) en su libro “Las Rocas en la Construcción”: “Hay varias consideraciones que hacer antes del establecimiento de una cantera. En primer lugar hay que excavar la menor cantidad posible de materiales inútil. Ocurre a veces que sólo interesa obtener bloques de determinadas dimensiones, y entonces, como todos los fragmentos más pequeños son puro desperdicio, se debe disponer una zona de ataque en la cantera y unos procedimientos de explotación que produzcan la menor cantidad posible de dichos tamaños.”

Por otra parte, es frecuente que la parte superior del macizo a explotar, llamada montera, esté constituida por terreno de aluvión o tierra vegetal que hay que eliminar antes de comenzar la explotación definitiva”.

Las canteras de sillar de Arequipa, son explotadas a cielo abierto en forma muy rudimentaria para lo cual se procede a eliminar el estrato superficial de arena y tierra que cubre el sillar.

El Dr. Jenks afirma que el espesor del estrato de sillar puede llegar a 250 m en una área de 500 m², en Añashuayco, a la vista se encuentran grandes murallones de más o menos 25 m, ya que se ha abierto una gran brecha, a lo largo de la cual se encuentran una extraordinaria cantidad de pequeños fragmentos. De todas las canteras ya mencionadas, Añashuayco es considerada como una de las que posee el mejor sillar; está ubicada en la quebrada del mismo nombre, a unos 5 km del centro de la ciudad y se explota sillar blanco y rosado, la cantera cuenta con vías de acceso carrozables que permiten el ingreso de camiones hasta las mismas canteras. Como generalmente estas vías son angostas y de fuerte pendiente, sólo camiones de bajo tonelaje pueden ingresar, los que transportan en cada viaje media tarea (100 piezas de sillar).

e) Herramientas e insumos utilizados

Los canteros proceden a derrumbar a los murallones (“PILCOS”), que son grandes bloques de sillar, los que posteriormente, ya en el fondo de la quebrada, son partidos en bloque medianos y estos finalmente partidos en bloques, en forma de paralelepípedos, listos para su venta.

El sillar en los murallones se encuentra constituyendo grandes bloques verticales (PILCOS). La explotación se inicia con el derrumbe de estos grandes bloques trabajándose de arriba hacia abajo y utilizando barretones de $\phi 1\frac{1}{4}$ ” y 50 cm de largo con puntas planas para palaquear y volcar los bloques y, en algunos casos, pólvora para el removido previo. El trabajo de volado de los bloques por el peligro que acarrea, obliga a los canteros a trabajar amarrados con sogas.

Para el moldeo de los bloques volcados al pie de los murallones, en bloque más pequeños, se utilizan:

- Cuñas de $\phi 1"$ y 20 cm de largo de punta plana
- Lampas
- Barreta chuso
- Platinas (muelles de camión)
- Barretas de $\phi 1\frac{1}{4}"$ de punta y pala de 1.50 m de largo
- Combas de 12 lbs. de peso y en algunos casos combas de 16 lbs.
- Estiércol de burro, caballo o ganado vacuno.

Para el moldeo de un bloque se sigue el siguiente procedimiento:

- 1° Con la punta de la barreta se hace una perforación de aproximadamente 2" de profundidad.
- 2° Se rellena la perforación con el estiércol.
- 3° Se introduce la cuña en la perforación con la punta colocada en la dirección que se desea partir el bloque.
- 4° Se aplica un golpe fuerte en la cuña metálica con la comba, consigiéndose de esta forma partir el bloque en la dirección deseada.

La barreta chuso y las platinas son utilizadas para levantar y voltear los bloques. El cantero procede con la operación de partido hasta lograr un tamaño apropiado, formado el paralelepípedo a golpe de comba y, con la pala de la barreta, uniformiza las superficies.

El uso del estiércol tiene por finalidad ajustar la cuña en la perforación, de lo contrario éste pulveriza localmente el sillar sin presión, también se corre el peligro de que se ajuste en el taladro, siendo muy difícil su extracción.

f) Formas y dimensiones de los bloques

Normalmente los bloques de sillar para la construcción, se preparan en forma de paralelepípedos de grandes dimensiones, pero posibles de ser manipulados por un sólo hombre.

Las superficies de estos paralelepípedos tal como salen de la cantera son bastante irregulares, ya que son conformados en forma bastante burda con la comba y la pala de la barreta. El albañil en obra se ve obligado a tener que refinrarlas antes de su asentado.

Se distingue 2 tipos de bloques de sillar, según su calidad:

- a) Tipo tabique
- b) Tipo ripio

El tipo tabique es el que tiene buena configuración y es empleado en la construcción de edificaciones, se preparan en dos dimensiones:

- Bloque corriente 20 x 32 x 55 cm.
- Bloque especial 20 x 25 x 60 cm.

El tipo ripio es el bloque irregular y que no tiene la forma de un paralelepípedo o que no tiene la dimensión pre-establecida.

Este tipo de bloques es empleado normalmente en la construcción de cercos en las chacras.

El bloque especial a pesar de tener un volumen menor que el bloque corriente, su costo es mayor debido a su menor sección que obliga al cantero a tener cuidado en su tallado.

g) Rendimiento de la mano de obra y costos de producción

Según visita personal realizada a al cantera de Añashuayco, en el mes de abril del año 85, se entrevistó algunos canteros y nos enteramos de que un cantero puede preparar 40 piezas de sillar en una jornada diaria de trabajo, listos para su venta.

El cantero vende la producción a los camioneros, quienes se encargan de su venta en los lugares de obra.

En el mes de abril de 1985, la tarea de sillar corriente (200 bloques) se vendía en cantera a S/. 280,000 soles, y en obra en la ciudad de Arequipa (4 kms.) a S/. 480,000 soles, notemos pues que es el transportista quien obtiene el 40% del producto de la venta.

Para la extracción del sillar actualmente se efectúan las siguientes inversiones:

- Mano de obra
- Herramientas
- Materiales

Sin duda que la inversión más costosa es en mano de obra; se tiene gastos iniciales en compra de herramientas y luego el desgaste periódico y barretas y cuñas, lo que normalmente se hace cada 2 ó 3 días.

Los materiales que normalmente se adquieren son: la pólvora y el estiércol de ganado, el que es comprado por costalillos. Hasta hace algunos meses se estuvo comercializando a nivel nacional, enchapes de sillar, "Sillares Arequipa SA" fue la firma que intentó esta empresa, pero lamentablemente fracasó, al parecer hubo mala administración por un lado y por otro los costos de herramientas eran bastante altos. Esta firma adquiría los bloques extraídos por los canteros y luego en la fábrica se procedía a su corte en diversas dimensiones utilizando cortadoras mecánicas (sierras de acero, importadas), pero vemos que no mecanizó la explotación de la cantera.

Sería interesante mencionar, los efectos del trabajo en canteras sobre la salud del personal, condiciones de trabajo: El trabajo de los canteros es bastante duro, contratados por los camiones, son llevados por estos muy temprano (5 a. m.) a las canteras.

El camionero se compromete a comprarles toda su producción, a un precio por tarea previamente acordado, y para asegurar la transacción comercial, el cantero recibe del camionero un adelanto de dinero a cuenta de su producción;

por consiguiente, el usuario del sillar en la ciudad no lo adquiere del cantero, sino del intermediario que es el camionero.

En las canteras, donde normalmente reina una alta temperatura, el personal permanece todo el día; el agua tiene que ser obligadamente llevada de la población. Algunos canteros llevan a sus esposas, las que le preparan algunos alimentos, algunas veces, también a sus menores hijos para que le ayuden a estas duras tareas. Normalmente los días lunes y domingo no trabajan.

El mayor peligro para la salud de las canteras, lo constituye el gas emanado de la roca y el sillar pulverizado que es inhalado, produciéndoles afecciones pulmonares y silicosis. Otro peligro lo constituye el derrumbe intempestivo de rocas y accidentes con las propias herramientas de trabajo. No se utilizan cascos protectores, botas o guantes.

h) Sistemas constructivos

En la ciudad de Arequipa, se observan mayormente 3 sistemas constructivos de muros utilizando el sillar: albañilería no reforzada, albañilería confinada y albañilería de bloques de sillar apilados, sin mortero de junta, éste último se da mayormente en los Pueblos Jóvenes, como una primera etapa constructiva, hasta que consiguen el dinero suficiente para asentarlo.

En las edificaciones antiguas de sillar, se observa que se usó el mortero cal-arena para el asentado de los bloques, sin ningún refuerzo metálico que le proporcione ductilidad al conjunto; en las edificaciones que se levantan actualmente, se está utilizando el mortero cemento-arena y esto posiblemente influenciado por la tecnología del ladrillo de arcilla.

Los espesores de muros son variables, dependiendo de la altura de los mismos. En las edificaciones recientes, tanto en las urbanizaciones residenciales como en Pueblos Jóvenes ya consolidados, se observa el uso de columnas y vigas de confinamiento, semejante a la albañilería con ladrillo de arcilla confinada. Los bloques de sillar en este caso son asentados con mortero cemento-arena y colocados de canto dando espesores de muro de 20 cm.

Tanto las juntas exteriores como interiores son solaqueadas. Las edificaciones que siguen este sistema constructivo, mayormente son de uno o dos pisos.

Los entrepisos y techos de las edificaciones antiguas están constituidas por bloques de sillar, colocados formando superficies curvas como cúpulas, arcos, medios cilindros, etc. o combinaciones de ellas, con la finalidad de hacer trabajar al sillar a la compresión. De esta forma se lograba techar grandes luces como se observa en las bóvedas de las iglesias. En los entrepisos, la superficie horizontal y plana se conseguía mediante rellenos.

El empuje horizontal hacia afuera, que producen techados en curva, se contrarresta mediante el uso de contrafuertes. Los entrepisos y techos de edificaciones modernas de sillar son de aligerado convencional.

En cuanto al uso del sillar en elementos estructurales, podemos decir que esta piedra tiene una capacidad resistente a la compresión bastante cercana a la de un ladrillo de arcilla tipo II. Esta característica es la que permite utilizarlo en albañilería portante y en techados de forma curva donde mayormente trabaja a la compresión. Su uso también proliferó en épocas pasadas, en las construcciones de pilares de puentes (Grau y Bolognesi en Arequipa) y de edificaciones altas.

Una de las características arquitectónicas del sillar es que su color blanco o rosado, le proporciona a las edificaciones una apariencia muy bella, lo que ha sido y es explotado muy hábilmente por los arquitectos y constructores en Arequipa. Así también, siendo el sillar una piedra relativamente blanda, lo que facilita su tallado en cualquier forma, ha permitido dar a las fachadas de una serie de edificios arequipeños, apariencias barrocas o churriguerescas. La firma Sillares Arequipa SA explotó esta característica, produciendo enchapes, con fines de recubrimientos de superficies de edificaciones de ladrillo de arcilla o de concreto armado.

De otro lado, las instalaciones eléctricas y sanitarias en edificaciones de sillar, son convencionales, con tuberías empotradas o vistas. Para el empotramiento normalmente se procede al picado de los muros y luego de colocada la tubería, al relleno correspondiente.

El mayor deterioro que se nota en el sillar de los muros, es por humedecido y secado, este deterioro es mayor cuando contiene sales solubles. Como el porcentaje de absorción del sillar es alto, su uso en climas húmedos no es nada recomendable.

Otro deterioro que se observa en las capas de pintura látex es el fácil desprendimiento de la superficie de sillar. Es por esta razón que mayormente se recurre a la aplicación de pintura a base de cal

Las vibraciones sísmicas han producido y producen la separación de los boques de sillar y el derrumbe correspondiente. Es raro observar que haya fallado el bloque por tracción diagonal, lo común es la falta e el mortero de asiento por falta de adhesividad del mortero.

El comportamiento estructural de los muros confinados ante las solicitudes sísmicas ha demostrado ser mucho mejor que el de muros sin refuerzo. Esto último será lo que trataremos más adelante.

i) Costos comparativos

Uno de los aspectos que hace posible la utilización de determinado material de construcción es su economía, especialmente en los actuales

momentos; es por esta razón que para incentivar a que los pobladores de Arequipa (especialmente los de los Pueblos Jóvenes) vuelvan a utilizar nuevamente el sillar en la edificación de sus viviendas, se debe tener muy en cuenta el problema de los costos.

En el Sillar

Considerando un muy en aparejo de soga, tal como se ha ensayado en este trabajo o sea muros de espesor de 25 cm (en los Pueblos Jóvenes actualmente se viene utilizando aparejo de canto, es decir muros de espesor de 20 cm), mortero 1:5 y juntas de 3 cm, tenemos:

$$\begin{aligned}\text{número de unidades/m}^2 &= 8 \text{ bloques } (25 \times 60 \times 19) \\ \text{cemento} &= 0.22 \text{ bols / m}^2 \\ \text{arena} &= 0.030 \text{ m}^3 / \text{m}^2\end{aligned}$$

En ladrillo de arcilla artesanal, tipo corriente:

Considerando un muro en aparejo de soga (aparejo más común), mortero 1:5, junta de 1.5 cm:

$$\begin{aligned}\text{número de unidades/m}^2 &= 55 \text{ ladrillos } (24 \times 12 \times 6) \\ \text{cemento} &= 0.25 \text{ bols / m}^2 \\ \text{arena} &= 0.04 \text{ m}^3 / \text{m}^2\end{aligned}$$

Los precios de estos materiales en Arequipa en abril del 85 eran:

$$\begin{aligned}\text{cemento} &= \$/.38,000/\text{bols} \\ \text{arena} &= \$/.42,000/\text{m}^3 \\ \text{bloque de sillar} &= \$/.3,000/unidad \\ \text{ladrillo de arcilla artesanal} &= \$/.420/unidad\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Evaluando : } 1 \text{ m}^2 \text{ de muro de sillar} &= \$/.33,620/\text{m}^2 \\ 1 \text{ m}^2 \text{ de muro de ladrillo} &= \$/.34,280/\text{m}^2 \\ \text{es decir } \$/.660.00 \text{ a favor de la albañilería con sillar.}\end{aligned}$$

Cabe indicar que en este análisis de costos no se ha incluido la mano de obra por carecer en aquel instante de los datos respectivos, sin embargo el asentado de grandes bloques de sillar demanda un menor tiempo en relación a las unidades de arcilla (8 bloques vs. 55 ladrillos/m²).

II. RECOPILACIÓN BIBLIOGRÁFICA

- 1) EFECTO DEL SISMO DEL 16 DE FEBRERO DE 1979 SOBRE LAS EDIFICACIONES DE SILLAR EN AREQUIPA (ref.7)**

Los Ings. Ángel San Bartolomé y Juan Bariola, profesores del Departamento de Ingeniería de la PUCP, expusieron sobre este tema en el 3er. Congreso Nacional de Ingeniería Civil realizado en el Cusco y dicen al respecto:

El 16 de febrero de 1979 ocurrió un sismo de magnitud de ondas superficiales m.s. 6.7, valor promedio de 49 estaciones proporcionado por el U.S.G.S. (United States Geological Survey). El foco fue ubicado en las coordenadas latitud sur 15.93, longitud oeste 72.42, a una profundidad de 49 km; esta posición corresponde a la zona denominada Huatapilla, provincia de Castilla, Arequipa.

El sismo fue registrado a las 5 hrs. 9 min. 14 seg., hora local y con una duración del movimiento significativo de 45 seg. La intensidad máxima alcanzó el grado VII en la ciudad de Camaná en la escala MSK debido a condiciones especiales del suelo que favorecieron la ampliación local de la intensidad.

En la zona céntrica de la ciudad de Arequipa la mayoría de las edificaciones son de sillar, algunas datan del siglo XVI.

Es importante indicar, para cualquier conclusión posterior, que las estructuras en su gran mayoría ya habían sido dañadas por los sismos de 1958, 1960 y otras por sismos pasados.

En algunos casos se realizaron reparaciones introduciendo adecuadamente elementos de concreto armado (Convento de Santa Rosa, Iglesia de San Pedro) en otros casos se trató de reparaciones consistentes en el simple resane de rajaduras.

Las edificaciones de sillar son generalmente de uno a dos pisos, el sistema de techado en algunos casos es en base a bóvedas del mismo sillar; o entablado de madera; otra forma muy común consiste en rieles y bloques de sillar colocados de manera semejante a un techo aligerado.

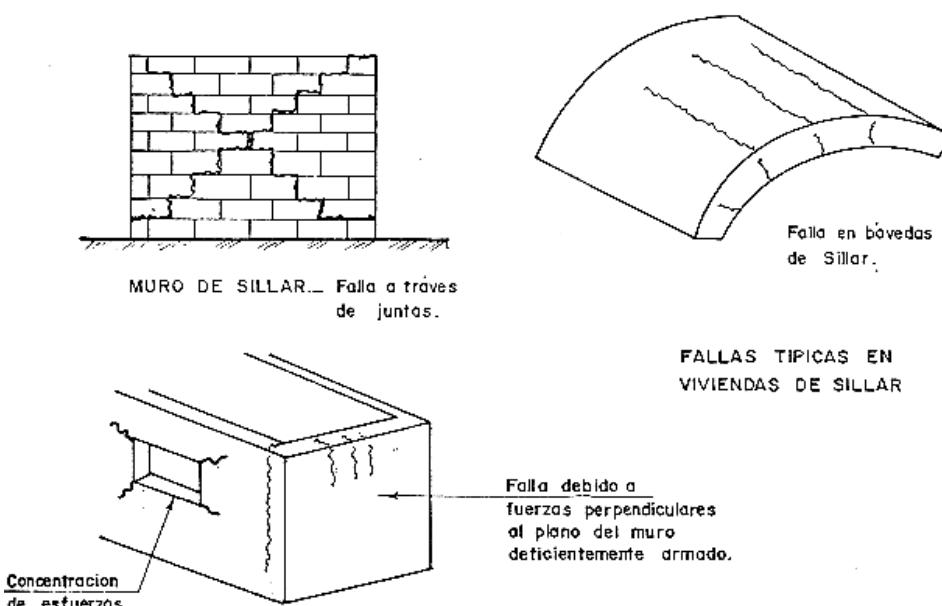
En la construcción rústica se utiliza techos de calamina. Para el asentado de los bloques de sillar se usa morteros de cemento en la zona urbana. En zonas rurales y Pueblos Jóvenes se usa pirca de sillar con morteros de barro o inclusive acomodado sin motero. Sólo en contados casos las construcciones de sillar poseen elementos de confinamiento.

El comportamiento de las estructuras de sillar se asemeja al de la mampostería de ladrillo no confinado, se presentan fisuras en las esquinas (encuentro de muros), rajaduras por tracción diagonal en muros y demás

fisuración de las bóvedas. La falla escalonada en los muros se presenta a través de las juntas, el mortero se debilita con el tiempo al estar en contacto con el sillar.

En las bóvedas, las rajaduras se presentan en la parte superior debido a que en esta zona las compresiones son mínimas, pudiendo desaparecer por efecto de la vibración. Asimismo, un mínimo desplazamiento relativo entre los muros de soporte hace que se desprendan los bloques en la bóveda y pueda sobrevenir el colapso por inestabilidad.

Otra falla típica es la caída de muros o parapetos que carecen de resistencia en dirección perpendicular a su plano, tal es el caso de los muros de fachada no amarrados convenientemente al resto de la estructura.



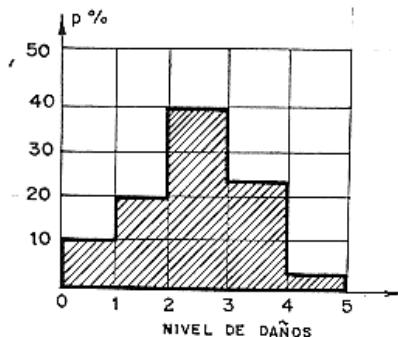
Durante el período de observaciones en el campo, se examinó un número de 130 viviendas de sillar en la zona céntrica de Arequipa con el fin de estimar la distribución de daños.

Se utilizó la escala MSK para la clasificación de daños y además, se asoció a cada grado de las escaleras un número, como porcentaje de la destrucción sufrida por la edificación, en la forma siguiente:

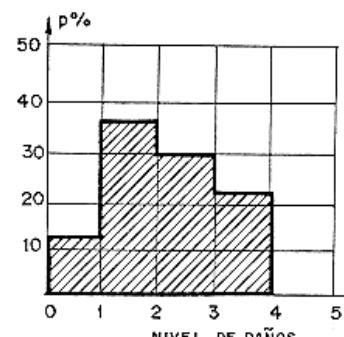
<u>Nivel de Daños</u>	<u>Clasificación</u>	<u>Destrucción Porcentual</u>
1	leve	10
2	moderado	20
3	severo	50
4	destructor	75
5	colapso	100

Si calculamos la sumatoria del producto del porcentaje de viviendas para cada nivel de daños (P_i) por el porcentaje de destrucción sufrido por la vivienda (D_i), obtendríamos la destrucción promedio en las edificaciones.

$$\sum P_i D_i = \text{destrucción promedio}$$



Destrucción promedio de edificaciones de sillar de un piso = 47 %



Destrucción promedio de edificaciones de sillar de dos pisos = 41 %

Se observa una menor destrucción para viviendas de dos pisos, lo cual puede deberse a una mayor cercanía del período predominante del sismo (se supone suelo firme) al período fundamental de las viviendas de un piso (estructura rígida).



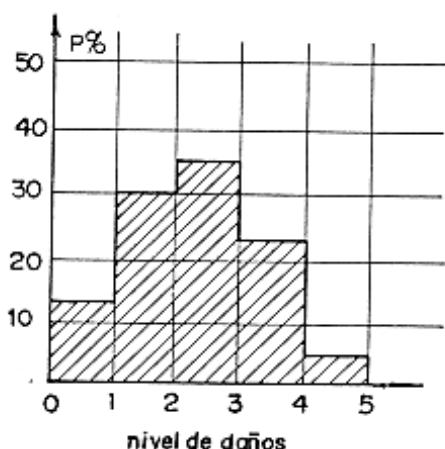
Buena calidad de construcción

Mala calidad de construcción

Por otro lado, la mayor destrucción promedio en edificaciones de un piso puede deberse también a que, en general las edificaciones de dos pisos son de mejor calidad de construcción. Esto se puede observar en la figura anterior donde se resumen los resultados de las encuestas en cuanto a calidades de construcción.

En la siguiente figura se observa la distribución de daños para el total de viviendas de uno y dos pisos, de lo cual se puede deducir que en cuanto la muestra sea representativa del estado general de las estructuras de sillar, los daños ocasionados equivalen a haberse destruido alrededor de un 40% de estas viviendas. Cabe mencionar que la muestra ha sido tomada en zonas especialmente dañadas, por lo cual el resultado podría sobre-estimar el daño real.

Debe tenerse en cuenta para la correcta interpretación de lo anterior, que los daños actuales corresponden a los efectos acumulados de por lo menos tres terremotos (1958, 1960, 1979). Por otro lado, las reparaciones efectuadas en sismos anteriores han sido en unos pocos casos eficaces, en otros incorrectos y no se ha realizado ningún tipo de reparación. Así pudo observarse bóvedas de sillar cuyos muros de soporte estaban ligados por cables que resultaban inefficientes para la acción sísmica.



Distribución de daños para el total de viviendas de sillar.

Las conclusiones y recomendaciones a los que llegaron los expositores son:

- Poner especial atención en la revisión de la seguridad y diseño de las estructuras de sillar; se recomienda tratar de confinar los muros y bóvedas con marcos de concreto armado y adicionar tirantes de refuerzo en las bóvedas que tratan de tomar el empuje producido por el arco. Al parecer, lo mejor sería cambiar este sistema de techado ya que se observa además, el fácil desprendimiento de los bloques de sillar por su mala adherencia con el mortero.
- Gran parte de los daños en las estructuras de sillar ocurrió en los Pueblos Jóvenes ubicados en lechos de torrenteras.
- La estadística de daños recogida, permite estimar que el sismo ocasionó en la ciudad de Arequipa el equivalente a la pérdida de un 35% de las viviendas de sillar. Dado que existe daño acumulado, se puede esperar una mayor pérdida para un sismo de la misma intensidad en el futuro.

2) ALGUNAS NORMAS TÉCNICAS (ref. 8)

En nuestro país no existe ningún tipo de reglamentación acerca de edificaciones con piedra natural. El Reglamento Mexicano contiene algunos acápitulos sobre mampostería de piedra natural. En la sección referida a los

materiales que se utilizan para este tipo de construcciones, el Reglamento Mexicano señala que las piedras deben cumplir las siguientes características:

- Resistencia mínima a la compresión en dirección normal a los planos de formación 150 kg/cm^2
- Resistencia mínima a la compresión en dirección paralela a los planos de formación 100 kg/cm^2
- Absorción máxima 4%
- Resistencia al intemperismo : máxima pérdida de peso después de 5 ciclos en solución saturado en sulfato de sodio 10%

Las piedras no necesitarán ser labradas, pero se evitará en lo posible el empleo de piedras de formas redondeadas y de cantos rodados.

En cuanto a morteros se dice:

- La relación volumétrica entre la arena y la suma de cementantes se encontrará entre 2.25 y 5.
- La resistencia mínima en compresión será de 15 kg/cm^2 .

Este reglamento señala los esfuerzos resistentes de diseño como sigue:

- Mampostería unida con mortero de resistencia en compresión no menos de 50 kg/cm^2 $f^*v = 20 \text{ kg/cm}^2$
 $v^* = 0.6 \text{ kg/cm}^2$
- Mampostería unidad con mortero de resistencia en compresión menos de 50 kg/cm^2 $f^*v = 15 \text{ kg/cm}^2$
 $v^* = 0.4 \text{ kg/cm}^2$

Los esfuerzos de diseño anteriores incluyen ya un factor de reducción, Fr., que por lo tanto no deberá ser considerado nuevamente en las fórmulas de predicción de resistencia.

Se verificará que en cada sección la fuerza normal actuante de diseño no exceda la fuerza resistente dada por la expresión:

$$P_r = (1-2 e/t) A_t f^*m$$

Siendo t peralte de la sección, A_t su área y e la excentricidad con que actúa la carga. La expresión anterior es válida cuando la relación entre la altura del elemento de mampostería y el peralte de su sección no excede de 5; cuando dicha relación se encuentre entre 5 y 10; la resistencia se tomará igual al 80% de lo calculado con la expresión anterior.

La fuerza cortante actuante no excederá de la resistencia obtenida de multiplicar en área transversal de la sección más desfavorable por el esfuerzo cortante resistente según el inciso anterior.

Finalmente, en cuanto al proceso constructivo se señala que las piedras que se emplean deberán estar limpias y sin rajaduras, además se mojarán antes de usarlas. El mortero se elaborará con la cantidad de agua mínima necesaria para obtener una pasta manejable.

3) USO DEL SILLAR EN LA CONSTRUCCIÓN – Primera Parte (ref.5)

El Instituto Nacional de Investigación y Normalización de la Vivienda ha realizado estudios de las propiedades física, mecánicas y químicas del sillar con el fin de evaluarlos para su utilización como elemento de albañilería (“Uso del Sillar en la Construcción” - Primera Parte Convenio ININVI-ITINTEC ref. 5); anteriormente similares estudios fueron realizados por Larrauri y Zorrilla (ref. 6).

Los datos provenientes de estos informes nos servirán para definir nuestro programa experimental, además es importante mencionar que los especímenes utilizados por ININVI en estos ensayos, pertenecen al mismo lote con los que se realizará nuestra investigación (proceden de la cantera de Añashuayco).

El siguiente es resumen de lo reportado en los mencionados informes:

- Propiedades Físicas: se determinó la geometría, peso específico, porcentaje de absorción, absorción máxima y coeficientes de saturación. Los resultados se muestran en el cuadro N° 1.
- Propiedades Mecánicas: se determinó la resistencia a la compresión y el módulo de rotura de acuerdo a la Norma ASTM C170-50 y C880-78 cuyos resultados se muestran en el cuadro N° 2. No se definió sentido de estratificación.
- Propiedades Químicas: se realizó el ensayo de eflorescencia según la norma ITINTEC 331.018, teniendo como resultado que el material ensayado no presentó eflorescencia.

De esta investigación se desprende que

- El bloque de sillar presenta características superiores al ladrillo tipo II de acuerdo a los requisitos señalados para este tipo de ladrillo en la Norma ITINTEC 331.017, ver cuadro N° 3. Según esta norma este tipo de ladrillo puede usarse en condición de intemperismo bajo y moderado en elementos que no estén en contacto con lluvia intensa o agua.

Será esta conclusión, nuestro punto de partida para la elaboración de nuestro programa de ensayos y la interpretación de los resultados; veremos si en las pruebas de albañilería el bloque de sillar se comporta como un ladrillo artesanal (tipo II).

TABLA N° 1: PROPIEDADES FÍSICAS DE BLOQUES DE SILLAR

ENSAYO	RESULTADOS
Geometría (Norma INTINTEC 331.018) ref. 5	Dimensiones nominales : Dimensiones ensayadas (cm) $\ell = 60 \text{ cm}$, $a = 25 \text{ cm}$ $\ell = 60.6$, $a = 24.6$, $e = 18$. $e = 20 \text{ cm}$ $\ell = 55 \text{ cm}$, $a = 32 \text{ cm}$ $\ell = 56.4$, $a = 32$, $e = 19$. $e = 20 \text{ cm}$
Peso específico (Norma ASTM C-127-59) ref.6	1.26 gr/cm ³
Absorción (%) (Norma ITINTEC 331.018)	27.88 (ref. 5) 30.88 (ref. 5)
Coeficiente de saturación (Norma ITINTEC 331.108)	1.00 (el máximo valor)

TABLA N° 2: PROPIEDADES MECÁNICAS DE BLOQUES DE SILLAR
(ref. 5)

ENSAYOS	RESULTADOS PROMEDIOS
Compresión	87.86 kg/cm ²
Módulo de rotura	13.8 kg/cm ²
Módulo de elasticidad	56875 kg/cm ²

TABLA N° 3: EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL BLOQUE DE SILLAR
(ref. 5)

	LADRILLO TIPO II	BLOQUE DE SILLAR
Resistencia a la compresión mínima	70 kg/cm ²	87.86 kg/cm ²
Absorción	Sin límite	30.88 %
Coeficiente de saturación	Sin límite	1.0
Módulo de ruptura	7 kg/cm ²	13.8 kg/cm ²
Eflorescencia	Sin eflorescencia (visto o sometido a humedad intensa)	Sin eflorescencia

4) CONCLUSIONES DE LA RECOPILACIÓN BIBLIOGRÁFICA

De lo anteriormente visto se desprende lo siguiente:

1. El sillar es un material que adecuadamente utilizado puede ser una buena unidad de albañilería, así lo demuestran la gran cantidad de construcciones en la ciudad de Arequipa edificadas con este material, muchas de ellas en mal estado por el daño acumulado en varios sismos de regular intensidad y además por mala construcción.
2. De lograr la industrialización de la extracción del sillar se logaría economizar en su costo, ya que hasta hoy su extracción es artesanal y riesgosa, ocasionando el encarecimiento de una piedra que Arequipa posee en abundancia en sus diversas canteras. (CAP. I).
3. No existe en nuestro país ninguna reglamentación sobre construcciones en piedra y las investigaciones realizadas en el sillar son sólo a nivel de material de construcción (propiedades físicas y mecánicas, etc.), realizada una de ellas por ININVI. Faltando profundizar estudios de succión y adherencia, al parecer los principales problemas en muros asentados con bloques de sillar.

III. DEFINICIÓN DE OBJETIVOS

El objetivo fundamental de este Proyecto, es obtener un adecuado conocimiento de las propiedades de la albañilería en sillar con la finalidad de disponer la información técnica que tomada como base permita en el futuro desarrollar una metodología de diseño y proponer normas y recomendaciones técnicas para el uso del sillar en la construcción.

Especificamente nuestro estudio se basará en los siguientes puntos:

- Adherencia, problema que se presenta en la mayoría de las edificaciones que utilizan el sillar en Arequipa.
- Determinación de los parámetros más importantes de la albañilería como son: la resistencia de la compresión axial, compresión diagonal, resistencia al corte, módulos de elasticidad, etc. su comparación contra la albañilería de arcilla.
- Verificar el cumplimiento de las relaciones conocidas entre estos parámetros (relaciones que se cumplen en albañilería con ladrillo de arcilla cocida o bloques de concreto) y por lo tanto poder predecir el tipo de falla en muros a escala natural.
- Estudiar el comportamiento estructural ante carga lateral cíclica de los muros que utilizan el sillar como unidad de albañilería, tratando en lo posible, de utilizar las características constructivas de la zona.

De otro lado, me parece importante mencionar que esta es la primera oportunidad que en nuestro país se realizan este tipo de ensayos en piedra natural, como es el sillar. El conocimiento de las propiedades mecánicas de la albañilería de sillar junto con el uso de criterios racionales de diseño llevará a proyectar estructuras más seguras y económicas en la zona de Arequipa.

El sillar es un material relativamente desconocido, por lo tanto nuestro programa de ensayos estará sujeto a modificaciones en cuanto al número de especímenes tal vez, o repetición de los ensayo; si fuera preciso. La variable que estudiaremos será el mortero y definiremos el uso de determinado mortero según los resultados que se nos vayan presentando.

Para la realización de los ensayos que a continuación proponemos, utilizaremos el mismo lote de bloque que usó el ININVI para los ensayos ya vistos en el CAP. II, estos bloques provienen de la cantera de Anashuayco.

IV. PROGRAMA EXPERIMENTAL – PROPUESTAS

1. INVESTIGACIÓN DE LA ADHERENCIA MORTERO-UNIDAD

De la bibliografía revisada y de la visita a la ciudad de Arequipa se deduce que uno de los principales problemas que se observan es el de la adherencia mortero-unidad. Se sabe que una de las propiedades más importantes de un mortero es su capacidad de producir una liga firme entre las piezas, ya que de esta propiedad dependen la durabilidad, resistente a tensión y parte también a la resistencia a compresión de la mampostería.

La adherencia entre el mortero y las piezas depende de las propiedades del mortero, de las piezas y del procedimiento de construcción. Por ellos, se ensayarán varios tipos de mortero, teniendo en cuenta para su selección razones de calidad en el comportamiento y de economía.

H. Gallegos (ref. 10) afirma que para ladrillos de mala calidad, la albañilería se mejora con un mortero de mayor calidad.

De otro lado, es necesario tomar en cuenta la utilización de la cal, aglomerante bastante utilizado en las edificaciones más antiguas que existen en Arequipa, y puesto que la cal hidratada produce un mortero de mayor trabajabilidad y retentividad, investigaremos los siguientes morteros: 1:0:5, 1:1:5, 1:0:8, proporciones volumétricas de cemento : cal : arena.

a) Succión

La influencia de la succión de la pieza sobre la adherencia se debe a que ésta puede extraer del mortero el agua necesaria para su fraguado generando una contratación rápida de éste, disminuyendo así su resistencia y adherencia con la pieza.

El sillar es un material bastante poroso y se hace necesario determinar su succión natural y seguramente habrá que reducirla, tratándola previamente, llámese sumergiéndola durante un determinado tiempo (asemejando lo que se hace con el ladrillo artesanal) y así lograr la succión adecuada (entre 10 y 20 gr. aproximadamente).

En los gráficos N° 1 y 2 observamos el efecto de la succión del tabique en la adherencia con el mortero (ref. 16 y 25). Del Proceso que hemos anotado para reducir la succión (sumergido previo al asentado) debemos señalar que el inconveniente más sobresaliente es la formación de eflorescencias. La determinación de la succión se realizará en base a la norma ITINTEC 331.018, el número de especímenes será 4, como mínimo para cada tratamiento.

b) Ensayo de corte directo sin carga de confinamiento

Objetivo.- Por intermedio del ensayo de corte determinaremos de manera cualitativa los dos morteros que evidencien una mayor adherencia. Razones de economía y dispersión de resultados nos motivaron a elegir este ensayo para la medición cualitativa de la adherencia, así lo revela la ref. 12.

Especímenes.- Se construirán 16 probetas (de 3 unidades cada probeta, dimensiones nominales 19 x 23 x 59 para cada unidad), 4 especímenes para cada tipo de mortero (las ya indicadas anteriormente). El espesor de las juntas será de 3 cm (valor determinado teniendo en cuenta la irregularidad de las superficies de los bloques y el alabeo). Para la construcción de los especímenes, de este ensayo y los próximos, se tendrá en cuenta el proceso de tratamiento de la pieza para la reducción de la succión. De igual manera durante la construcción de la totalidad de los especímenes de los ensayos que proponemos se utilizarán: el escantillón (control de altura y juntas) nivel, plomada y los bloques se tallarán o refinarán con cincel y una comba pequeña de acuerdo a las dimensiones requeridas.

Descripción del ensayo.- El dispositivo de ensayo y las características de los especímenes los presentamos en los gráficos N° 5 y 8. Uno de estos especímenes tiene un peso aproximado de 120 kg, por lo cual, para su transporte se ha diseñado un dispositivo especial (gráfico N° 4).

La carga se aplicará a una velocidad de 1 ton/min. y la carga de rotura se registrará como la máxima carga monotónica creciente, la celda de carga determinará exactamente el mencionado valor, registrando su señal en un amplificador HBM a razón de 400 mv. por tonelada.

Cabe señalar que en este ensayo, al igual que todos los que continúen, los especímenes serán previamente preparados para el ensayo, colocando capping de yeso, de espesor acorde con lo irregular de la pieza y así asegurar un contacto parejo entre los instrumentos de carga y los especímenes.

Cálculos.- Para la determinación del esfuerzo cortante de rotura utilizaremos:

$$\tau = \frac{P}{2A}$$

donde : A es el área de la cara de asiento del bloque.
P carga de rotura.

además, τ^* : resistencia característica = $\bar{\tau} (1 - C. V.)$

C. V.: Coeficiente de variación

2. ENSAYO DE COMPRESIÓN AXIAL EN PILAS

a) Objetivo

El objetivo de este ensayo será la búsqueda de la resistencia a la compresión ($f'm$) y la determinación del módulo de elasticidad de la albañilería de sillar (E_m), para ello necesitamos determinar la carga de rotura o fisuración (si fuera posible) y la curva carga deformación, respectivamente.

b) Especímenes

El ensayo de compresión axial se realizará en pilas formadas por 4 medios bloques de sillar, juntas de 3 cm (ver gráfico N° 10), se utilizarán medios bloques para evitar efectos de flexión que podrían presentarse en bloques de tamaño normal ya que la carga es concentrada.

Ensayaremos 8 pilas, las que llevarán 2 tipos de mortero (los que hayan denotado un mejor comportamiento en el ensayo anterior). La edad de las pilas será de 28 días.

c) Descripción del ensayo

En la gráfica N° 10 mostramos un esquema del ensayo de compresión axial.

La gráfica carga deformación sólo se realizará hasta una determinada carga para luego retirar los LVDT's (en previsión de que en el momento de la falla se puedan daño) y proceder a la rotura.

El control de la carga es similar al descrito en el ensayo anterior (la Máquina Universal MTS de 25 ton. de capacidad tiene una celda de carga incorporada), pero para registrar las deformaciones nos valdremos de dos LVDT's (Linear Variable Differential Transformers, no es más que un sensor electrónico) conectados a sus respectivos canales en el amplificador, a su vez estos inducirán las gráficas en los Recorders Philips, de tal manera que tendremos una gráfica en X-Y (deformación-carga). En la Máquina Universal MTS, se controla la velocidad de desplazamiento, esta será de 1 m.m./min. De no poder obtener la rotura del espécimen, éste se trasladará a una Máquina Universal de mayor capacidad (100 ton), existente en el Laboratorio de Minas.

d) Cálculos

Para el cálculo de la resistencia a la compresión utilizaremos el método 1 de las Normas Técnicas de Edificación en Albañilería (ref.27), según estas normas:

$$f'm = \frac{P}{A} \times F.C.,$$
$$f'm = \bar{f}m (1 - 1.5 (C.V. - 0.10)), \text{ si } C.V. > 0.10$$

donde:

f_m : Resistencia a la compresión en una pila.

$f'm$: Resistencia a la compresión corregida.

\bar{f}_m : Resistencia a la compresión promedio.

F.C. : Factor de corrección por esbeltez (de acuerdo a tabla del reglamento) que depende de relación altura/espesor.

C.V. : Coeficiente de variación

En nuestro caso de acuerdo a la geometría de las pilas:

$$\frac{\text{Altura}}{\text{Espesor}} = \frac{81}{24} = 3.375, \text{ F.C.} = 0.8975$$

El módulo de elasticidad lo determinaremos en base a las curvas carga-deformación, datos provenientes de la celda de carga (conectada ala gata) y los dos LVDT's (uno en cada cara de la pila), es decir tendremos 2 gráficos por cada pila, que tal vez mostrarán algunas diferencias, por lo cual el módulo de elasticidad de la pila será el promedio de los resultados obtenidos en estos dos gráficos, según la siguiente fórmula:

$$E = \frac{(\Delta P) L_0}{A(\Delta \delta)}, \Delta P = P_2 - P_1, \Delta \delta = \delta_2 - \delta_1$$

donde : P_2 , es la carga máxima graficable (50 % P rotura)

P_1 , 15% de la carga de rotura

δ_2, δ_1 son las deformaciones correspondientes a las cargas P_2 y P_1

L_0 , distancias entre bases del LVDT

3. ENSAYO DE COMPRESIÓN DIAGONAL EN MURETES

a) Objetivo

Otro de los ensayos que representa al comportamiento de muros rodeados por marcos exteriores es el ensayo de compresión diagonal; ya que reproduce un estado de deformaciones similar al efecto producido por fuerzas cortantes.

El modelo sujeto a carga diagonal puede fallar de diferentes formas : por deslizamiento sobre las juntas, por tensión diagonal y por aplastamiento. Los resultados del ensayo a compresión con otras unidades nos indican que, cuando

la falla es por tensión diagonal, existe un estrecha relación entre la resistencia a tensión diagonal de la mampostería y la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión, de modo que la primera puede determinarse, sin necesidad de recurrir a ensayos especiales en función de la segunda, trataremos de verificar el cumplimiento de esta relación. A partir de este ensayo también será posible determinar el módulo de corte (G), su cálculo nos permitirá verificar relaciones con el módulo de elasticidad (Em).

b) Especímenes

Ensayaremos 8 muretes, serán cuadrados, de bloque y medio de lado, juntas de 3 cm (ver gráfico N° 9); dimensiones definidas en base a razones de orden práctico (p.e. el transporte del murete utilizando el dispositivo del ensayo de corte directo).

Tendrán una edad de 28 días. La variable a estudiar en este ensayo también será el tipo de mortero, estos serán los dos morteros que mostraron mejor comportamiento en el ensayo de corte directo y para la construcción se seguirá el proceso que se determina luego del ensayo de succión.

c) Descripción del ensayo

Los instrumentos de medición (carga y deformación) así como el dispositivo de ensayo aparecen en el gráfico N° 6 y 9. Este ensayo es bastante similar al ensayo de corte, en lo que respecta al proceso de transporte de los muretes y de la medición de la carga, pero de la ejecución de este ensayo obtendremos además el módulo de corte, para ellos es necesario registrar las deformaciones de las 2 diagonales; como en el ensayo de compresión axial serán los LVDT's quienes registren estas deformaciones. La carga a aplicar será monotónica creciente y tendrá una velocidad de 1 ton/min.

d) Cálculos

Para la determinación del esfuerzo de corte ($v'm$) usaremos:

$$v'm = \frac{P}{L_t \sqrt{2}}, \quad v'm = (1 - C.V.) \bar{v}m$$

donde:

P, es la carga de compresión en la dirección diagonal

L, lado del murete

t, espesor del murete

El módulo de corte (G) se obtendrá calculando la pendiente de la recta secante que une los puntos correspondientes al 15% y 50% de la carga de rotura, entonces:

$$G = \frac{(\Delta P) L_0}{(\Delta H + \Delta V) L_t \sqrt{2}}$$

donde:

ΔP = 0.5 Prot. – 0.15 Prot.
 L_0 = distancia entre bases de los LVDT's
 $\Delta H, \Delta V$ son las diferencias correspondientes a las deformaciones entre el 15% y 50% de la carga de rotura, medidas por los LVDT's horizontal y vertical, respectivamente.

4. ENSAYOS DE CARGA LATERAL CÍCLICA EN MUROS A ESCALA NATURAL

a) Objetivo

De lo anotado anteriormente en cuanto a la manera como actualmente se edifican las viviendas que utilizan el sillar como unidad de albañilería, se deduce que se hace necesario estudiar la capacidad estructural de estos muros (especialmente el comportamiento sísmico) mediante el ensayo ante cargas alternadas de muros rodeados por marcos de concreto. En este caso, el refuerzo es particularmente importante en cuanto a que el confinamiento que proporcionan las columnas de concreto a los muros, mejoran en forma definitiva su ductilidad y capacidad de resistir repeticiones de carga sin deteriorarse.

Ensayaremos 2 muros de 2.40 x 2.40 m cada uno, sujetos a una carga horizontal aplicada cíclicamente en lo alto. El objetivo de los ensayos es el establecer diferencias en rigidez, forma de falla, cartas últimas y comportamiento inelástico entre los dos diferentes morteros que se utilizarán.

Debemos tener en cuenta que al considerar el muro en voladizo sujeto a una carga lateral en su extremo superior, estamos idealizando un muro que se encuentra limitado únicamente por el sistema de piso despreciando la restricción al giro que éste le proporcione.

El comportamiento de este tipo de muros ha sido ampliamente estudiado en la Pontificia Universidad Católica del Perú, por R. Meli en México y en la Universidad Católica de Chile y se ha comprobado que los esfuerzos críticos son los esfuerzos de tensión que se presentan en dirección normal a la diagonal cargada y los esfuerzos tangenciales horizontales que existen en las caras de contacto entre el mortero y las piezas, estos dos tipos de esfuerzos pueden provocar la falla a través de una grieta que atraviesa diagonalmente al muro (si la capacidad de flexión supera a la de corte).

Cuando las fuerzas laterales causen en el muro momentos flexionantes importantes, puede ocurrir también una falla por flexo-compresión en la base del muro, la resistencia a flexo-compresión se debe al trabajo conjunto de la mampostería y columnas de confinamiento.

También es importante, una vez definido cuales son las propiedades mecánicas básicas en el comportamiento de la mampostería con sillar ante

distintas solicitudes, el verificar el cumplimiento de propiedades que se relacionan por medio de fórmulas empíricas con la resistencia de los elementos estructurales. Investigadores como R. Meli en México, A. San Bartolomé en Perú han propuesto algunas ecuaciones empíricas para predecir la resistencia, sin embargo para verificar el cumplimiento de estas ecuaciones es necesario conocer con mas detalle el mecanismo de falla y las propiedades que influyen en la resistencia de la mampostería con sillar ante estos tipos de esfuerzos, tensiones diagonales y esfuerzos tangenciales en las juntas.

b) Especímenes

Una de las principales características de nuestros muros será el refuerzo vertical ($4 \phi 3/8"$), definido teniendo en cuenta que en los Pueblos Jóvenes de Arequipa se viene utilizando esta armadura. Además, si realizamos el cálculo de la fuerza sísmica para una vivienda de un piso:

$$H = \frac{ZUSCP}{R_d}$$

$$Z = U = S = 1.0$$

$$C = 0.4$$

$$R_d = 2.5$$

Considerando un área tributaria de 4×4.4 m, y una carga distribuida de 0.8 ton/m², obtenemos : $H = 2.25$ ton

Remitiéndonos a nuestro reglamento (ref.27), para una fuerza cortante $H = V = 2.5$ ton, el área de la armadura longitudinal del elemento de refuerzo vertical se calcula con :

$$As(V) = \frac{1.4V}{fy} \left(\frac{H}{L} \right)$$

$$H/L \approx 1$$

$$fy = 4200 \text{ kg/cm}^2$$

$$As = 0.83 \text{ cm}^2$$

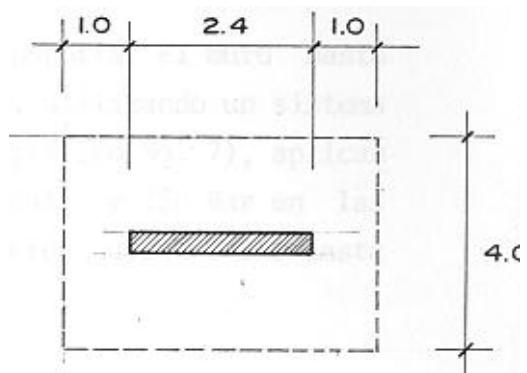
pero el área mínima es:

$$As(V) = 0.1(f'c/fy) Ac$$

$$Ac = 15 \times 25 \text{ cm}$$

$$f'c = 170 \text{ kg/cm}^2$$

$$As \text{ min} = 1.52 \text{ cm}^2, \text{ es decir } 3 \phi \frac{3}{8}"$$



Entonces se justifica la armadura asumida. Para el diseño de la viga de cimentación y la viga solera se consideró que éstos deberían ser fuertemente reforzados para evitar su falla durante el ensayo cíclico. En el gráfico N° 11^a mostramos los detalles de refuerzo. Otra característica importante será el edentado de la unión muro columna, esto en razón de que así se acostumbra en nuestro medio y además para aminorar la posibilidad de un desprendimiento entre columna y muro, debido a que la alta succión del sillar evitaría una buena pega entre el bloque y el concreto, distorsionando nuestras mediciones. Las dimensiones del muro han sido asumidas en base a razones de simetría (composición de las hiladas) y compatibilidad con el dispositivo de ensayo (gráfico N° 11).

Para el asentado de los bloques de sillar se seguirá el mismo proceso que para la construcción de las pilas y muretes, es decir se tratará de definir un ciclo de trabajo, teniendo en cuenta el tiempo de sumergido de los bloques, etc.

Cabe resaltar que la viga de cimentación de nuestros muros tienen dos propósitos: el transporte de los muros y el de fijación a la losa de ensayos. En el diseño de la viga se han considerado dos perforaciones, éstas servirán para colocar los pasadores de los cuales se sujetarán las fajas del puente grúa, durante el transporte de los mismos.

c) Descripción del Ensayo

Después de transportar el muro hasta la losa de ensayos, lo fijaremos a ésta, utilizando un sistema de gatas horizontales y verticales (ver gráfico N° 7), aplicando 350 Bar de presión en las gatas verticales y 250 Bar en las gatas horizontales (alternando la aplicación cada 50 Bar hasta llegar al límite).

La aplicación de la carga horizontal en lo alto del muro se realizará mediante el Actuador MTS (50 ton de capacidad y ± 150 mm de amplitud en el desplazamiento), al cabezal de éste se empernarán dos tirantes y perfiles que harán posible la transmisión de los desplazamientos aplicados por el actuador y controlados por el operador.

Se ha fijado la aplicación de 9 fases de desplazamiento lateral, tomado como tope), cada fase se comportará de 3 ciclos de carga y descarga excepto la primera fase, un ciclo en el rango elástico y la segunda de dos ciclos.

Se pintarán sobre el muro las grietas asociadas a cada fase y se tomarán fotos al término de ella. Asimismo, se medirá el tamaño de grieta con un Vernier al tercer ciclo de cada fase.

La velocidad del ensayo será 1 ciclo / 4 minutos.

Los desplazamientos en cada fase son:

FASE	1	2	3	4	5	6	7	8	9
DESPLAZAMIENTO (m.m.)	0.5	1.0	2.0	4.0	7.0	10.0	13.0	16.0	20.0

Como es lógico registraremos los valores de las cargas aplicadas y desplazamientos de diversos puntos (12), por lo tanto necesitaremos de 13 canales de control; el actuador posee su propia celda de carga y las 12 deformaciones o desplazamientos las mediremos por medio de LVDT's conectados a 2 amplificadores (6 canales cada uno), estos datos serán grabados automáticamente cada dos segundo en diskettes del microcomputador HP 9825 B.

La distribución de los LVDT's la apreciamos en el gráfico N° 12 y en las siguientes tablas presentamos el tipo de LVDT y su calibración, así también la función que cumple cada uno de ellos.

L V D T	TIPO (m.m.)	CALIBRACIÓN
2	50	5 m.m. = 1 volt.
3	50	5 m.m. = 1 volt.
4	20	2 m.m. = 1 volt.
5	20	2 m.m. = 1 volt.
6	50	5 m.m. = 1 volt.
7	50	5 m.m. = 1 volt.
8	50	5 m.m. = 1 volt.
9	50	5 m.m. = 1 volt.
10	50	2 m.m. = 1 volt.
11	50	2 m.m. = 1 volt.
12	20	2 m.m. = 1 volt.
13	20	2 m.m. = 1 volt.

<u>CANAL</u>	<u>FUNCIÓN</u> :
1	Carga Lateral (ton)
2	Desplazamiento horizontal (mm), usado también para controlar el ensayo
3	Desplazamiento horizontal de la zona de col. (mm)
4	Deformación en zona alta del refuerzo vertical (mm)
5	Deformación en zona baja del refuerzo vertical (mm)
6	Deformación total del refuerzo vertical de columna izquierda (mm)
7	Deformación total del refuerzo vertical de columna derecha (mm)
8	Desplazamiento horizontal del centro de la columna izquierda (mm)
9	Desplazamiento horizontal del centro de la columna derecha (mm)
10	Desplazamiento horizontal de zona inf. de la col. izquierda (mm)
11	Desplazamiento horizontal de zona inf. de la col. derecha (mm)
12	Deformación de la diagonal izquierda (mm)
13	Deformación de la diagonal derecha (mm)

Los objetivos de cada instrumento de medición serán:

Los canales 1 y 2 nos proporcionarán información acerca de la rigidez lateral, carga de fisuración y agrietamiento diagonal, sí como el comportamiento inelástico. El canal 3, nos permitirá observar si hay deslizamiento de la solera (en relación al registro del canal 2) lo que induciría a que el fierro vertical se doble.

Los canales 4, 5 y 6 nos permitirán estudiar en mejor forma a una de las columnas de confinamiento, especialmente al comportamiento del refuerzo vertical.

Los canales 6, 7, 8, 9, 10 y 11 permitirán la configuración deformada del muro luego de su agrietamiento, lo que a su vez permitirá decidir un mejor reforzamiento que evite fallas indeseables en futuras pruebas.

Los canales 12 y 13 permitirán obtener el módulo de corte en el rango elástico.

d) Construcción

Los muros serán construidos a un ritmo de $\frac{1}{2}$ altura por día, dejándose libre la junta vertical de la última hilada en el primer día de trabajo. El tratamiento de la

unidad se definirá luego del ensayo de succión y los muretes a utilizar serán los ya mencionados para el ensayo de compresión diagonal.

En lo que respecta a la mano de obra, para la construcción de la albañilería en la totalidad de los especímenes se empleará un solo albañil y un ayudante. La construcción de los muros se llevará a cabo siguiendo las exigencias de nuestras normas (ref. 28).

Para la preparación del mortero se utilizará: arena gruesa que se aproxime a la granulometría ASTM C-144, Cemento Portland Tipo I, Cal Hidratada normalizada. La dosificación del mortero siempre se realizará en volumen, la cantidad de agua será definida por el albañil de tal forma de lograr una mezcla trabajable, pastosa y sin segregación de los constituyentes.

Todos los especímenes se elaborarán en un lugar bajo techo donde se almacenarán sin otro tratamiento.

El concreto a utilizar será preparado en mezcladora y vibradora durante el vaciado. Para la viga de cimentación utilizaremos concreto en proporción volumétrica 1:1:3 (utilizado en la práctica para obtener $f'_c \approx 210 \text{ kg/cm}^2$) y para el marco de confinamiento utilizaremos proporciones de 1:2:3.5 ($f'_c \approx 175 \text{ kg/cm}^2$ ésta es la proporción utilizada en Arequipa), proporciones volumétricas de cemento; arena y piedra de $\frac{1}{2}$ ", respectivamente.

5. ENSAYOS DE CONTROL DE MATERIALES

En este punto nos referimos solamente a los ensayos de los morteros, refuerzos y concreto.

a) Morteros

La propiedad más comúnmente empleada para caracterizar la calidad del mortero es la resistencia a la compresión en cubos estándar, tomaremos 4 muestras como mínimo para cada mortero utilizando en la construcción de los muros y los ensayaremos a los 28 días según las normas ASTM C-91.

b) Refuerzos

En vista que utilizaremos un solo tipo de refuerzo longitudinal en las columnas ($\phi 3/8"$ corrugado) ensayaremos tracción en estos elementos y determinaremos el esfuerzo de fluencia y el esfuerzo máximo en 4 muestras, según normas ASTM A370.

c) Concreto

Se tomarán 3 muestras por cada etapa de vaciado en cada muro (viga de cimentación, columnas y viga solera). Las probetas cilíndricas se ensayarán a los 28 días.

En el concreto se realizará la prueba del slump con el Cono de Abrams. (ASTM C-143). Cabe mencionar que el curado de los elementos de concreto se llevará a cabo según ASTM C-31.

d) Arena.- Se realizará el análisis granulométrico de la arena utilizada para la totalidad de los ensayos, el tamaño máximo del agregado deberá pasar por la malla N° 4 y la granulometría aproximarse en lo posible a los límites fijados en la siguiente tabla: (norma ASTM C-144).

GRANULOMETRÍA PARA ARENA
NORMA ASTM C-144

Malla	Porcentaje que pasa
3/8	100
4	100
8	95 – 100
16	60 – 100
30	40 – 75
50	20 – 40
100	10 – 25
200	0 - 10

6. CRONOGRAMA GENERAL

CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES PARA CONSTRUCCIÓN DE MUROS

ACTIVIDAD	DIAS										
	1	2	3	5	6	7	8	9	10	12	15
Colocación del refuerzo de las vigas de cimentación	MS 1 MS2										
Encofrado de vigas de cimentación	MS 1 MS2										
Concreto de vigas de cimentación ($f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$)	MS 1 MS 2										
1º Jornada de asentado de bloques		MS 1 MS 2									
2º Jornada de asentado de bloques			MS 1 MS 2								
Estrulado de columnas				MS 1 MS 2							
Encofrado de columnas					MS 1	MS 2					
Concreto de columnas ($f'c = 175 \text{ kg/cm}^2$)					MS 1	MS 2					
Colocación del refuerzo de vigas soleras							MS 1	MS 2			
Encofrado de vigas soleras									MS 1	MS 2	
Concreto de vigas soleras ($f'c = 175 \text{ kg/cm}^2$)									MS 1	MS 2	

TABLA N ° 4

CRONOGRAMA DE LA CONSTRUCCIÓN Y ENSAYOS DE ESPECÍMENES

ACTIVIDAD	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SETBRE	OCTUBRE
ENSAYO DE SUCCIÓN	<u>2d</u>						
ENSAYO DE CORTE DIRECTO	2d	---	<u>2d</u>				
ENSAYO DE COMP. AXIAL		3 d	-----	1 d	<u>2 d</u>			
ENSAYO DE COMP. DIAGONAL		4 d	-----	2 d	<u>2 d</u>			
ENSAYO DE CORTE EN MUROS					4 d	-----	11 d	<u>4 d*</u>

* Incluye 2 días para preparación de muros en el dispositivo

(.....) Significa tallado o preparación de bloques de sillar

(----) Construcción de pilas, muretes o muros

(—) Ensayo de las pilas, muretes o muros

7. GRÁFICOS

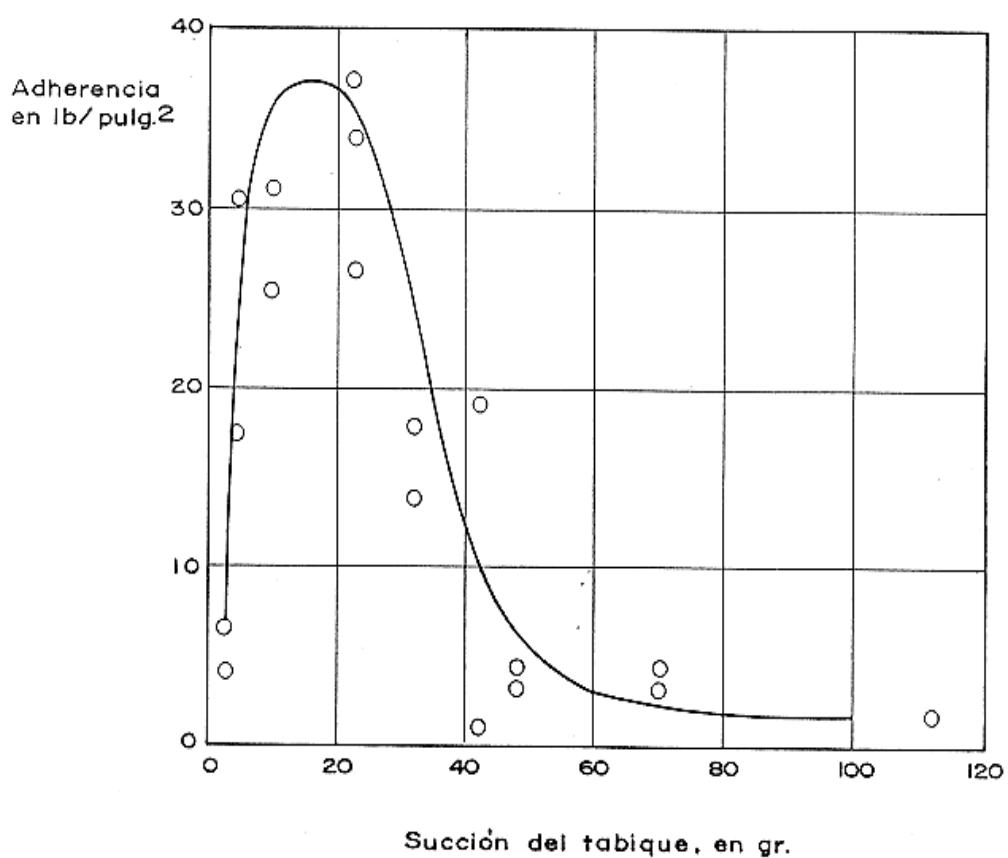
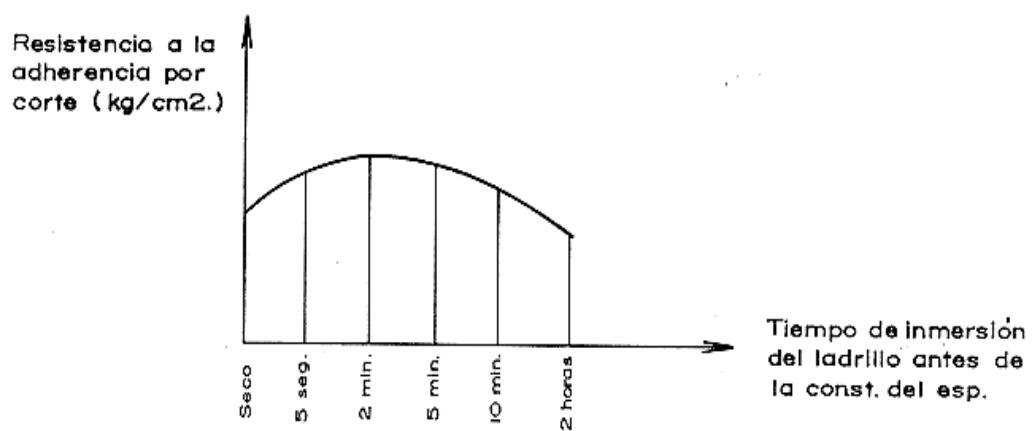
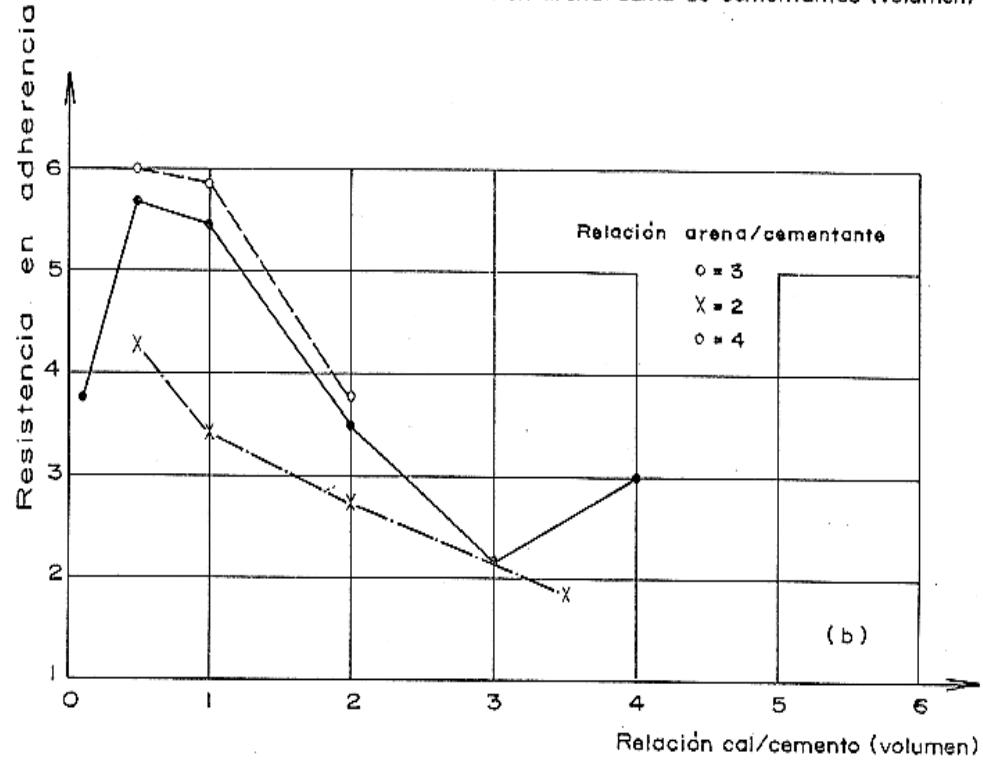
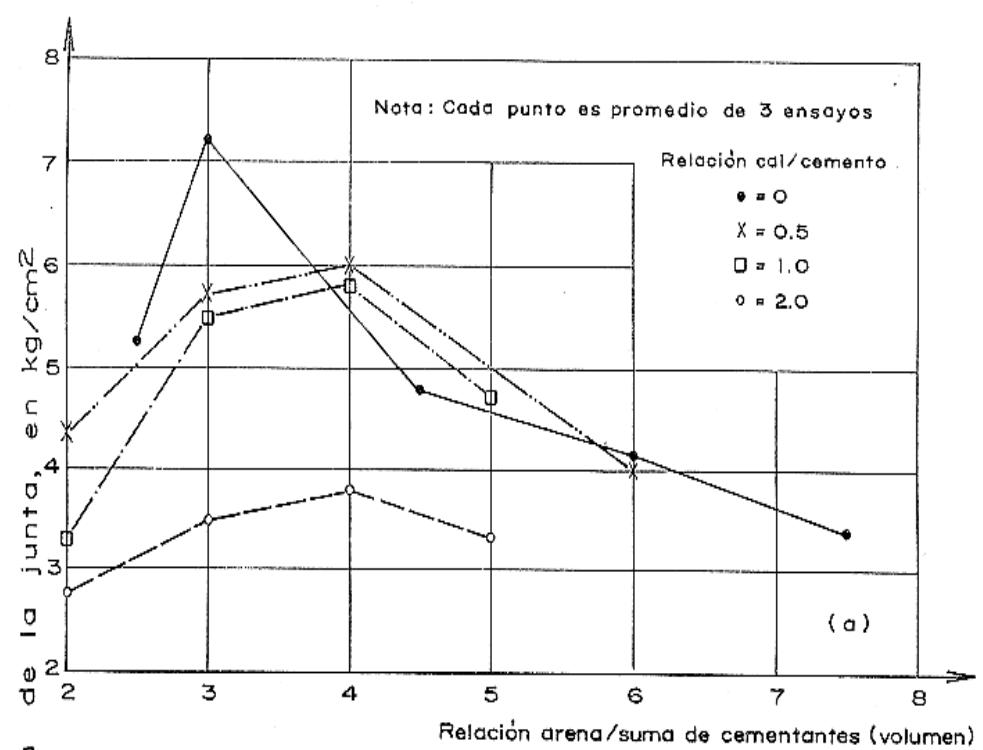
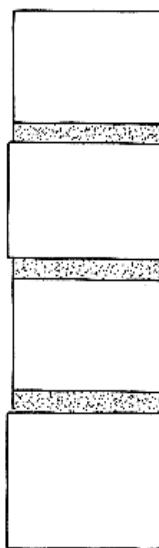
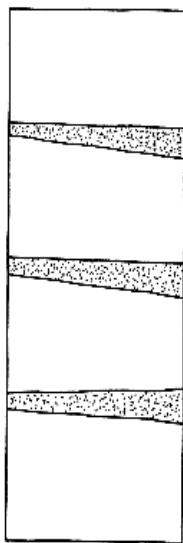


Fig. 1 Efecto de la Succión del tabique en la adherencia con el mortero (Ref. 15)

Fig. 2 Resistencia a la adherencia por corte variando el tiempo de inmersión del ladrillo (Ref. 25)

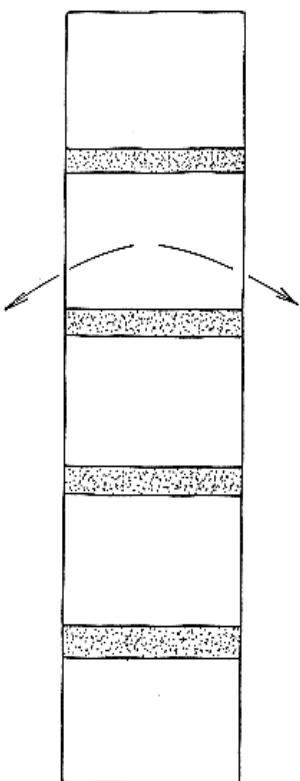




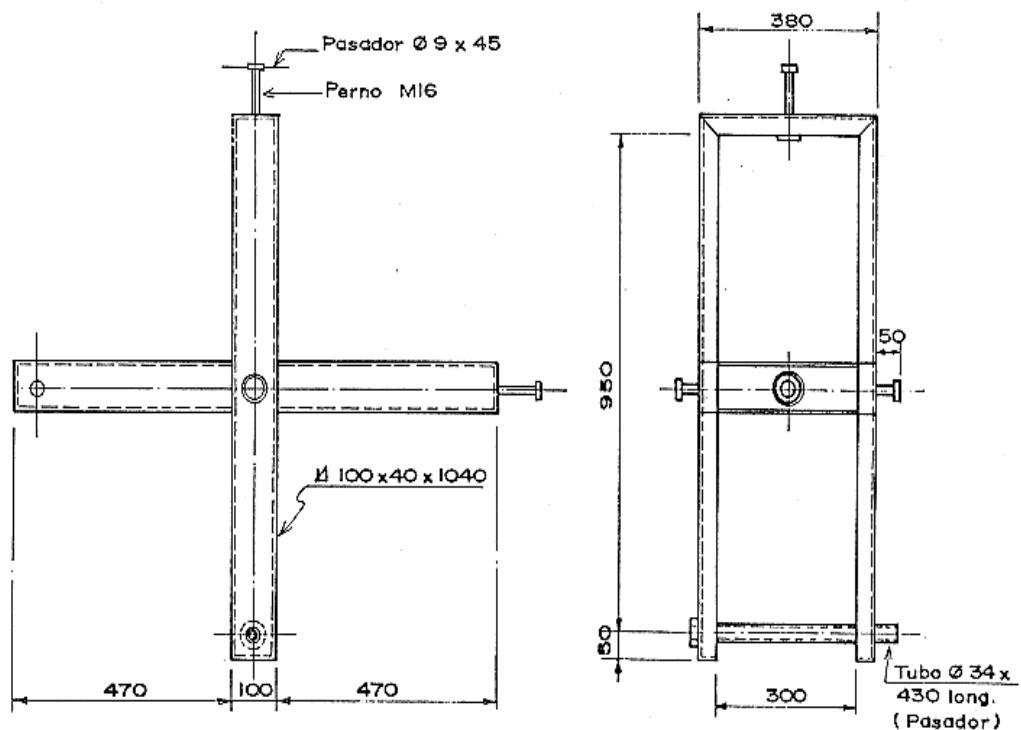
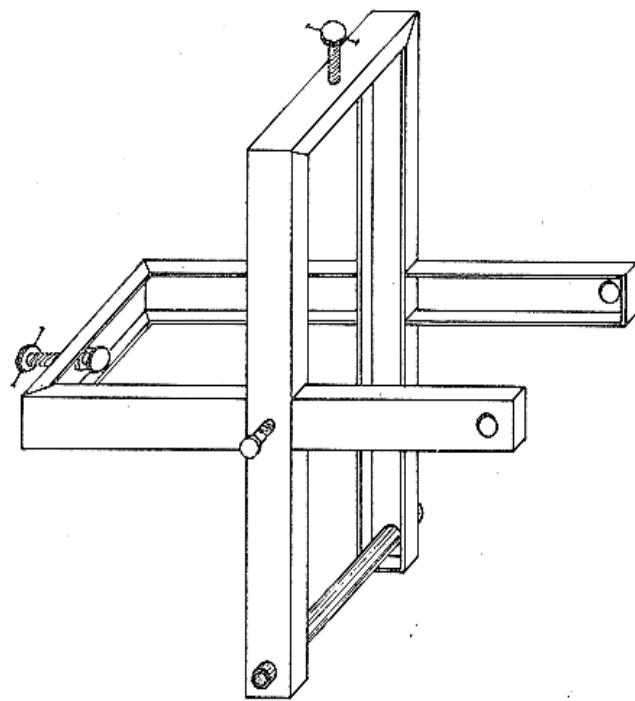


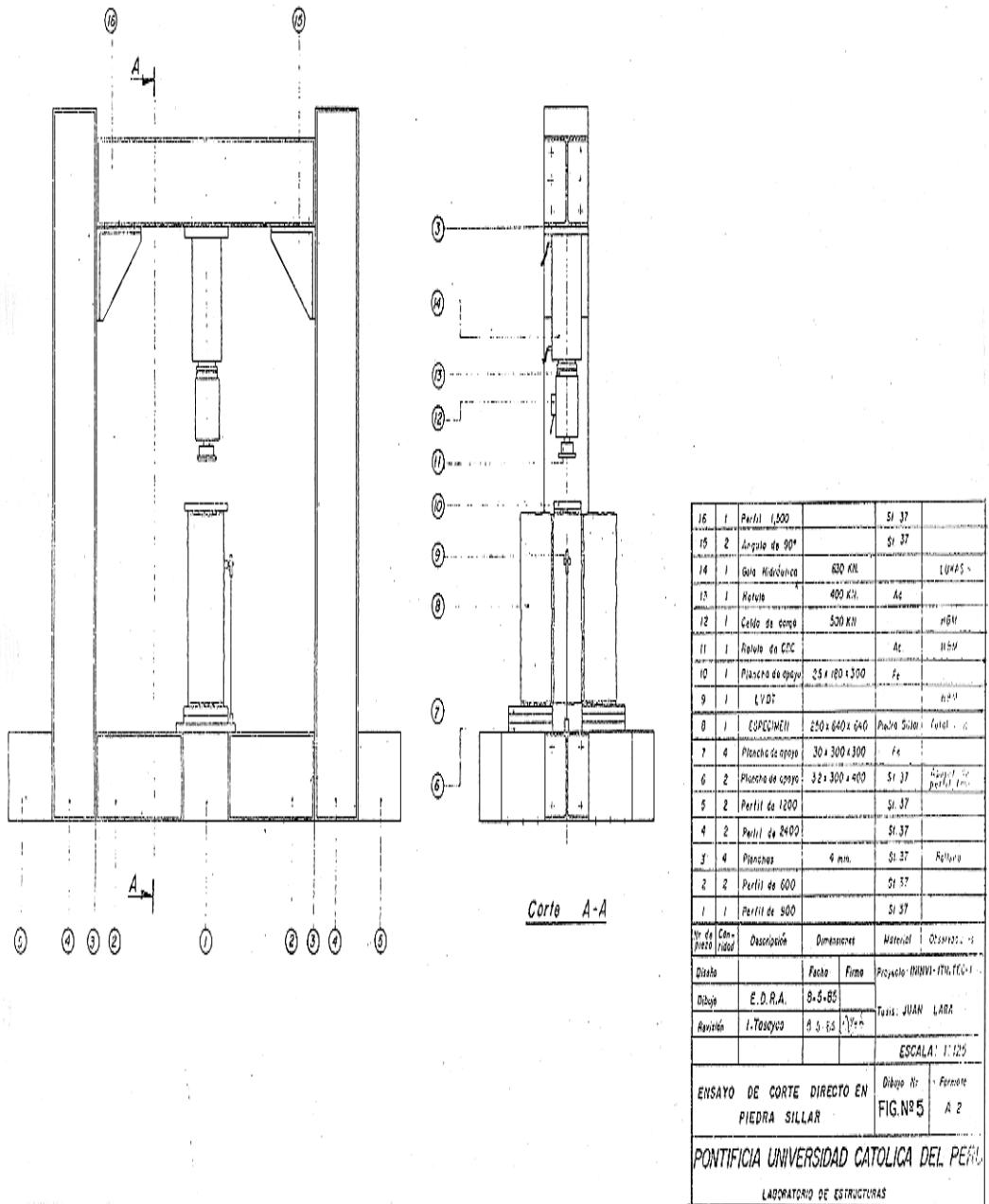
d) PIEZAS DE ESPESOR IRREGULAR.
AUMENTAN LOS ESFUERZOS DEL LADO EN
QUE LA JUNTA ES MAS DELGADA. MAYORES
DEFORMACIONES Y EXCENTRICIDADES DE
LA CARGA.

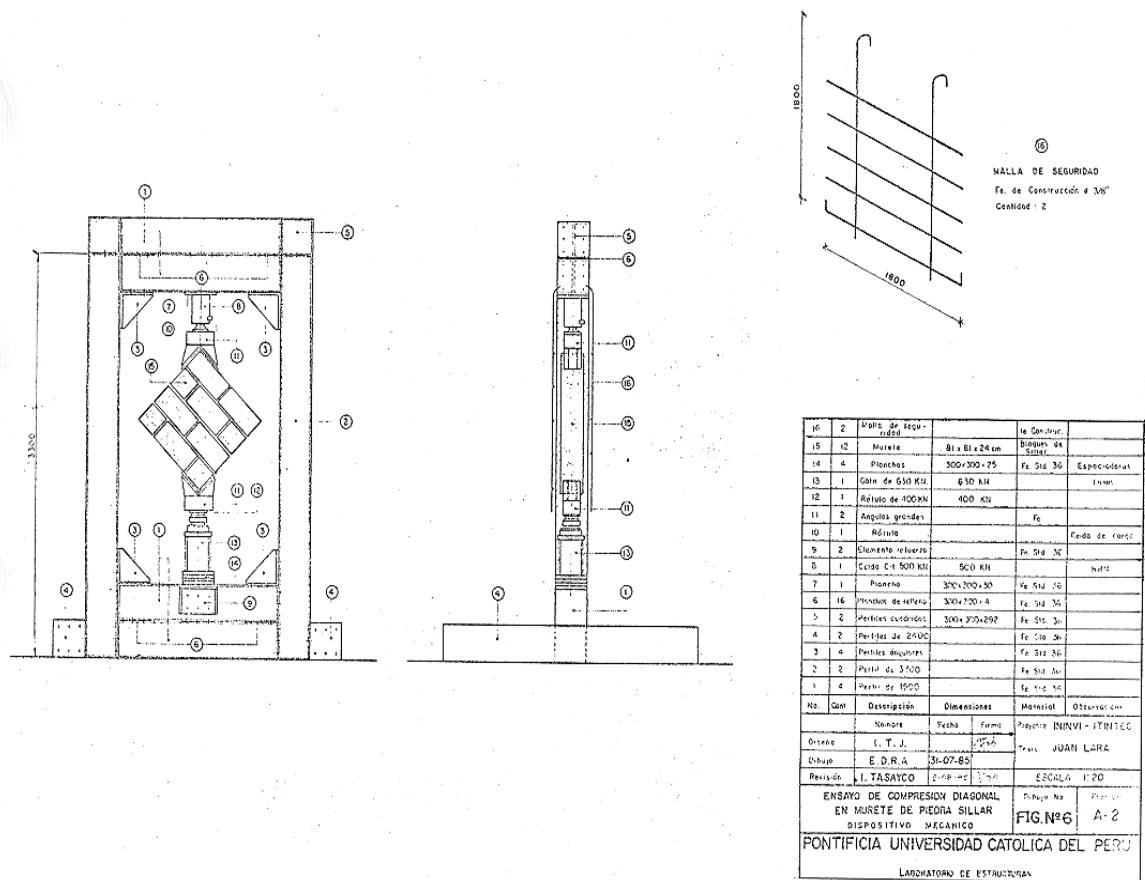
b) PIEZAS DE ANCHO IRREGULAR.
EXCENTRICIDAD ENTRE LA CARGA
APLICADA Y LA RESULTANTE INTE-
RIOR.

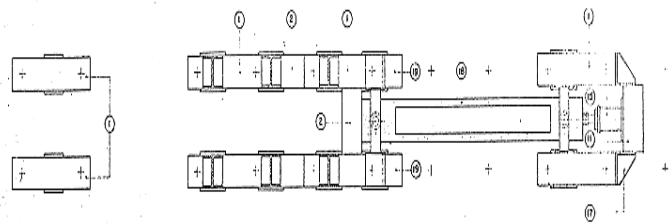


c) AL CONSTRUIR UN MURO DELgado LA PARTE SUPE-
rior se MUEVE HACIA ADELANTE Y ATRAS. SI LA
SUCCION DE AGUA es EXCESIVA EL MORTERO PIER-
DE PLASTICIDAD Y SE REDONDEA HACIA LOS EX-
TREMOS BAJA CARGA AXIAL EXISTE CONCEN-
TRACION DE ESFUERZOS EN EL CENTRO. BAJO CAR-
GA EXCENTRICA SE REDUCE MAYORMENTE LA CA-
PACIDAD.

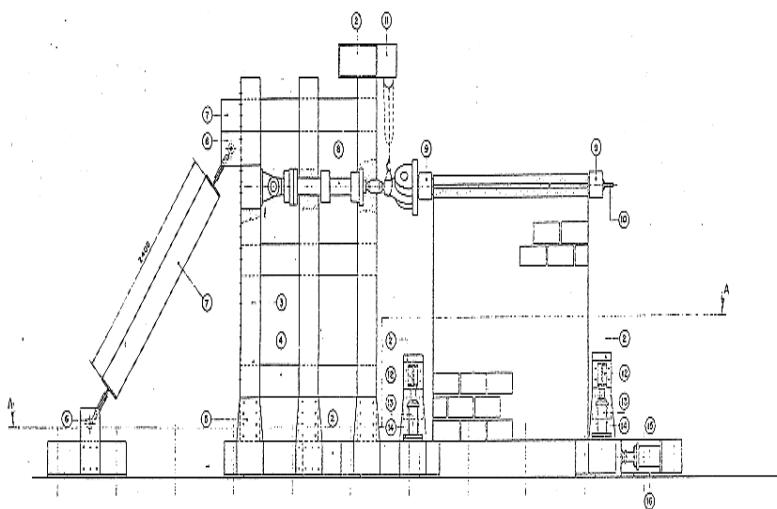








CORTE A-A



Ref.	Parte	Unidad	Unidad
1	Puerta de 300	—	—
2	Muro	300	—
3	Columnas de 30	30	—
4	Placa base	—	—
5	Llave a 550 lib	LHM 63/250	—
6	Placa	300 x 300 x 25	Tu.
7	Llave a 250 lib	LHM 25/100	—
8	Llave de 100 lib	Tu.	—
9	Muro de 300	30	—
10	Barras Tijera	Al.	—
11	Placa de madera	Tu.	—
12	Placa de madera	300 x 300	673
13	Placa JACO 5	51.87	—
14	Placa de 200	—	—
15	Placa 300	51.52	—
16	Placa de 200	—	—
17	Placa de 300	—	—
18	Placa de 300	—	—
19	Placa de 100	51.52	—

Obs.: Dimensiones y Valores estimados

Numeros: Fondo / Fondo Proyecto UNINV-ITATEC

Scal.: 1:10

Draft: 17/09/03 Dibujo: JUAN LARA

Revisor: 11/09/03 Escala: 1:20

ENCASO DE MURO CON CARGA LATERAL - PIEDRA SILLAR FIG N°7 A-I

DISPOSITIVO VELANCO

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU

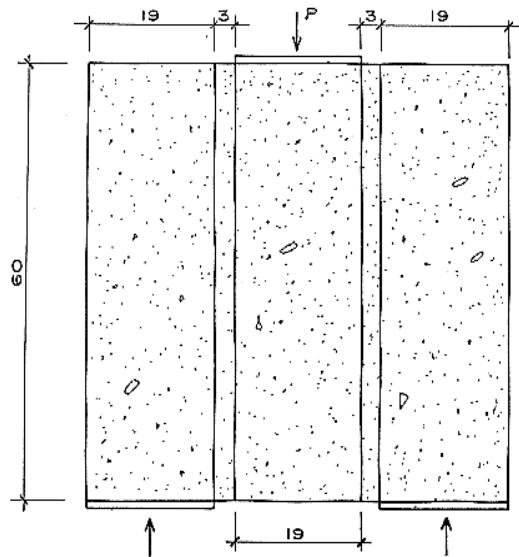
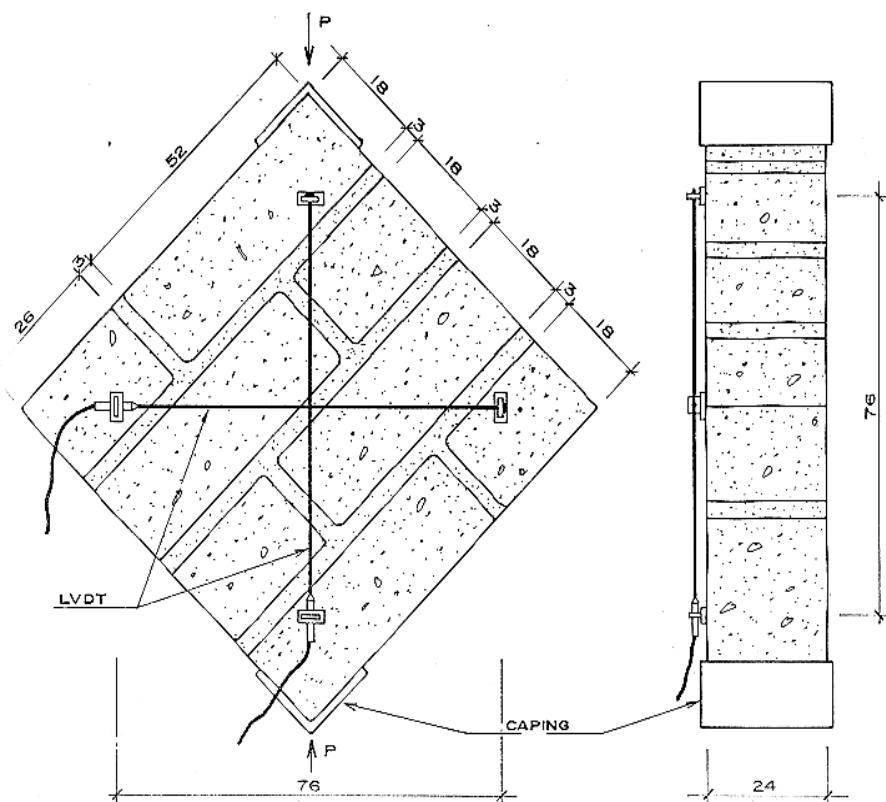
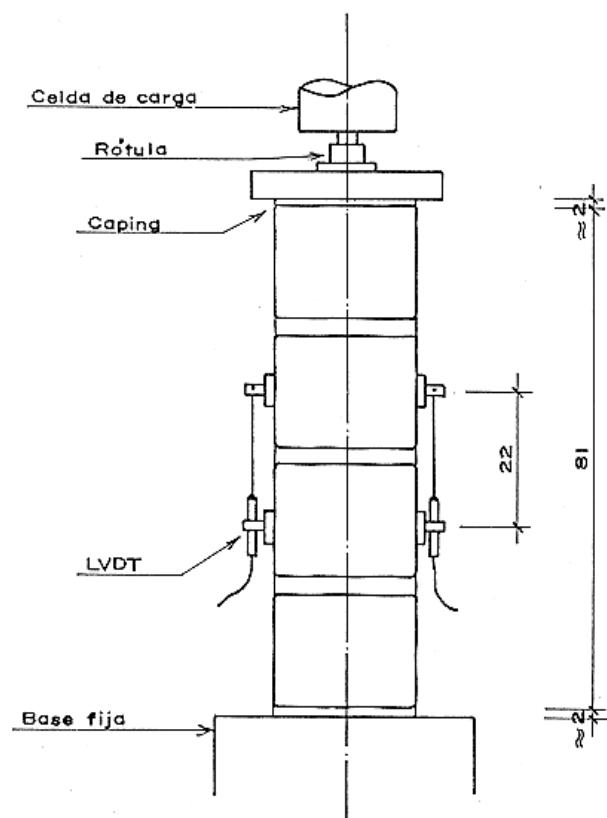
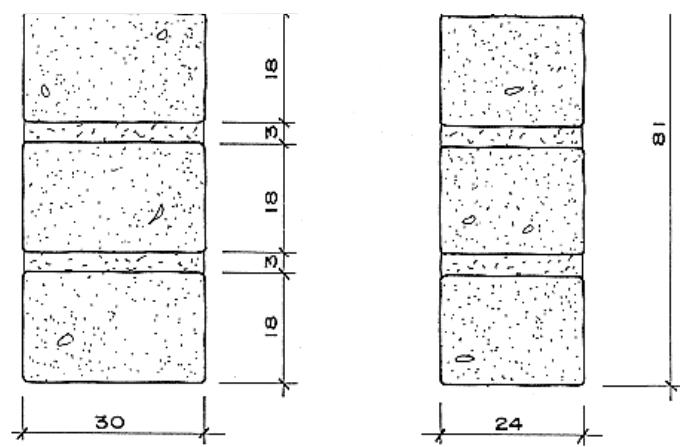


Fig. 8 Ensayo de corte directo
(sin confinamiento)

escala: 1:75





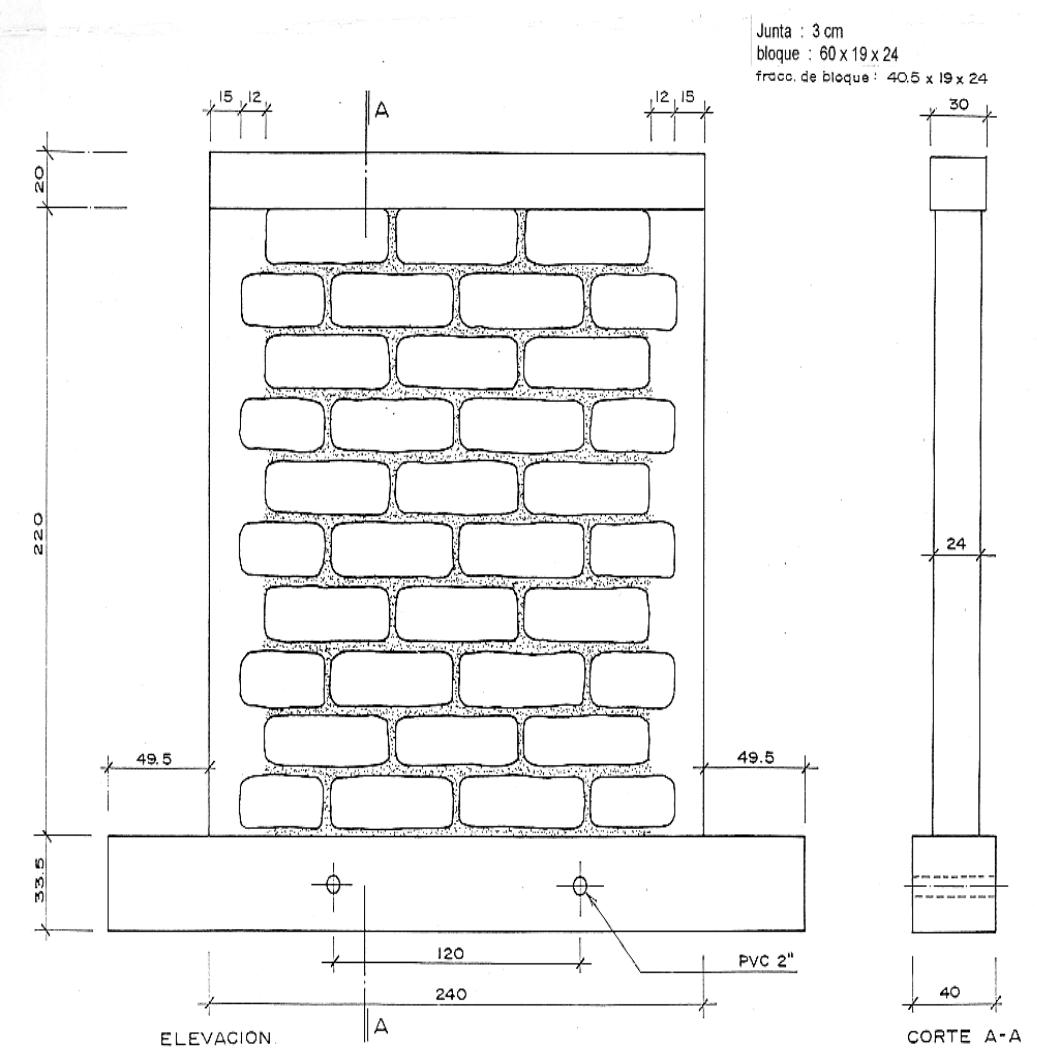
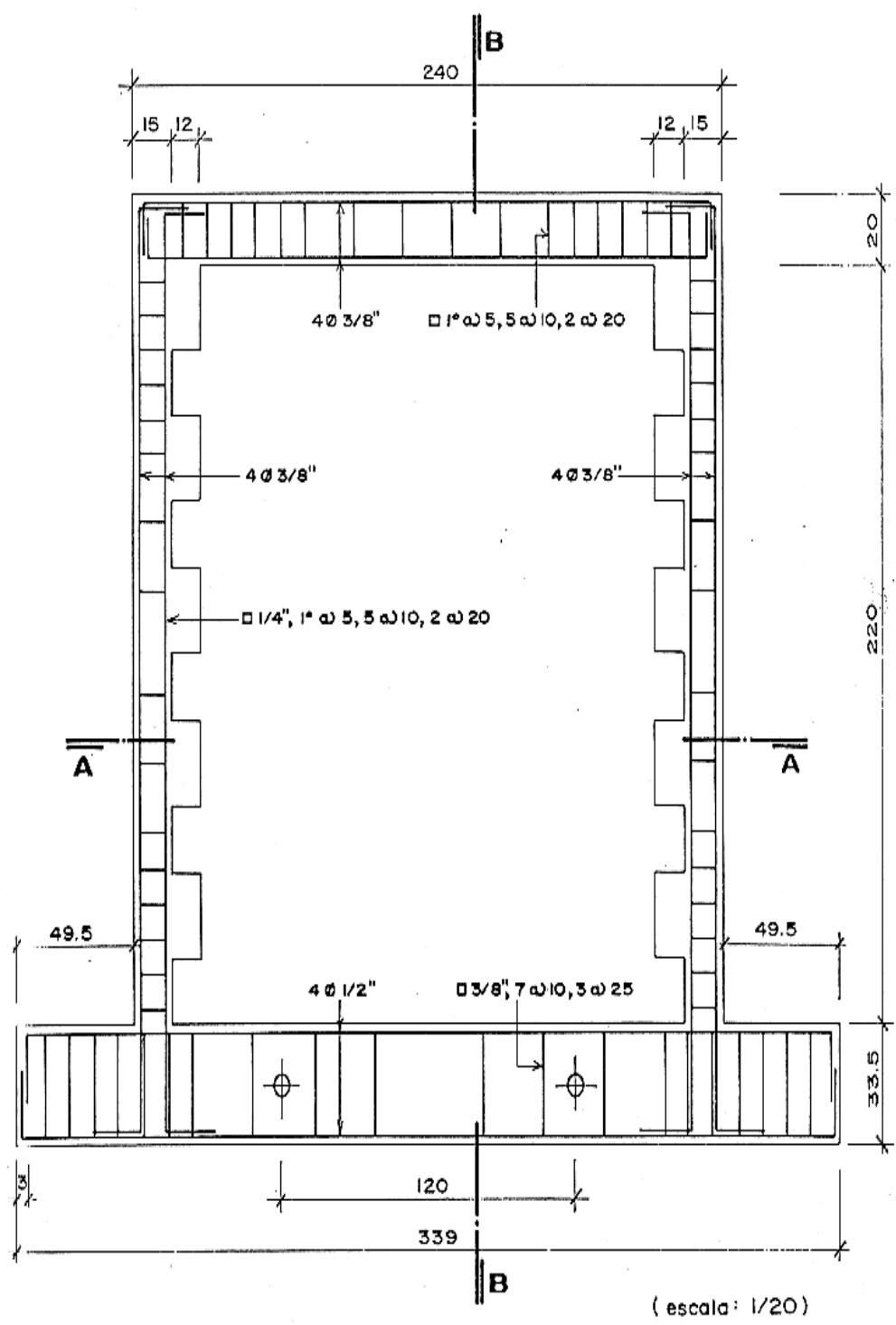
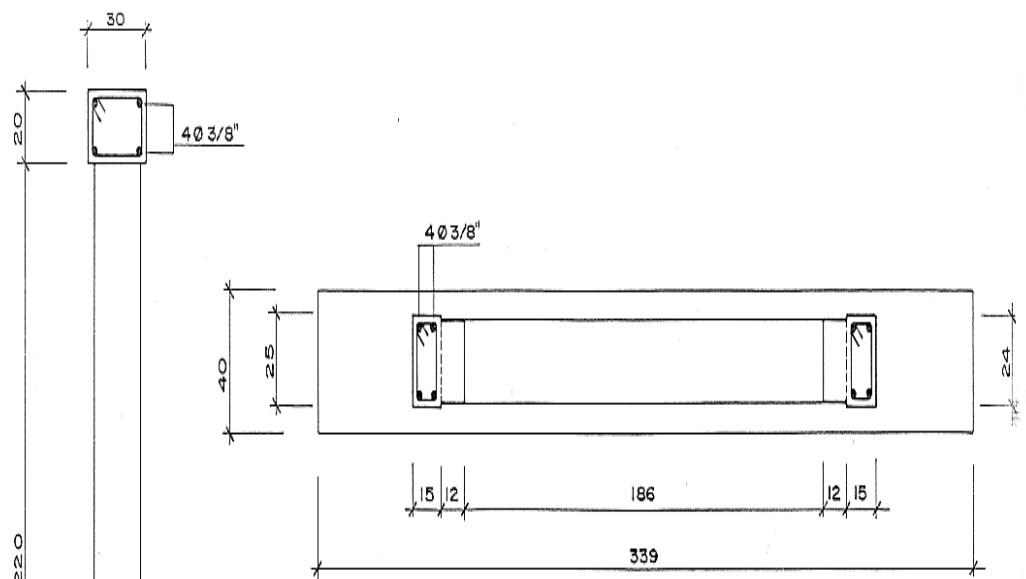


Fig. II Características de los muros (escala: 1/20)





CORTE A-A (escala: 1/20)

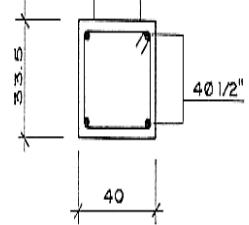


Fig. 11a

Detalles del ref. de muros

CORTE B-B

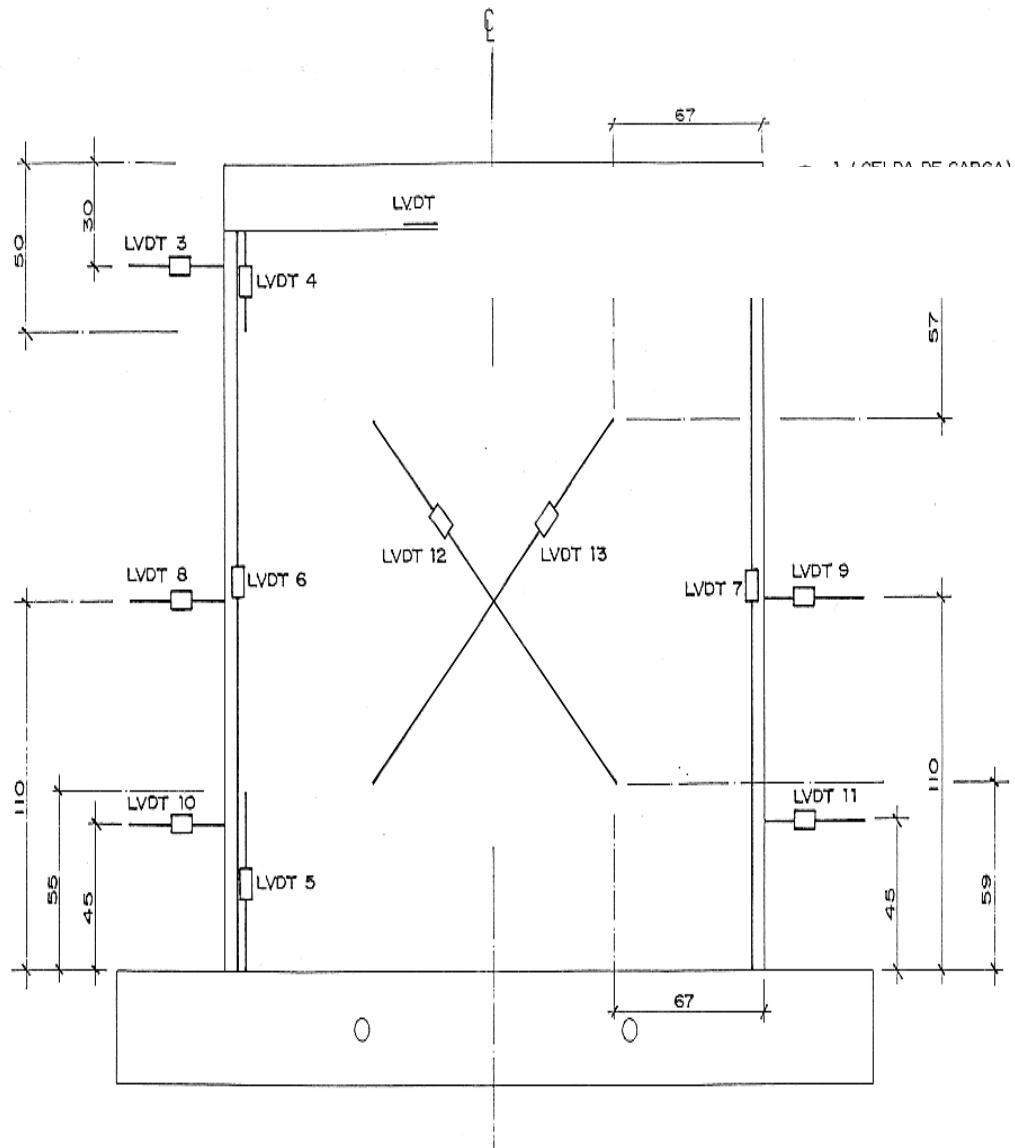


Fig. 12 Ubicación de instrumentos de medición (LVDT)

V. ENSAYOS DE CONTROL DE MATERIALES: Resultados

a) Morteros

Las muestras fueron tomadas durante la fabricación de los especímenes para los ensayos de compresión axial, compresión diagonal y corte en muros a escala natural. Los resultados corresponden al promedio de 16 muestras para cada mortero sin cal y de 8 para los morteros con cal, todos ensayados a los 28 días. Las proporciones están dadas en volumen.

TABLA N° 5: ENSAYO A COMPRESIÓN EN MORTEROS

Mortero Cemento:Cal:Arena	Resistencia a la Compresión (kg/cm ²)	Slump
1 : 0 : 5	95.3	7.9 "
1 : 0 : 8	37.5	6.7 "
1 : 1 : 5	58. 5 *	--

(*) Resultado bastante por debajo de lo normal

b) Refuerzo Vertical

Se realizó el ensayo a tracción del refuerzo vertical utilizado en el marco de confinamiento de los muros. Los resultados son promedio de 4 muestras.

TABLA N° 6: ENSAYO A TRACCIÓN DEL REFUERZO VERTICAL

Refuerzo	f _y (kg/cm ²)	f máx. (kg/cm ²)
ϕ 3/8"	4155	6350

c) Concreto

Se tomaron muestras del concreto utilizado en las vigas de cimentación (6) y los marcos de confinamiento (6 probetas por cada marco).

La dosificación se realizó en volumen para los concretos correspondientes a f'c = 175 y 210 kg/cm² para el marco y la viga de cimentación respectivamente.

TABLA N° 7 : RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO UTILIZADO

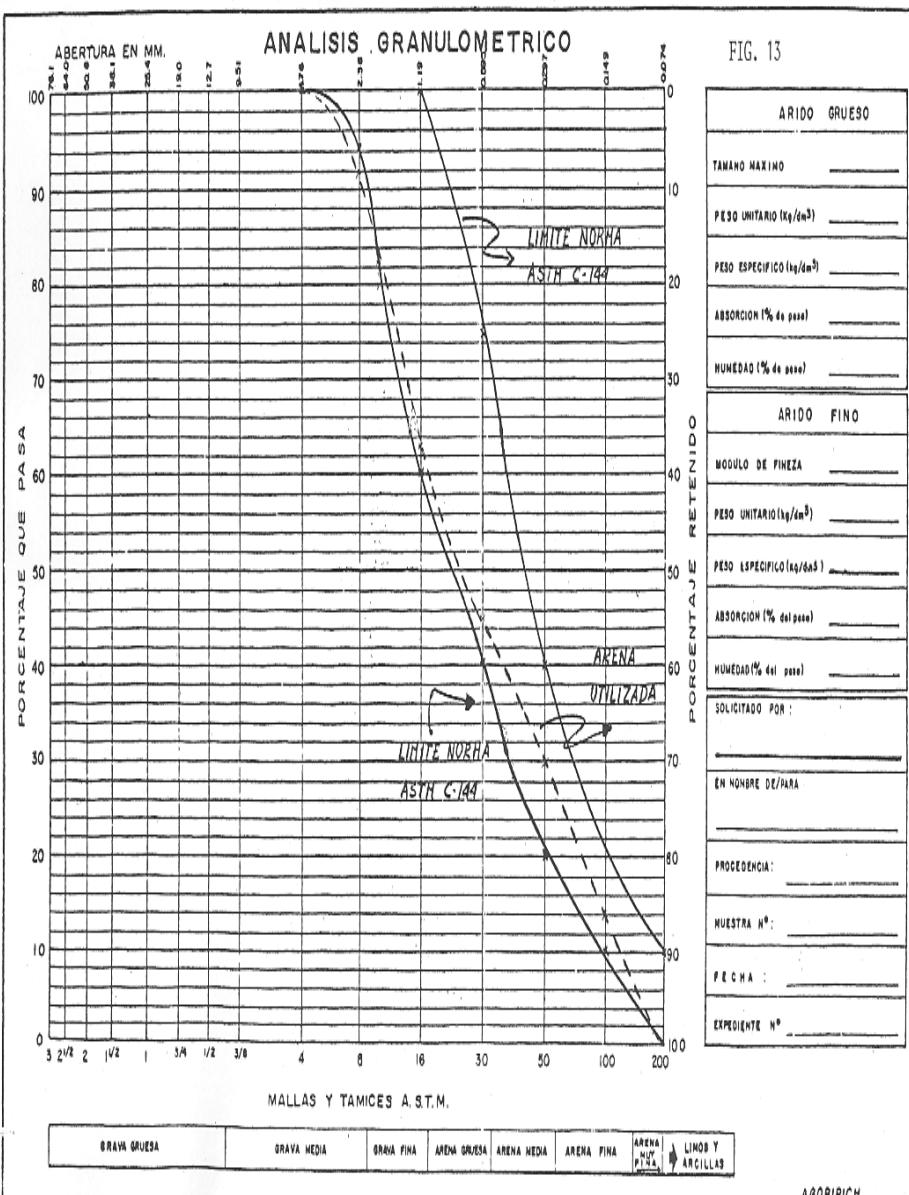
	Dosificación en volumen cemento:arena:piedra ½"	f'c (kg/cm ²)	Slump
Vigas de cimentación	1:1:3	240	3"
Marcos de confinamiento	1:2:3:5	170	3.5"

d) Arena

Se utilizó un solo tipo de arena durante la fabricación de la totalidad de especímenes, el análisis granulométrico realizado nos indica que nos encontramos aproximadamente entre los límites de la especificación ASTM C-144 (ver gráfico N° 13^a).

TABLA N° 7^a: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LA ARENA UTILIZADA

Malla N°	% que pasa	% que pasa (Norma ASTM C-144)
4	100	100
8	92	95 -100
16	62.6	60 - 100
30	45.3	40 - 75
50	30	20 - 40
100	13.8	10 - 25
200	0	0 - 10



VI. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS EN ELEMENTOS DE ALBAÑILERÍA

a) Ensayos de succión

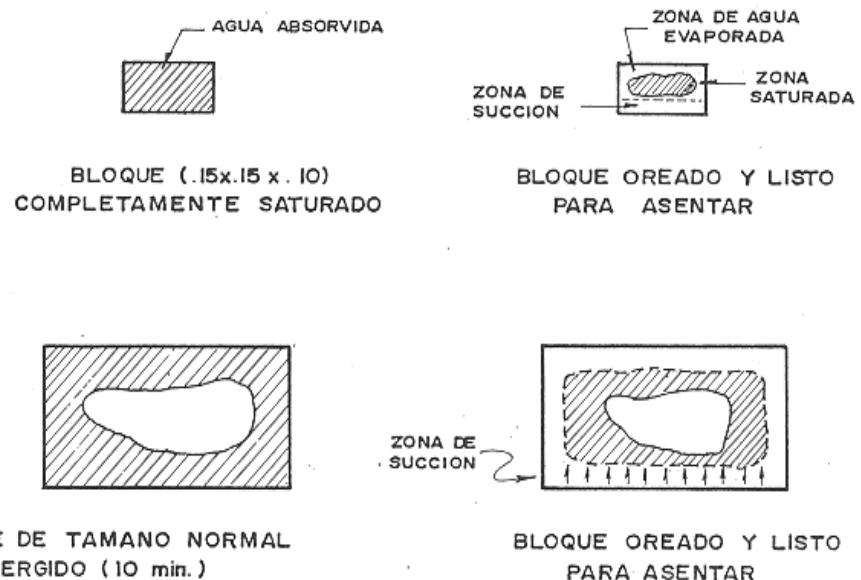
Los ensayos se realizaron en muestras pequeñas (aquí nos apartamos ligeramente de la norma, ésta determina que sea 1 ó ½ bloque) de 15 x 15 x 10 cm por lo fácil de maniobrarse, de ésta manera obtendríamos la succión natural del sillar y luego de un tratamiento previo (remojo o sumergido) la reducción de ésta.

En el Cuadro N° 8 resumimos los resultados de estos ensayos, observamos que la succión natural es de 72 gr/min. (referido a un área normalizada de 200 cm²), es lo que corresponde a un ladrillo artesanal, así mismo en esta tabla figuran valores de succión tratada, es decir remojando y sumergiendo la muestra, emulando lo que se hace con la unidad de arcilla cocida, pero no pudimos lograr la succión adecuada (10 ó 20 gr). Los gráficos N° 1 y 2 tomados de la Ref. 16 y 24 nos dan los márgenes adecuados de succión.

De otro lado, de acuerdo a experiencias anteriores realizadas en ININVI, se había tratado a los bloques con sumergidos de 3 hrs. antes del asentado y al parecer se llegó a buenos resultados; entonces se trató de verificar este procedimiento, fabricando especímenes para ensayarlos al corte (ver gráfico y tabla N° 9) siguiendo el proceso de la Ref. 25; este ensayo preliminar al programa original, nos daría una idea del tiempo de sumergido más adecuado, obviamente ello estaría representado en la mayor resistencia al corte que se obtenga. El tiempo más conveniente fluctuaba entre las 3 y 4 hrs. de sumergido previo al asentado pero el proceso no resulta práctico.

Recogiendo las experiencias del sistema constructivo que se practica en Arequipa (sólo mojan el bloque hasta observar que el agua penetre unos 5 cm), nuevamente realizamos ensayos de succión, pero en esta oportunidad en bloques de tamaño natural, en ellas variábamos el tiempo de sumergido y consideramos un tiempo de oreado (Cuadro N° 10).

Sumergiendo el bloque durante 10 min. y oreándolo de 1 a 2 minutos obtenemos una succión de 23 gr., valor cercano al rango recomendado. De las tablas citadas como resultado de nuestros ensayos, deducimos que es posible obtener una adecuada succión de 2 maneras, grafiquémoslas



Por lo tanto, adoptaremos éste último proceso para la construcción de todos los especímenes.

b) Ensayo de corte directo.- En la Tabla N° 11 hemos anotado los resultados de los esfuerzos cortantes experimentales y en el gráfico N° 13^a mostramos las fallas típicas que se observaron luego de los ensayos.

Recordemos que la variable de este ensayo fue el tipo de mortero, comentemos los resultados:

Llama poderosamente la atención la diferencia de resistencias experimentadas en los especímenes que contenían cal en su mortero con respecto de los que no la contenían. Acerca de la inclusión de cal en el mortero para albañilería con unidades conocidas, Gallegos & Casabonne, reportan un aumento en la resistencia al corte de albañilería del orden de 85% con respecto a morteros sin cal. Sin embargo, F. Bonhomne (Ref. 15) representa los efectos del proporcionamiento del mortero en la adherencia entre mortero y pieza, para diferentes relaciones de arena y cementantes (Gráfico N° 3), y en esta representación podemos apreciar que para el mortero con 5 proporciones de arena, la cal no produce mayor variación en la adherencia. Nuestras resistencias revelan valores menores que las de la citada gráfica, pero consideremos que son especímenes de diferentes características.

Relacionando nuestros resultados en lo que respecta a la cantidad de cementantes, vemos que la inclusión de la cal no mejoró la resistencia al corte:

$$\frac{\tau \text{ (mortero 1:1:8)}}{\tau \text{ (mortero 1:0:8)}} = \frac{1.67}{2.58} = 64.7\%$$

$$\frac{\tau \text{ (mortero 1:1:5)}}{\tau \text{ (mortero 1:0:5)}} = \frac{2.05}{3.10} = 66.1\%$$

De igual manera, si relacionamos entre sí las resistencias asociadas a los morteros con cal y sin cal:

$$\frac{\tau \text{ (mortero 1:0:8)}}{\tau \text{ (mortero 1:0:5)}} = \frac{2.58}{3.10} = 83.2\%$$

$$\frac{\tau \text{ (mortero 1:1:8)}}{\tau \text{ (mortero 1:1:5)}} = 81.5\%$$

Es decir que aumentando la proporción de cemento aumentamos la resistencia al corte en sólo 20%.

Tratando de buscar una justificación del mal comportamiento de los morteros con cal, podría ser ésta, la mala calidad del producto (Cal “Carella”, aunque según el departamento técnico de la compañía, esta cal contiene 79% de CaO), para salvar este posible error se recurrirá a una marca de mayor garantía para la construcción de 3 muretes adicionales a los contemplados en el programa de ensayos de compresión diagonal.

Revisando los resultados del Cuadro N° 11, observamos que algunos de los resultados tienen una gran variabilidad, al respecto R. Meli (Ref. 17) anota que cualquiera de los ensayos que miden la adherencia deriva en resultados extraordinariamente dispersos.

c) Ensayos de Compresión Axial

Se realizaron 2 ensayos preliminares (1 por cada tipo de mortero) para determinar la carga que nos daba la adecuada seguridad para los instrumentos de medición, ésta fue de 15 ton. (valor máximo para el cálculo del módulo de elasticidad), sólo hasta aquí graficamos.

Para la rotura de los especímenes fu necesario utilizar la Máquina Universal de 100 ton. de capacidad, la Máquina Universal MTS no tenía la capacidad suficiente(25 ton)

Los valores de la resistencia a la compresión axial ($f'm$) y los módulos de elasticidad experimentados son mostrado en las tablas N° 12 y 13. En el gráfico 15 presentamos algunas de las curvas que nos sirvieron para determinar los módulos de elasticidad.

Como estaba previsto sólo utilizamos 2 tipos de mortero: 1.5 Y 1:8, morteros sin cal; como se sabe la inclusión de cal no altera mayormente a la resistencia a la compresión.

Una explicación a la baja resistencia a la compresión experimentada podría ser el “efecto de junta” (Ref. 31), que en este caso se hace más notoria debido a la gran diferencia entre los módulos de elasticidad bloque-mortero (están en el orden de 55000 kg/cm^2 en el bloque y de 17000 kg/cm^2 en el mortero); así también la relación esfuerzo-deformación, que depende de la normalidad de las piezas y el mortero, relación muy sensible al tamaño de las juntas (3 cm). Los ensayo experimentales con otro tipo de unidades de albañilería muestran que no todas las piezas son igualmente sensibles al fenómeno de junta, lo cual equivale a que en algunos materiales la resistencia es más afectada por la presencia de esfuerzos transversales que en otros.

También ha influido en la resistencia la fabricación del espécimen, ya que es muy difícil construir un elemento perfectamente vertical y que tenga características uniformes en las distintas secciones transversales; esta es particularmente importante en nuestro caso, nuestras piezas son de características irregulares. Por esta razón, se introducen excentricidades accidentales que reducen la resistencia.

La falla característica en la mayoría de los ensayos fue un agrietamiento vertical producido por las deformaciones transversales que acompañan a la deformación longitudinal y que en las piezas pueden verse incrementadas por el efecto de junta.

Para el cálculo de $f'm$ se tomó la carga de rotura, ya que fue bastante difícil determinar la carga de primera fisura.

La mayoría de los investigadores coincide en aceptar que la relación $f'm/fb = 0.5$ a 0.7 (fb : resistencia a la compresión de la pieza), tomando $fb = 87.7 \text{ kg/cm}^2$ (Ref. 6), $f'm = 40.4 \text{ kg/cm}^2$ (1:8), $f'm = 46.7 \text{ kg/cm}^2$ (1:5) obtenemos $f'm/fb = 0.46$ y 0.53 para los morteros 1:8 y 1:5 respectivamente, causa de esta diferencia podría ser la forma e irregularidad de los bloques. El Reglamento Nacional de Construcciones y la bibliografía revisada anotan una relación entre el módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión para la albañilería con unidades de arcilla cocida : $E/f'm = 500$; en la Tabla N° 13 nuestros ensayos nos dicen : $E/f'm = 426.0$ (mortero 1:5) y $E/f'm = 534$ (mortero 1:8). Por lo que, resulta aceptable adoptar $E/f'm = 500$ para la albañilería de sillar.

En la Tabla N° 4 de la Norma de Albañilería del Reglamento Nacional, clasifican los valores de $f'm$ de acuerdo al tipo de unidad, si nos remitimos a ella, podemos afirmar que nuestra unidad de sillar se está comportando como una Tipo III.

Recordemos que las pilas sufrieron dos fases de carga lo que seguramente redujo su resistencia a la compresión. En Arequipa se utiliza ladrillo artesanal de arcilla, no tenemos información de ensayos realizados con unidades de esta

ciudad, pero el Ing. Ángel San Bartolomé (Ref. 26) reporta que en ensayos realizados con unidades similares hechas en Lima y mortero 1:5 obtuvo $f'm = 40 \text{ kg/cm}^2$ (con $f'm = fm (1 - C.V.)$) o sea la resistencia característica, así en nuestros ensayos obtuvimos $f'm = 47 \text{ kg/cm}^2$ (con $f'm = (1 - C.V.)$) para el mortero 1:5 $f'm = 40 \text{ kg/cm}^2$ para el mortero 1:8 en el más desfavorable de los casos.

Las Normas Técnicas de México (Ref. 8), en lo que respecta a la mampostería con piedra natural (Pág. 22), recomienda valores que son ampliamente superados por nuestros resultados.

d) Ensayo de Compresión Diagonal

Para la realización del ensayo de compresión diagonal se consideraron 3 muretes adicionales a los 8 programados con el objeto de verificar los resultados obtenidos en la medición de la adherencia con los prismas que contenían cal (sólo mortero 1:1:5).

Siguiendo el proceso constructivo ya establecido, se construyeron los 11 muretes, los dispositivos de transporte, ensayo y medición trabajaron perfectamente.

En el gráfico N° 16 mostramos croquis con las fallas observadas y en el gráfico 17 las curvas carga vs. deformación diagonal correspondientes a los dos graficadores XY

En las tablas N° 14 y 15, detallamos los resultados del ensayo, o sea los esfuerzos cortantes ($v'm$) y módulos de corte (G), respectivamente.

Nuevamente los muretes que contenían cal mostraron menor resistencia (falla por corte en las juntas, falla escalonada), pese a que utilizamos cal de otra marca (cal “Lima”, hidratada y normalizada con 81% de CaO, según su Departamento de Ventas).

$$\frac{\bar{v}(1:1:5)}{\bar{v}(1:5)} = \frac{2.65}{4.98} = 0.53$$

Considero que no es posible afirmar que la cal no es beneficiosa para el mortero, podría ser que la calidad del producto sea la que reduce la resistencia, prueba de ello serían los resultados de los ensayos de compresión realizados en los cubos con los 2 tipos de cal hasta aquí utilizados, solamente llegan a ser 60% del valor usual (ver Tabla N° 5).

Nuestros gráficos de fallas típicas (16) nos revelan fallas por corte (escalonada a través de la junta) en muretes con morteros 1:8 y 1:1:5; para los muretes con mortero 1:5 no es fácil definir el tipo de falla, en algunas ocasiones la grieta atraviesa al bloque y juntas, evidenciando una falla compuesta (tensión diagonal y corte en juntas).

Se sabe que la falla por deslizamiento (escalonada) ocurre cuando los esfuerzos tangenciales en la junta, exceden su resistencia al corte, proporcionada en parte por la adherencia entre los materiales; la falla por tensión diagonal (grieta diagonal que atraviesa unidad y mortero) se debe a las fuerzas de tensión, que ocurren en dirección normal a la diagonal del elemento, este tipo de falla se produce cuando se ha optimizado la adherencia.

La resistencia característica al corte de la albañilería ($v'm$) que hemos calculado es: 3.08 kg/cm^2 para los muretes con mortero 1:8 y de 4.43 kg/cm^2 para los muretes con mortero 1:5.

Una de las relaciones características: $v'm = \sqrt{f'm}$ que se cumple en muretes con fallas por tensión diagonal, según R. Meli (Ref. 17), no cumple exactamente en los muretes con mortero 1:5 y es por que la falla observada no se puede definir como de tensión diagonal.

En lo que respecta a los módulos de corte (G) experimentados, hemos calculado 6217 kg/cm^2 y 7263 kg/cm^2 para los morteros 1:8 y 1:5 respectivamente; si relacionamos los módulos de corte y elasticidad obtenemos: $G/E = 0.37$ (mortero 1:5) y $G/E = 0.3$ (mortero 1:8); según la Norma Peruana de Albañilería (Ref. 27) ésta relación es $G/E = 0.4$, obviamente para ladrillos de arcilla.

Nuevamente si nos referimos a las Normas Mexicanas (Ref. 8) nuestros valores de $v'm$ superan las recomendadas en dichas normas para piedra natural.

TABLA N° 8 ENSAYO SUCCIÓN (Previo Tratamiento)

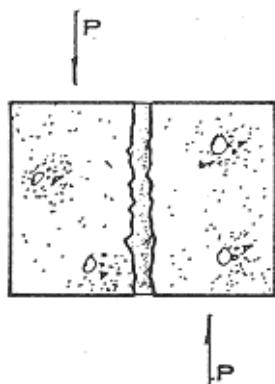
Espécimen : Bloque Sillar a escala reducida

Dimensiones Nominales : $15 \times 15 \times 10 \text{ cm}$

Norma ITINTEC : 331.018

Estado	S (gr/200 cm ² /min)	C.V. (%)	Número de Muestras
Muestra seca	72	5.5	5
Muestra rociada superficialmente	60	19.5	5
Muestra sumergida : 15 min.	8	25.6	5
Muestra sumergida : 30 min.	3	40.8	5

TABLA N° 9

MEDICIÓN DE ADHERENCIA POR CORTE VARIANDO
TIEMPO DE INMERSIÓN DE BLOQUE DE SILLA

Mortero : 1:8 (2 cm de espesor)
 Edad : 7 días
 Espécimen : 2 bloques (25 x 20 x 60)

Tiempo de Sumergido	Carga Máxima Promedio (P)	# de Especímenes
1 hora	1683 kg	3
2 horas	1917 kg	3
3 horas	5417 kg	3

TABLA N° 10 ENSAYO DE SUCCIÓN (previo tratamiento) (S)

Espécimen : Bloques de Sillar (3 bloques/estado)

Dimensiones Nominales : 25 x 60 x 20 cm

Norma ITINTEC : 331.018

Estado de Muestra	S (gr/200 cm ² /min.)	C.V. (%)
Sumergido 4 hrs Oreado : ½ hr	8	9.6
Sumergido superficial : 2 min. Oreado : 1 min.	41	5.4
Sumergido superficial : 5 min. Oreado : 1 min.	25	19.3
Sumergido superficial : 10 min. Oreado : 1 min.	23	4.3
Sumergido superficial : 15 min. Oreado : 2 min.	22	21.9
Sumergido Total : 10 min. Oreado : 2 min.	22	11.2
Sumergido total : 15 min. Oreado : 2 min.	11.5	30.7

**TABLA N° 11 RESULTADOS DEL ENSAYO DE MEDICIÓN DE
ADHERENCIA POR CORTE DIRECTO
(sin carga de confinamiento)**

Especímenes : Pilas con bloques de sillar (4/cada mortero)

Mortero Cemento:Cal:Arena	τ (kg/cm ²)	τ^* (kg/cm ²)	C.V. (%)
1: 0: 8	2.58	1.63	36.9
1: 0: 5	3.10	2.50	19.5
1: 1: 8	1.67	1.47	12.2
1: 1: 5	2.05	1.48	27.8

$\tau^* = \tau (1-CV) =$ resistencia característica a corte directo

**TABLA N° 12 RESULTADOS DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN AXIAL
(f'm)**

Especímenes : Pilas con bloques de sillar (4/cada mortero)

Mortero	fm (kg/cm ²)	f'm (kg/cm ²)	C.V. (%)	f'm/fb
1:8	45.00	40.40	5.3	0.46
1:5	52.75	46.70	10.9	0.53

$f'm = 0.8975 \times fm \times (1 - 1.5(CV - 0.1))$

TABLA N° 13

MÓDULOS DE ELASTICIDAD DE LA PILA : Em
(Promedio de 3 pilas)

Mortero	Em(kg/cm ²)	C.V. (%)	E/f'm
1:8	21573	10.2	534
1:5	19876	12.8	425.6

TABLA N° 14

RESULTADO DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN
DIAGONAL

Especímenes : Muretes de 81 x 81 cm

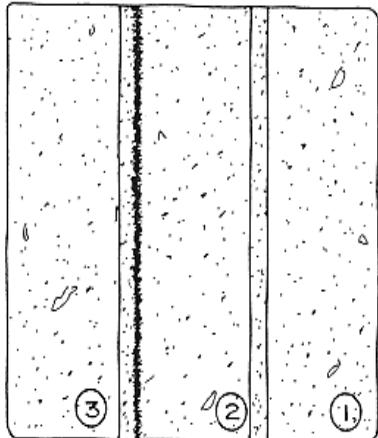
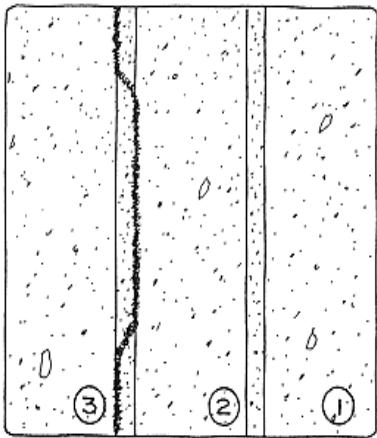
Mortero	$\bar{v}m$ (kg/cm ²)	$\bar{v}'m$ (kg/cm ²)	C.V. (%)	# Muretes
1:8	3.43	3.08	10.2	4
1:5	4.98	4.43	11.0	4
1:1:5	2.65	2.26	14.7	3

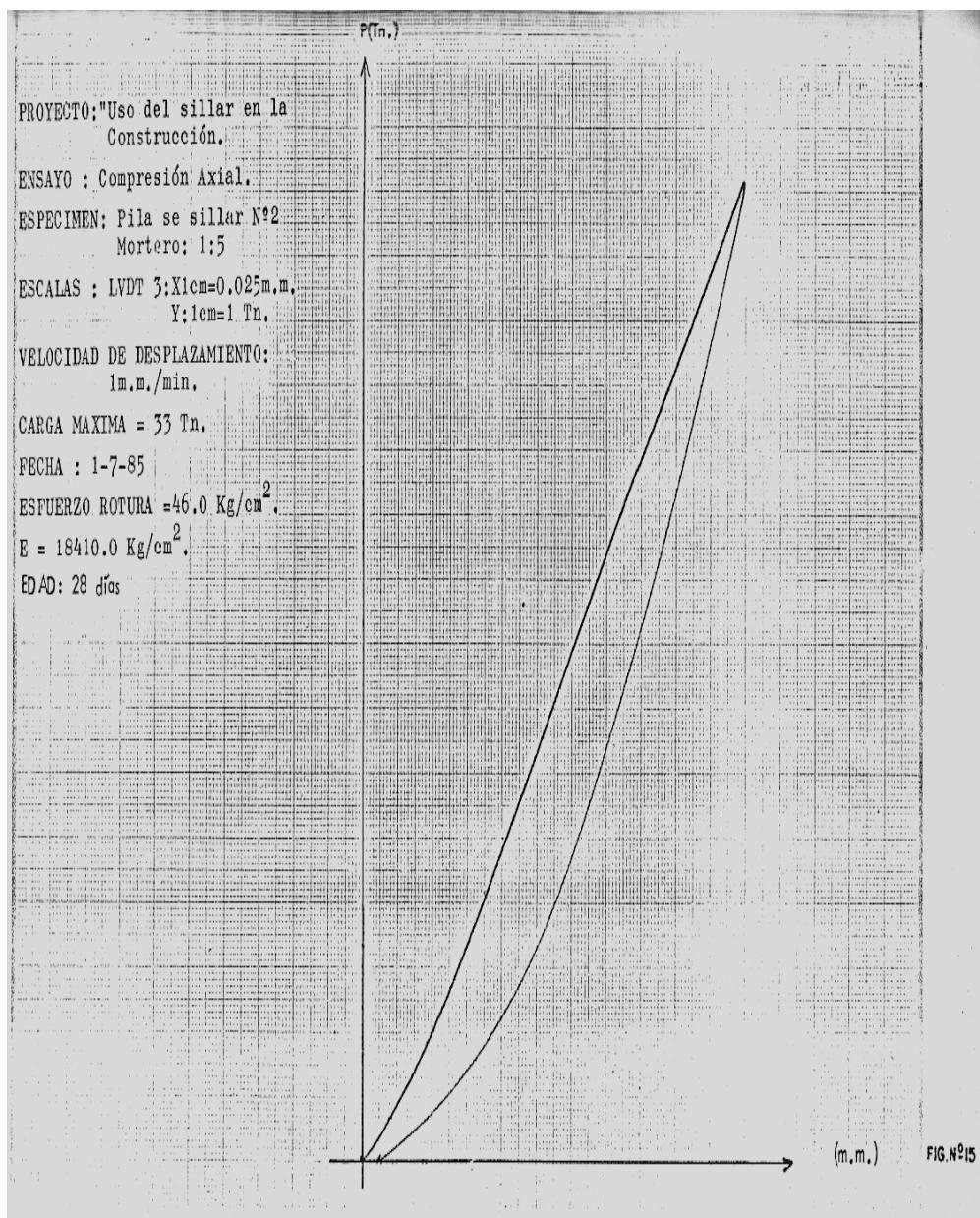
TABLA N° 15

MÓDULO DE CORTE G (Promedio de 4 muretes)

Mortero	G (kg/cm ²)	C.V. (%)	G/E
1:8	6217	17.1	0.30
1:5	7263	23.8	0.37

Normas Técnicas de Albañilería E-070 : G/E = 0.4





ENsayo: Tensión del sillar en la
Construcción.

ENsayo: Compresión Axial

ESPECIMEN: Pila del sillar N°2
Mortero 1; 5

ESCALAS: LVDT 2; X: 1cm=0,025m,
Y: 1cm=1m,

VELOCIDAD DE DESPLAZAMIENTO:
1mm/mm. /min.

CARGA MAXIMA = 53 Tn.

FECHA: 1-7-35

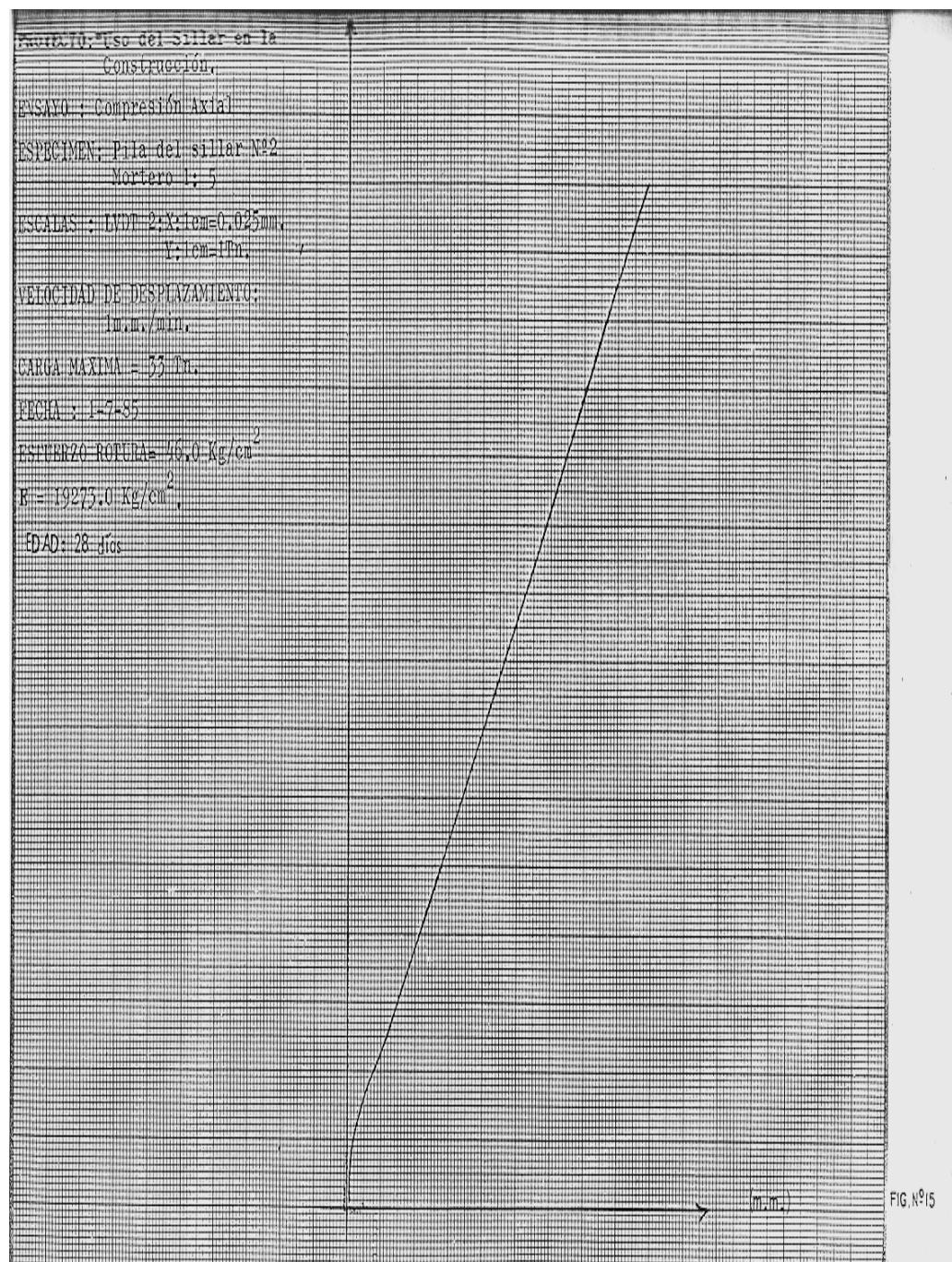
ESTUERZO ROTURA = 49,0 Kg/cm²

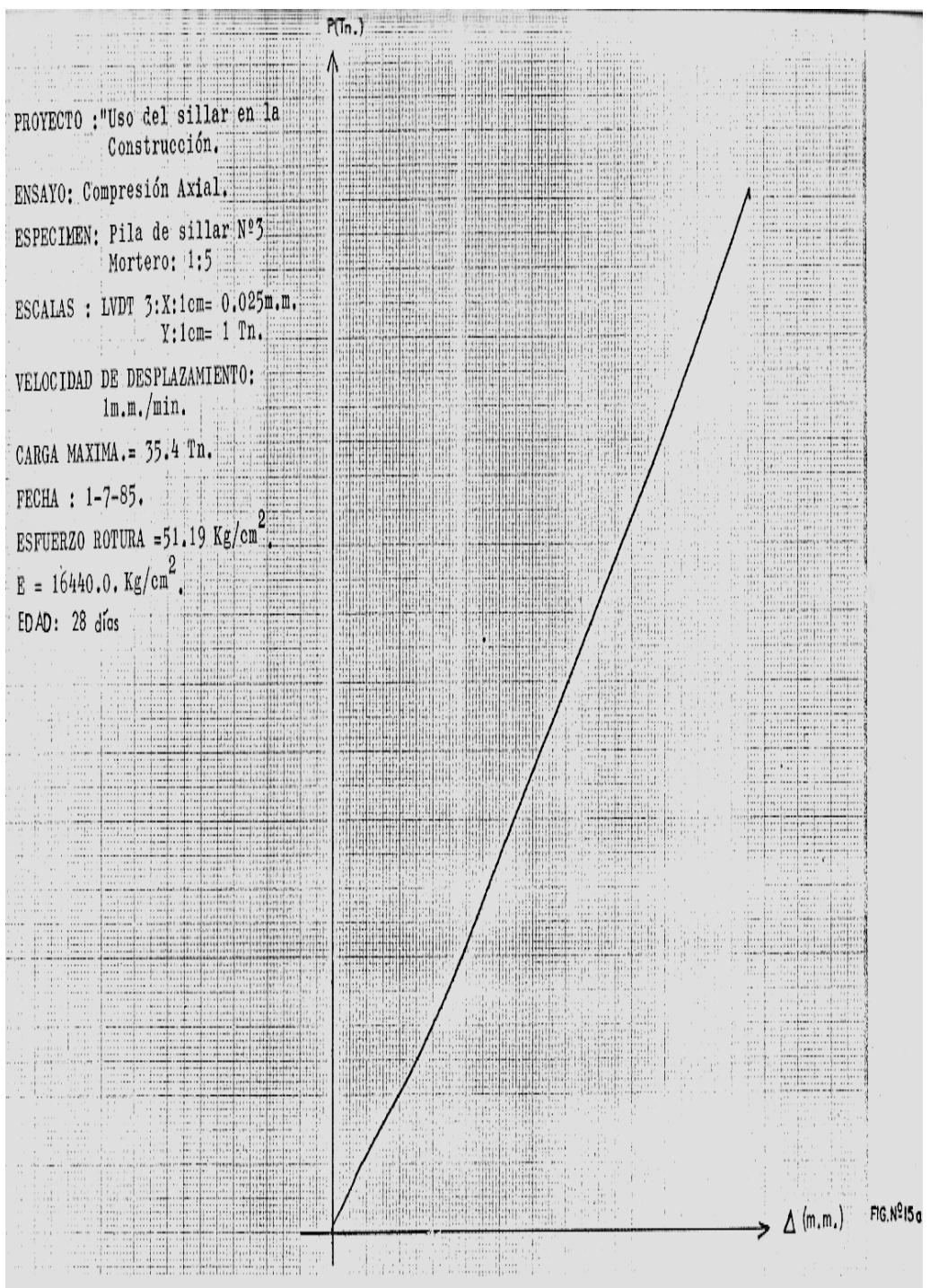
R = 19273,0 Kg/cm²

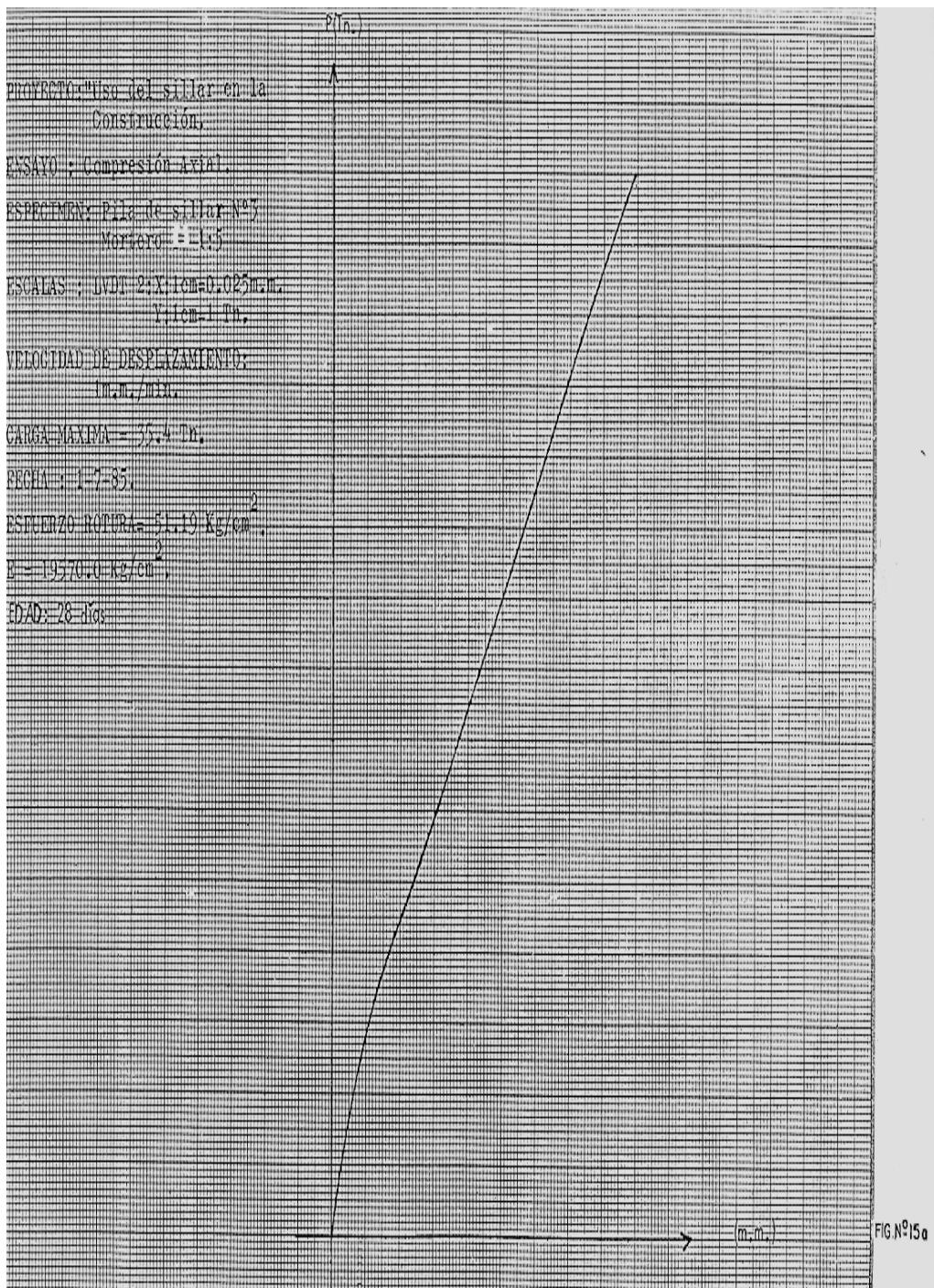
EDAD: 28 días

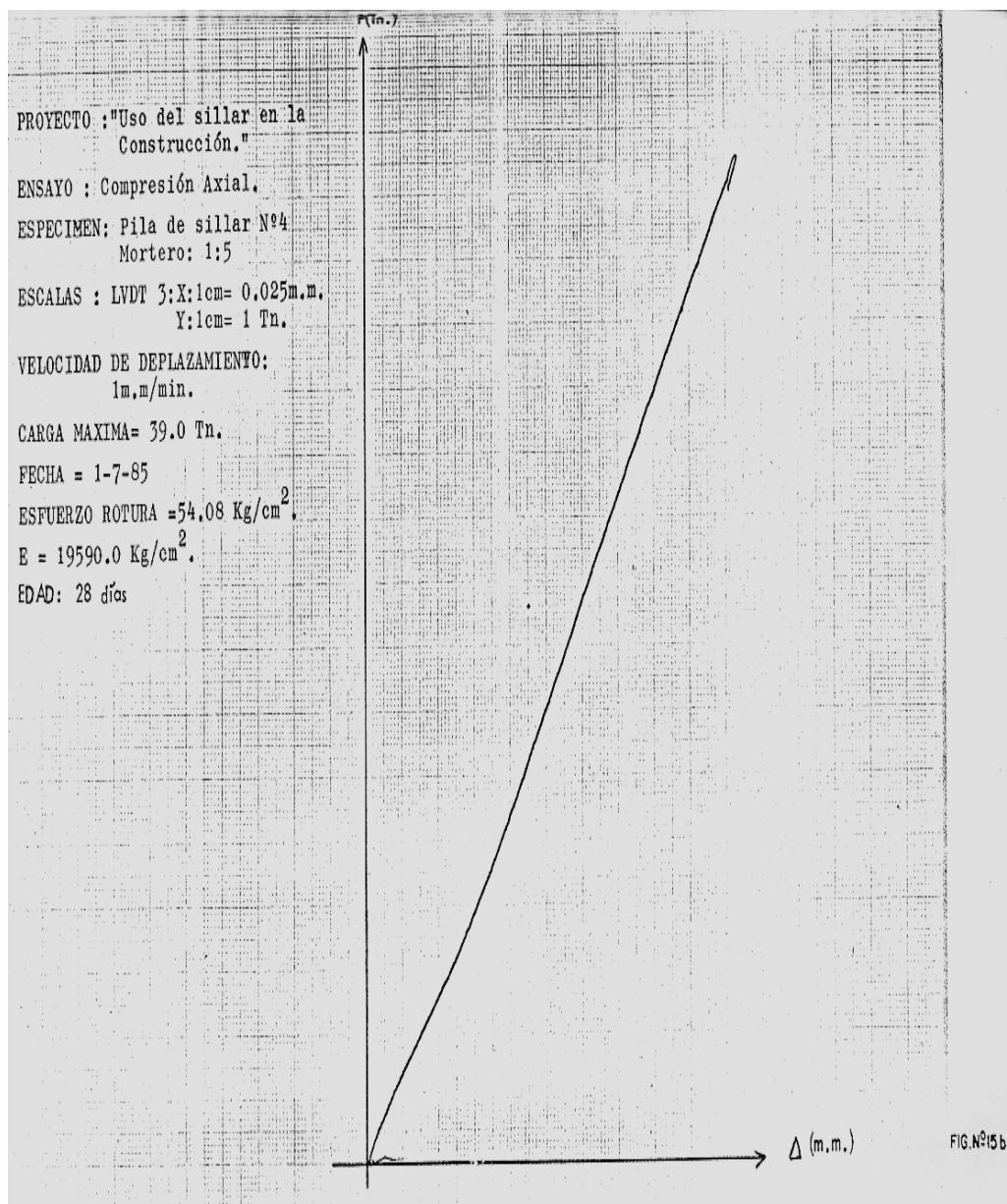
(m, m₁)

FIG. N°15









PROYECTO: Uso del sillar en la
Construcción.

ENSAYO: Compresión Axial.

EJEMPLO: Pila de sillar N°4
Mortero, 1,5

ESCALAS: 1 VM = 2, V: 1 cm = 0,025 m.
V: 1 cm = 1 Tn.

VELOCIDAD DE DESPLAZAMIENTO:
(m.s.)/100.

CARGA MÁXIMA: 39,0 Tn.

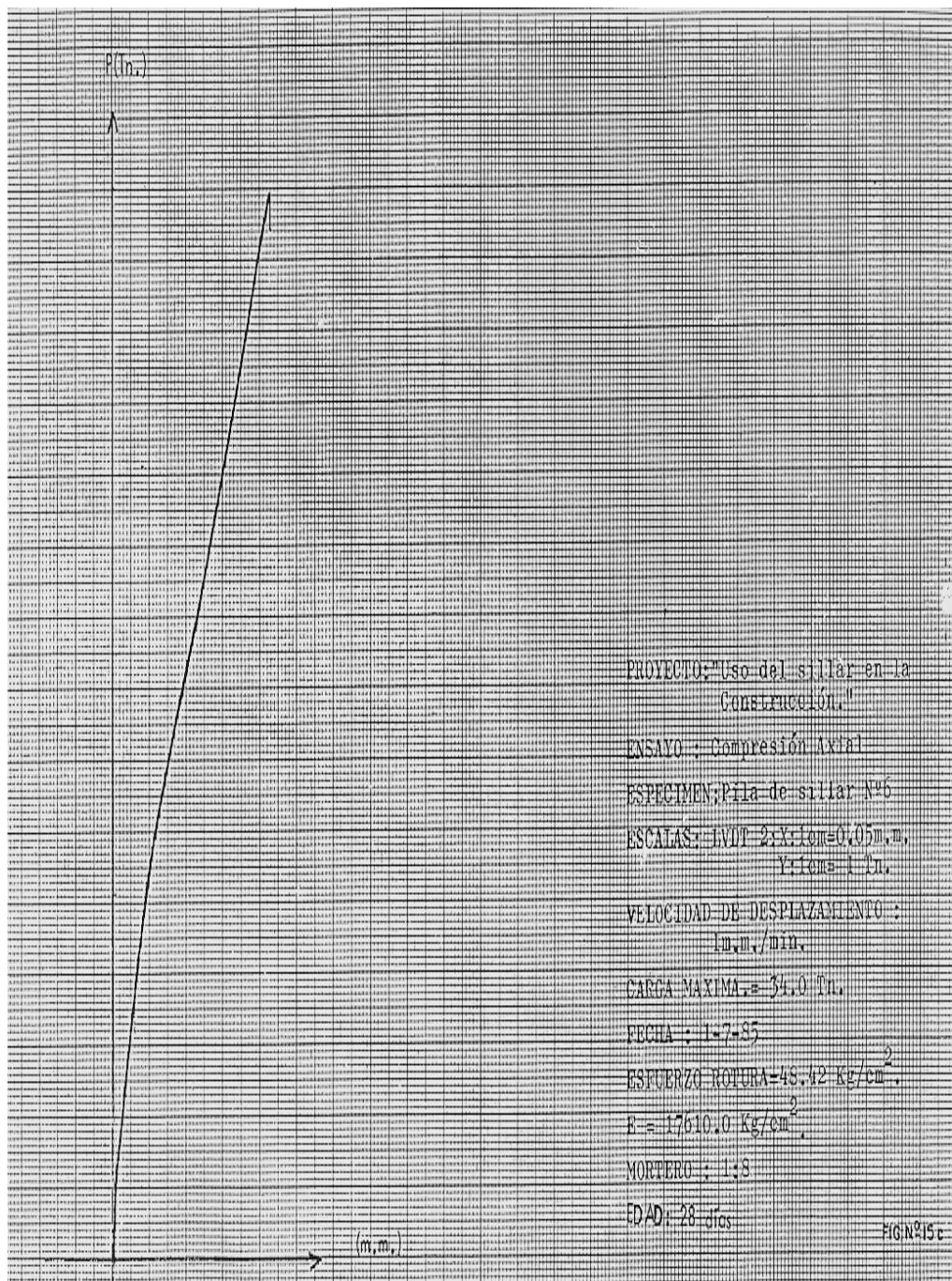
FICHA: 1-7-85

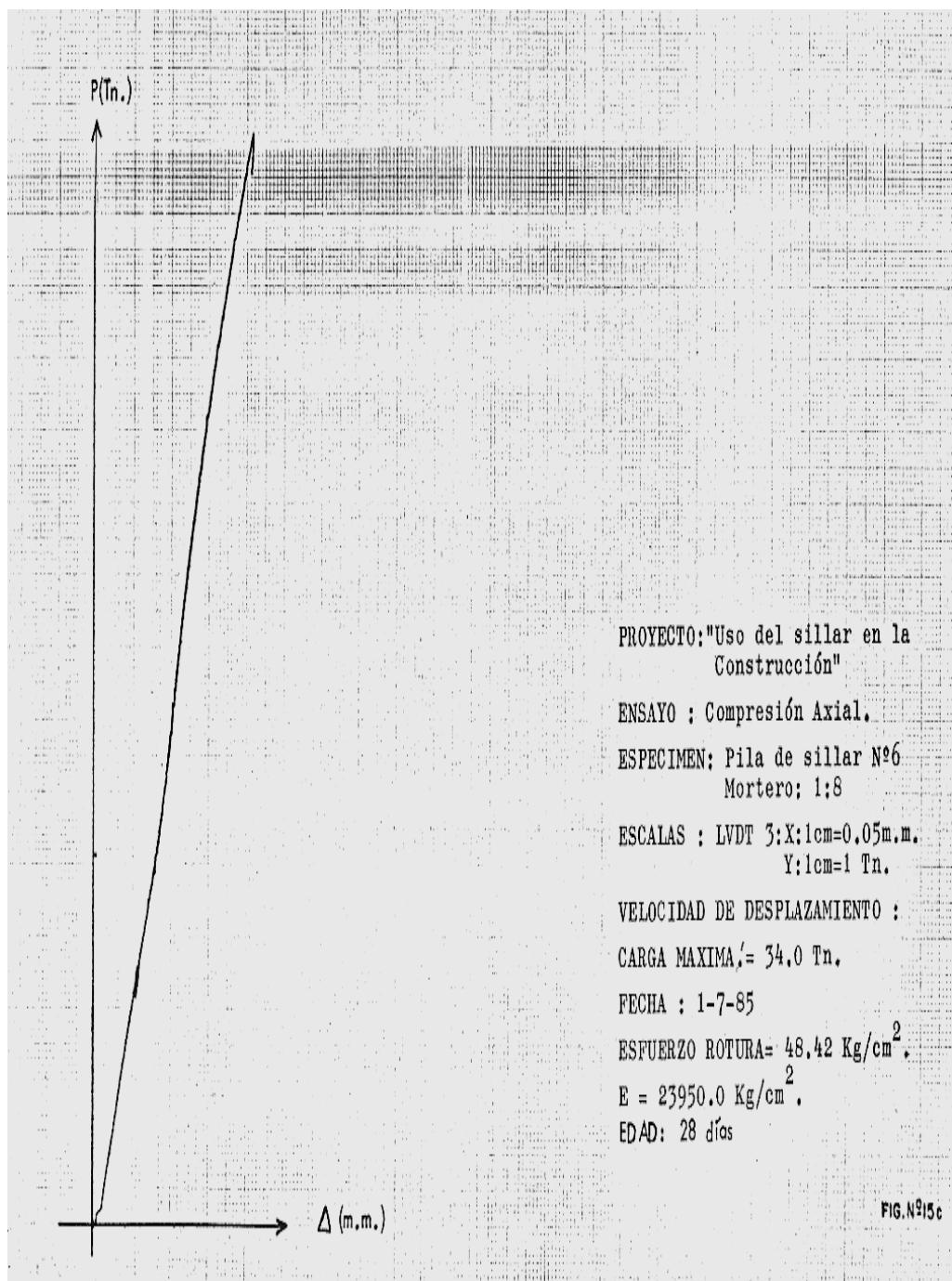
ESTRÉS ROTURA = 54,08 Kg/cm²,
 $E = 25970,0 \text{ Kg/cm}^2$.

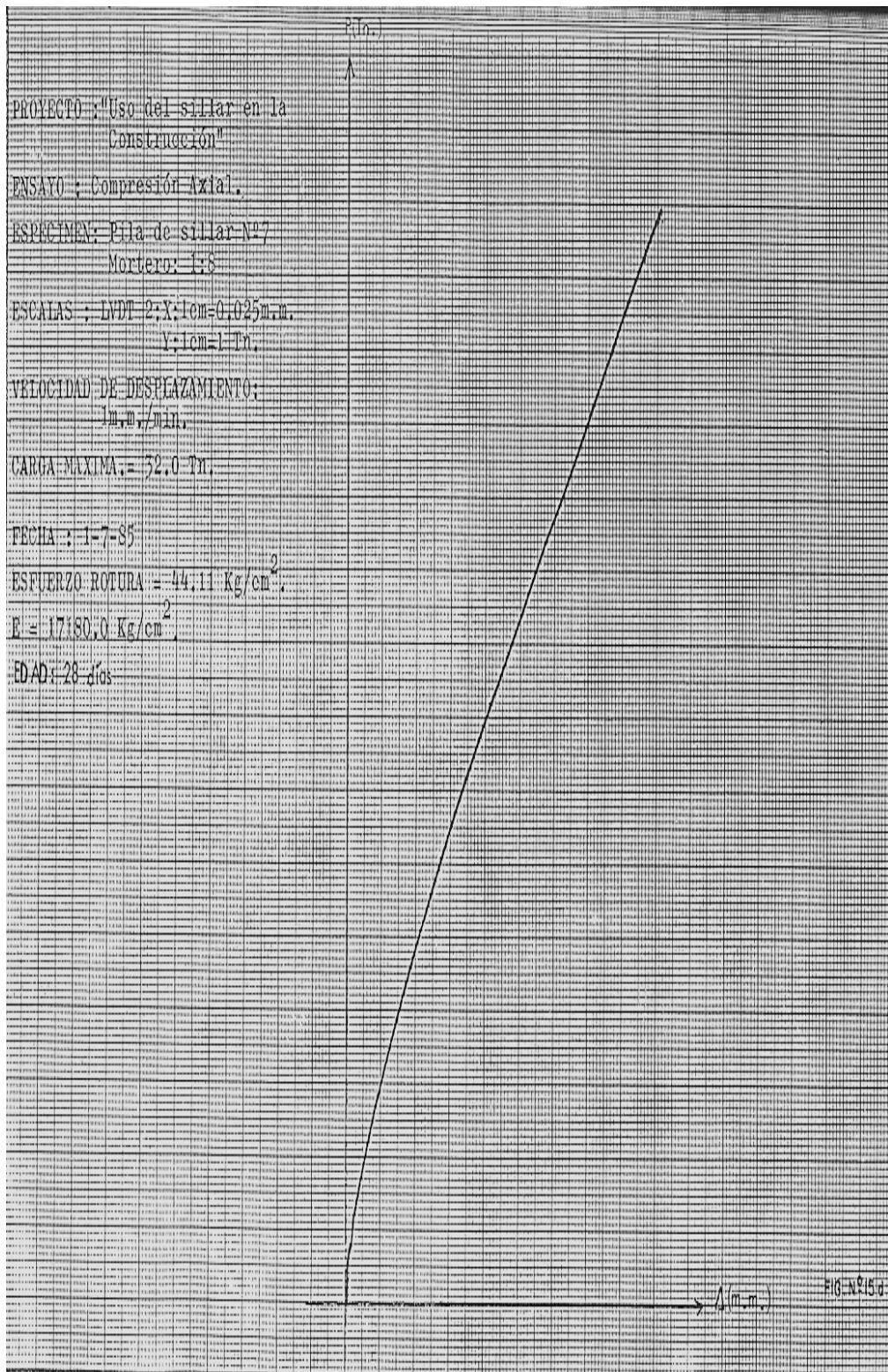
DAD: 28 días

→ Δ (m, m.)

FIG. N° 15b







PROYECTO : "Uso del sillar en la
Construcción."

ENSAYO : Compresión Axial.

ESPECIMEN: Pila de sillar N°7
Mortero : 1:8

ESCALAS : LVDT 3:X; 1cm=0.025m.m.
Y: 1cm= 1 Tn.

VELOCIDAD DE DESPLAZAMIENTO:
1m.m./min.

CARGA MAXIMA = 32.0 Tn.

FECHA : 1-7-85

ESFUERZO ROTURA = 44.11 Kg/cm².

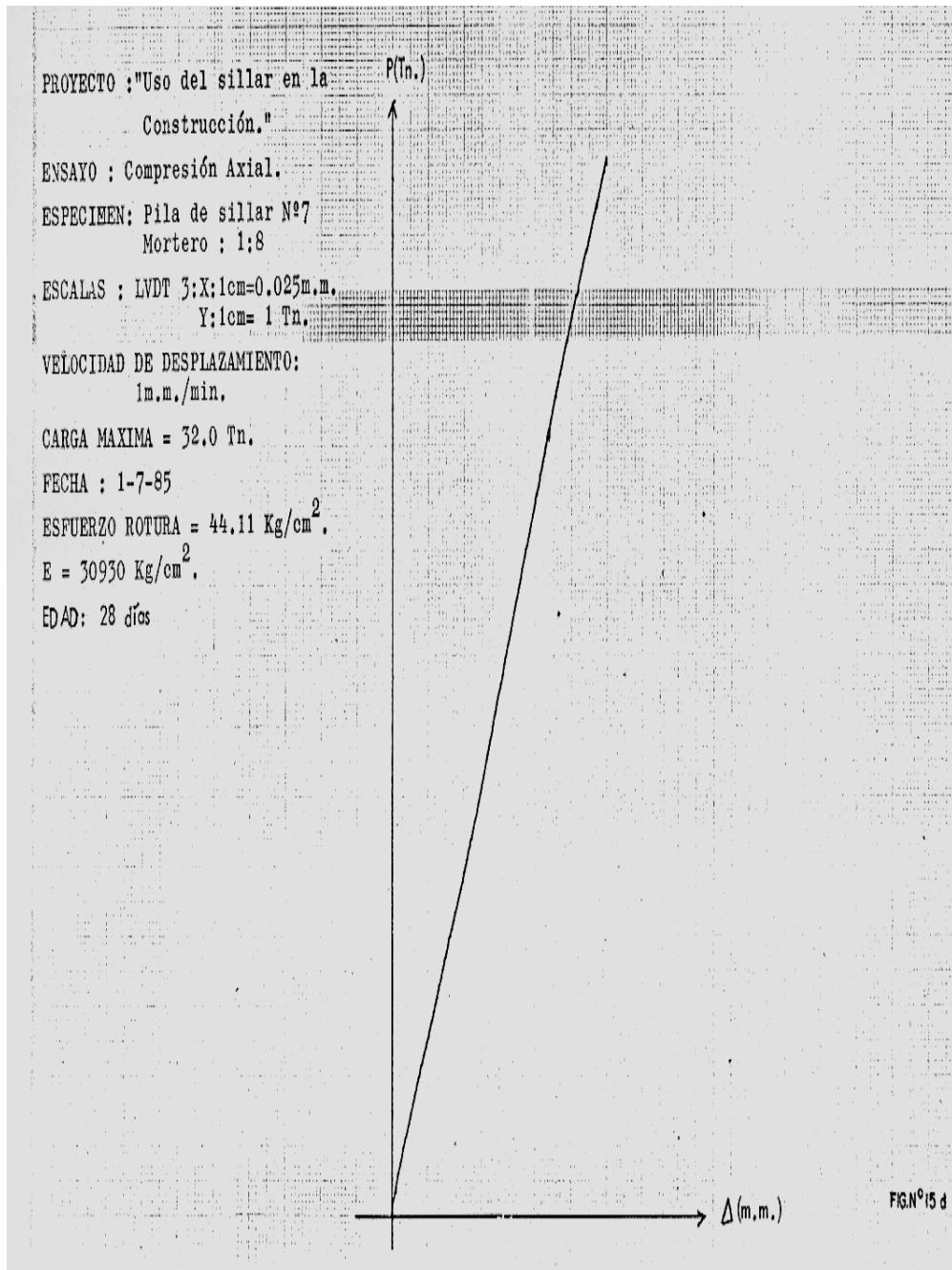
E = 30930 Kg/cm².

EDAD: 28 días

P(Tn.)

Δ(m.m.)

FIGN°15 d



PROYECTO: "Uso del sillar en la Construcción."

ENSAYO : Compresión Axial.

ESPECIMEN: Pila de sillar N°8
Mortero: 1:8

ESCALAS : LVDT 3:X:1cm=0,025m.m.
Y:1cm=1 Tn.

VELOCIDAD DE DESPLAZAMIENTO:
1m.m./min.

CARGA MAXIMA.= 31.0 Tn.

FECHA : 1-7-85.

ESFUERZO ROTURA = $42,85 \text{ Kg/cm}^2$.

$E = 27370 \text{ Kg/cm}^2$.

EDAD: 28 días

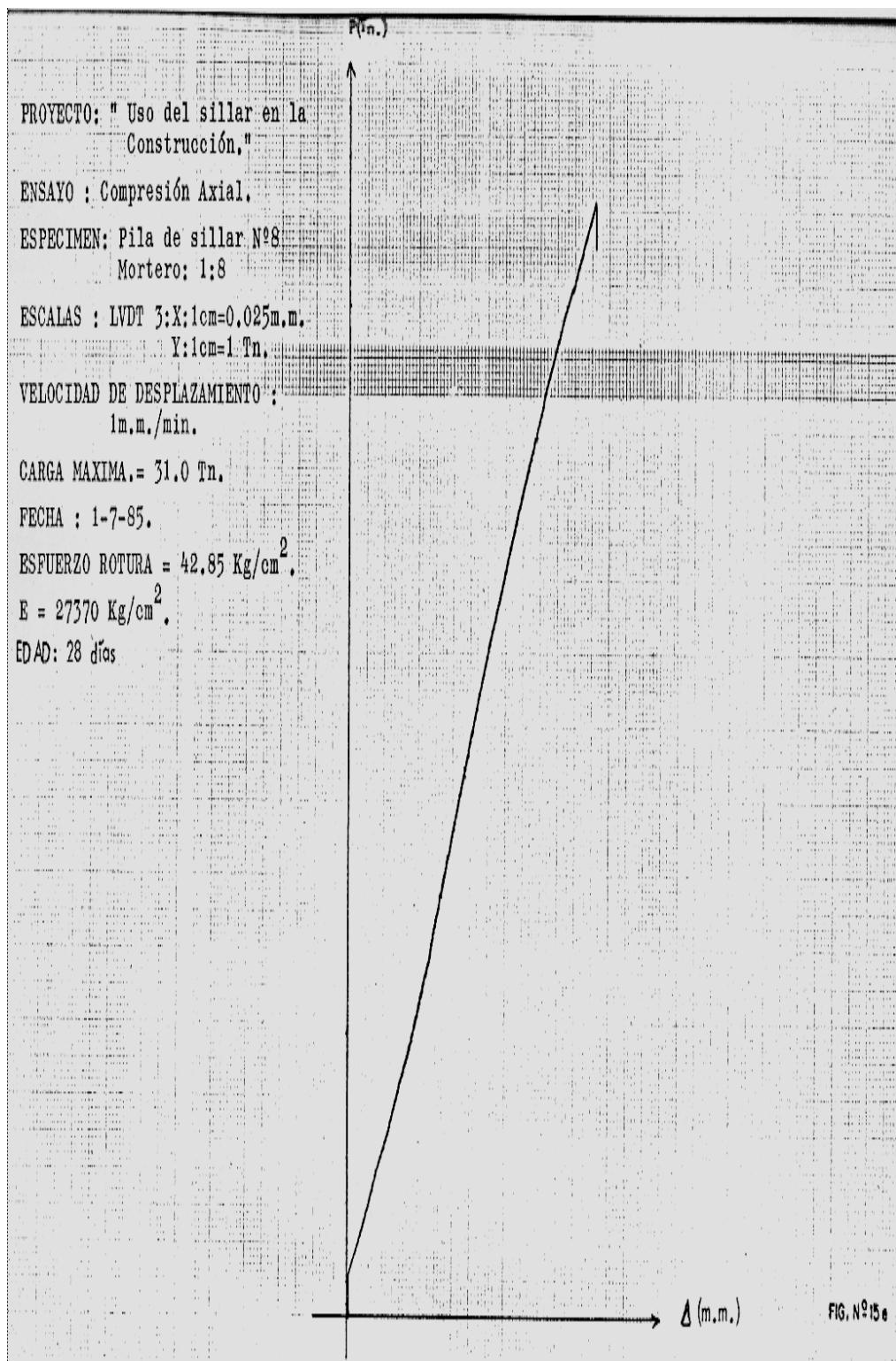
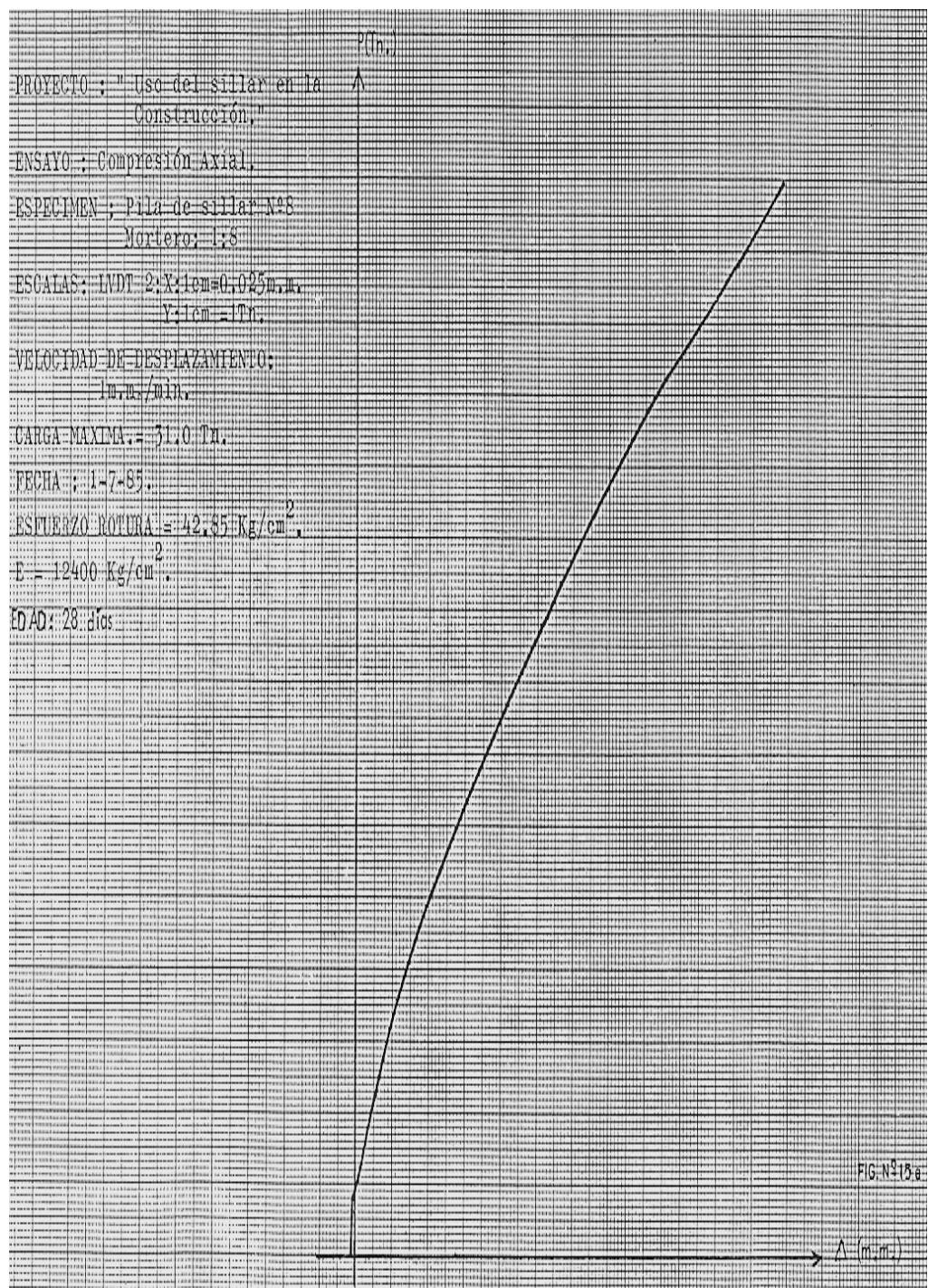
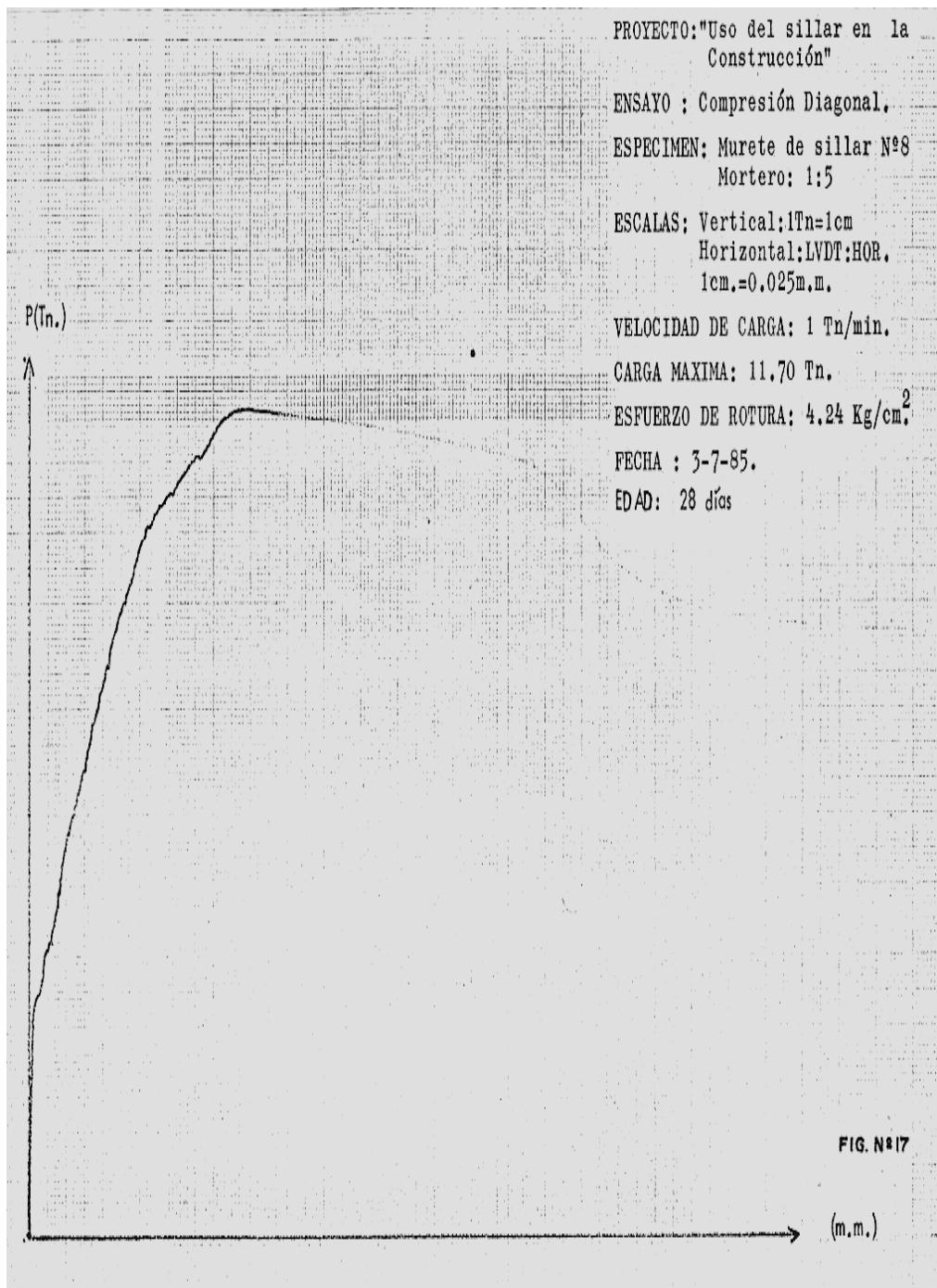
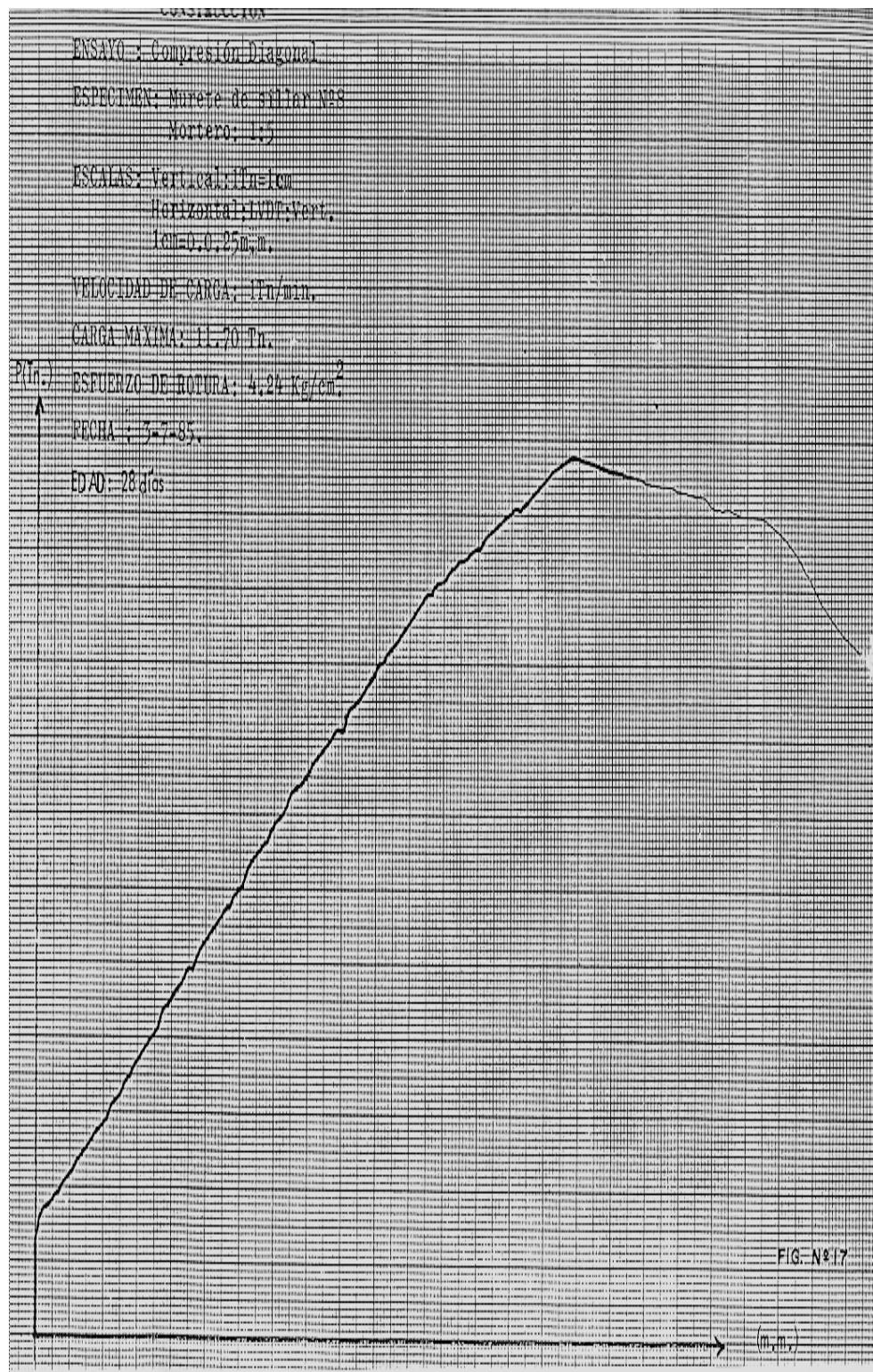
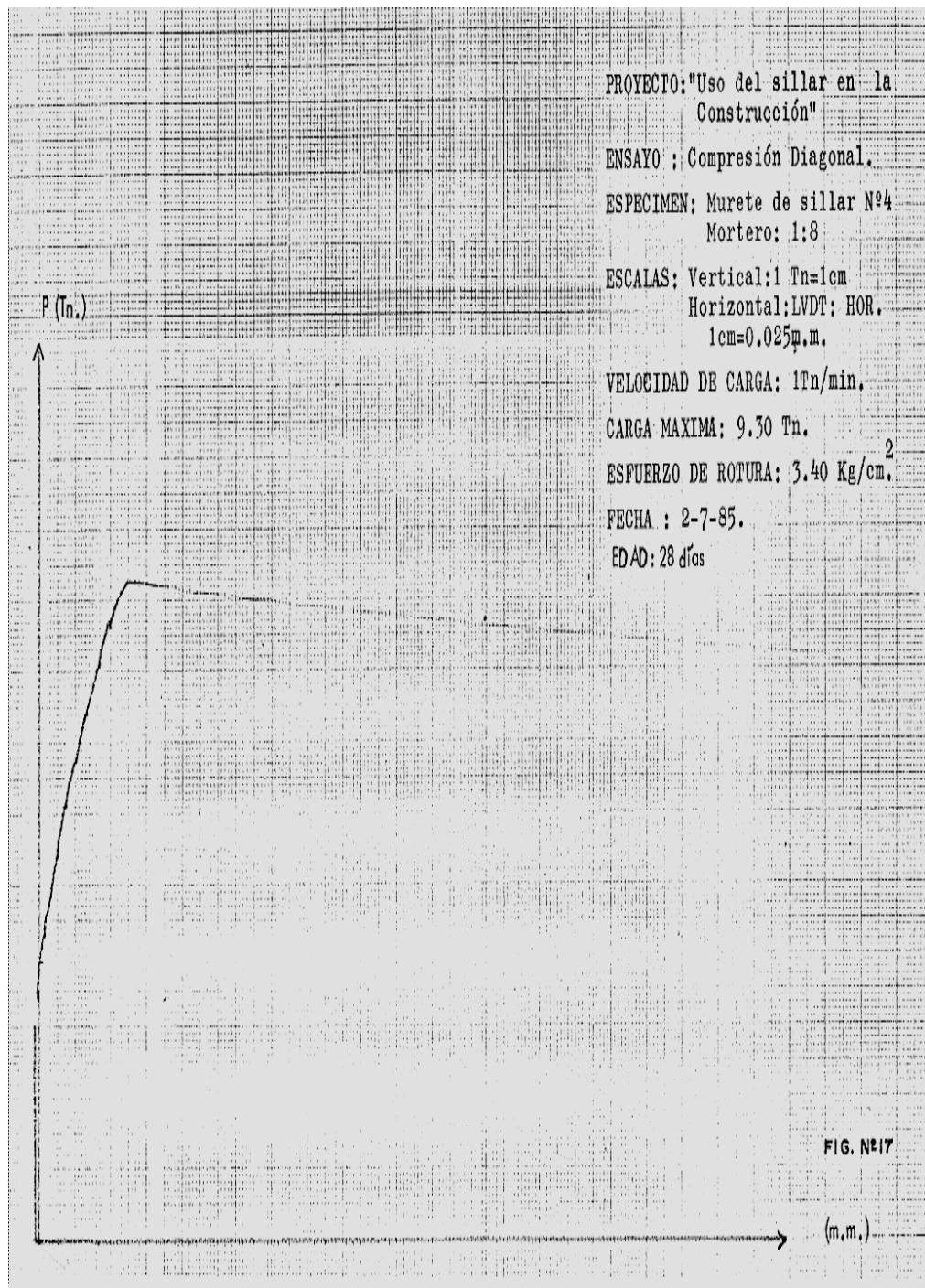


FIG. N°15e









PROYECTO: "Uso del Sillar en la Construcción".

ENSAYO: Compresión Diagonal.

ESPECIMEN: Murete de sillar N° 4
Mortero: 1:3

ESCALAS: Vertical: 1 cm = 10 mm
Horizontal: 1 cm = vert.
1 cm = 0,025 m.

VARIACIONES DE CARGA: 1 Tn/mm.

CARGA MAXIMA: 9,30 Tn.

MOMENTO DE ROTURA: 5,40 kg/cm^2 .

TIPO: 1-2-3-5

EDAD: 28 días

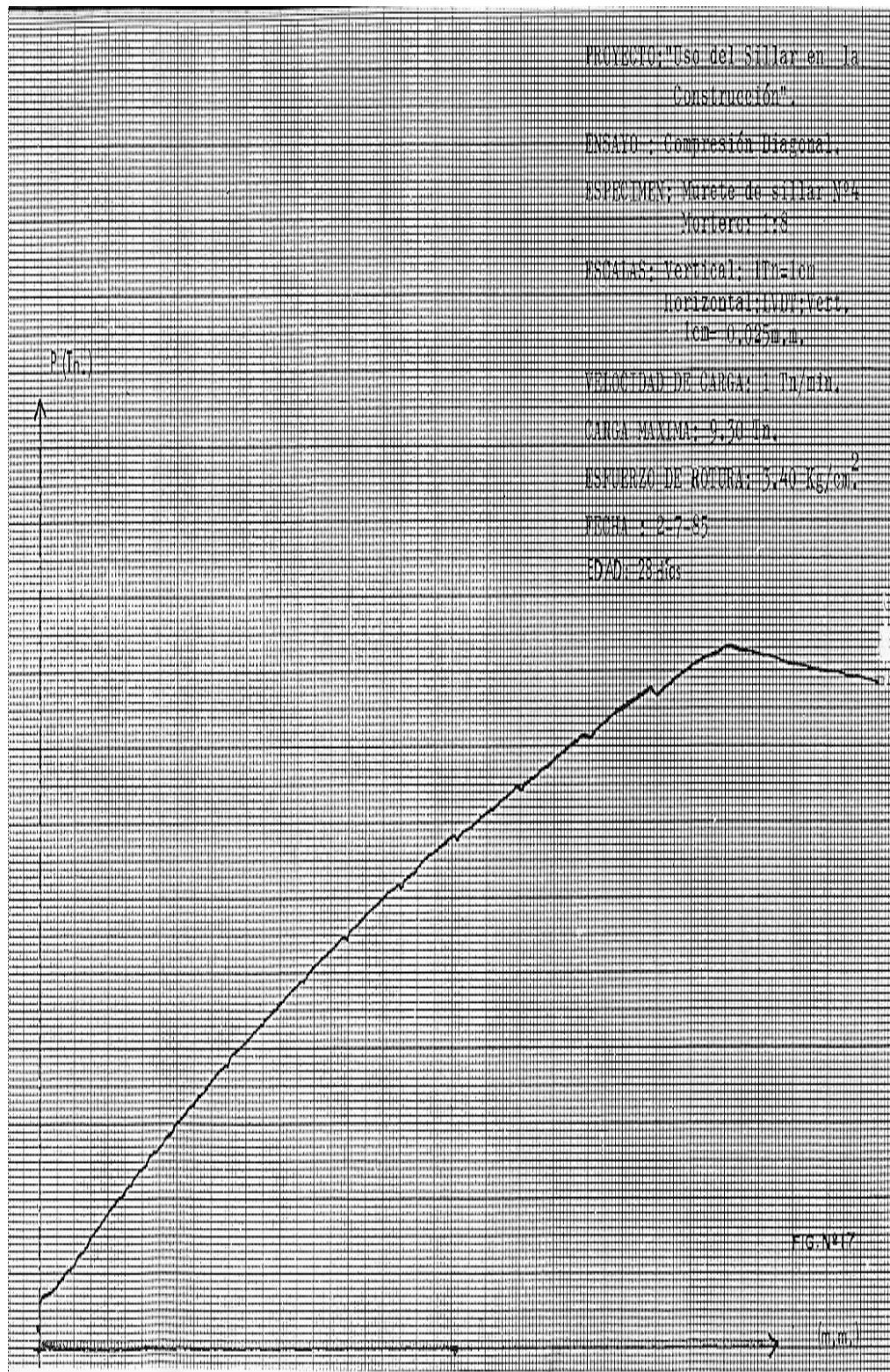
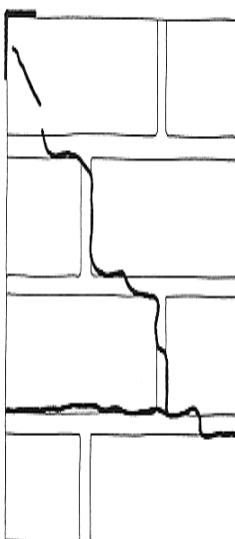
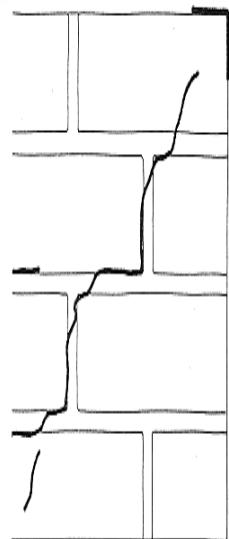


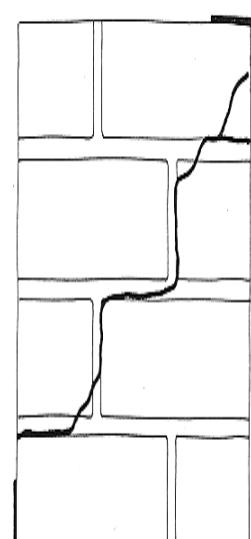
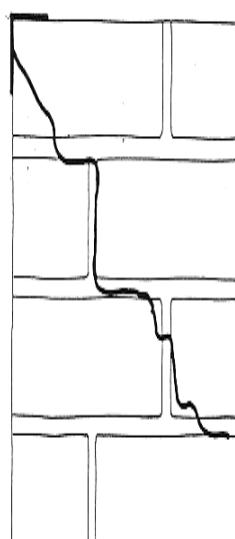
FIG. Nº 7

Fig. 16

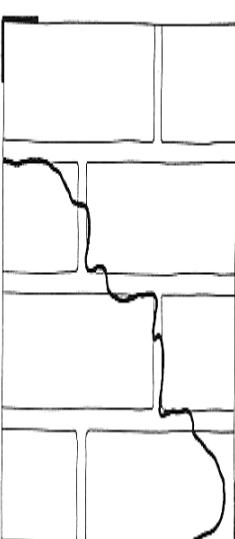
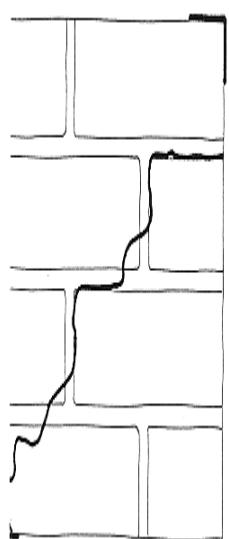
Compresión Diagonal



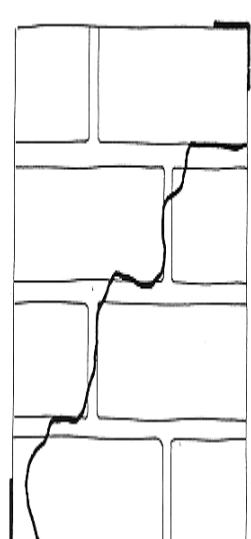
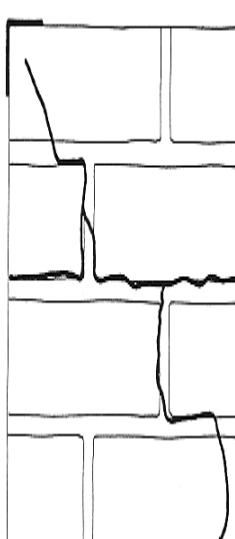
MURETE # 1



MURETE # 2



MURETE # 3



MURETE # 4

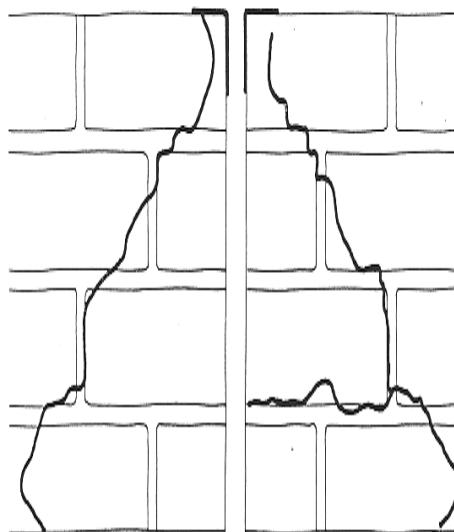
escala: 1:125

Fig. 16

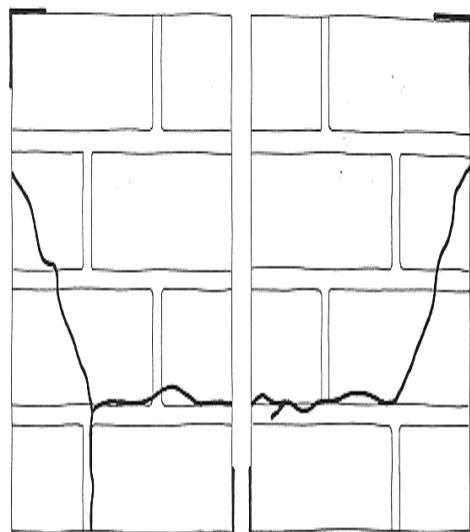
Compresión Diagonal

MURETES : 81 x 81 x 24 (JUNTAS: 3 cm)

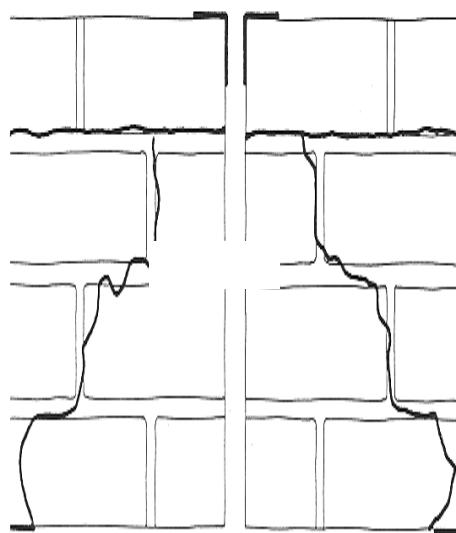
MORTERO: 1:5



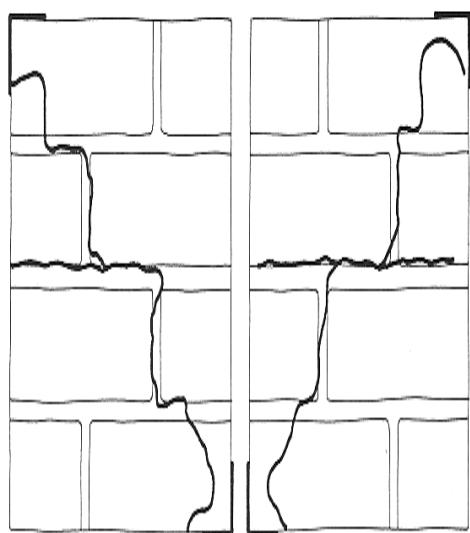
MURETE # 5



MURETE # 6



MURETE # 7



MURETE # 8

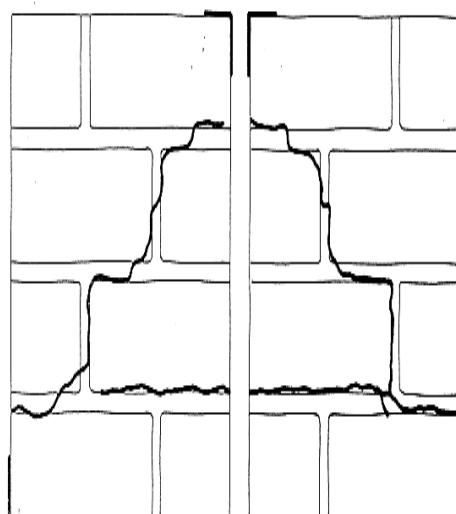
escala: 1:25

Fig.

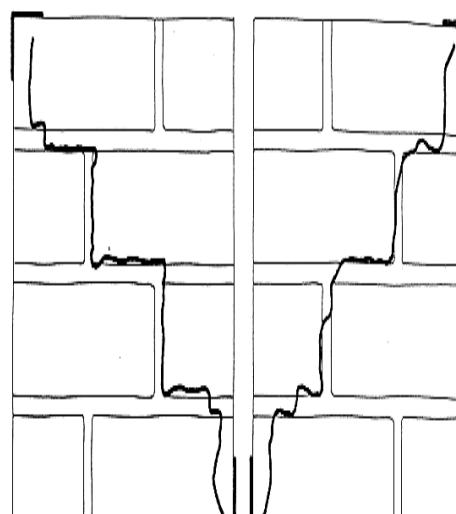
Compresión Diagonal

Muretes : 81 x 81 x 24 (JUNTAS : 3 cm)

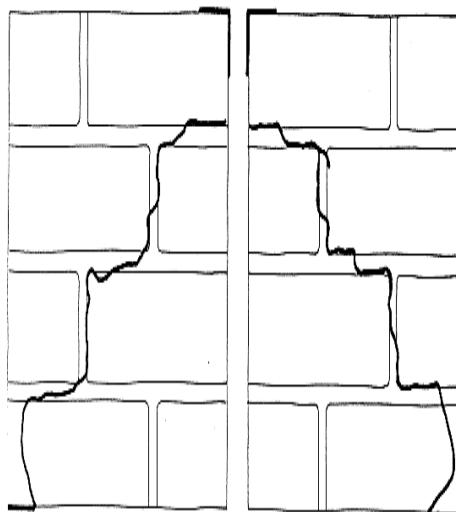
MORTERO : 1:1:5



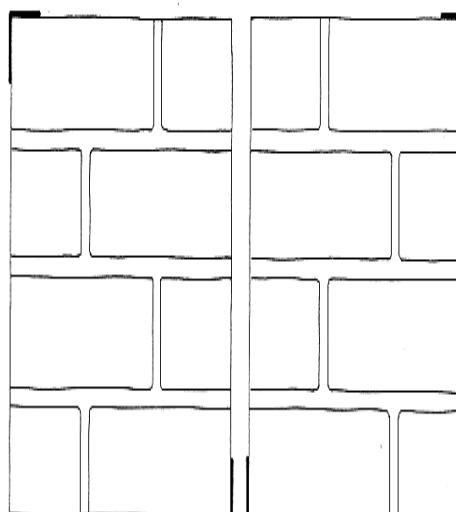
MURETE # 9



MURETE # 10



MURETE # 11



escala 1:25

VII. PROCESAMIENTO DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE MUROS A ESCALA NATURAL

i) Identificación de los Muros:

MS1 : Muro de Sillar # 1 Mortero 1:8

MS2 : Muro de Sillar # 2 Mortero 1:5

ii) Definición de Programas de Cómputo a utilizarse:

Para la realización de los gráficos y cuadros comparativos de los resultados de los ensayos en muros a escala natural, se utilizaron los programas pertenecientes al Centro de Cómputo del Laboratorio de Estructuras de la Pontificia Universidad Católica del Perú, estos son:

- “TESTM”, recaba la información enviada por los LVDT’s y celda de carga utilizadas en ensayos quasi-estáticos.
El programa utiliza la minicomputadora HP9825 B y uno de los sistemas de adquisición de datos HP 3455 A (22 Hz. máx) ó HP 3437 A (3600 Hz. máx).

El programa requiere de dos archivos para operar:

Archivo de datos: donde se guardan los voltajes de transductores inmediatamente después que han sido leídos.

Archivo de calibración: donde se guarda información complementaria con el título del ensayo, fecha de ejecución, identificación de cada canal y factores de calibración para convertir los voltajes a unidades de ingeniería.

- “FILDT”, transforma los datos almacenados en voltajes por el “TESTM” a unidades de ingeniería, separando cada canal de control en un file: trabaja con la cantidad exacta de datos o con un número menor de los datos almacenados durante el ensayo completo.
- “GRAFM”, grafica las informaciones de 2 files en X é Y, puede graficar la totalidad de las informaciones o segmentos de estos, a la escala deseada.
- “datman”, almacena datos en forma manual en un file.
- “lfdt”, imprime los datos de un file.
- “DIGIT”, digitaliza los puntos X, Y de un gráfico almacenándolos en files diferentes.
- “AREA”, calcula el área encerrada entre 2 puntos de 2 files.

- “AMORT”, calcula el amortiguamiento equivalente. Datos de entrada: EH (absorción de energía) y ED (energía disipada).
- “SUMA”, mediante la ecuación $ax + by + c$ podemos modificar los datos de un file (x), ya sea para sumarlos con otro files (y) o trasladar su gráfica.

iii) Definiciones (Ver gráfico N° 17^a)

- V : Carga Lateral; d : Desplazamiento Lateral.
- Punto F : Punto asociado a la primera fisura visible.
- punto e : Punto que simula comportamiento elástico y para el cual la energía elástica es equivalente a la energía inelástica (comportamiento real):

$$V_e = \sqrt{2k_o EH}$$

- Punto y : Punto de carga máxima asociado al ciclo estable de cada fase.
- Punto R : Punto de primera fisura diagonal importante, conlleva una repentina pérdida de la rigidez y de resistencia por parte del muro.
- Punto M : Punto asociado a la carga máxima del ensayo.
- Ciclo Estable: Es el ciclo histerético estabilizado, en el cual la variación con respecto al ciclo anterior es mínimo.
- Ciclo de Máxima Carga o Primer Ciclo: Es aquel en donde ocurre la carga máxima para una determinada fase del ensayo.
- Envolventes de los ciclos estables y del primer ciclo: Por medio del programa “DIGIT” se digitalizó los puntos de los ciclos de máxima carga y de los ciclos estables y luego se unieron estos puntos para obtener los envolventes, considerando siempre la rama más desfavorable.
- Deterioro de la capacidad de carga . (D.C.C)

$$D.C.C. = \frac{V_y}{V_R} \times 100\%$$

Porcentaje entre la carga del ciclo estable y la carga en que apareció la primera fisura diagonal importante (Punto R).

- Rigidez lateral inicial : $K_o = V_F / dF$ (en el rango elástico)
- Rigidez lateral : (K_y) : V_y / d_y
Está asociada al punto Y

- Degradación de la rigidez lateral (K_y/K_o) : Es la disminución de la rigidez lateral respecto de la rigidez inicial en porcentaje.
- Energía Disipada (ED) : Área encerrada en el ciclo histerético estable. Se calculó mediante el programa “AREA” en la gráfica carga vs. desplazamiento horizontal. En las tablas aparecen valores correspondientes a la rama más desfavorable.
- Capacidad de Absorción de Energía (EH) : Área bajo la curva carga lateral vs. desplazamiento horizontal en el instante de recarga en el ciclo estable (hasta el punto Y). Se calculó mediante el programa “AREA”, siempre para las ramas más desfavorables.
- Curva Esqueleto : Curva promedio en el ciclo histerético estable entre la rama de recarga y la rama de descarga del desplazamiento ya sea positivo o negativo.
- Trabajo (W) : Área bajo la curva esqueleto. Su cálculo se realizó mediante el programa “AMORT” más su valor final se veía afectado por el factor 2π , ya que la idea de este programa es el cálculo directo del amortiguamiento equivalente, ésta área corresponde aproximadamente a:

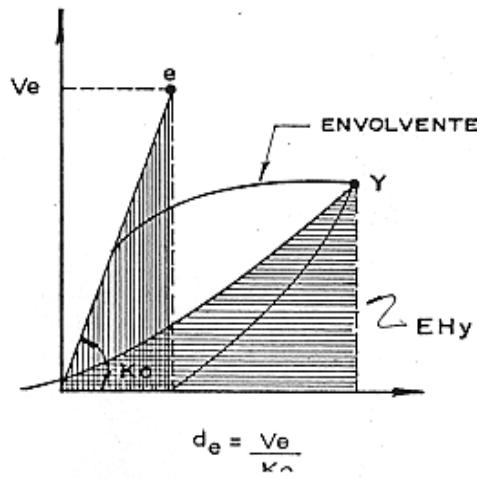
$$EH - (ED/2)$$

- Amortiguamiento Equivalente ($ED/2\pi W$) : Es el cociente entre el valor de la energía disipada (ED) y el valor del producto 2π por el área bajo la curva esqueleto (W). Su cálculo se efectuó mediante el programa “AMORT”. El amortiguamiento equivalente es uno de los parámetros que gobierna el comportamiento dinámico de la estructura, y es un indicador de la energía disipada por fricción debido a una mayor o menor cantidad y tamaño de grietas.
- Coeficiente Indicativo de la Ductilidad (FD)

$$\text{Se obtuvo mediante la definición . FD} = \frac{V_e}{V_R}$$

Este valor FD, es un factor para apreciar básicamente la ductilidad del espécimen, no se puede tomar como índice directo de los valores propuestos por el reglamento debido a las características del ensayo, caso de carga vertical cero y asimismo, no considera el efecto del amortiguamiento en el rango inelástico, que indudablemente afecta el coeficiente sísmico.

El cálculo del coeficiente indicativo de la ductilidad puede predecirse mediante el criterio de igualación de energía.



$$Ee = \frac{1}{2} Vede = EH_y$$

$$\frac{1}{2} \frac{V_e^2}{K_o} = EH_y$$

$$\Rightarrow V_e = \sqrt{2 K_o \times EH_y}$$

$$\text{Si FD} = V_e / V_R \quad \Rightarrow \quad FD = \sqrt{2 K_o EH_y}$$

iv) Denominación y Contenido de los files grabados

Para analizar los resultados de nuestros ensayos a escala natural se han utilizado dos diskettes:

Diskette # 1: Datos de los ensayo en los 2 muros provenientes de los 13 canales de medición.
Datos vírgenes.

Diskette # 2: Datos procesados.

En este último diskette tenemos grabados los files que describimos en la tabla N° 15^a.

Cada fase tiene un determinado número de ciclos, las lecturas que limitan a estos ciclos y fases tienen una numeración y los detallamos en la tabla N° 15b.

v) Gráficos de la Información Instrumental

En el capítulo IV, cuando describimos el programa experimental en lo concerniente al ensayo de muros, anotamos que uno de los objetivos de la colocación de los 13 canales de medición era el de tener una adecuada configuración deformada del muro luego de su agrietamiento, además del comportamiento del refuerzo vertical y determinación de posibles deslizamientos, para ellos hemos elaborado los gráficos N° 20 – 45 (carga horizontal vs. desplazamiento horizontal) con los cuales nos damos una idea del comportamiento de los muros y elaboramos la posición deformada de los muros (gráfico N° 46).

vi) Anotaciones durante el ensayo

El ensayo se realizó conforme las indicaciones dictada en la propuesta del ensayo (ver 4.4).

Antes del inicio del ensayo se aplicó en el muro una carga lateral de 4 ton con el fin de ajustar los tirantes al muro y buscar un acomodo entre el actuador y el muro.

Sobre el muro MS1 (muro de sillar N° 1, con mortero 1:8), se aplicaron las 9 fases de carga previstas, el estado final de agrietamiento figura en el gráfico N° 18. Conforme aparecían las fisura, se anotaba el punto o número de lectura en que se producía dicha fisura y luego se fotografiaba el estado del muro al final de cada fase.

Sobre el muro MS2 (muro de sillar N° 2, con mortero 1:5), solamente se aplicaron 6 fases de carga, ya que el muro tuvo una pronta caída de su capacidad de carga.

En las figuras N° 20 y 32 graficamos carga lateral vs. desplazamiento horizontal (lectura del LVDT 2, canal de control de desplazamientos) para los 2 ensayos.

En las siguientes tablas anotamos los puntos importantes de agrietamiento.

PUNTOS IMPORTANTES DE AGRIETAMIENTO MURO MS1
(Mortero 1:8)

Fase	Desplazamientos	Empujando (e)	Jalando (j)	Observaciones
1	0.5 mm			
2	1.0 mm		59	Grietas en zona inferior de la col. izquierda
3	2.0 mm		48	
4	4.0 mm	15, 59, 62		(59) Grieta que corre a lo largo de junta inf.
5	7.0 mm	21, 18		
6	10.0 mm	12		Espesor máx. de grieta : 0.605 cm (e), 0.7 cm (j)
7	13.0 mm	12		Espesor máx. de grieta : 0.76 cm (e), 0.85 cm (j)
8	16.0 mm			Espesor máx. de grieta : 1.6 cm (e), 1.69 cm (j)
9	20.0 mm			Espesor máx. de grieta : 1.9 cm (e), 2.31 cm (j)

PUNTOS IMPORTANTES DE AGRIETAMIENTO MURO MS2
(Mortero 1:5)

Fase	Desplazamientos	Empujando (e)	Jalando (j)	Observaciones
1	0.5 mm			
2	1.0 mm	19		Primera fisura visible
3	2.0 mm	24	56	
4	4.0 mm	15	59	
5	7.0 mm	14	51	Espesor máx. de grieta : 0.6 cm
6	10.0 mm			Espesor máx. de grieta : 1.24 cm, gran desplazamiento de columna

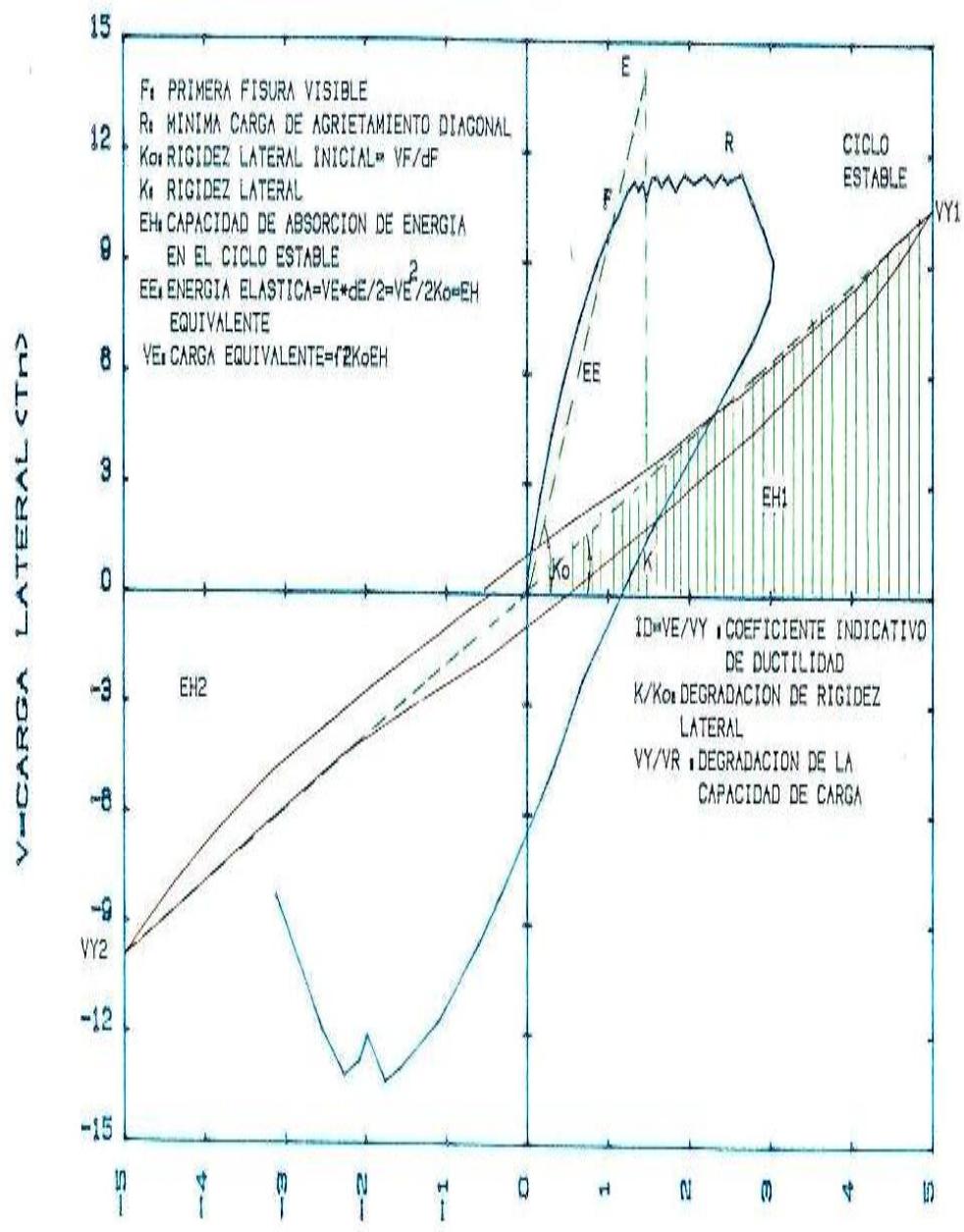
Luego de cada fase del ensayo, se fotografió el estado en que se encontraba el muro, los que presentaremos en un capítulo aparte

**TABLA N° 15^a: FILES GRABADOS PARA ELABORACIÓN
DE GRÁFICOS DISKETTES : PROYECTO SILLAR
(datos procesados)**

Nombre	Información	# Puntos
MS1i (i=1,...,13)	Lecturas provenientes de 13 canales para el muro de sillar 1 (mortero 1:8)	1264
MS2i (i=1,...,13)	Lecturas provenientes de 13 canales para el muro de sillar 2 (mortero 1:5)	1105
ECE 1X ECE 1Y	Envolventes de los ciclos estables para el muros MS1, en X e Y (desplazamiento vs. carga)	12
ECE 2X ECE 2Y	Envolventes de los ciclos estables para el muro MS2, en X e Y (desplazamiento vs. carga)	11
ECH 2X ECH 2Y	Envolventes de cargas máximas para el muro MS2, en X e Y (desplazamiento vs. carga)	9
ECM 1X ECM 1Y	Envolvente de cargas máximas para el muro MS1, en X e Y (desplazamiento vs. carga)	11
EDH 10X EDH 10Y	Envolvente de los desplaz. horizontales de base de cal izquierda, canal 10, muro MS2, X : desp., Y : carga	32
EDH 11X EDH 11Y	Envolvente de los desplaz. horizontales de base cal derecha, canal 11, muro MS2 X : desp., Y : carga	21
ERV 26X ERV 26Y	Envolvente de la deformación del refuerzo vertical de col. izquierda, canal 6, muro MS2, X : deformación; Y : carga lateral	29
ERV 27X	Envolvente de la deformación del refuerzo vertical de col. derecha, canal 7, muro MS2, X : deformación.; Y : carga lateral	22
M1K/K _o	Contiene relación K/K _o para muro MS1	9
M2K/k _o	Contiene relación K/K _o para muros MS2	6
DESPLA	File que contiene los 9 desplazamientos correspondientes a cada una de las 9 fases de ensayo	9
MS1 ID MS2 ID	Variación del Coef. Indicativo de la ductilidad FD para los muros MS1 y MS2	7 4
AEMS1	Amortiguamiento equivalente en el muro M9S1	9
AEMS2	Amortiguamiento equivalente en el muro MS2	6
RDEMS 1	Relación de disipac. de energía en el muro MS1	9
RDEMS 2	Relación de disipac. de energía en el muro MS2	6
MS 210M	MS210 modificada, curva desplazada al origen fase 6	
MS 22M	MS22 modificada, curva desplazada al origen fase 6	
MS 25M	MS25 modificada, curva desplazada al origen fase 6	
MS 15M	MS15 modificada, curva desplazada al origen fase 9	
MS 16M	MS16 modificada, curva desplazada al origen fase 9	
DCC MS1	Degrada. de la capacidad de carga en el muro MS1	7
DCC MS2	Degrada. de la capacidad de carga en el muro MS2	4

**TABLA N° 15^b: LÍMITES DE LAS LECTURAS OBTENIDAS
POR LOS TRECE CANALES DE CONTROL PARA LOS CICLOS INICIALES
Y CICLOS ESTABLES DE CADA FASE**

Fase	MURO	MS1	MURO	MS2
	Lecturas Primer Ciclo	Lecturas Ciclo Estable	Lecturas Primer Ciclo	Lecturas Ciclo Estable
1	1 - 64	65 - 123	1 - 83	146 - 199
2	124 - 198	199 - 248	200 - 266	267 - 337
3	249 - 305	306 - 349	338 - 415	416 - 487
4	349 - 419	452 - 494	488 - 571	639 - 711
5	495 - 554	643 - 672	712 - 774	834 - 909
6	673 - 750	812 - 864	910 - 966	1023 - 1105
7	865 - 934	935 - 987		
8	988 - 1047	1101 - 1127		
9	1128 - 1173	1206 - 1264		



d=DES. LATERAL (mm)

FIG. 17a.- DEFINICIONES (Ejemplo)

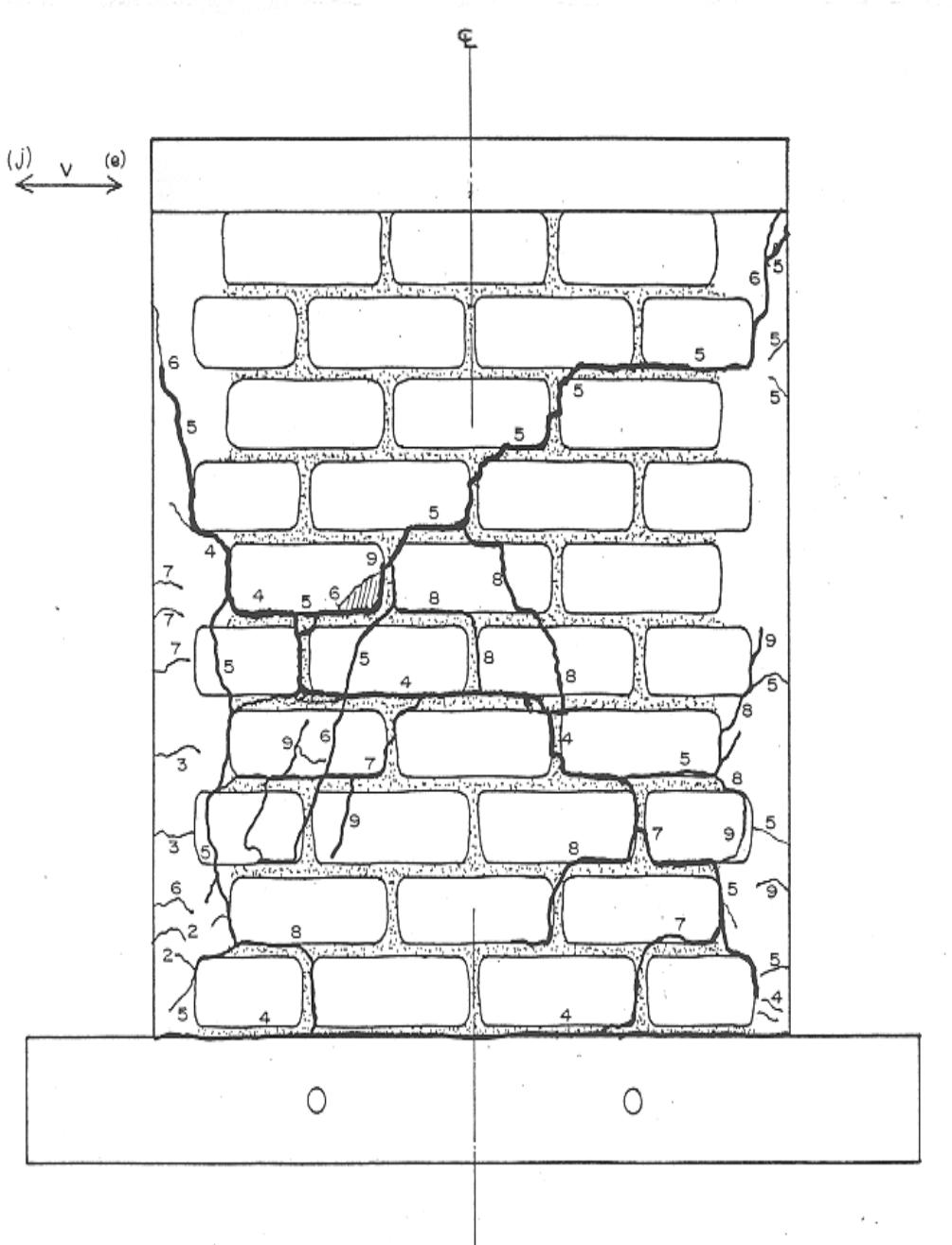


Fig. 18 Estado final de agrietamiento muro MS1 (mortero 1:8)

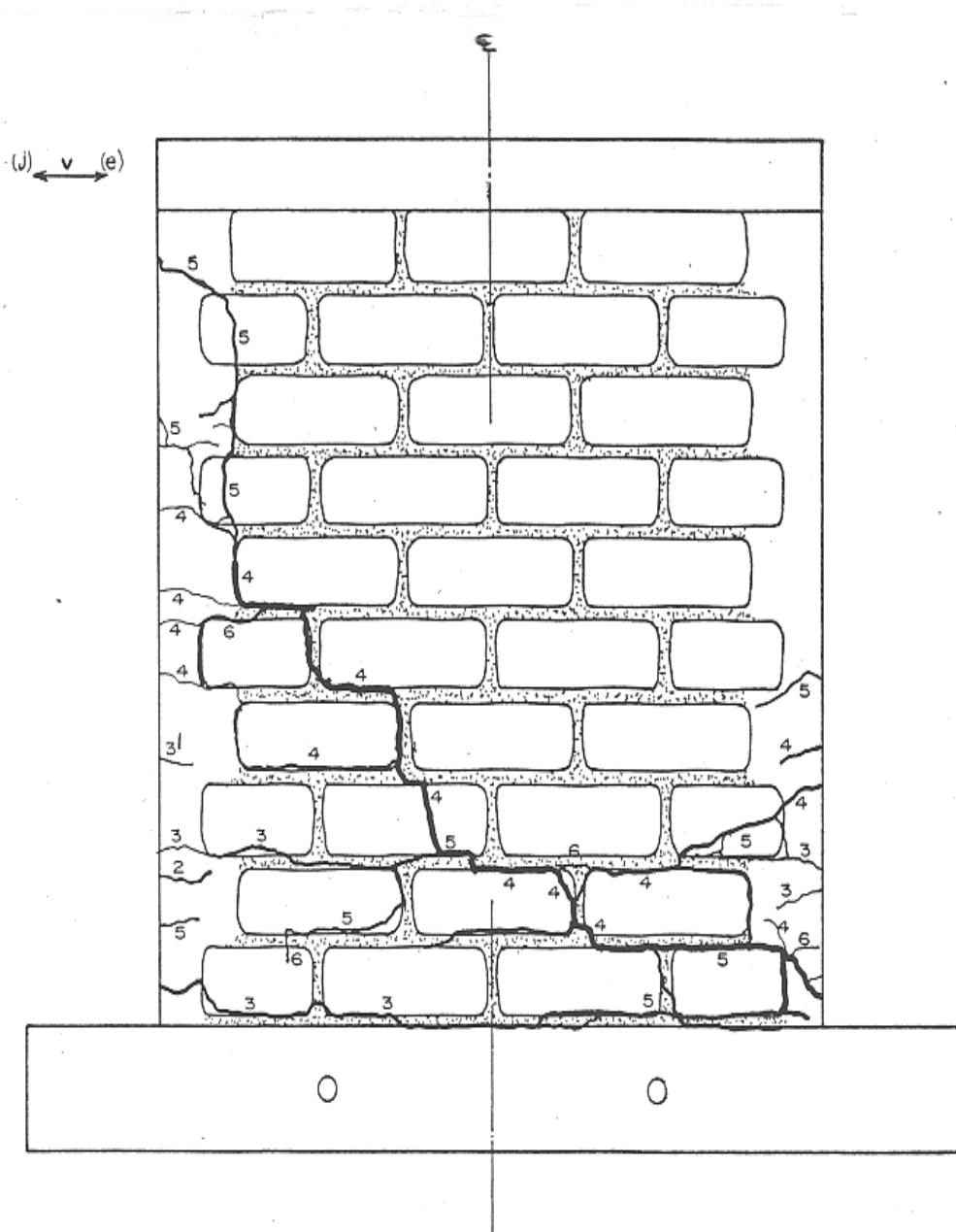


Fig. 19 Estado final de agrietamiento muro MS2 (mortero 1:5)

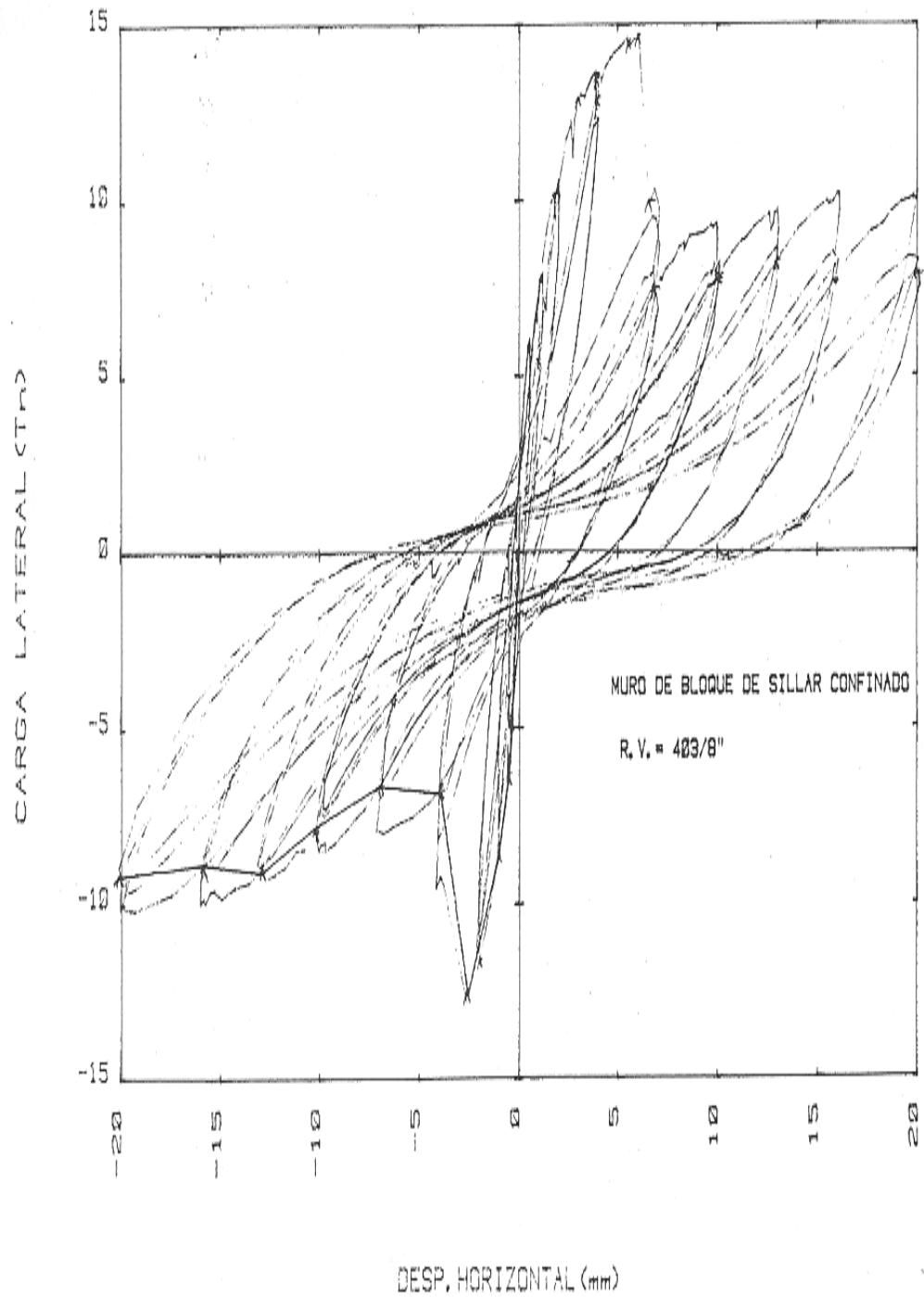


FIG. 20.- MURO MS1-MORTERO 1:8

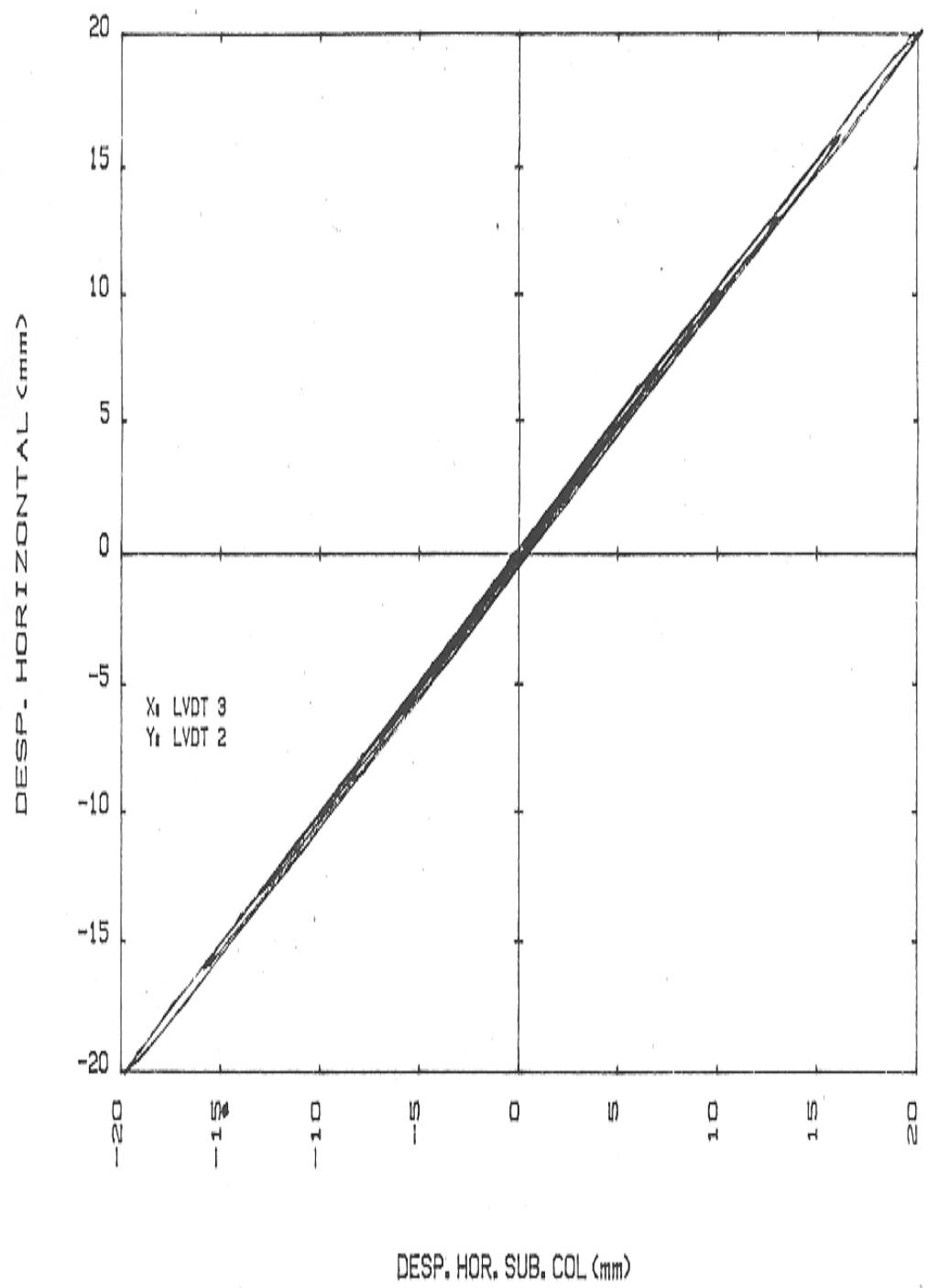


FIG. 21.- DESP. HOR. vs. DESP. HOR. SUP. COL. -MS1

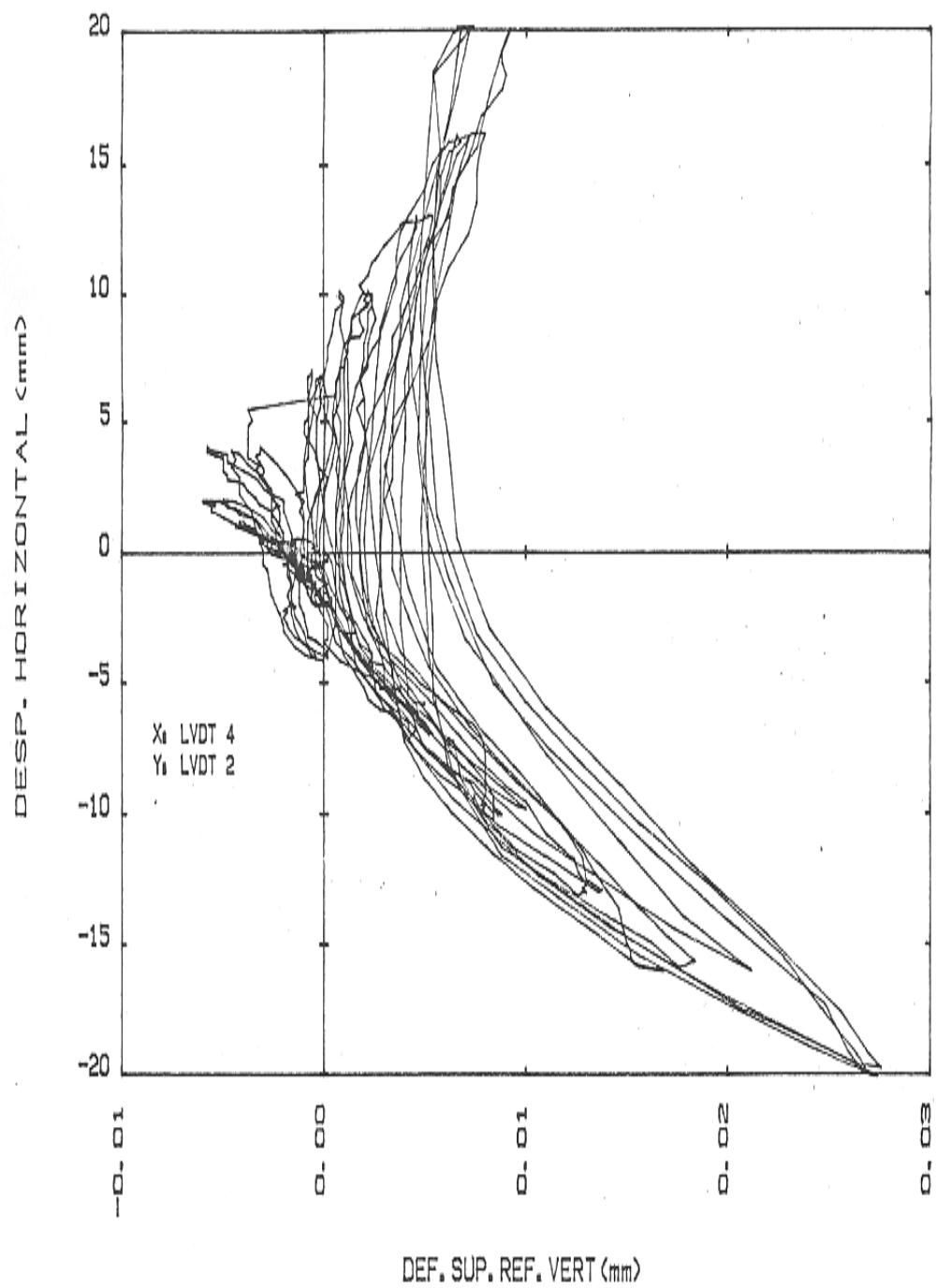


FIG. 22.- DESP. HOR. vs. DEF. SUP. REF. VERT. -MS1

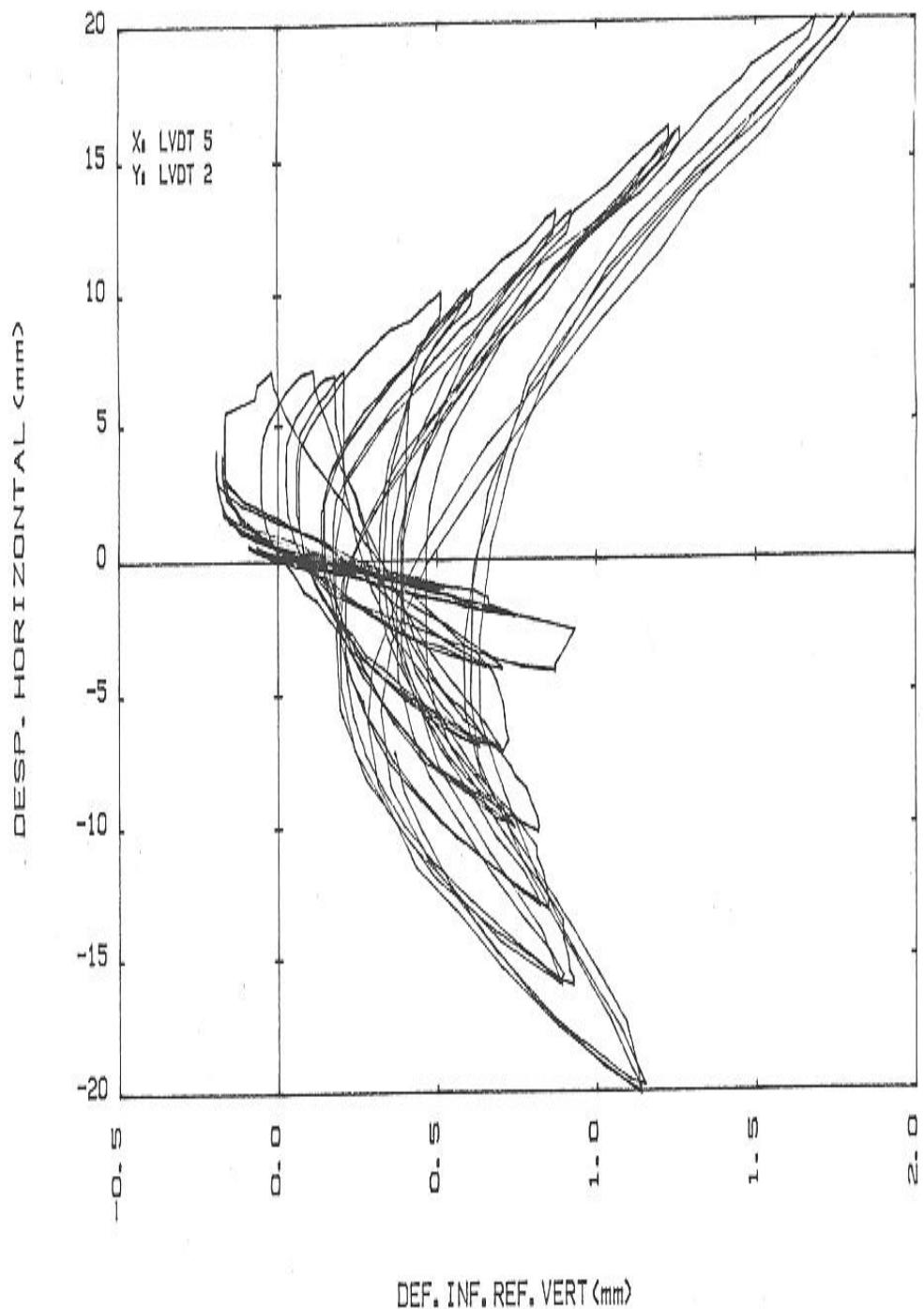


FIG. 23.- DESP. HOR. vs. DEF. INF. REF. VERT. -MS1

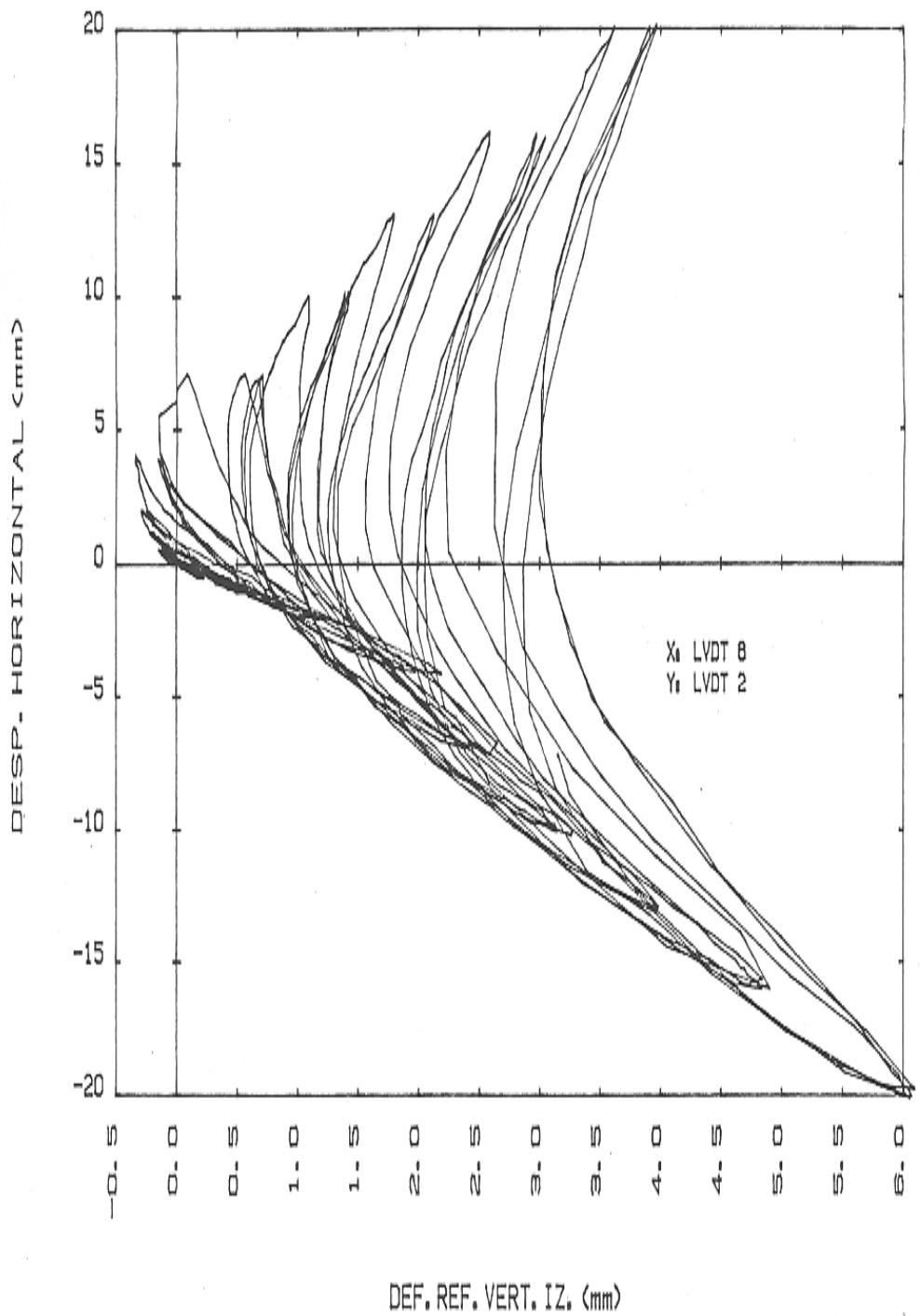


FIG. 24.- DESP. HOR. vs. DEF. REF. VERT. IZ. -MS1

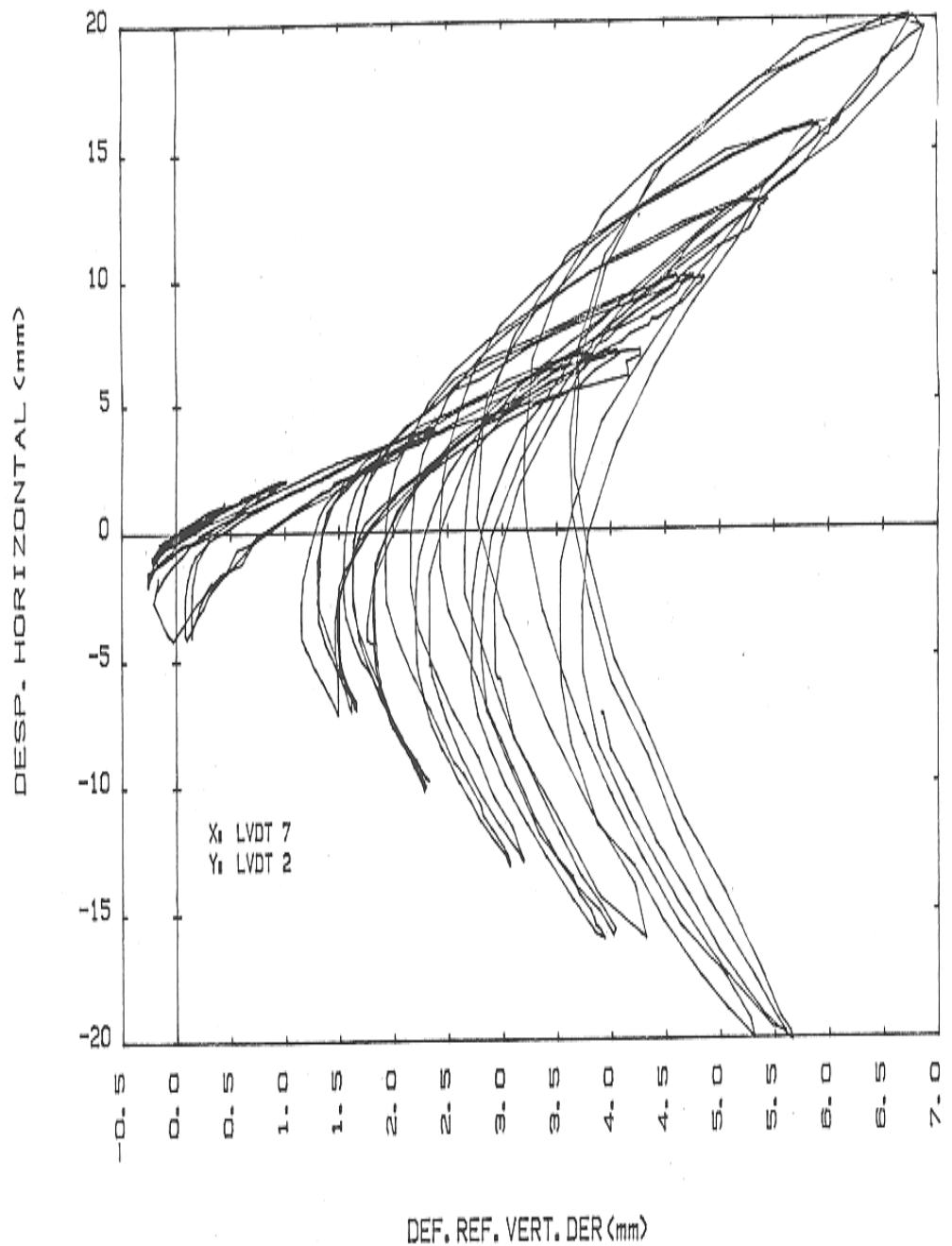


FIG. 25.- DESP. HOR. vs. DEF. REF. VERT. DER. -MS1

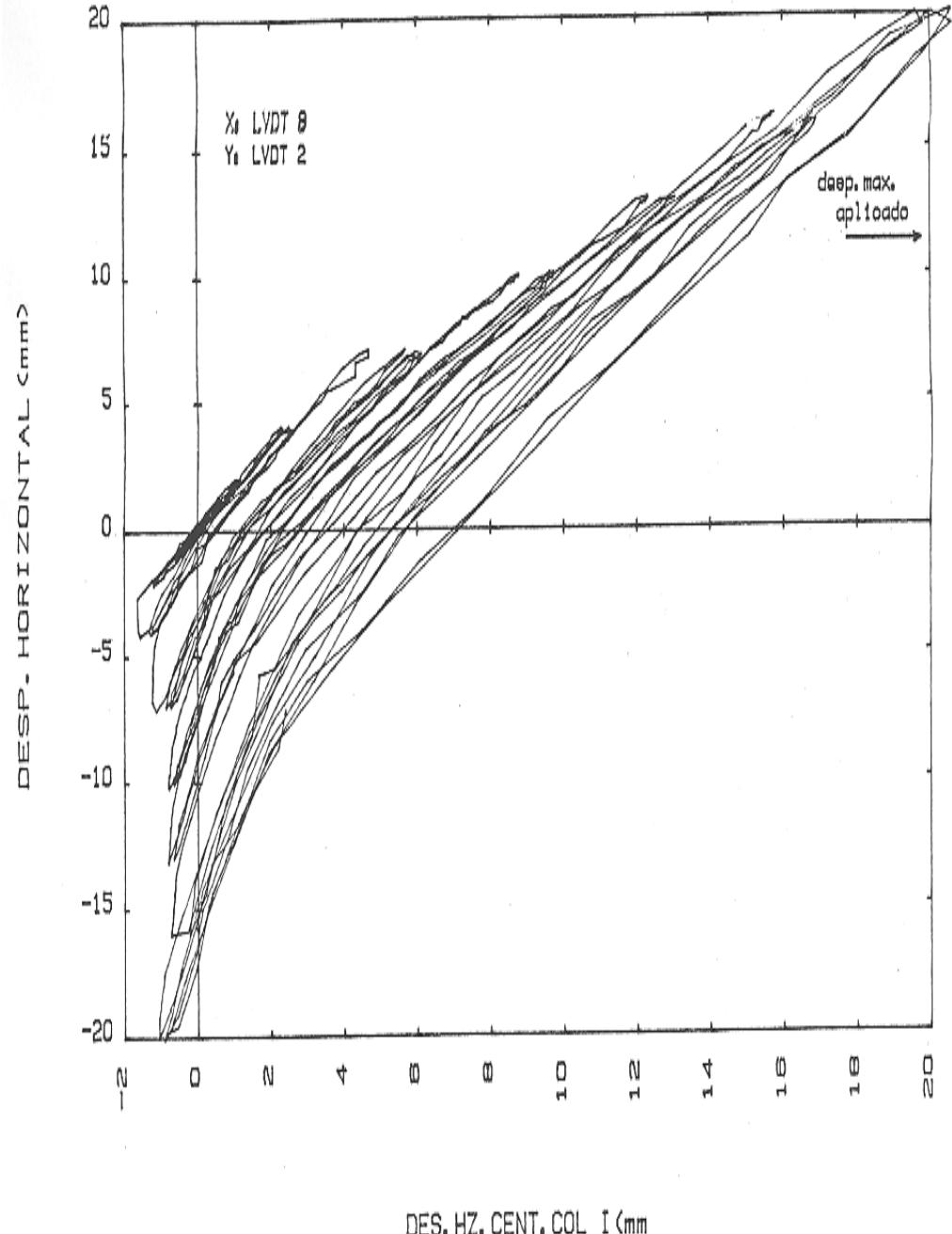


FIG. 26.- DESP. HOR. vs. DESP. HOR. CENT. COL. IZ. -MS1

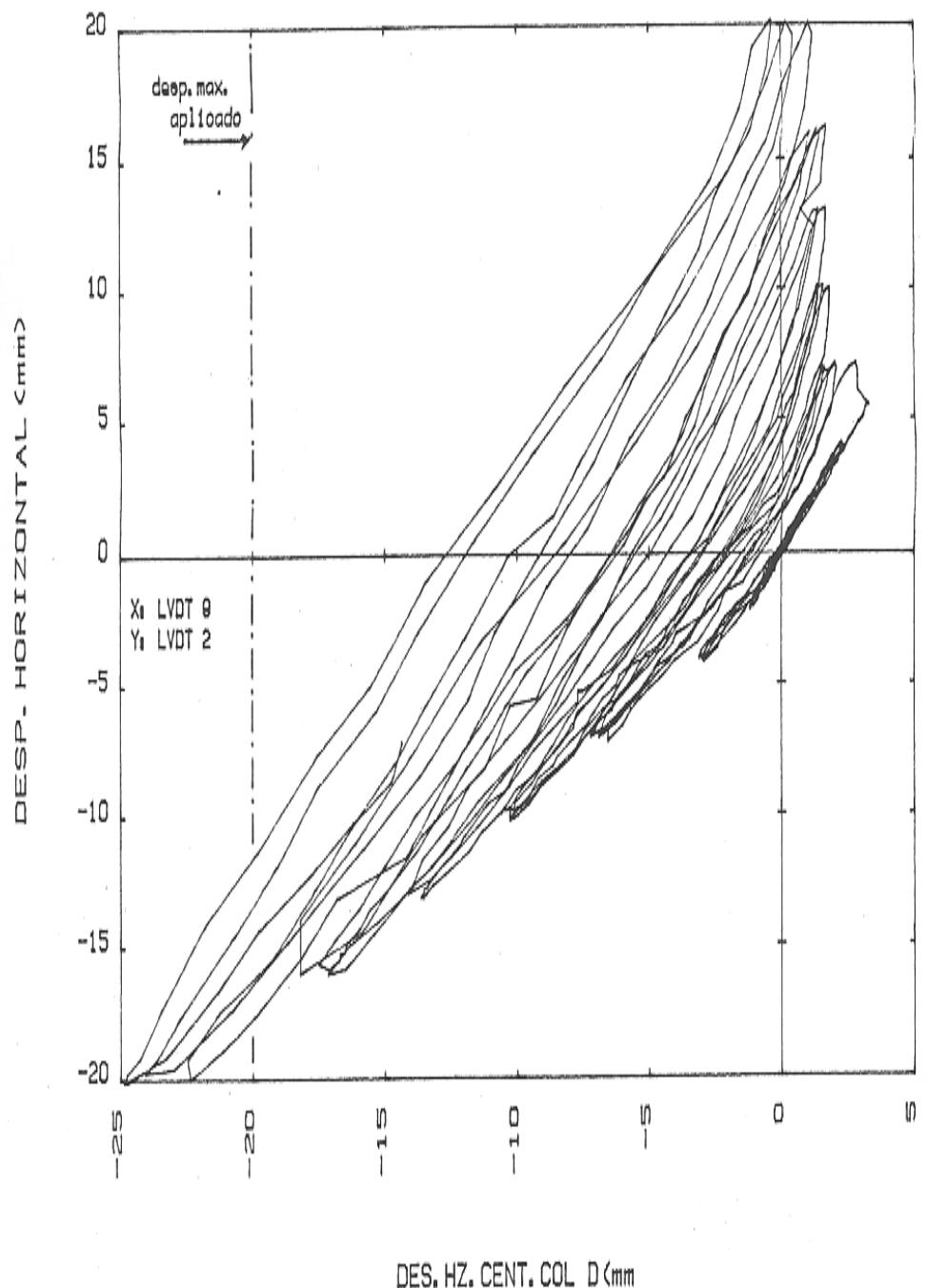


FIG. 27.- DESP. HOR. vs. DESP. HOR. CENT. COL. DER. -MS1

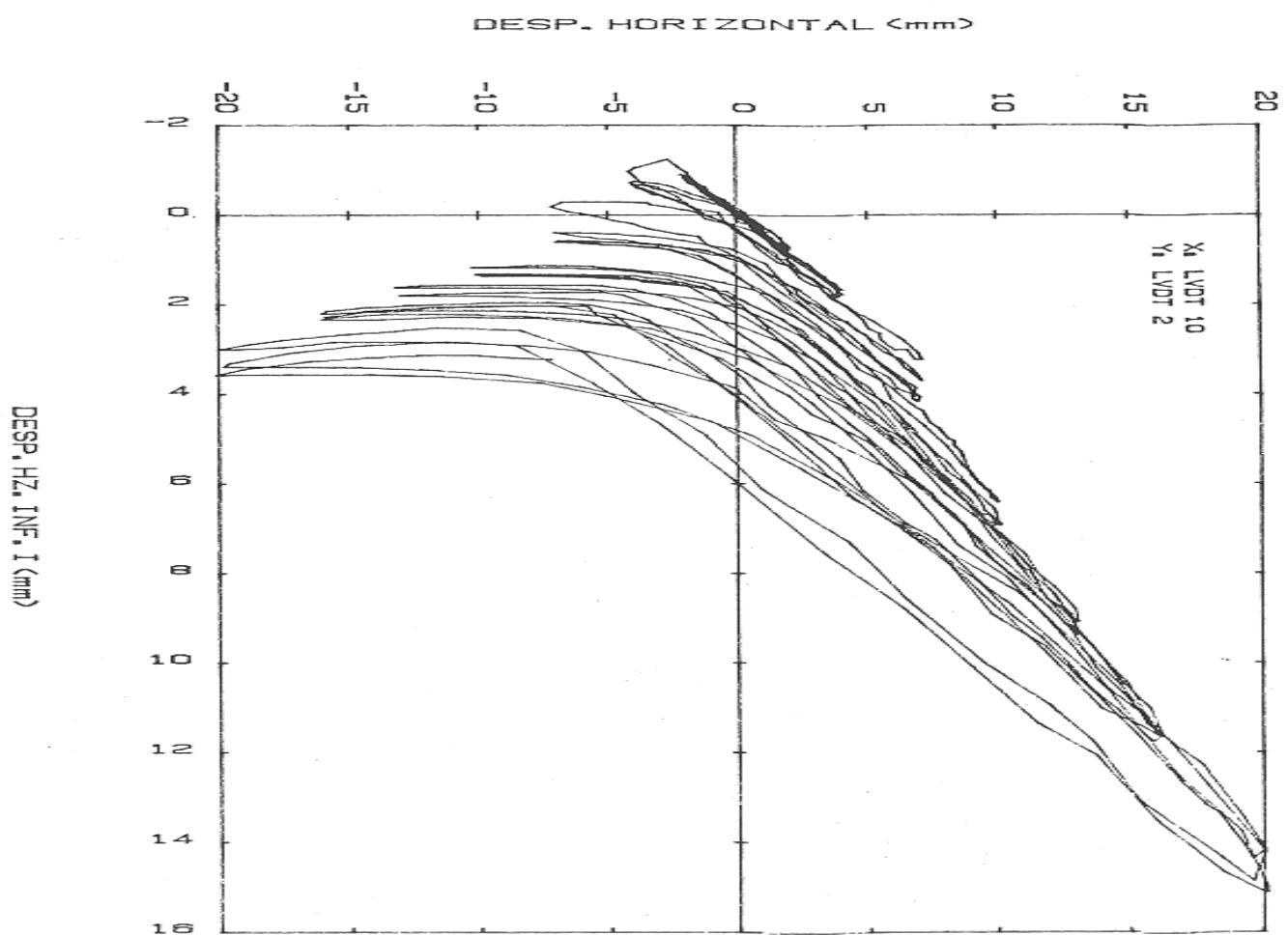


FIG. 28. DESP. HOR. vs. DESP. HOR. INF. IZ. -MSI

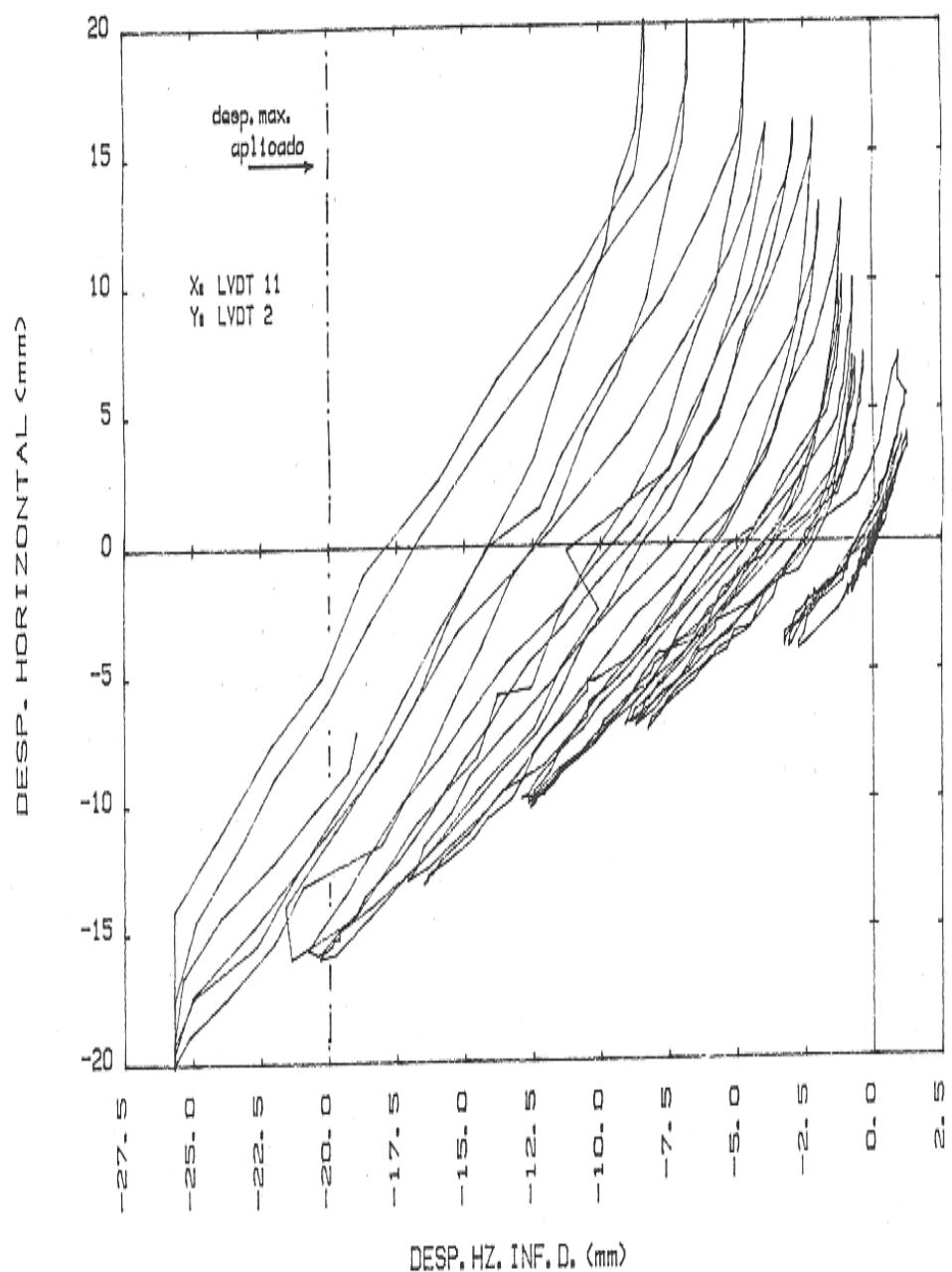


FIG. 29.- DESP. HOR. vs. DESP. HOR. INF. DER. -MS1

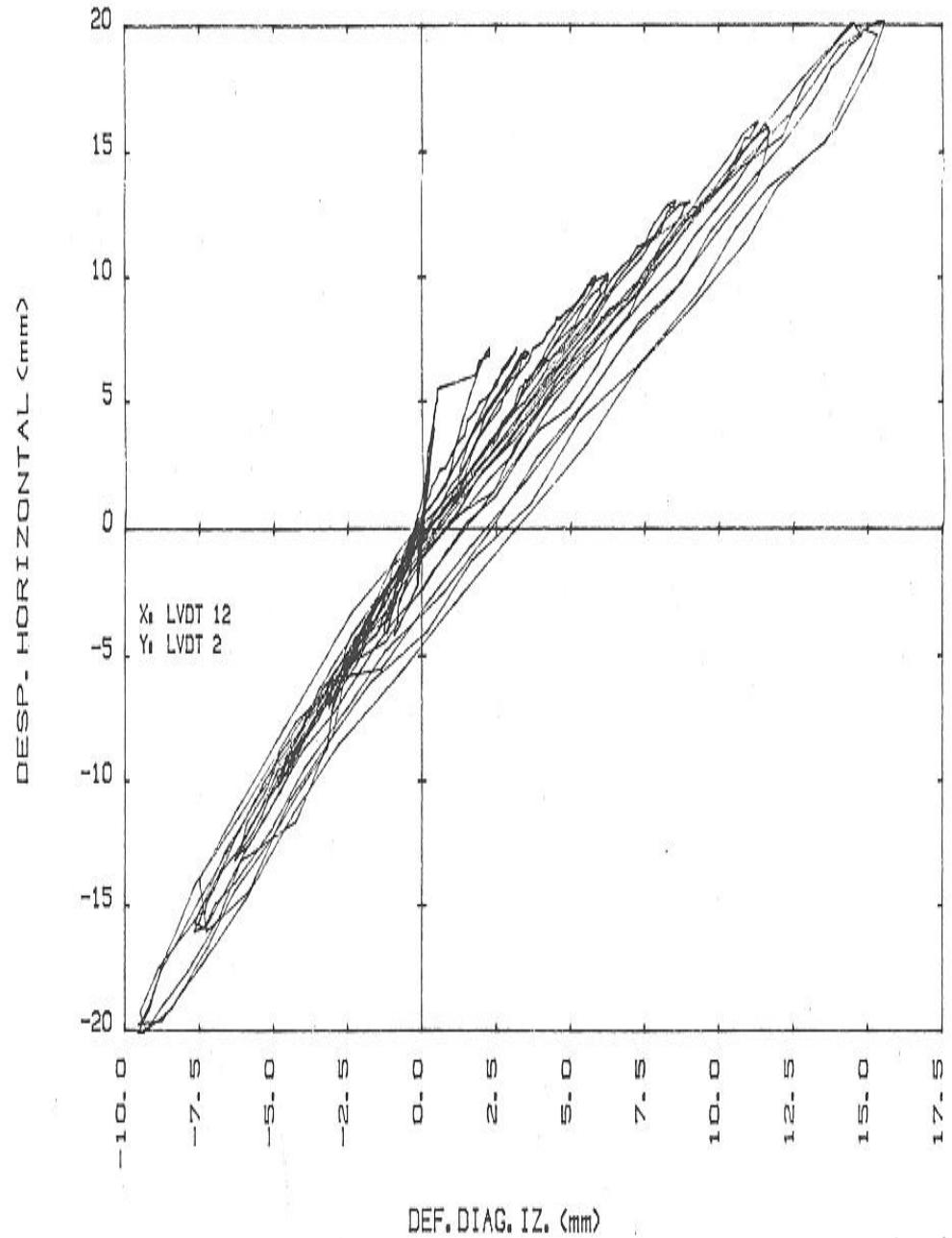


FIG. 30.- DESP. HOR. vs. DEF. DIAG. IZ. -MS1

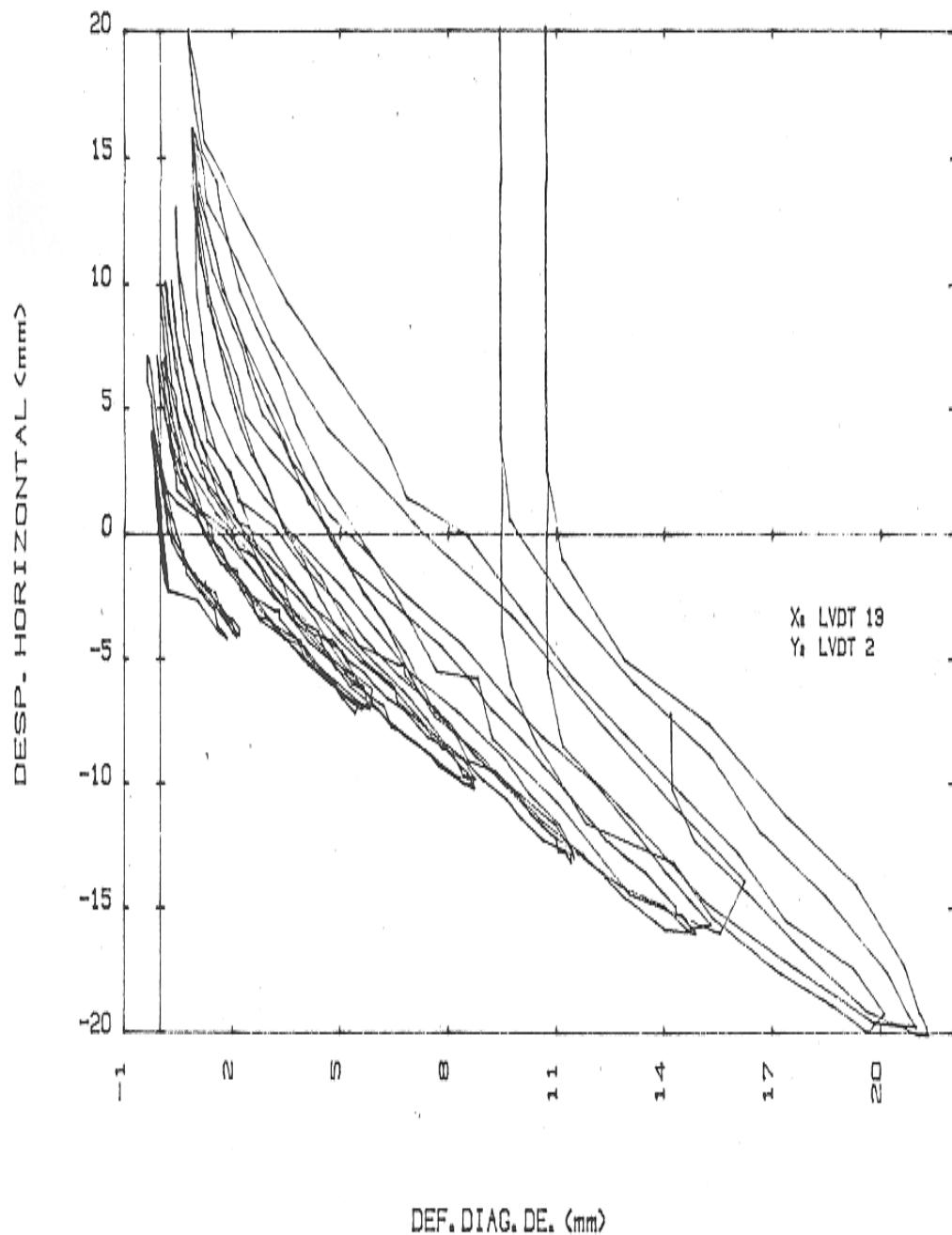


FIG. 31.- DESP. HOR. vs. DEF. DIAG. DER. -MS1

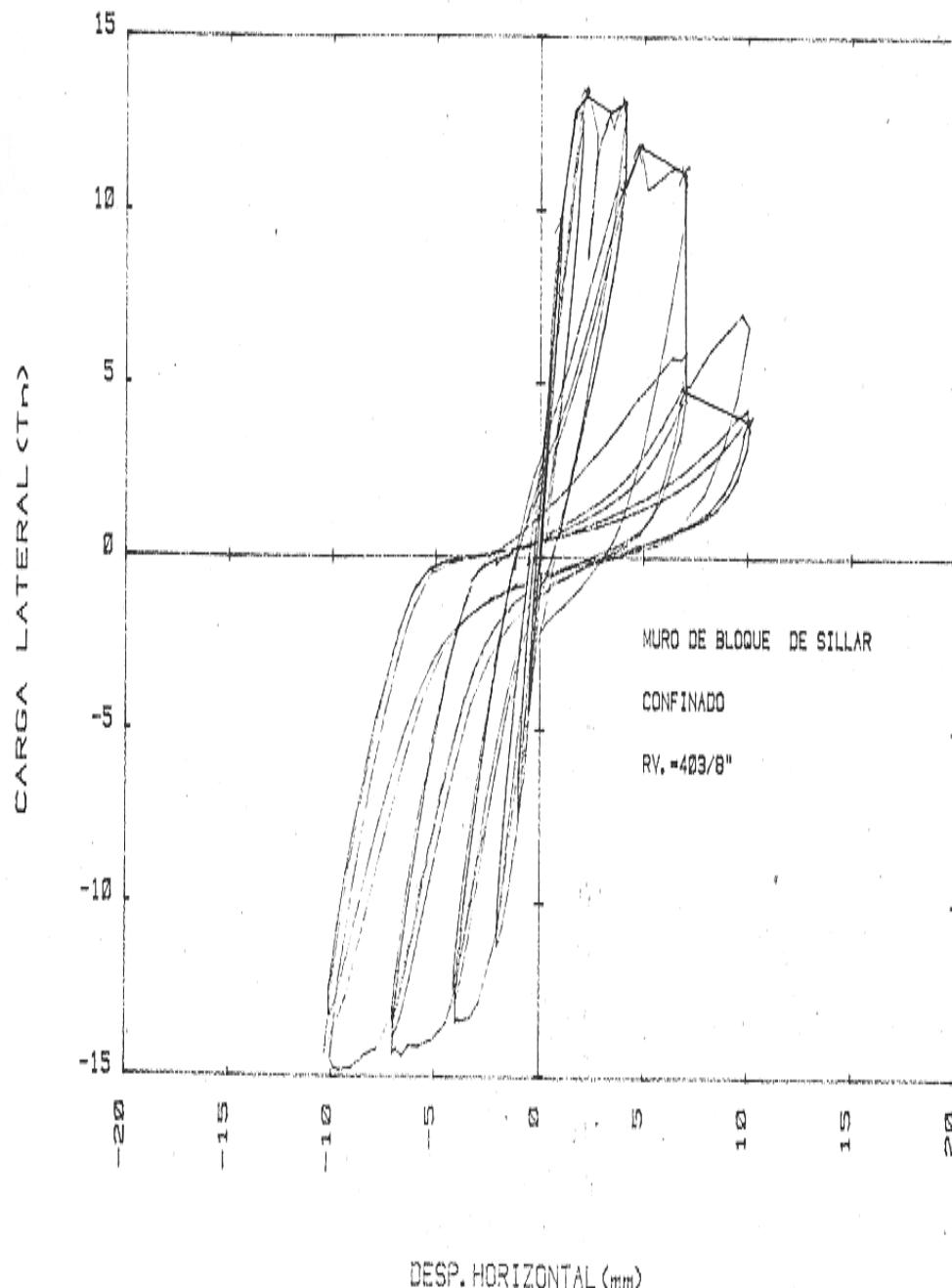


FIG. 32.- MURO MS2-MORTERO 1:5

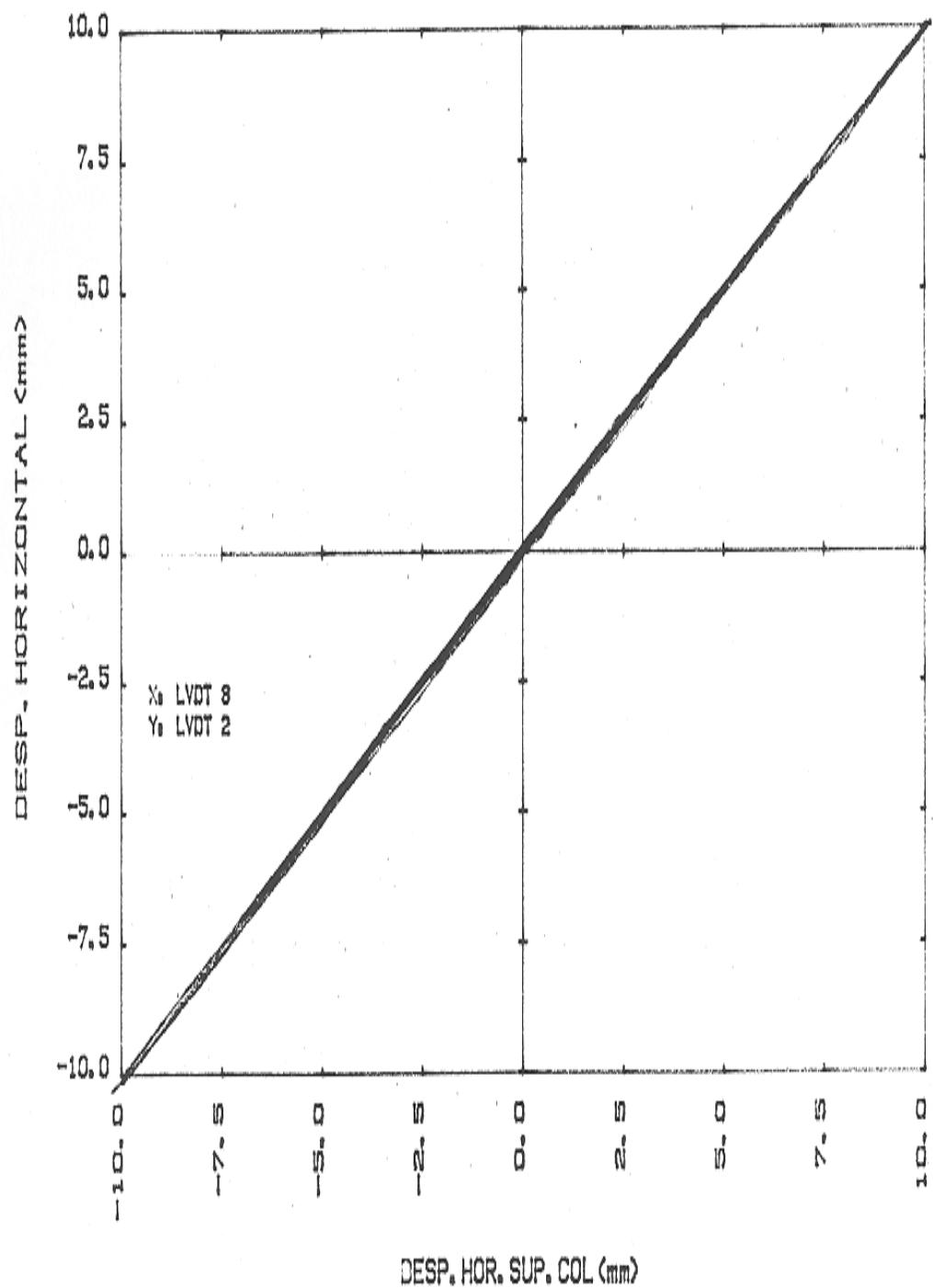


FIG. 33.- DESP. HOR. vs. DESP. SUP. COL. -MS2

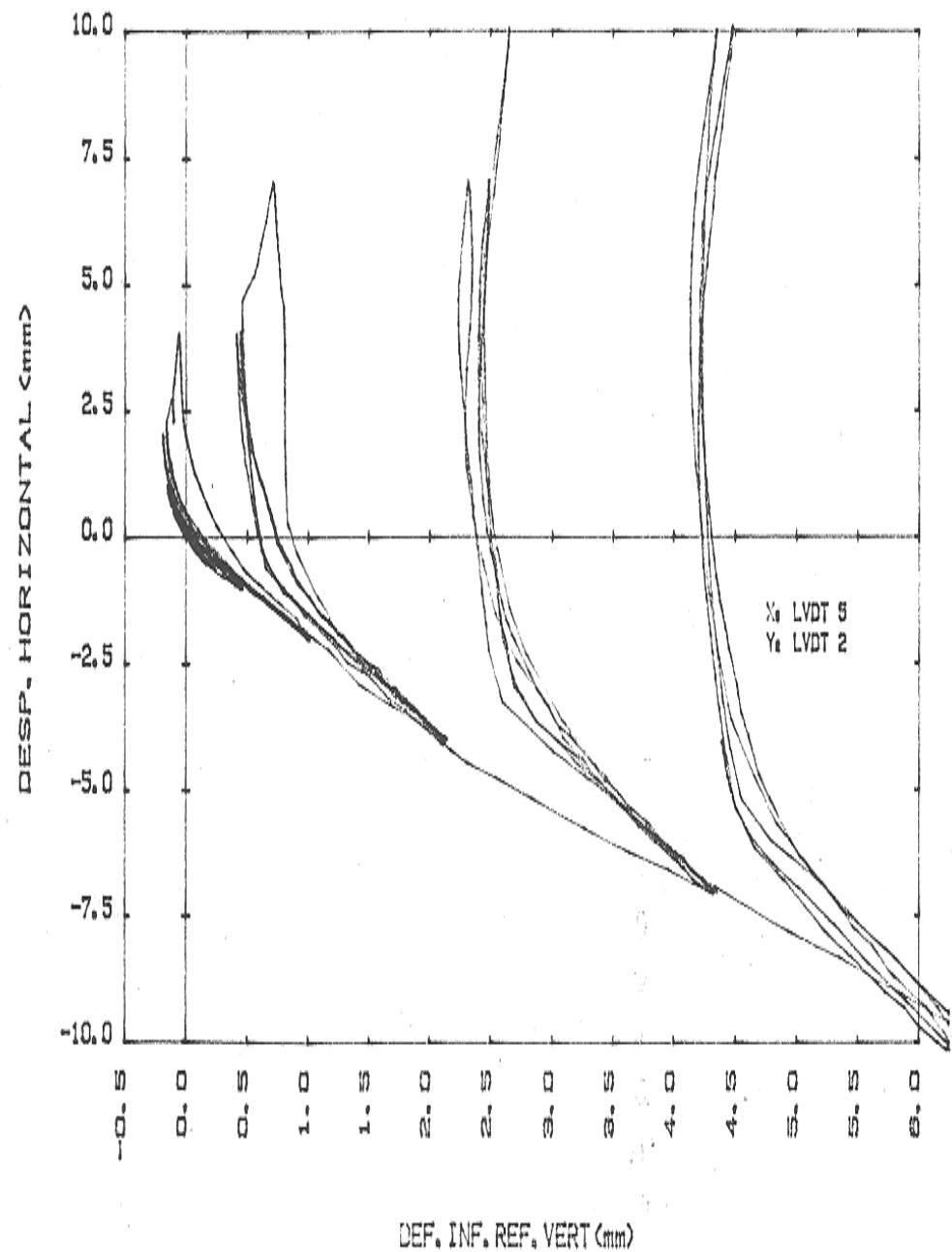


FIG. 34.- DESP. HOR. vs. DEF. INF. REF. VERT. -MS2

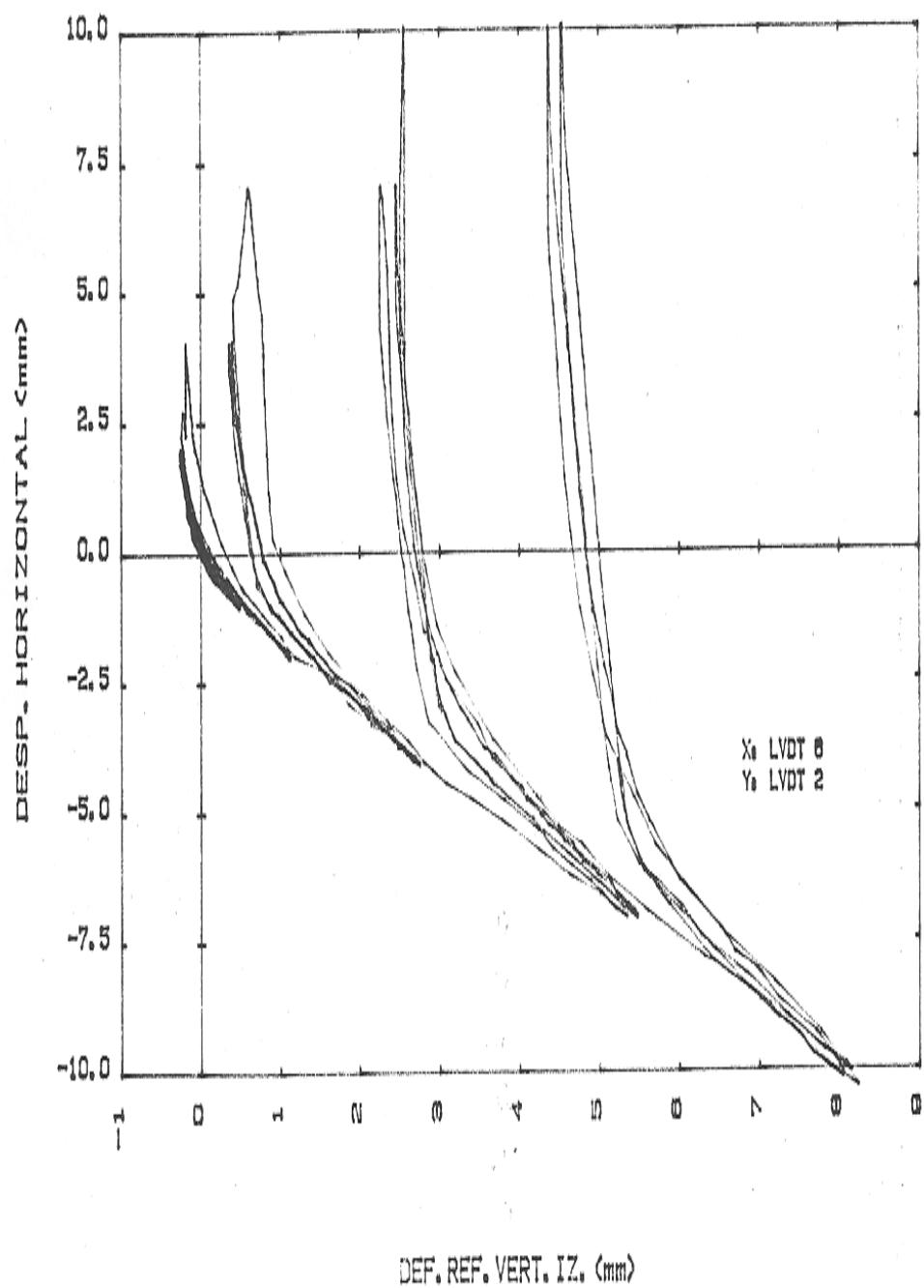


FIG. 35.- DESP. HOR. vs. DEF. REF. VERT. IZ. -MS2

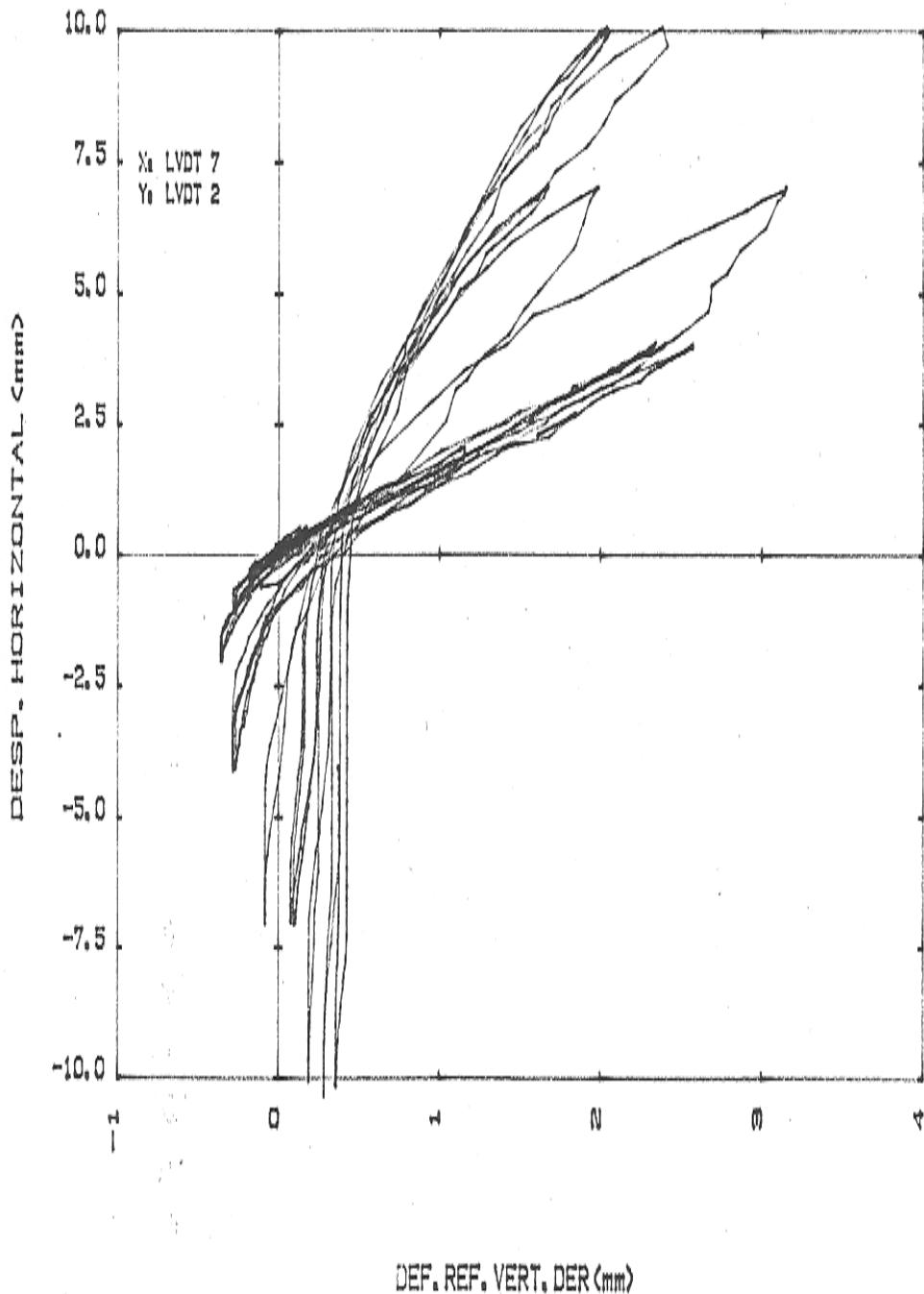


FIG. 36.- DESP. HOR. vs. DEF. REF. VERT. DER. -MS2

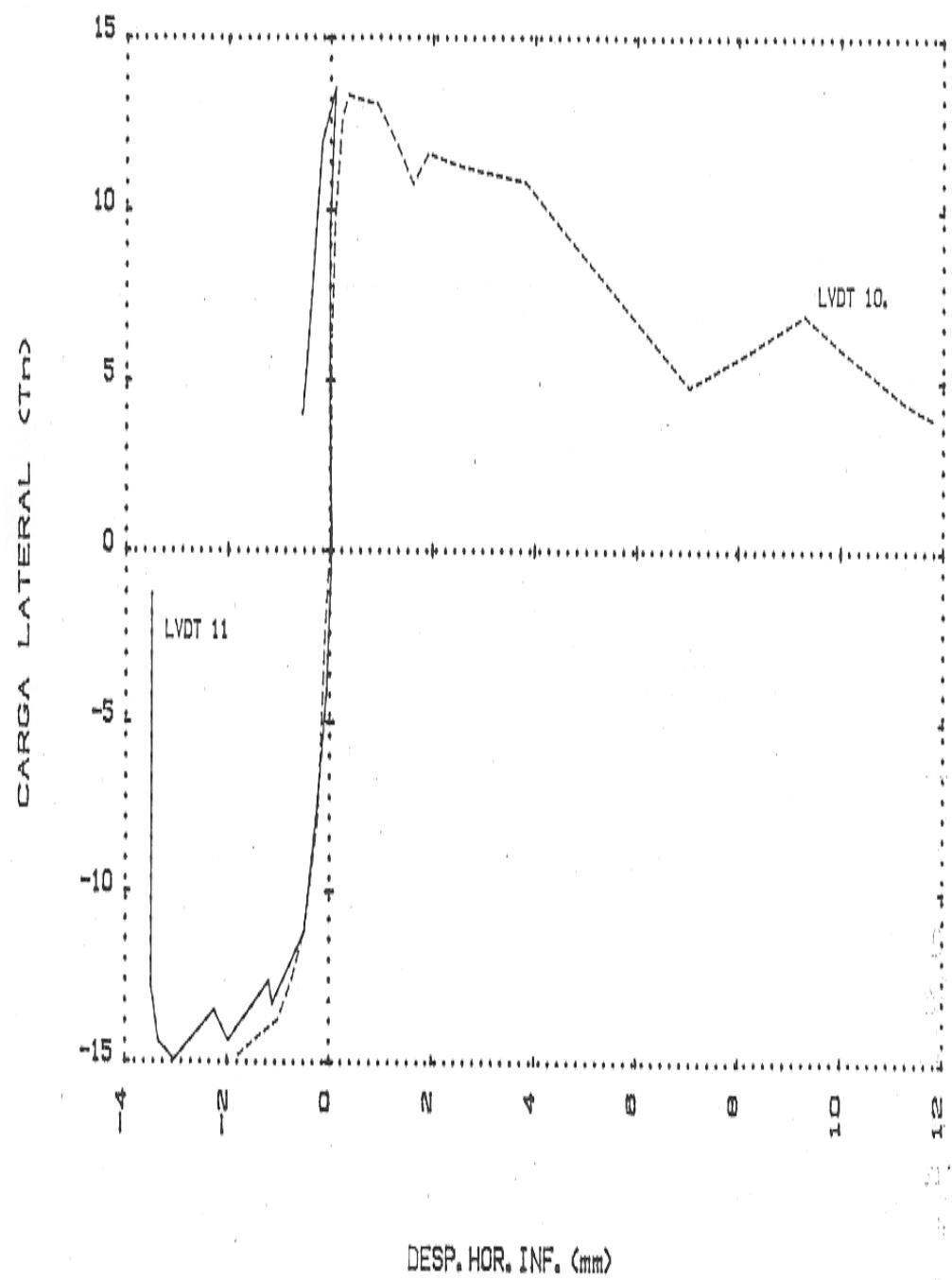


FIG. 37.- ENVOLVENTE DEL DESP. HOR. INF. EN COL. MS2

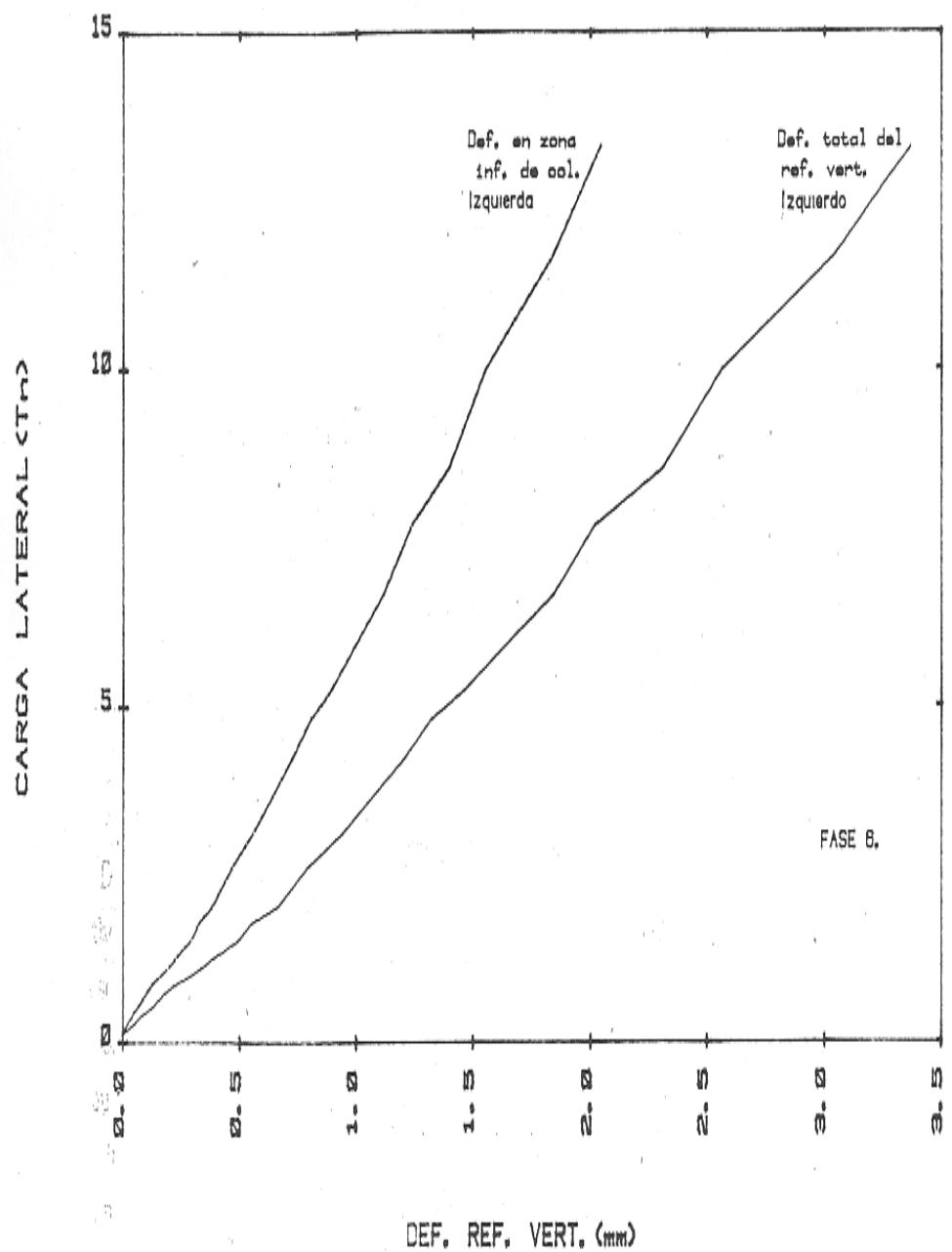


FIG. 38.- DEFORMAC. DEL REF. VERTICAL - MURO MS2

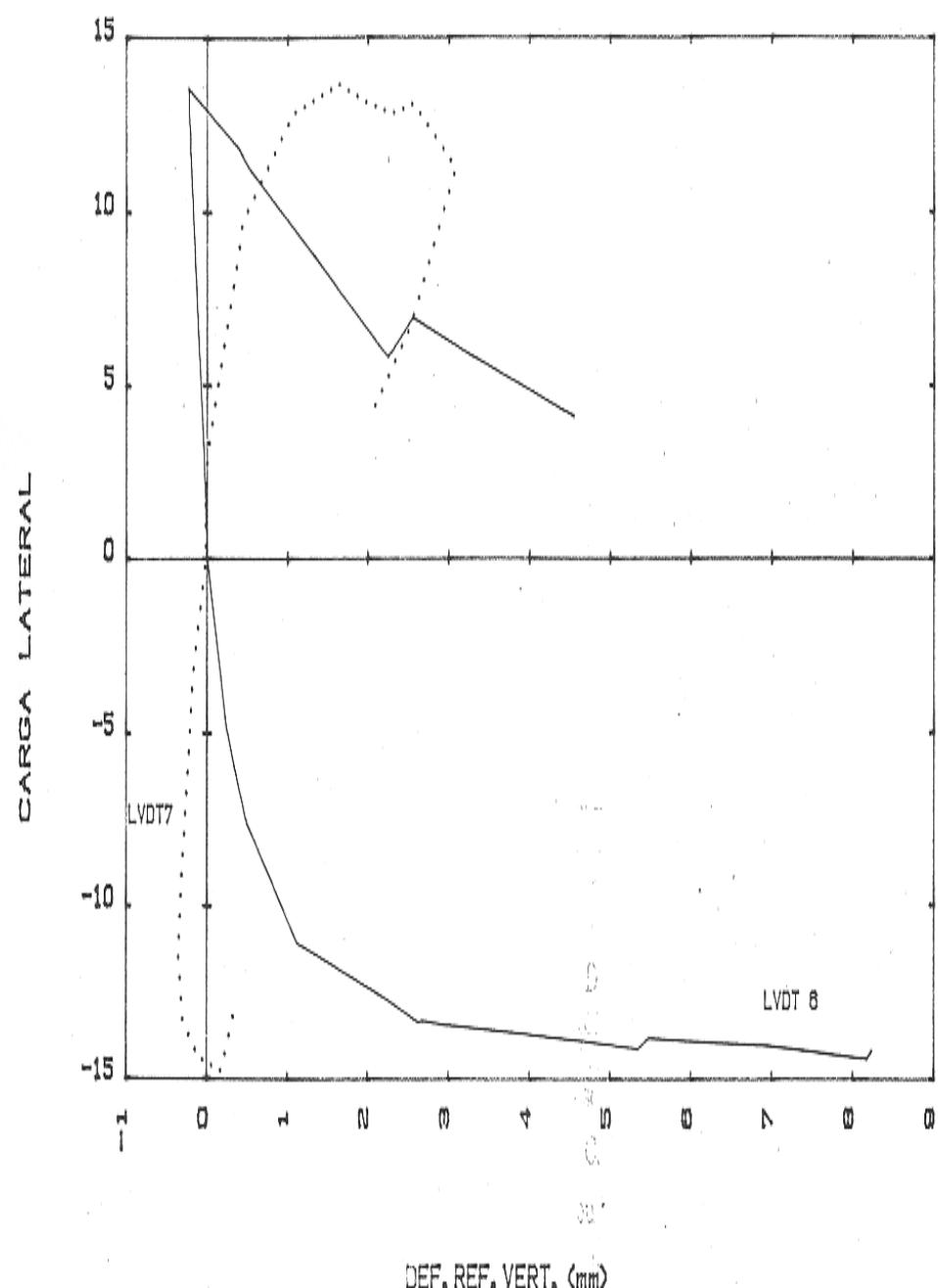


FIG. 39.- ENVOLVENTE DE LA DEF. DEL REF. VERT. MS2

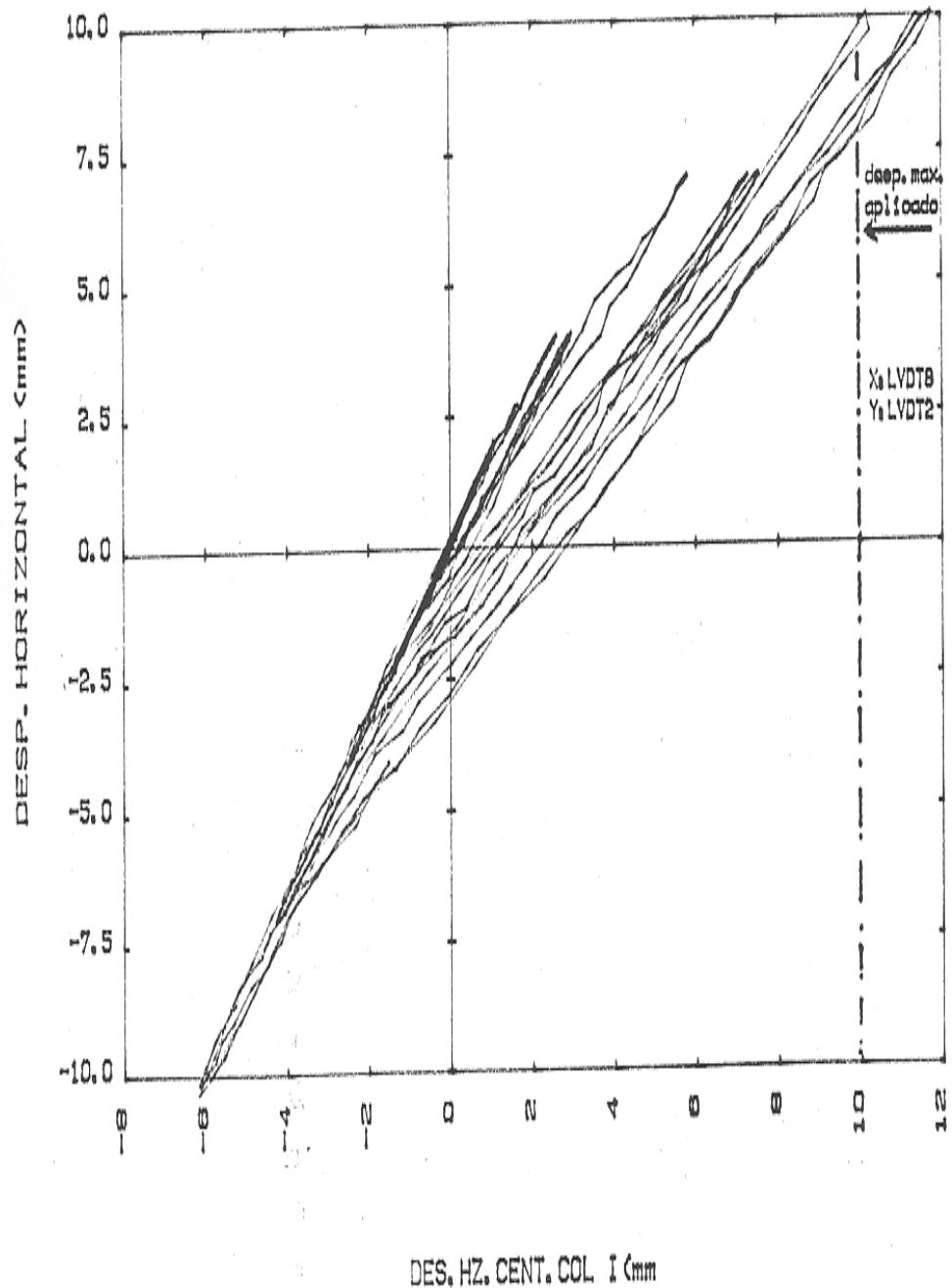


FIG. 40.- DESP. HOR. vs. DESP. HOR. CENT. COL. IZ. -MS2

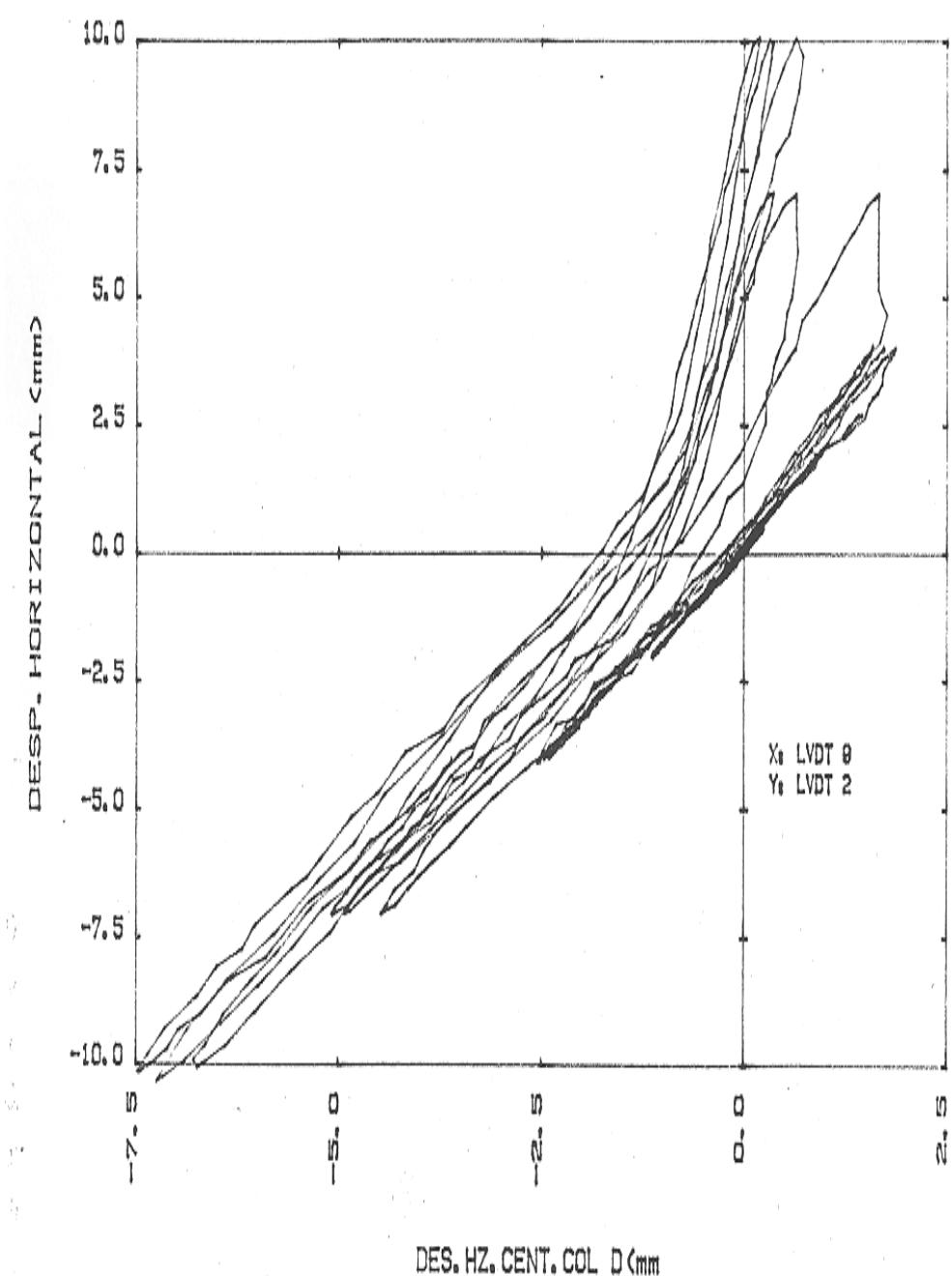


FIG. 41.- DESP. HOR. vs. DESP. HOR. CENT. COL. DER. -MS2

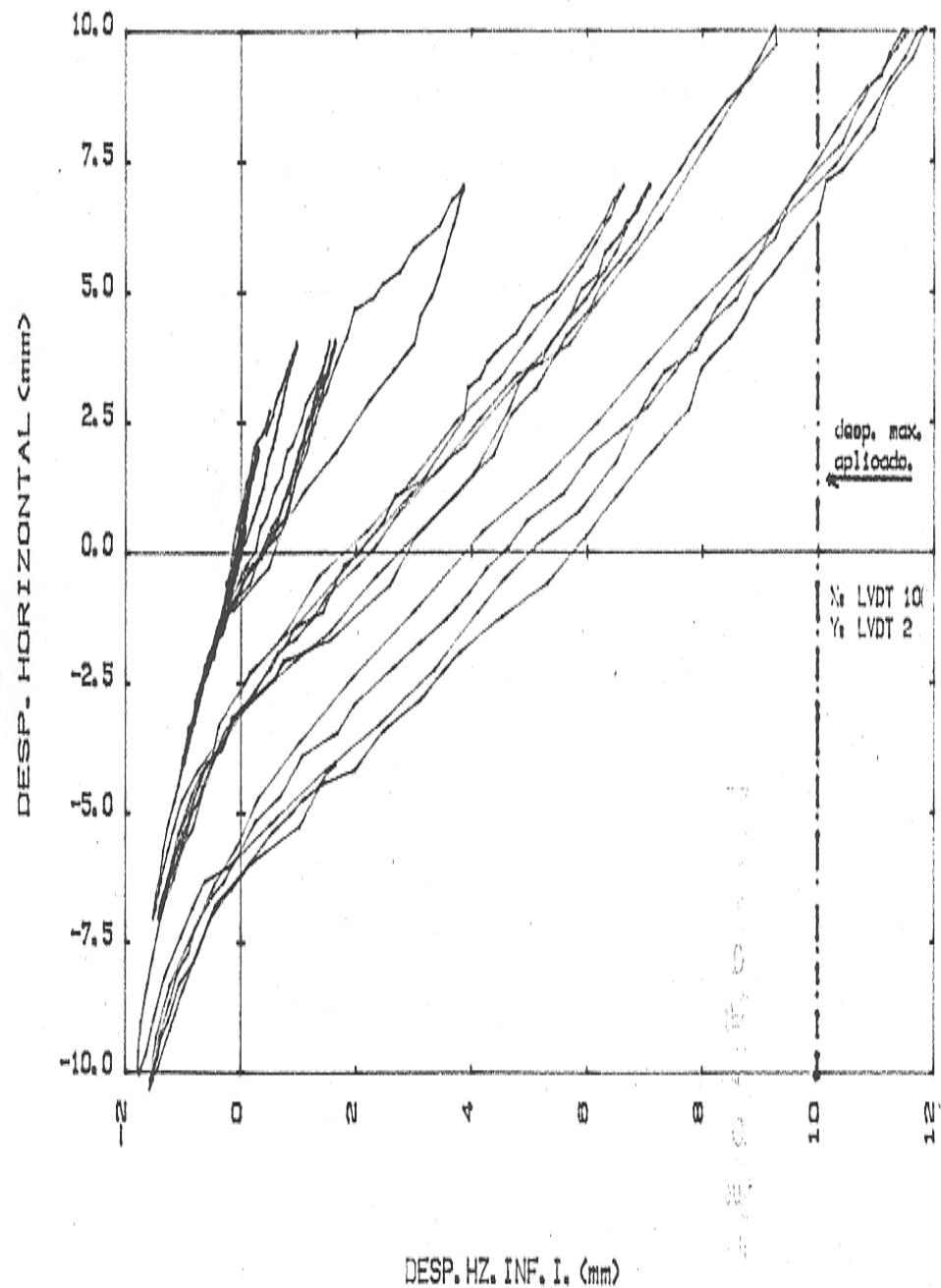


FIG. 42.- DESP. HOR. vs. DESP. HOR. INF. IZ. -MS2

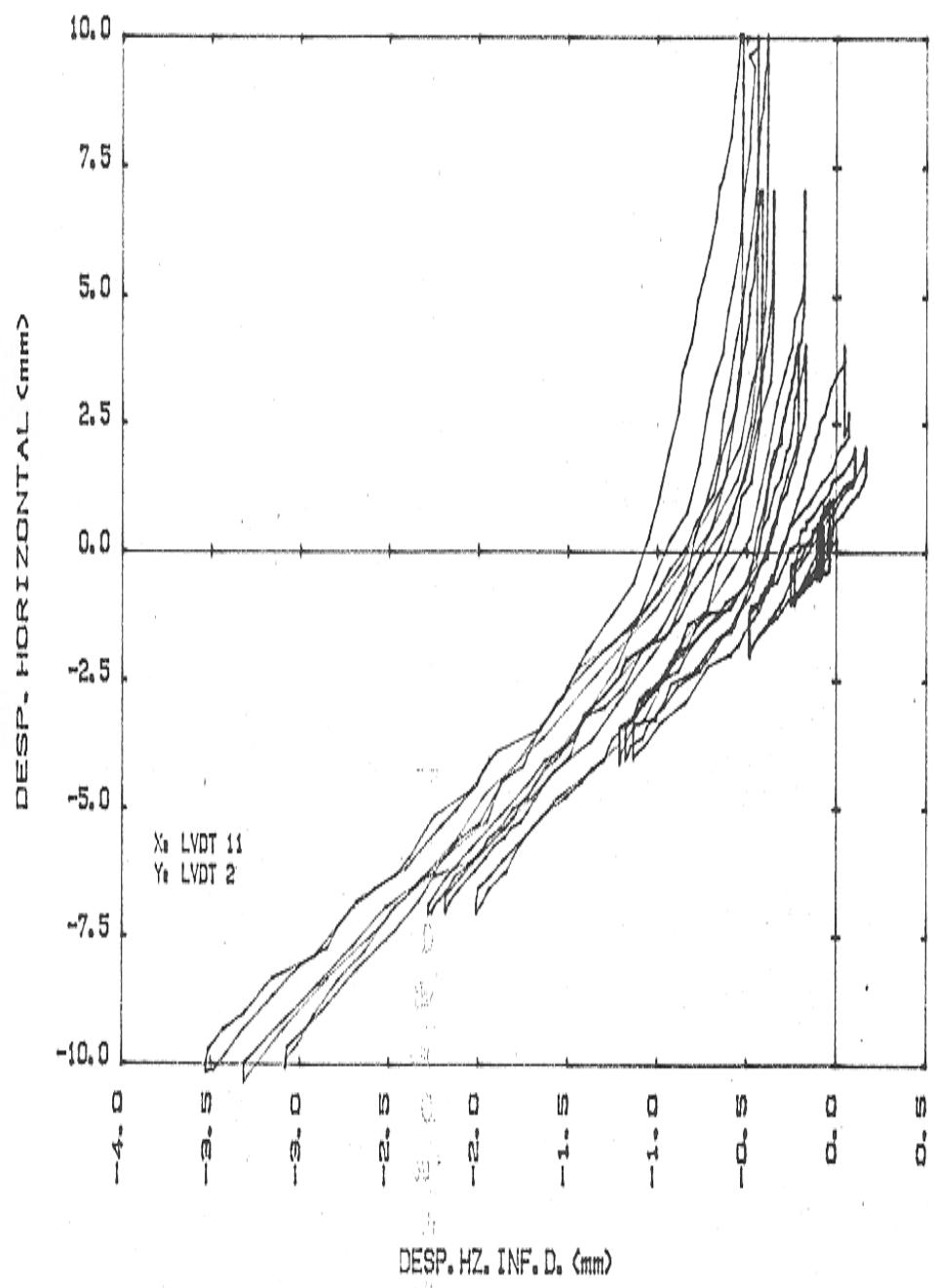


FIG. 43.- DESP. HOR. vs. DESP. HOR. INF. DER. -MS2

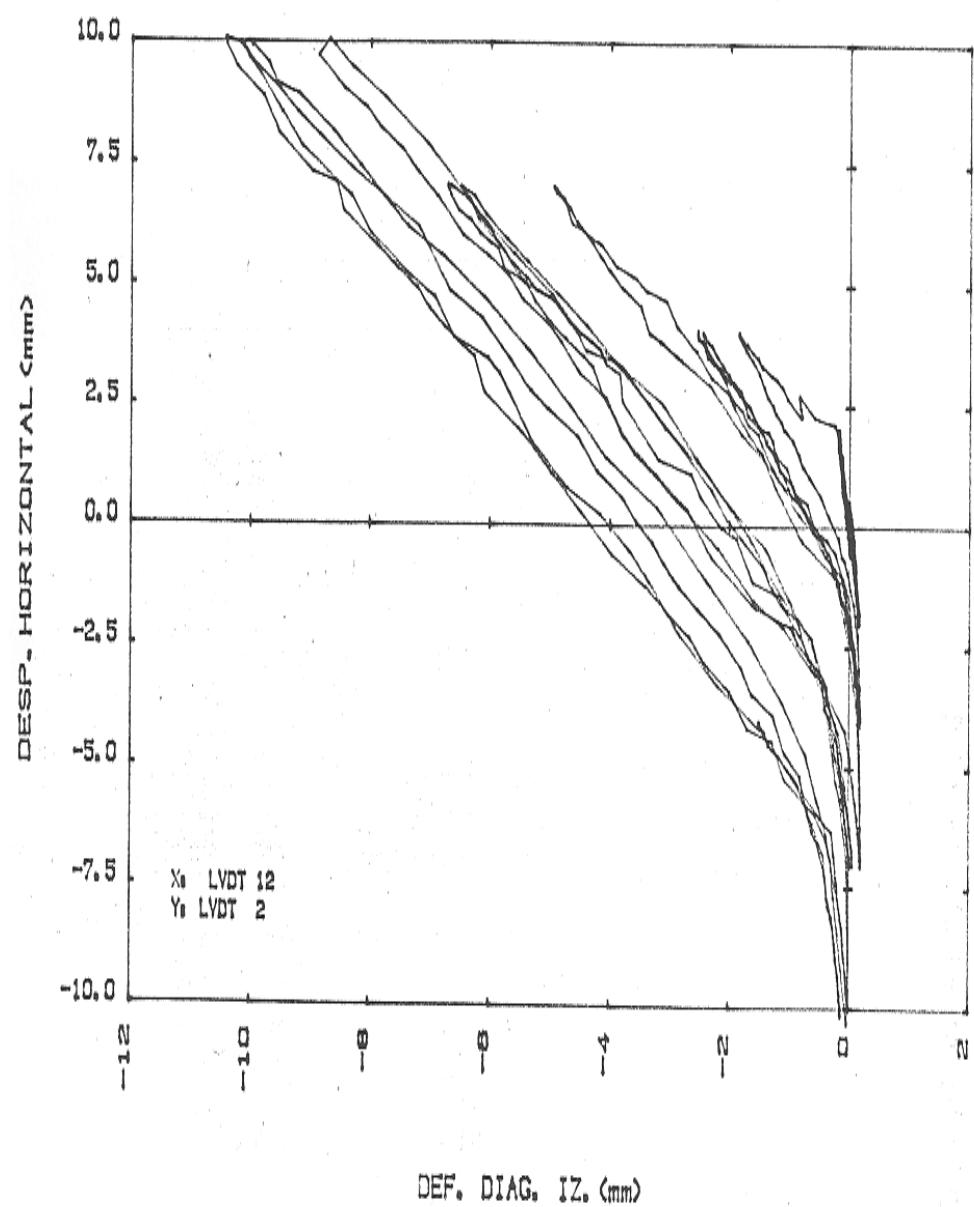


FIG. 44. - DESP. HOR. vs. DEF. DIAG. IZ. -MS2

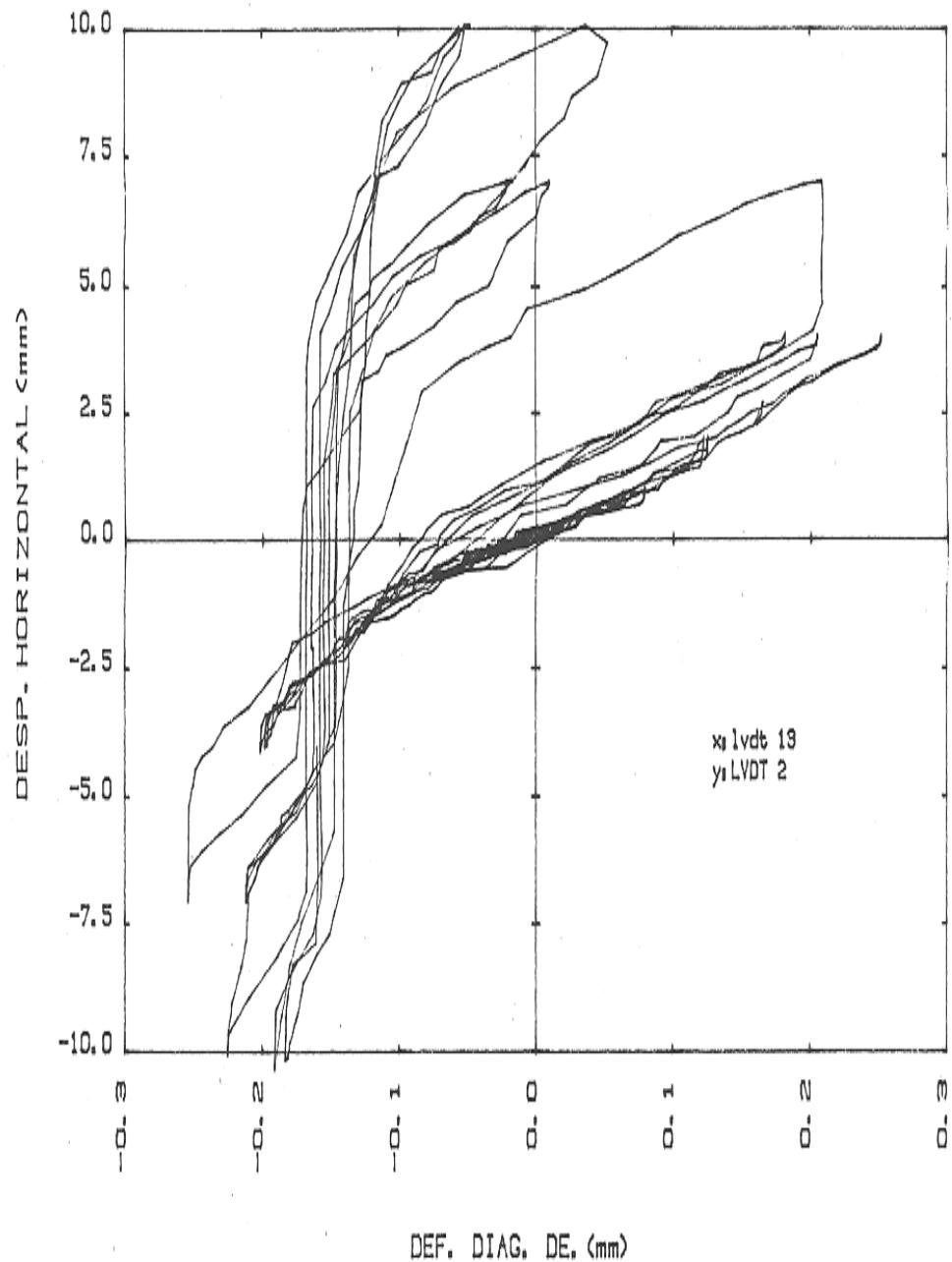
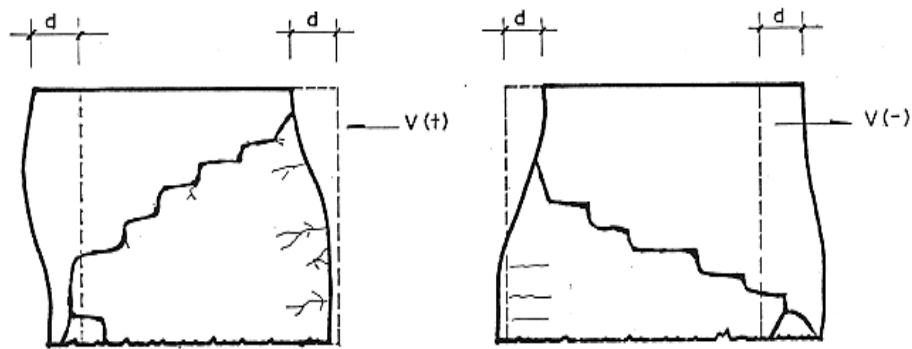
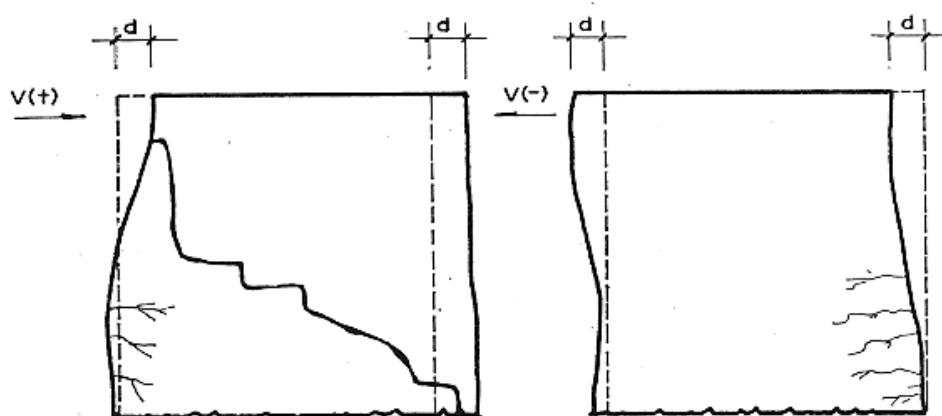


FIG. 45.- DESP. HOR. vs. DEF. DIAG. DER. -MS2



a) Posición deformada del muro MS1 ($d = 20$ mm)



b) Posición deformada del muro MS2 ($d = 10$ mm)
Notemos el diferente comportamiento ante carga positiva y negativa.

Fig. 46 Posición deformada de los muros ensayados
(La línea punteada indica la posición original del muro).

VIII. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

A. ANÁLISIS ELÁSTICO

El análisis elástico, se practicará solo para el muro MS1 (mortero 1:8), en vista que el muro MS2 (mortero 1:5) presentó cangrejera en la base de una de sus columnas la que no se detectó sino hasta después de haber ejecutado el ensayo, esta podría ser una de las razones por la cual obtenemos una gráfica atípica e un comportamiento elástico como es la que se muestra en la Fig. 52.

Adicionalmente, si comparamos los gráficos 50 y 51 correspondientes a las deformaciones diagonales de un muro con ladrillo de arcilla (Ref. 33) y nuestro muro MS1, llegamos a la conclusión que el muro de sillar no tiene un comportamiento elástico, lo que se corrobora al observar el gráfico 47, en donde se observa una gran disipación de energía para el primer ciclo de carga pese a que en dicha fase no se pudo apreciar fisuras, posiblemente esto pueda deberse al peralte mínimo de la columna y a la conexión dentada entre la columna y grandes bloques de sillar.

Sin embargo trataremos de analizar elásticamente al muro MS1.

a) Determinación del módulo de corte (G) y del módulo de elasticidad ϵ .

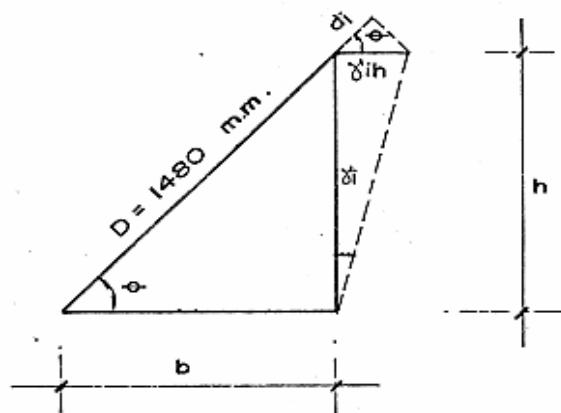
El módulo de elasticidad se obtiene a partir del módulo de corte (G), el que fu obtenido en forma experimental y de la siguiente manera:

$$\gamma_{ih} = di/\cos \theta = di/b/D = (di) D/b \quad (\text{Ver figura})$$

$$\gamma_i = D (di) /bh, \text{ pero } b=h=D \sqrt{2}/2$$

$$\gamma_i = D (di) /D^2/2 = 2 di/D$$

$$\gamma = (\gamma^{12} + \gamma^{13}) /2$$



- D : Distancia entre bases de LVDT's.
- γ : Deformación angular por fuerza cortante.
- di : Desplazamiento de la diagonal obtenida con el LVDT 12 y LVDT 13 en valor absoluto para una fuerza lateral en el rango elástico (V).
- V : Carga en el primer ciclo rango elástico.

MURO MS1 : V = 2.92 ton. (20% de la carga máxima)

$$D = 1480$$

Para el muro MS1 los desplazamientos promedios de las diagonales del muro mostrados en el gráfico N° 51 son:

$$d_{12} = 0.04$$

$$d_{13} = 0.035$$

$$G = \frac{V}{t L \gamma}$$

*t: espesor del muro (24cm)
L: largo del muro (240cm)*

$$\gamma_{12} : 0.000054 \quad \gamma_{13} : 0.000047$$

$$\gamma : 0.0000506$$

$$G = \frac{2920}{24 \times 240 \times 0.0000506} = 10018 \text{ kg/cm}^2$$

Luego obtenemos nuestra relación:

$$\frac{E_{\text{pila}}}{G_{\text{muro}}} = \frac{21573}{10018} = 2.15$$

Vemos pues, que este valor aproximadamente coincide con el valor reglamentario para unidades de arcilla ($E/G = 2.5$), pero recordemos que estamos partiendo de la suposición de que el comportamiento del muro de sillar es elástico, lo que verificaremos más adelante no se cumple en el sillar.

La ref. 33 muestra el comportamiento de muros de ladrillo de arcilla en el rango elástico (gráficos N° 49, 50, 53), en donde observamos el cumplimiento de

la hipótesis de Navier y notemos además las diferencias contra los gráficos 51, 52, 54 y 55 pertenecientes a nuestros muros, son comportamientos diferentes en cuanto a elasticidad, tal vez esto signifique que en los muros de sillar para estos pequeños desplazamientos ya existen microfisuras imperceptibles a la vista. Esta es la principal razón por la cual en los cálculos del módulo de corte tomamos los desplazamientos promedios de los lazos formados en los gráficos mostrados.

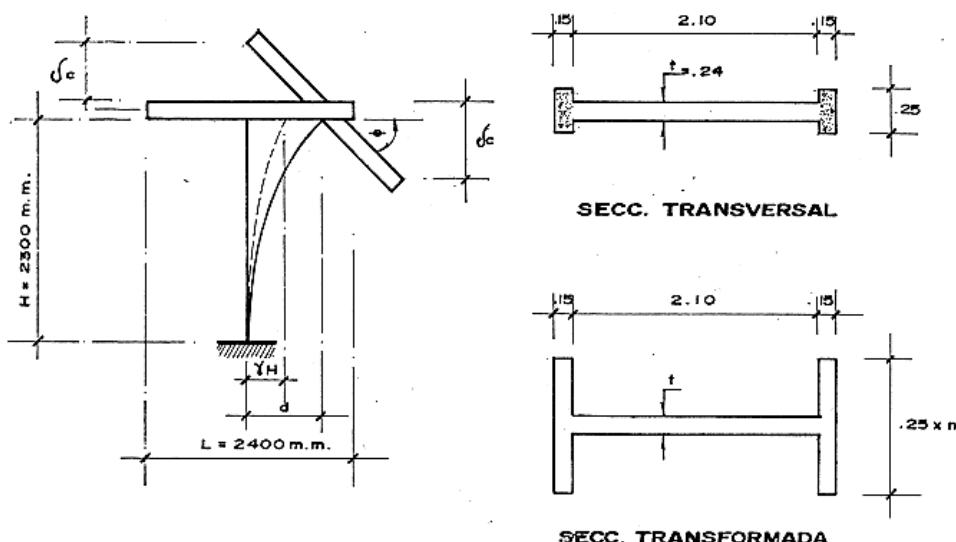
En la siguiente tabla (16) mostramos las relaciones conocidas para E, G y $f'm$.

TABLA 16 : RELACIONES DE MÓDULOS E, G y $f'm$

Ensayo	Mortero 1:8	Mortero 15
Pilas	$E = 21573$	$E = 19876$
Muros	$G = 10018$	
E/G	$E/G = 2.15$	
$E/f'm$	$E/f'm = 534$	$E/f'm = 426.0$

b) Verificación de los resultados experimentales para una carga $V \approx 0.5 V_F$

Con la intención de comparar los resultados experimentales con los teóricos, se realizó el siguiente proceso:



$$\text{Desplazamiento por corte: } \gamma H = \frac{VH}{GA} \text{ (mm)}$$

$$\text{Desplazamiento total : } d = \frac{VH^3}{3EI} + \gamma H \text{ (mm)}$$

Desplazamiento vertical

$$\text{de las columnas : } \delta c = \frac{\theta L}{2} \text{ (mm)}$$

$$\text{Ángulo de giro : } \theta = \frac{VH^2}{2EI} \text{ (rad.)}$$

$$\text{Área de corte : } A = 2.4 t \text{ (m}^2\text{)}$$

Para el muro MS1 tenemos:

$$I = \frac{1}{2} \times 0.24 \times 2.1^3 + 2 \times 2.30 \times 0.15 \times 1.125^2 + \\ 1/12 \times 2 \times 2.3 \times 0.15^3 + 2 \times 229.3 \times 10^{-4} \times 1.125^2 = 1.12 \text{ m}^4$$

Si $V = 3.09 \text{ Tn} \approx 0.5 V_F$ y tomando E_{pila} y G_{muro} , calculamos un desplazamiento total $d = 0.181$ para el muro MS1, siendo el valor experimental $d = 0.124 \text{ mm}$, es decir existe un 46% de diferencia.

B. MODOS DE FALLA Y ANÁLISIS DE LOS GRÁFICOS

a) Muro MS1:

En la propuesta de nuestros ensayos describimos dos de los tipos de falla características que pueden ocurrir cuando un muro es sometido a carga lateral. La gráfica N° 18, nos muestra al muro MS1 y una falla por corte en las juntas o también llamada falla escalonada.

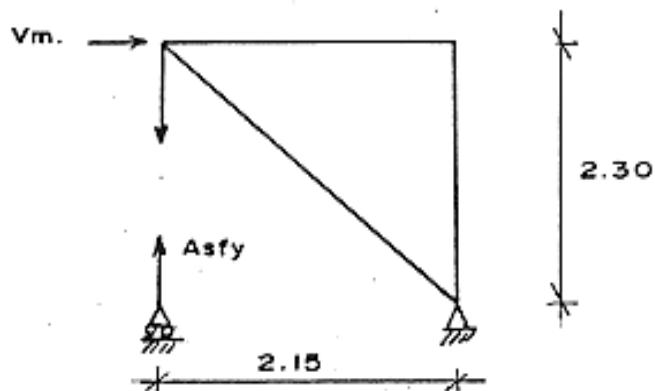
En los gráficos N° 20, 56 y 58 representamos las curvas carga lateral vs. desplazamiento horizontal (celda de carga vs. LVDT 2), estos nos revelan un comportamiento característico de fallas por corte en las juntas, como es el cambio brusco de la rigidez y resistencia que apreciamos se produce en la 5ta. fase.

Valiéndonos de la información obtenida de los gráficos N° 20 – 31 (información de los canales 8, 9, 10, 11, 12, 13) hemos obtenido la posición deformada del muro MS1 (gráfico N° 46 y en ella apreciamos deslizamientos de triángulo superior del muro (formados luego de producido el agrietamiento diagonal); las lecturas anotadas por los canales de medición nos dicen de deslizamientos acumulados (por ejemplo los LVDT's 8, 9 y 11 en gráficos N° 26, 27 y 29) que son mayores que los aplicados (LVDT 2), este deslizamiento se produce con una carga sostenida igual a la resistencia aportada por el acero

vertical suponiendo que el triángulo superior rota y desliza sobre la base, comprimida de la columna.

b) Muro MS2

Antes de continuar con el análisis correspondiente a este muro es necesario realizar un sencillo cálculo de la carga de fluencia para los 4 $\phi \frac{3}{8}''$ que utilizamos en las columnas de nuestros muros.



Tomando momentos respecto al punto O:

$$V \times 2.30 = As \times fy \times 2.15$$

$$V = \frac{As \times fy \times 2.15}{2.30}$$

$$V = \frac{4 \times 0.71 \times 4155 \times 215}{230}$$

$$V = 11030 \text{ kg}$$

Al empujar el muro MS2 en la fase N° 4, este presentó una falla por corte con una elevada degradación en su capacidad de carga, lo cual fue producto de la cangrejera que se presentó en la base de la columna derecha, con lo cual el triángulo superior al tratar de rotar entorno a la base comprimida, no tuvo contra que reaccionar produciendo el pandeo del refuerzo vertical y al jalar el muro no se desarrollaron grietas por corte ya que el refuerzo ubicado en la zona de cangrejera entró a trabajar directamente generándose un comportamiento de flexión. Lo explicado se aprecia en las figuras 32, 19 y 46.

Al margen de lo último, vale la pena mencionar otra característica importante observada en los muros ensayados (2), es la relativa a que el 60% de los dicentes de las columnas se desprendieran del muro, esto obedece a una mala adherencia entre bloques y concreto, y a que el bloque es de gran altura lo

que limita la penetración completa del concreto en la zona dentada, evidentemente no pudimos controlar este factor, puede ser que nos falló regar bien los dientes del muro antes de vaciar el concreto de las columnas.

Por último, cabe mencionar que los muros ensayados mostraron gran eflorescencia (a consecuencia del tratamiento de la unidad), que se logró aminorar con la pintura de cal que se les aplicó.

C. PREDICCIÓN DE LA CARGA DE FISURACIÓN (V_F), DE LA CARGA DE AGRIETAMIENTO (V_R)

a) Carga de Fisuración : V_F

Muro MS1 (mortero 1:8) :

$$E_a = 21573 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_c = 15210 \sqrt{f'c} = 198314 \text{ kg/cm}^2 \quad (f'c = 170 \text{ kg/cm}^2)$$

$$f_r = 2 \sqrt{f'c} = 26.08 \text{ kg/cm}^2 \quad (\text{módulo de ruptura del concreto})$$

$$n_{c/a} = E_c / E_a = 9.19$$

$$E_s = 2030000 \text{ kg/cm}^2, n_{s/a} = 94.10$$

Esfuerzos permisibles

$$f_c \text{ adm.} = 0.45 f'c = 76.5 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_s \text{ adm.} = 0.50 f_y = 2100 \text{ kg/cm}^2$$

Antes de la fisuración $f \leq f_r$ ó $V \leq V_F$

Momento de Inercia : $I = 1.12 \text{ m}^4$

$$\sigma = \frac{M Y}{I} \quad (\text{sin considerar peso propio})$$

El esfuerzo f_r del concreto transformado a albañilería:

$$f_r = 26.08 / 9.19 = 2.83 \text{ kg/cm}^2 = 28.3 \text{ Tn/m}^2$$

$$28.3 = \frac{2.3 V_F \times 1.2}{1.12} \Rightarrow V_F = 11.48 \text{ Tn}$$

Para $V = V_F$, el esfuerzo en el acero:

$$f_s = 94.10 \frac{2.3 \times 11.48 \times 1.125}{1.12} = 2496 \text{ Tn/m}^2$$

$$f_s = 250 \text{ kg/cm}^2 \leq f_s \text{ adm}$$

Este valor nos dice que el refuerzo de acero tiene un mínimo trabajo antes de la fisuración del concreto.

En el concreto:

$$f_c = 9.19 \frac{2.3 \times 11.48 \times 1.125}{1.12} = 243.74 \text{ Tn/m}^2$$

$$f_c = 20.8 \text{ kg/cm}^2 \leq f_c \text{ adm.}$$

b) Carga de Agrietamiento (V_R)

Existen algunas relaciones que predicen las cargas de agrietamiento (tomando en cuenta el tipo de falla escalonada), a partir de ensayos con especímenes pequeños. San Bartolomé (ref. 26), utiliza relaciones de resistencias al corte del muro (Pto. R en este trabajo y punto de agrietamiento según Meli) contra las resistencias promedio de pilas y muretes (no los valores característicos, a partir de los ensayos realizados por R. Meli, anota:

$$V_R / \sqrt{f_m} = 0.24 \quad \text{y} \quad V_R / \bar{v}_m = 0.31$$

En el muro MS1, el punto R nos representa una resistencia al corte $V_R = 2.56 \text{ kg/cm}^2$, siendo $\bar{v}_m = 3.43 \text{ kg/cm}^2$ (ensayo de compresión diagonal con mortero 1:8) y $f_m = 45 \text{ kg/cm}^2$ (ensayo de compresión axial con mortero 1:8), obtenemos:

$$V_R / \sqrt{f_m} = 0.38 \quad \text{y} \quad V_R / \bar{v}_m = 0.75$$

Apreciamos que son relaciones que difieren de las anteriormente citadas, aquí recordemos que estamos comparando dos materiales diferentes: el ladrillo y el sillar.

Por otro lado, aceptándole mecanismo de falla de Coulomb, el esfuerzo resistente al corte puede calcularse como:

$$v = \mu_o + f \sigma$$

donde: μ_o es la adherencia, f el coeficiente de fricción entre el mortero y la pieza, σ el esfuerzo de compresión normal a la junta.

Polyakov (Ref. 22) propone una ecuación bastante conservadora, fórmula obtenida para interpretar los ensayos de compresión diagonal cuando la falla es por cortante (casos con muretes con mortero 1:8)

$$v = \frac{0.7}{1 - 0.85 fh/\ell}$$

En general, se sabe que la resistencia al cortante varía con la carga de confinamiento, pero el valor de esta resistencia es menor para confinamiento cero que el que se obtiene con la prolongación de la recta trazada con otros valores de carga de confinamiento, así utilizaremos $\mu_o = 1.63 \text{ kg/cm}^2$ (ensayo de corte directo).

De nuestro ensayo de compresión diagonal hemos obtenido $v'm = 3.08 \text{ kg/cm}^2$, en nuestro caso $h/\ell = 1$, reemplazando estos valores en la anterior fórmula, calculamos $f = 0.74$ (valor que se encuentra dentro del rango experimentado por Meli).

Luego, considerando en el cálculo del esfuerzo de compresión (σ), al peso de la viga solera y el peso de $\frac{1}{2}$ muro, es decir solamente carga muerta, tenemos:

$$V_R = 1.63 + 0.74 \sigma = 1.83 \text{ kg/cm}^2$$

valor que difiere en 28% del valor experimentado:

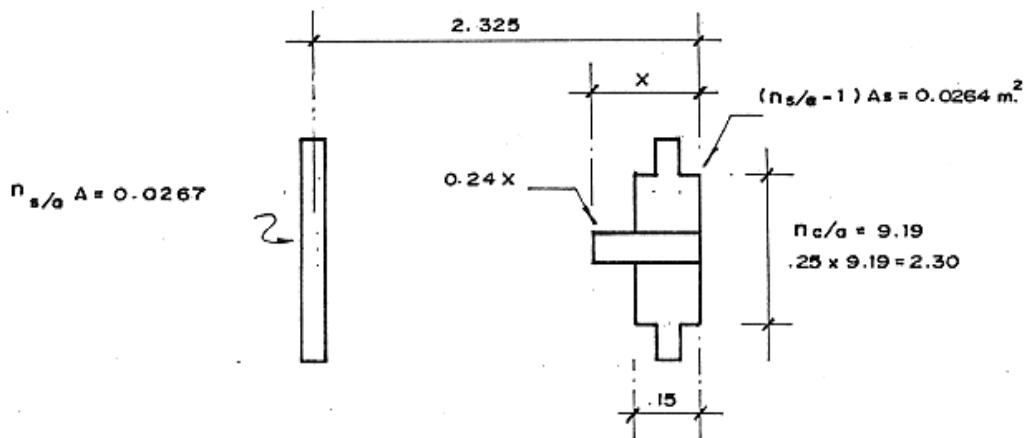
$$F_R = 2.56 \text{ kg/cm}^2$$

Sería necesario realizar ensayos en muros a escala natural variando carga vertical (ya que el valor f es bastante elevado en comparación a los experimentados por San Bartolomé en este tipo de ensayos) y de otro lado tener en cuenta el valor $\mu_o = 1.63 \text{ kg/cm}^2$ en rotura es muy cercano al valor admisible (1.2 kg/cm^2) que indica el reglamento.

c) Capacidad de Flexión

Muro MS1

Sección agrietada (sin considerar el peso propio)



$$A = 0.24x + 0.15(2.30 - 0.24) + 0.0264 + 0.0267$$

$$A = 0.24x + 0.362$$

Centroide:

$$(0.24x + 0.362)x = 0.0264 \times 0.075 + 2.04 \times 0.15 \times 0.075 + 0.0267 \times 2.325 + 0.24x^2/2$$

$$0.24x^2 + 0.362x = 0.087 + 0.12x^2$$

Resolviendo: $X = 0.224 \text{ m}$

$$\begin{aligned} I &= 0.0267(2.101)^2 + 0.24x(0.224)^3/12 + 0.24 \times 0.224x \\ &\quad (0.224/2)^2 + 0.0264(0.149)^2 + 1.75 \times (0.15)^3/12 + 1.75 \times \\ &\quad 0.15 \times (0.149)^2 \end{aligned}$$

$$I = 0.126 \text{ m}^4$$

Capacidad de flexión a la primera fluencia:

$$f_s = f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2 = 42000 \text{ Tn/m}^2$$

Transformando a albañilería:

$$f_s = \frac{42\,000}{94.10} = 446.33 \text{ Tn/m}^2$$

$$446.33 = \frac{2.3 V_y (2.101)}{0.126} \Rightarrow V_y = 11.64 \text{ Tn}$$

En ese momento, en el concreto:

$$f_c = 11.6 \times 2.3 \times 0.224 \times 9.19 / 0.126 = 435.9 \text{ Tn/m}^2$$

$$f_c = 43.6 \text{ kg/cm}^2 \leq f_c \text{ adm}$$

Notemos aquí que aunque la capacidad teórica de flexión (11.64 Tn) es inferior a la carga de agrietamiento por corte V_R (14.59 Tn), no se produjo una falla por flexión en este muro contradictoriamente a lo esperado, esto se debe a que el 84% de la deformación total es por corte, con un trabajo mínimo del acero hasta antes del agrietamiento.

Antes de finalizar este análisis es importante decir que nuestro muro no tuvo un comportamiento elástico, lo vemos en la fig. 47, además que si calculamos los desplazamientos para la carga de fisuración, obtenemos valores que discrepan con los experimentados.

D. DEGRADACIÓN DE LA RIGIDEZ LATERAL (K/K₀):

Las tablas N° 17, 18 y 19 nos muestran los valores de la rigidez lateral y la degradación de ésta respecto de la rigidez inicial, esto último lo graficamos en la fig. 62.

Las referencias 26 y 33 nos muestran degradaciones que varían entre el 40 y 20% para desplazamientos laterales de 5 mm, pese a ser muros de diferentes características (calidad de unidad o tipo de refuerzos), creo que es válida la comparación ya que la gráfica de la degradación de la rigidez del muro MS1 es similar al de los mencionados muros (excepto que es muy rápida al inicio, para 1 mm de desplazamiento ya es 60%; pero luego a partir de 5 mm tienen el mismo comportamiento). El muro MS2 también podría entrar en esta comparación, pero sólo a partir de los 4 mm de desplazamiento lateral, recordemos que estamos considerando los lazos más desfavorables.

E. DISIPACIÓN DE ENERGÍA Y AMORTIGUAMIENTO EQUIVALENTE:

La relación de la energía disipada contra la absorbida (RDE = ED/EH), ha sido tabulada en la tabla N° 16^a y graficada en la fig. 63, notemos aquí el diferente comportamiento de los dos muros hasta antes de los 5 mm de desplazamiento

lateral; luego el muro MS1 muestra una relación más o menos constante (≈ 0.6), es decir en este lapso disipó el 60% de la energía absorbida (tal vez esta energía disipada se refleje en el agrietamiento mostrado por el muro), lo ideal es que ésta relación sea aproximadamente 1, pero en albañilería esto no es real. La Ref. 20 muestra de sus ensayos una relación RDE 0.5, pero en muro de características muy superiores en cuanto a calidad de unidades y refuerzos.

El amortiguamiento equivalente también es mostrado en este trabajo (tabla N° 21 y gráfico N° 64), en ellos se expresa el porcentaje de energía que es disipada por fricción.

F. COEFICIENTE INDICATIVO DE DUCTILIDAD (FD):

Para la evaluación de este coeficiente consideramos los lazos más desfavorables de cada ensayo (tabla N° 20 y gráfico N° 65). en este gráfico observamos el similar comportamiento de los 2 muros, hasta un desplazamiento lateral de 4 mm, pero luego el valor FD decae bruscamente para el muro MS2 debido a la cangrejera que tuvo una e las columnas.

En cuanto al muro MS1 la gráfica revela valores que son bastante aceptables para desplazamientos entre 10 a 15 mm; tuvo un coeficiente indicativo de ductilidad que va de 2.14 a 3.0 (pero para un desplazamiento de 5 mm tuvo un valor de 1.5, valor algo bajo).

La Ref. 26 indica en sus ensayos valores, de este coeficiente, que van desde 2.16 (5 mm de desplazamiento) a 3.23 (15 mm de desplazamiento). Sin embargo podría adoptarse $FD = 2.0$ para $\delta = 10$ mm ya que hasta este punto el muro puede repararse.

G. DEGRADACIÓN DE LA CAPACIDAD DE CARGA:

La degradación de la capacidad de carga es mostrada en la tabla N° 22 y graficada en la Fig. 66; el muro MS1 muestra un comportamiento característico de una falla por corte, es decir cambios bruscos en su capacidad de carga ya que después de la rotura diagonal el comportamiento depende de las columnas de confinamiento y su refuerzo, mientras que el muro MS2 muestra también una caída notoria luego de los 4 mm de desplazamiento lateral, recordemos que estamos graficando los lazos mas desfavorables y en este se refleja el efecto de los problemas ocasionados por la cangrejera en la base de la columna derecha del muro MS2.

TABLA N° 16^a: RELACIÓN DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA (RDE)

Fase	δ (mm)	MS1		MS2		Relación de disipación de energía (RDE) = ED/EH	
		ED (Tn x mm)	EH (Tn x mm)	ED (Tn x mm)	EH (Tn x mm)	MS1	MS2
1	0.5	1.1788	1.6850	0.5308	1.9762	0.6996	0.2686
2	1.0	2.3074	3.9979	1.9549	6.1111	0.5771	0.3199
3	2.0	4.8302	10.3241	5.1073	14.9902	0.4679	0.3404
4	4.0	11.3851	14.9051	10.1408	26.6797	0.7638	0.3801
5	7.0	17.2281	26.9074	10.8351	16.2095	0.6403	0.6684
6	10.0	24.1648	38.7933	11.3347	17.6070	0.6229	0.6439
7	13.0	36.2379	61.0911			0.5932	
8	16.0	44.4432	79.5992			0.5583	
9	20.0	55.6011	91.8040			0.6056	

TABLA N° 17: RIGIDEZ LATERAL $K = V_y / \delta_y$
 (Ciclos estables, lazos más desfavorables)

Fase	Muro MS1 (1:8)			Muro MS2 (1:5)		
	V_y (ton)	δ_y (mm)	K (ton/mm)	V_y (ton)	δ (mm)	K (ton/mm)
1	6.130	0.488	12.561	5.225	0.515	10.145
2	7.797	1.018	7.659	9.713	0.995	9.762
3	10.877	2.006	5.422	12.468	1.989	6.268
4	6.996	3.768	1.857	10.911	4.063	2.685
5	6.485	6.982	0.929	5.087	7.025	0.724
6	7.281	9.707	0.750	4.014	10.059	0.399
7	8.893	12.923	0.688			
8	9.275	16.009	0.579			
9	9.392	19.795	0.474			

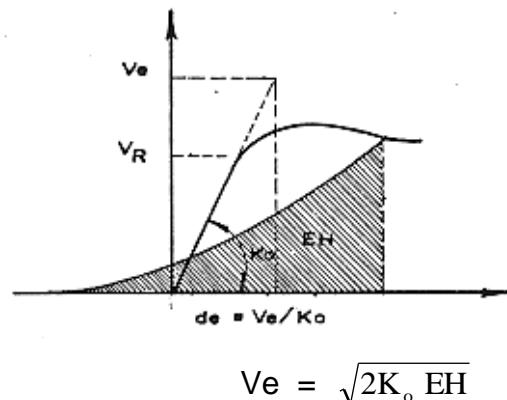
TABLA N° 18: RIGIDEZ LATERAL INICIAL $K_o = V_F / \delta F$

Muro	V_F (ton)	δ_F (mm)	K_o (ton/mm)
MS 1	5.727	0.456	12.560
MS 2	5.113	0.504	10.145

TABLA N° 19: DEGRADACIÓN DE LA RIGIDEZ LATERAL (K/K_o)

Fase	δ (mm)	K/K_o (%)	
		MS 1 (1:8)	MS 2 (1:5)
1	0.5	100.0	100.0
2	1.0	60.98	96.22
3	2.0	43.17	61.78
4	4.0	14.79	26.47
5	7.0	7.90	7.136
6	10.0	5.97	3.933
7	13.0	5.48	
8	16.0	4.61	
9	20.0	3.774	

TABLA N° 20: COEFICIENTE INDICATIVO DE LA DUCTILIDAD (fd)



$$FD = \frac{V_e}{V_R} \quad V_R : V \text{ de rotura}$$

V_e : V equivalente

$$V_e = \sqrt{2K_o EH}$$

$$Ee = \frac{1}{2} V_e de = \frac{1}{2} V_e \frac{V_e}{k_o} = \frac{1}{2} \frac{V_e^2}{k_o} = EH$$

$$V_e = \sqrt{2K_o EH}$$

Fase	δ (mm)	MS1			MS2		
		$K_o = 12.56 \text{ ton/mm}, V_R = 14.60 \text{ ton}$			$K_o = 10.145 \text{ ton/mm}, V_R = 14.80 \text{ ton}$		
		EH (ton x mm)	Ve (ton)	FD	EH (ton x mm)	Ve (ton)	FD
3	2.0	10.324	16.104	1.10	14.99	17.44	1.18
4	4.0	14.905	19.350	1.32	26.68	23.267	1.58
5	7.0	26.907	25.998	1.78	16.21	18.136	1.23
6	10.0	38.793	31.217	2.14	17.60	18.897	1.27
7	13.0	61.091	39.174	2.68			
8	16.0	79.599	44.716	3.03			
9	20.0	91.804	48.022	3.29			

TABLA N° 21 : AMORTIGUAMIENTO EQUIVALENTE A (%)

Fase	δ (mm)	MS 1 (1:8)	MS 2 (1:5)
1	0.5	17.12 %	4.94 %
2	1.0	12.91	6.06
3	2.0	9.72	6.53
4	4.0	19.67	7.47
5	7.0	14.99	15.98
6	10.0	14.40	15.11
7	13.0	13.42	
8	16.0	12.33	
9	20.0	13.83	

TABLA N° 22 : DETERIORO DE LA CAPACIDAD DE CARGA

$$(D.C.C. = \frac{V_y}{V_R} \%)$$

Fase	δ (mm)	MS1 ($V_R = 14.6$ ton)		MS2 ($V_R = 14.8$ ton)	
		V_y (ton)	D.C.C. (%)	V_y (ton)	D.C.C. (%)
3	2.0	10.877	74.5	12.468	84.2
4	4.0	6.996	47.9	10.911	73.7
5	7.0	6.485	44.4	5.087	34.4
6	10.0	7.281	49.9	4.014	27.1
7	13.0	8.893	60.9		
8	16.0	9.275	63.5		
9	20.0	9.392	64.3		

TABLA N° 23: RESULTADOS EXPERIMENTALES

Muro	V_F (ton)	V_R (ton)	V_R (kg/cm^2)	δ_F (mm)
MS1	5.727	14.597	2.56	0.456
MS2	5.113	14.841	2.57	0.504

V_R : Resistencia al corte del muro

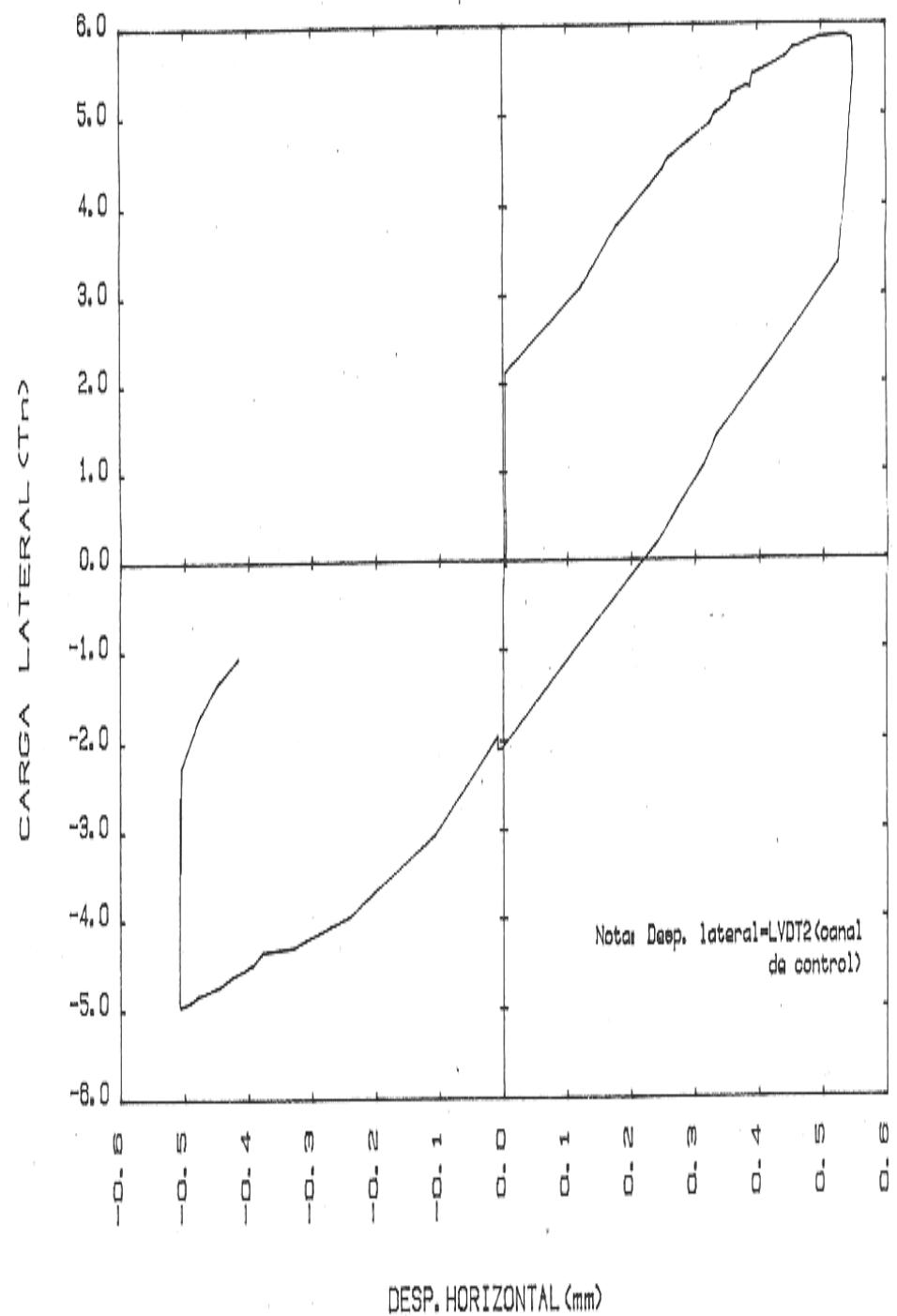


FIG. 47.- CARGA vs. DESP. LAT. -CICLO INICIAL (MS1)

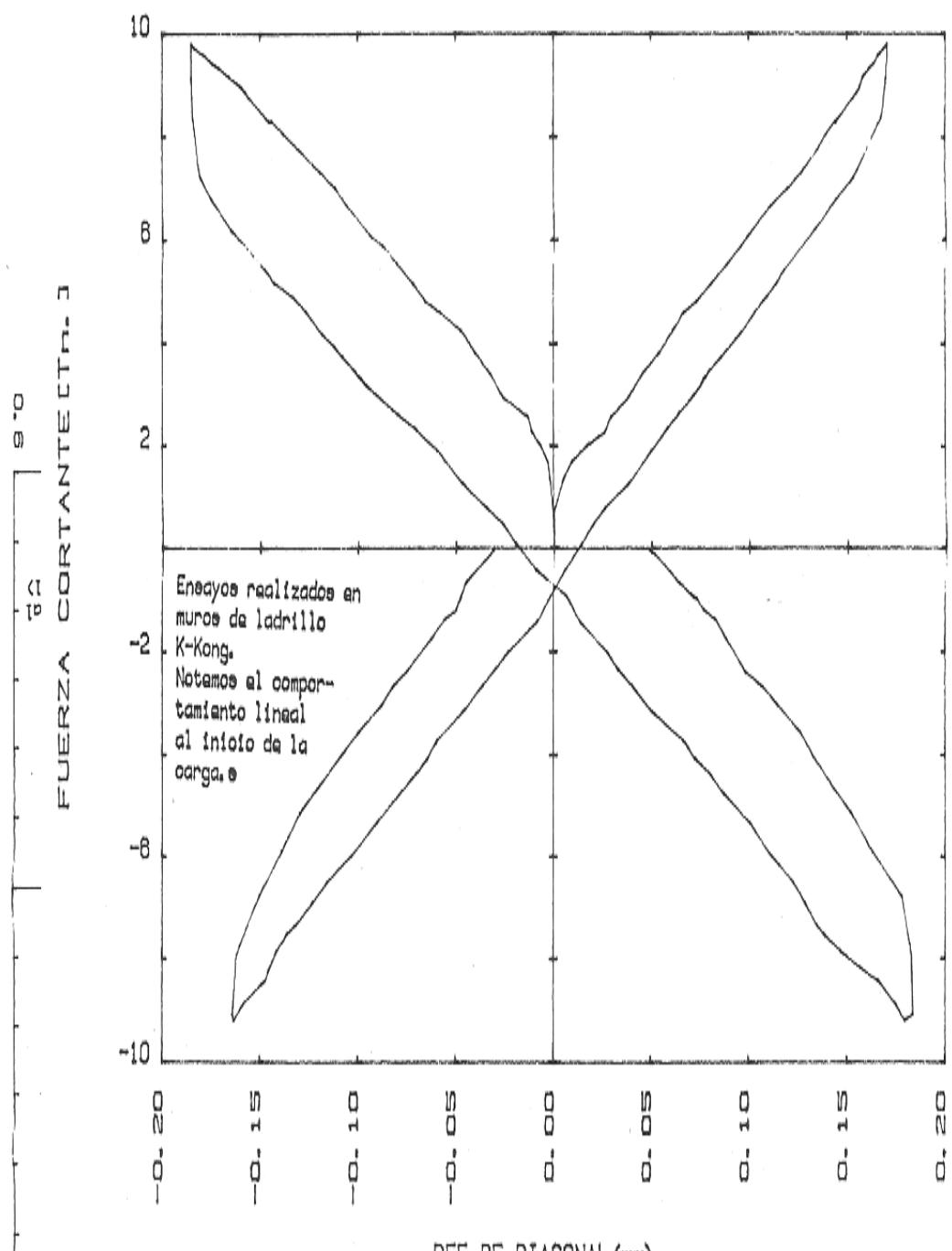


FIG. 49.- DEFOR. DE DIAGONALES-CICLO ELASTICO-REF. 33

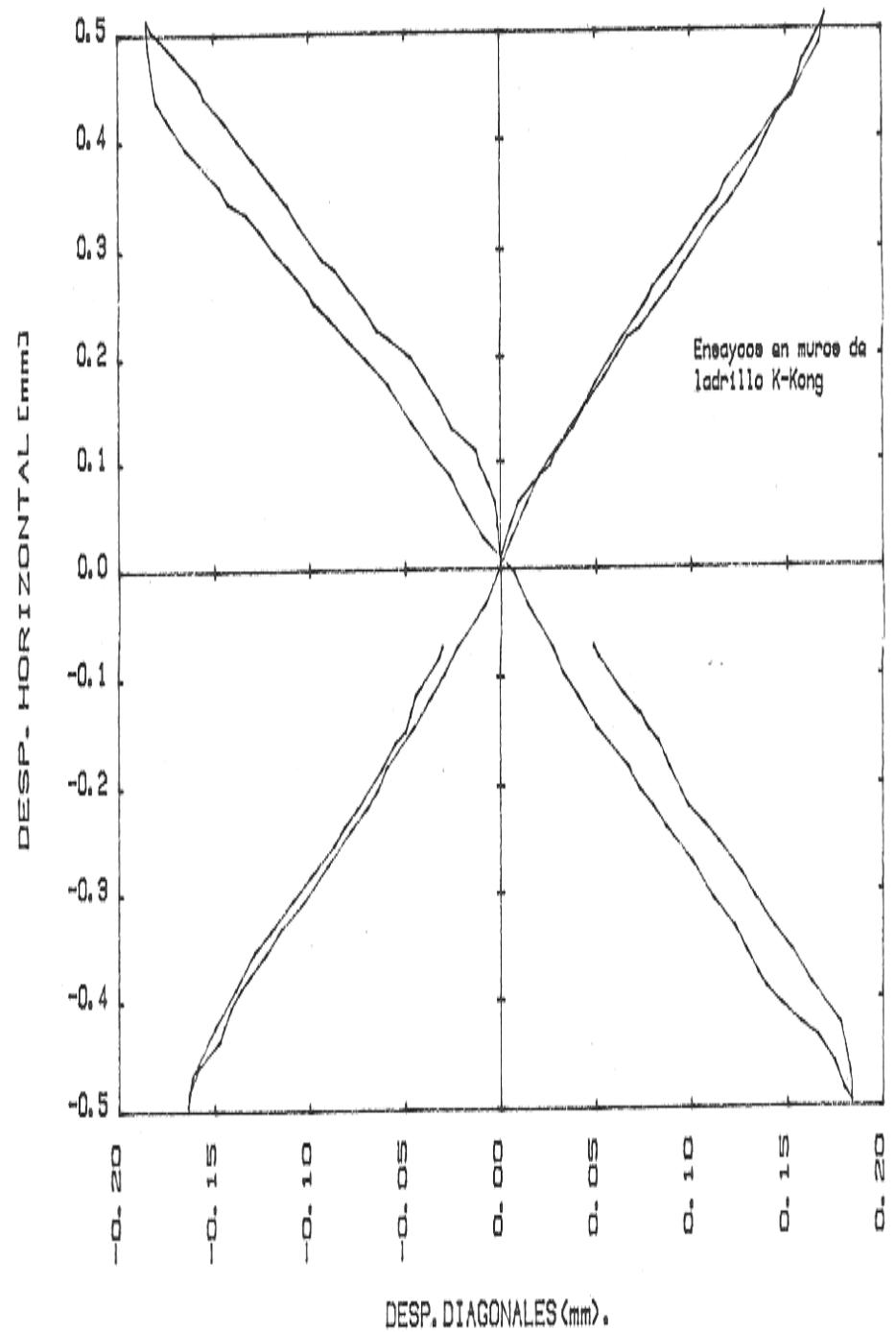


FIG. 50.- DEFORMACION EN DIAGONALES (rango elast.) Ref. 33

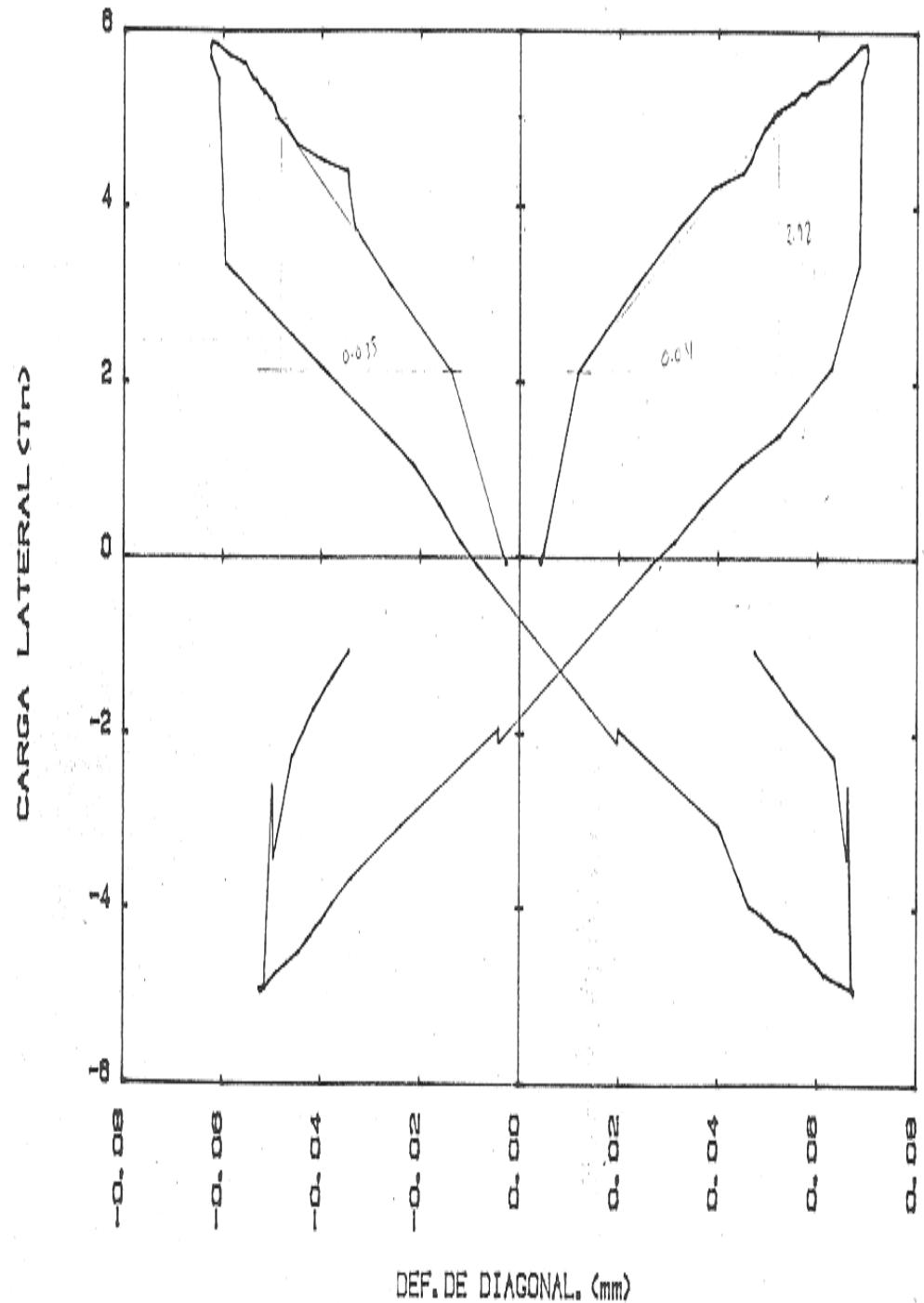


FIG. 51.- DEFORM. DE DIAGONALES-CICLO ELASTICO-MS1

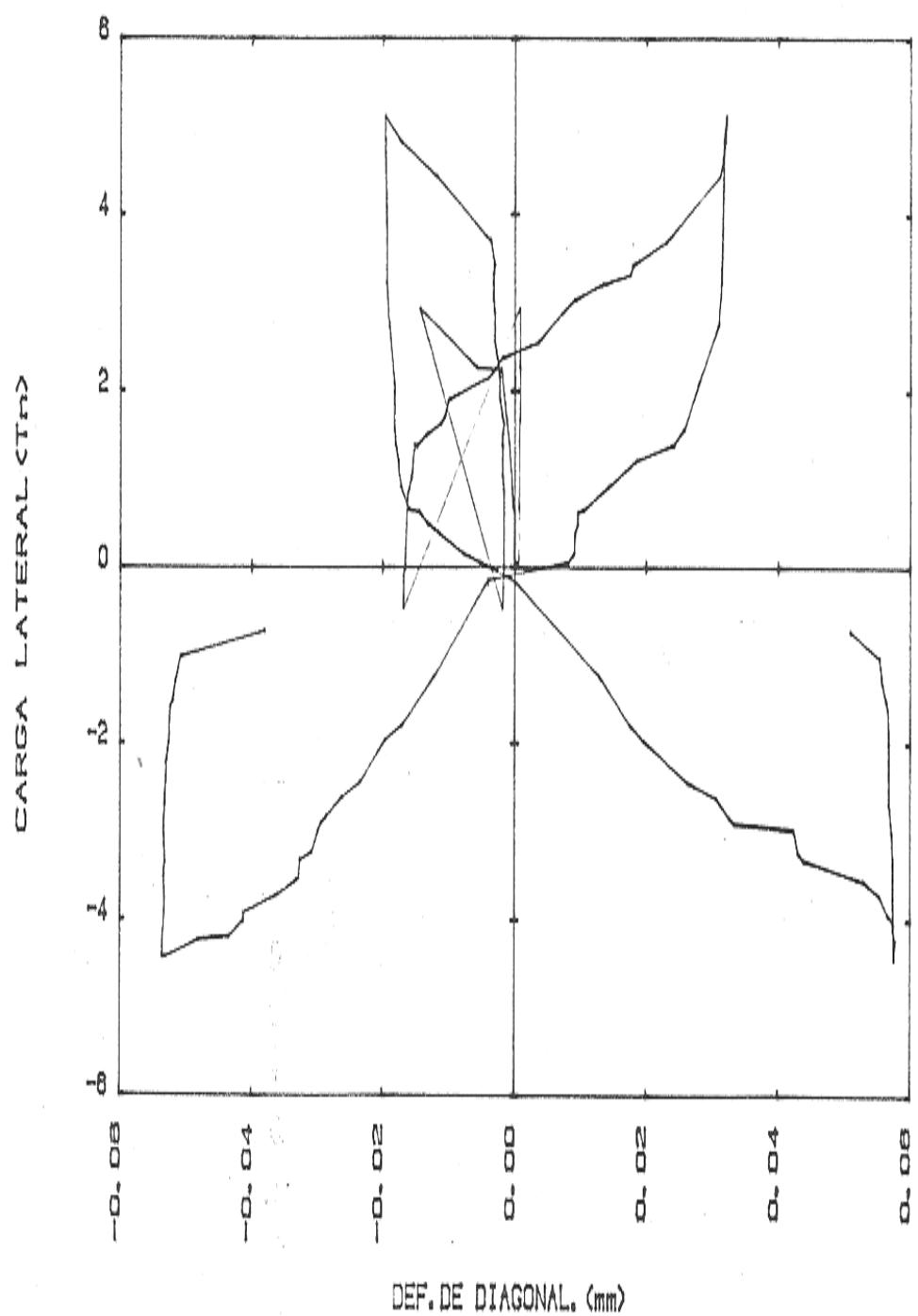


FIG. 52.- DEFORM. DE DIAGONALES-CICLO ELASTICO-MS2

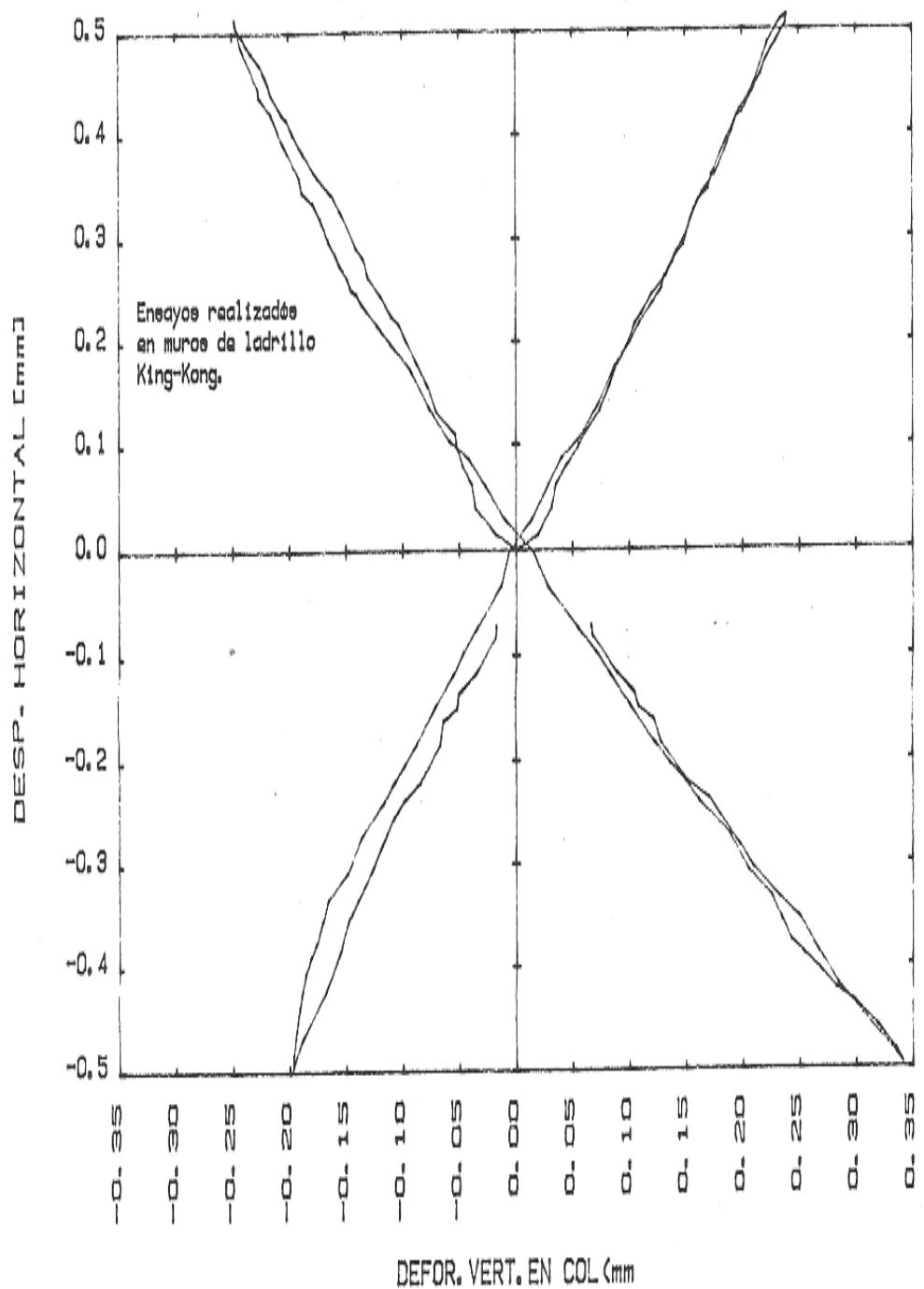


FIG. 53.- DEF. DE COL (Hip. de Navier, rango elast) Ref. 33

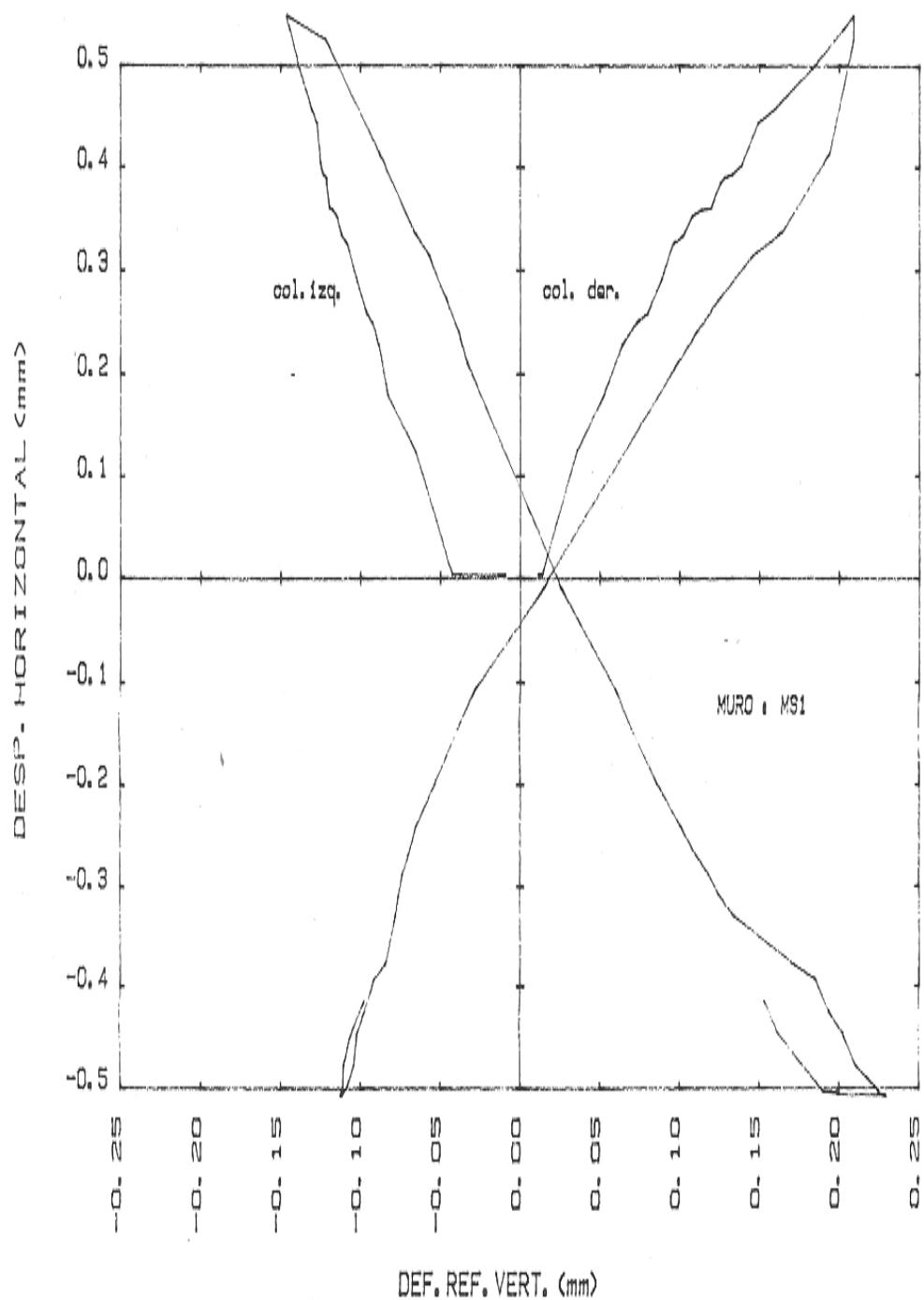


FIG. 54.- DEFORMACION DE COLUMNAS (CICLO INICIAL)

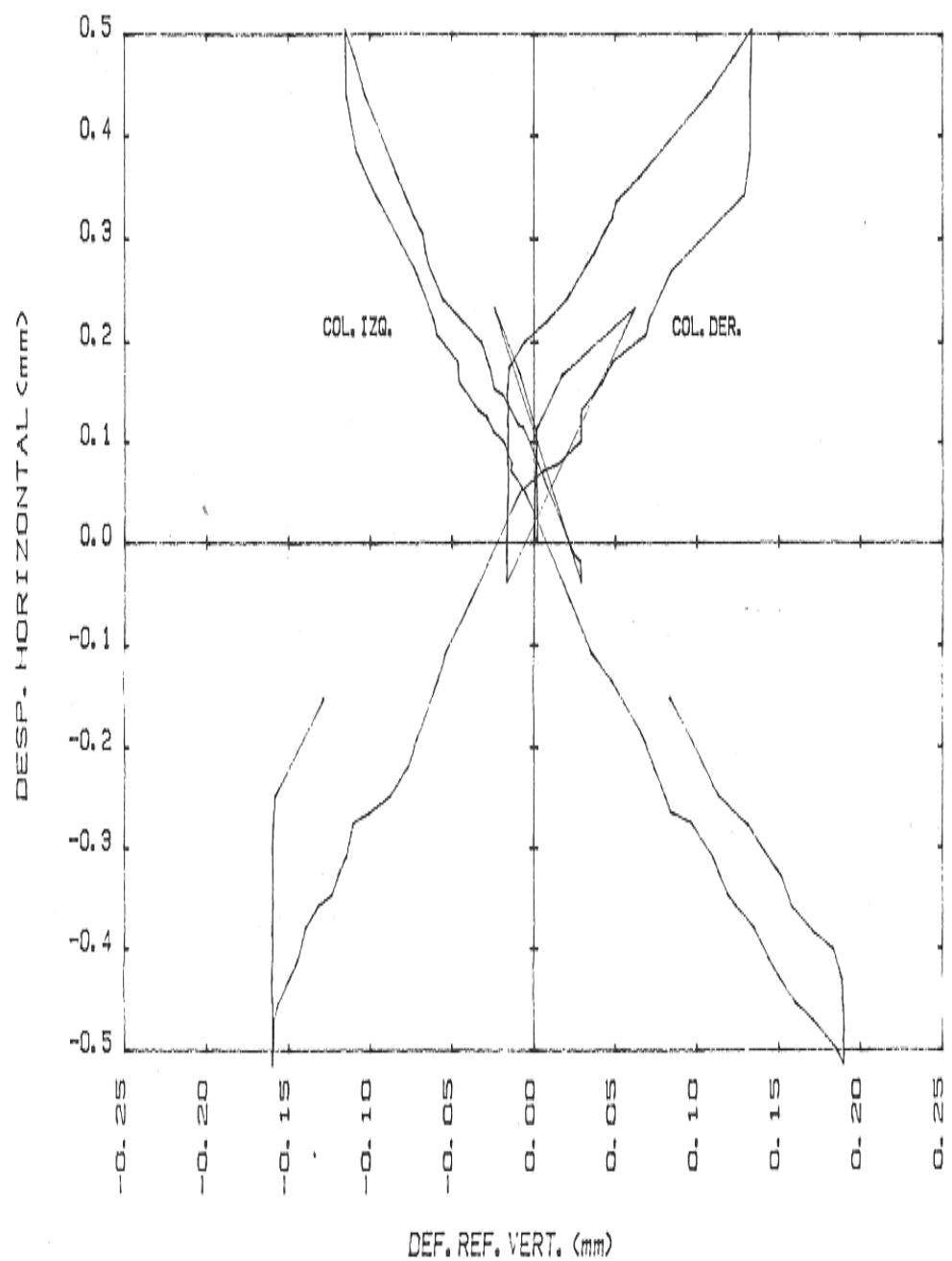


FIG. 55.- DEFORM. DE COLUMNAS (CICLO INICIAL) MS2

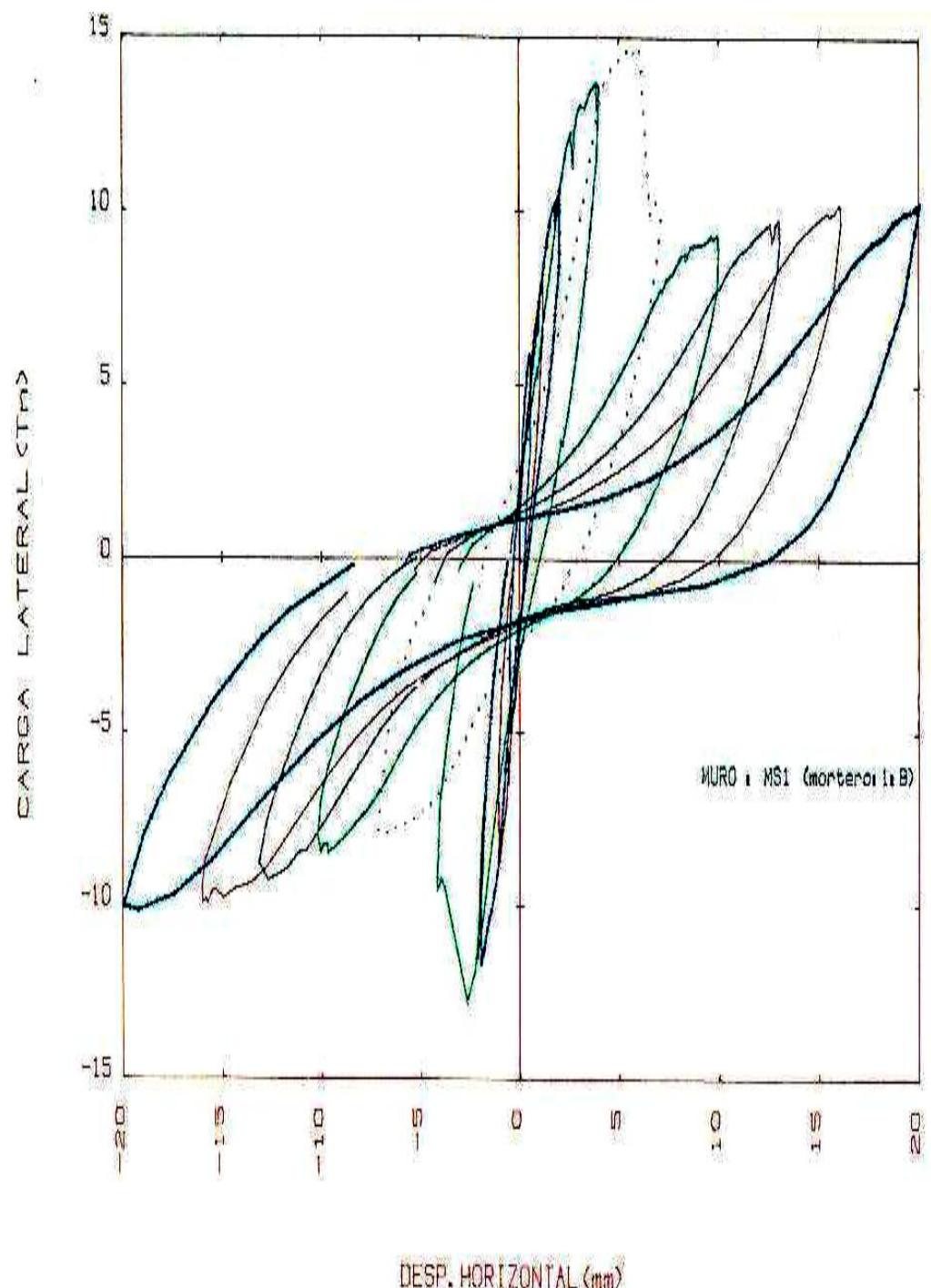


FIG. 56.- PRIMEROS CICLOS-CARGAS MAXIMAS

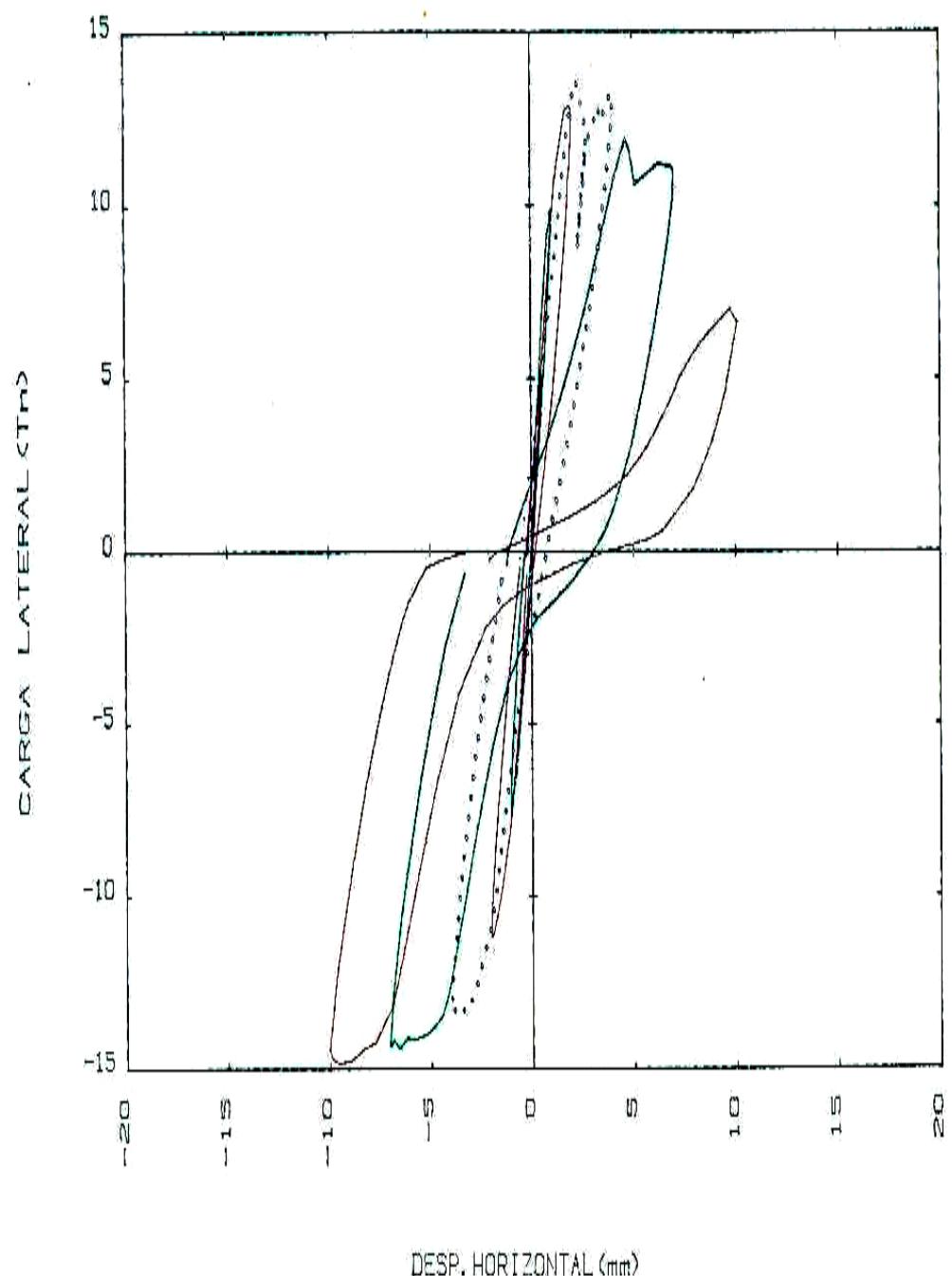


FIG. 57.- PRIMEROS CICLOS-CARGAS MAXIMAS-MURO MS2

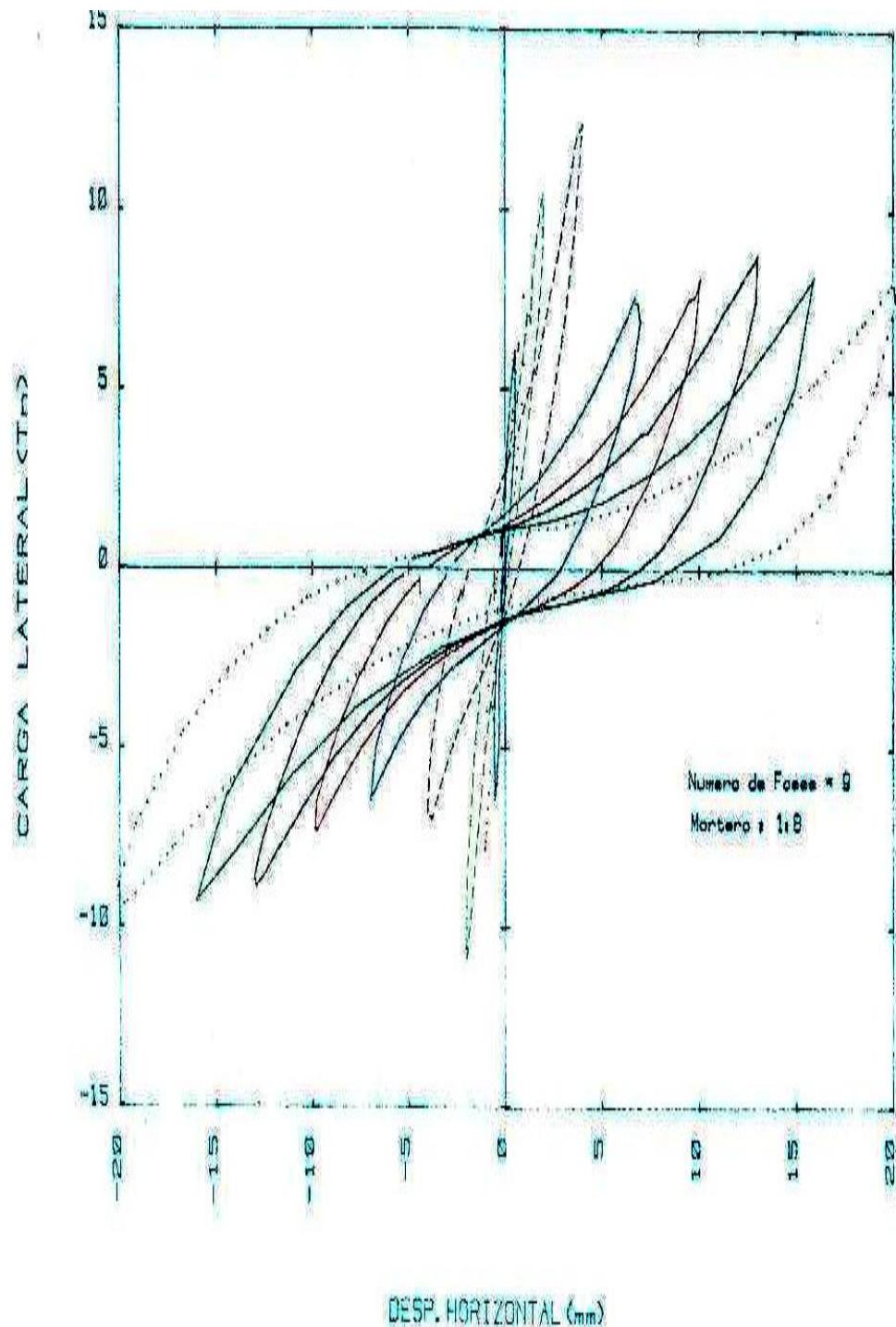


FIG. 58.- CICLOS ESTABLES MURO MS1

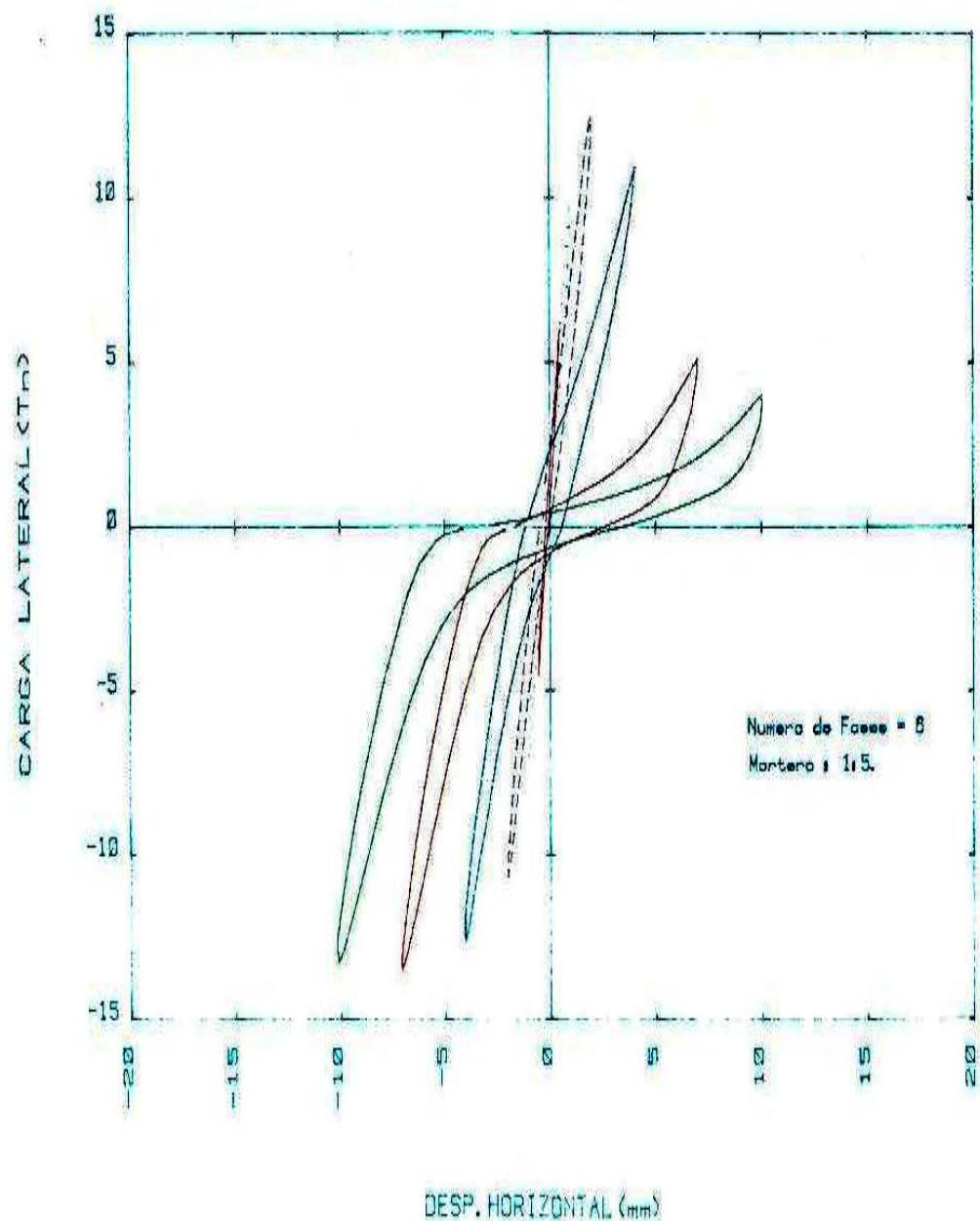


FIG. 59.- CICLOS ESTABLES MURO MS2

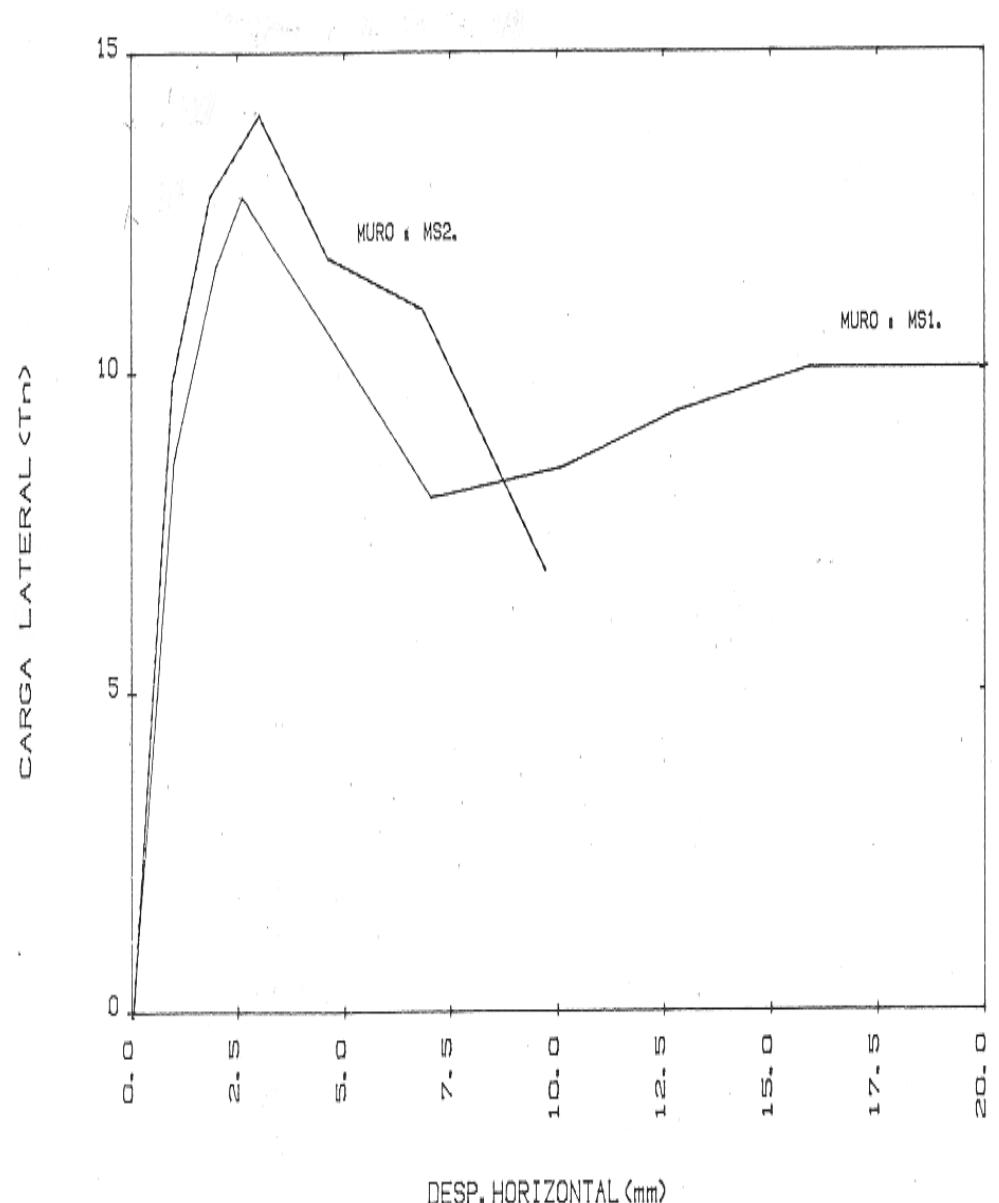


FIG. 60.- ENVOLVENTES DE CARGAS MAXIMAS (PRIMEROS CICLOS)

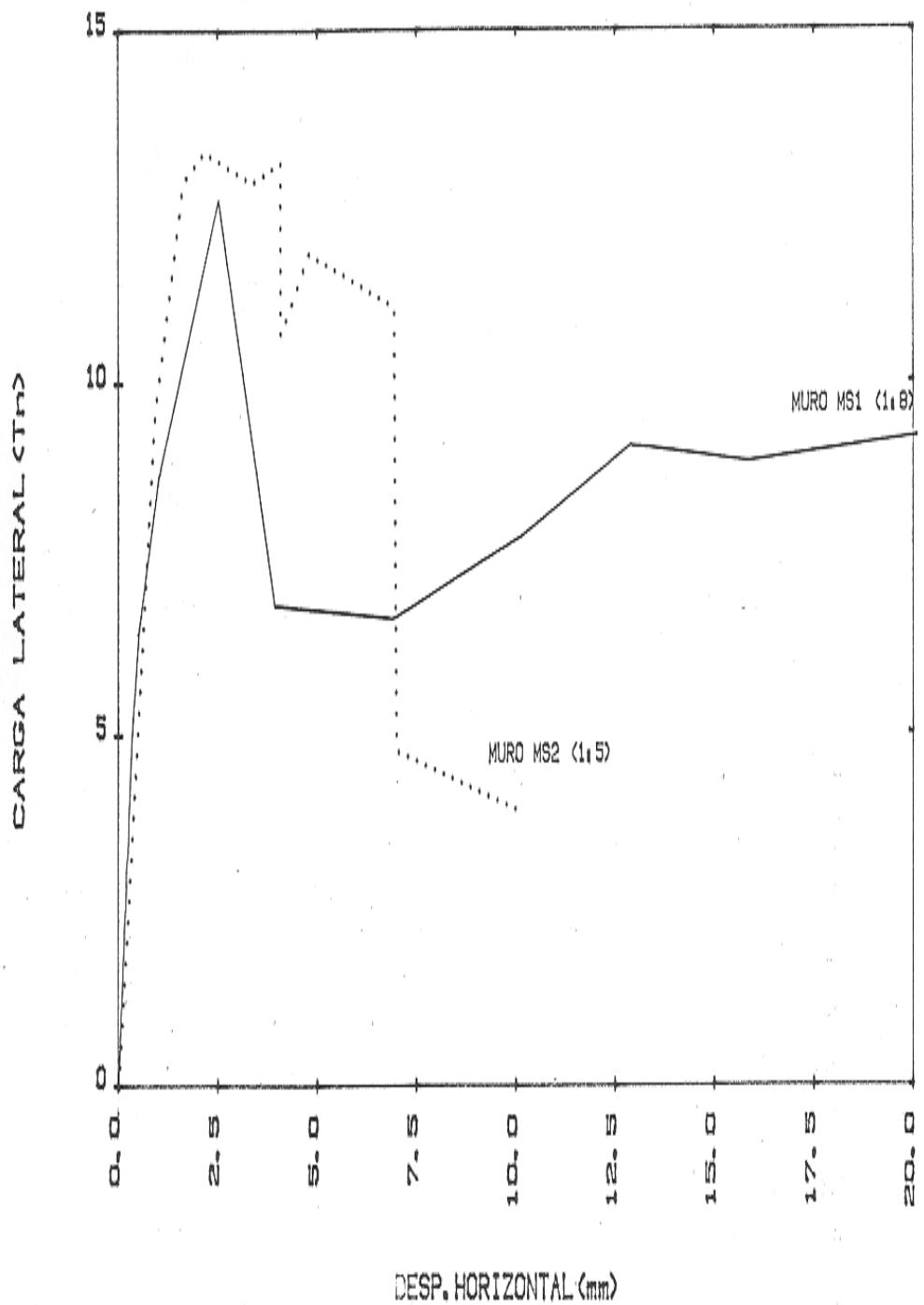


FIG. 61.- ENVOLVENTES DE CICLOS ESTABLES EN MS1 Y MS2

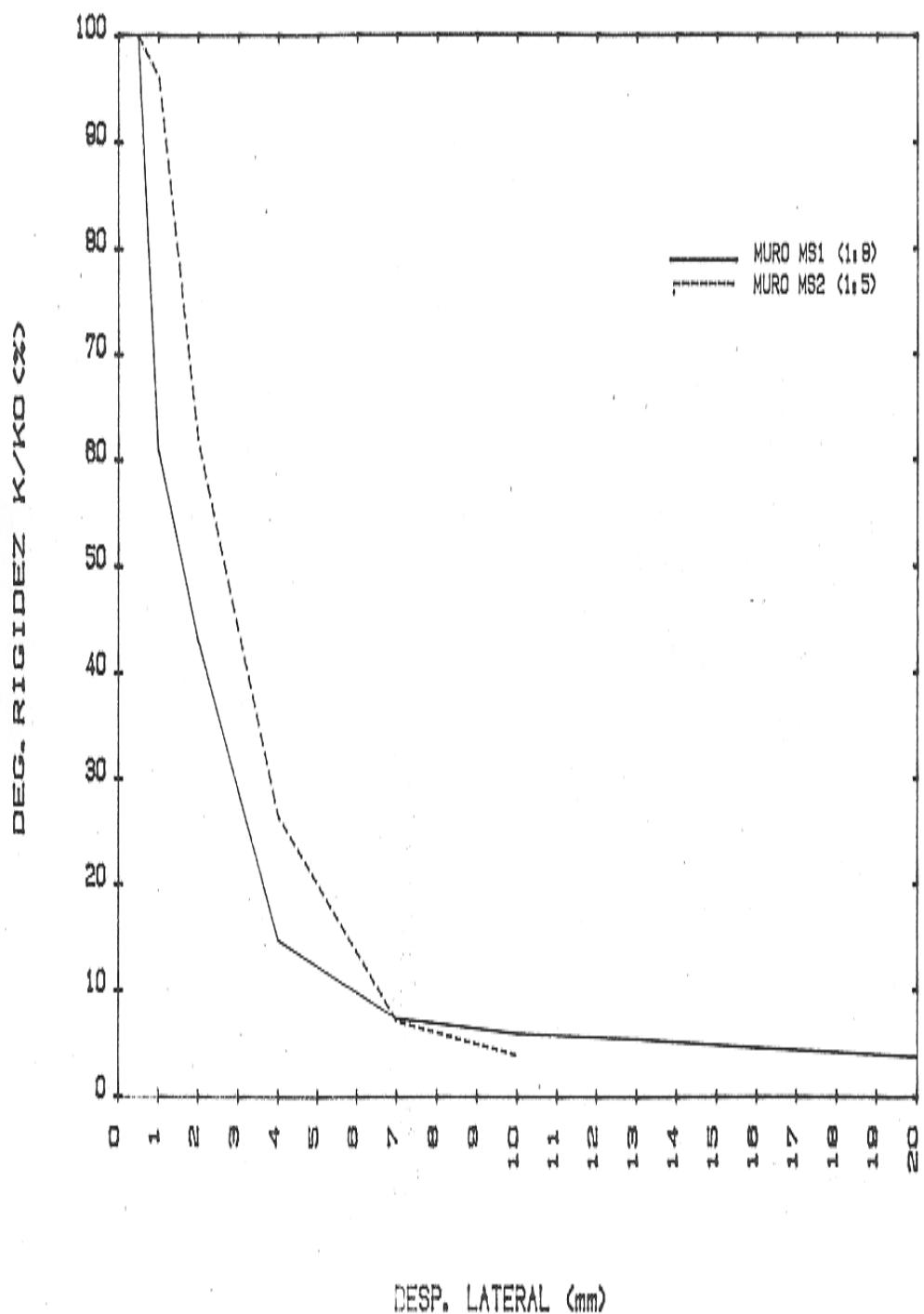


FIG. 62.- DEGRADACION DE LA RIGIDEZ

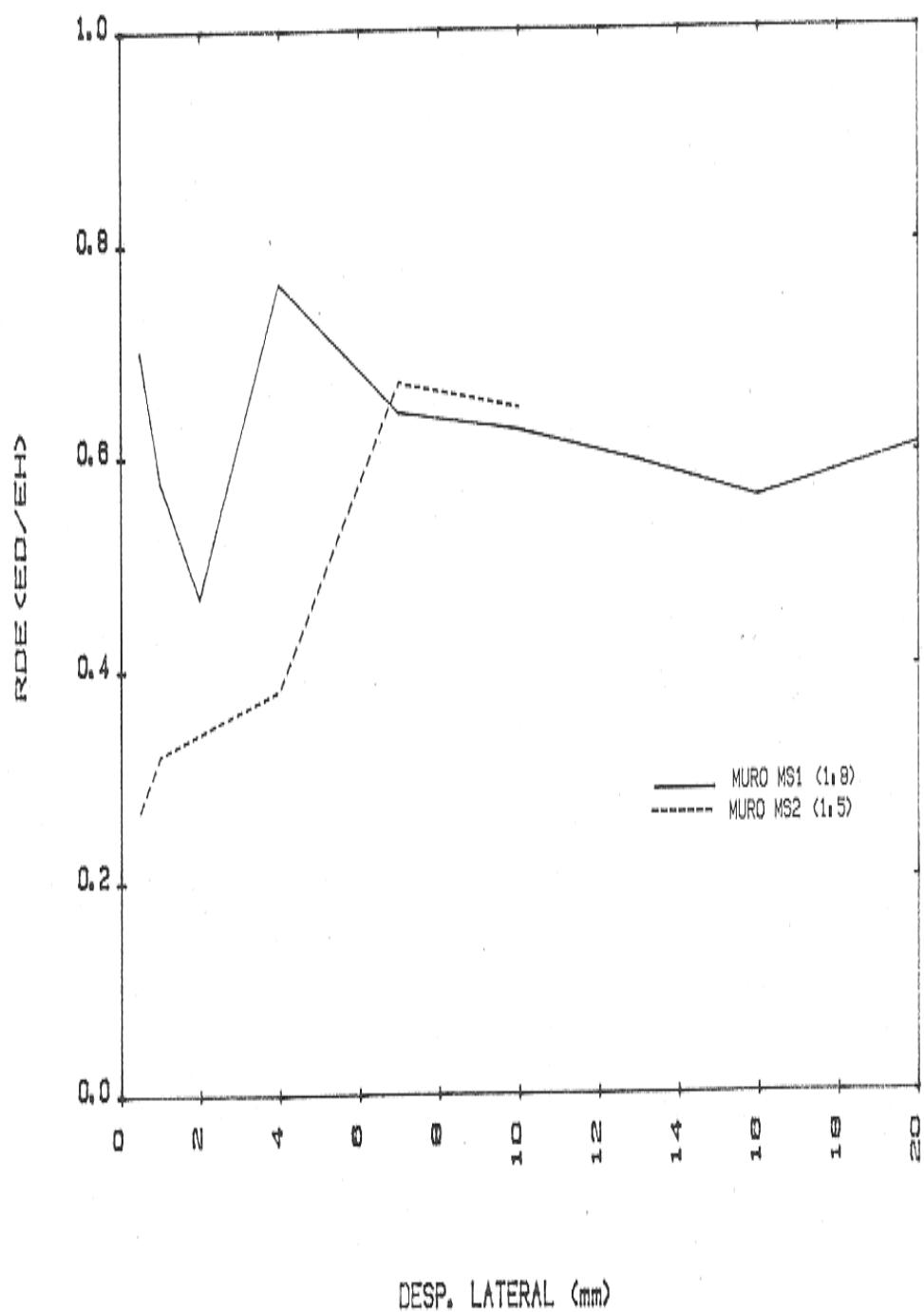


FIG. 63.- RELACION DE DISIPACION DE ENERGIA (RDE)

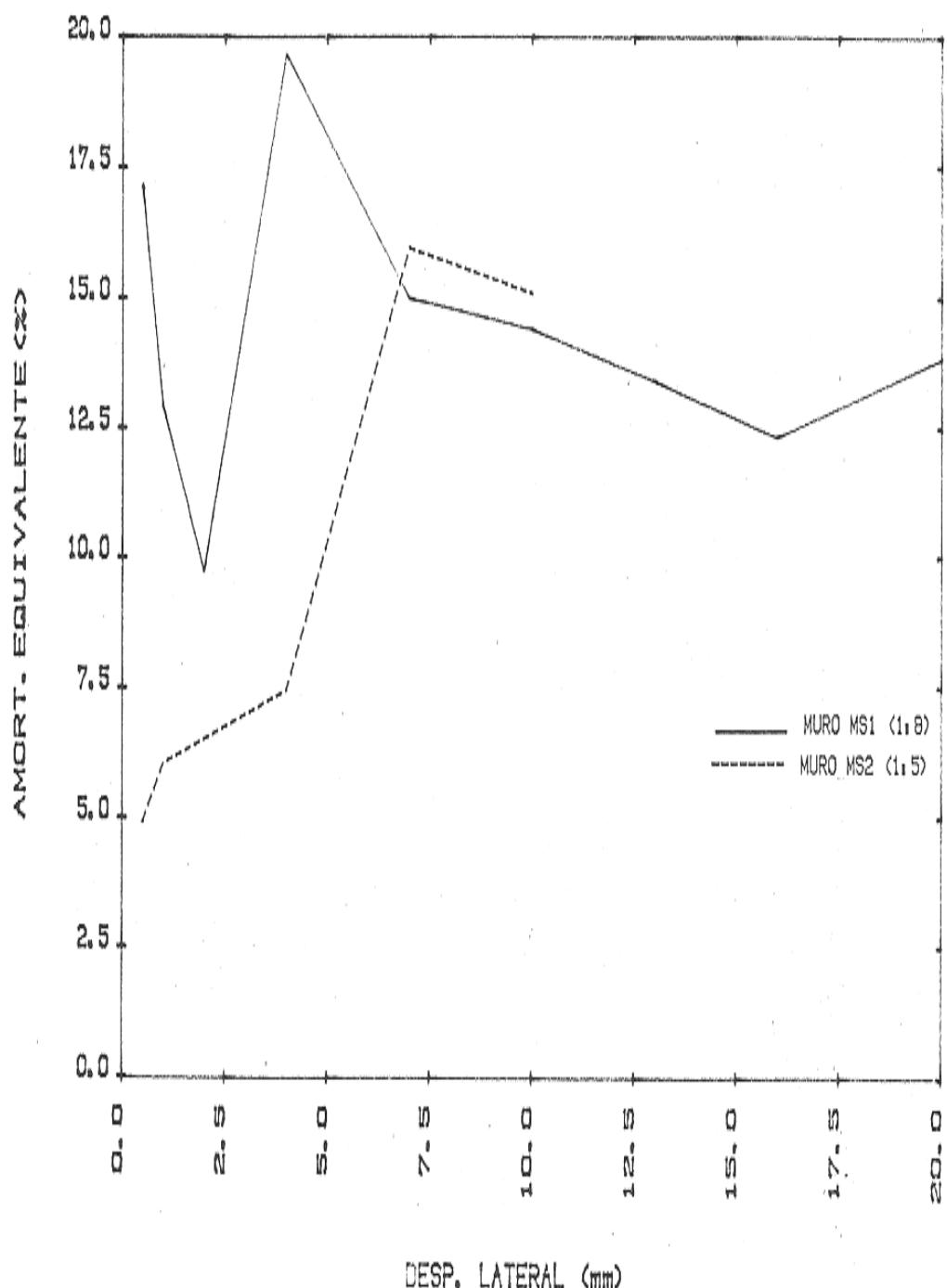


FIG. 64.- AMORTIGUAMIENTO EQUIVALENTE

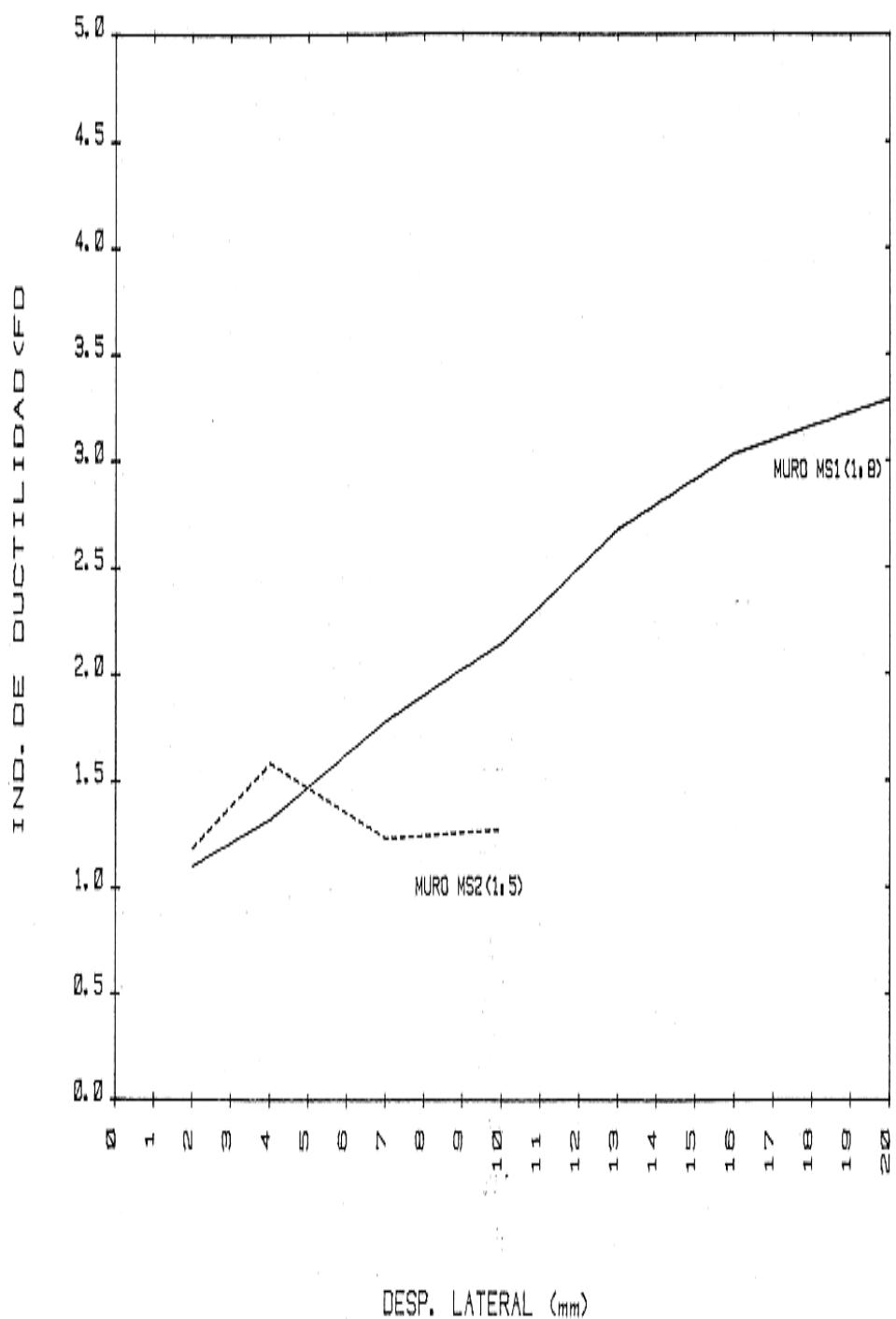


FIG. 65.- VARIACION DEL COEF. INDICATIVO DE DUCTILIDAD

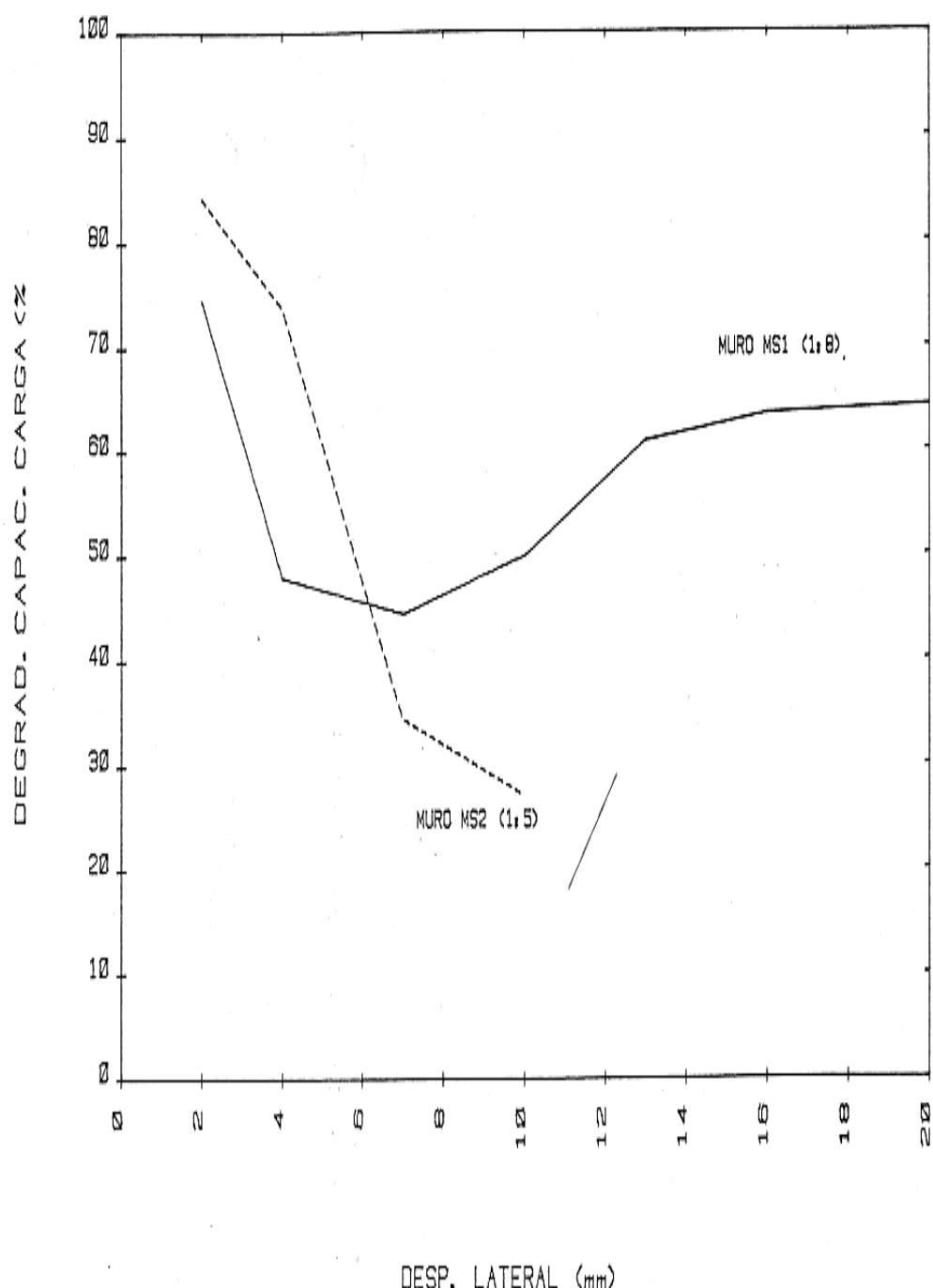


FIG. 66.- DEGRADACION DE CAPACIDAD DE CARGA (V_y/V_r)

IX. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Si bien es cierto que aún no contamos con una cantidad suficiente de ensayos, cuyos resultados nos permitan proponer normas referentes al sillar; considero que del presente trabajo se podría concluir y recomendar lo siguiente:

- a) En la primera parte del Proyecto “USO DEL SILLAR EN LA CONSTRUCCIÓN”, ejecutado por ININVI, se llegó a la conclusión de que el bloque de sillar presenta características superiores al ladrillo de arcilla tipo II; en este proyecto, en el que hemos investigado las cualidades del sillar como unidad de albañilería, sólo se ha verificado características ligeramente superiores en ensayos a pequeña escala, pero en ensayos a escala natural no se ha verificado esta superioridad y tampoco se cumplen los análisis teóricos en el rango elástico.

En la tabla N° 24 mostramos un resumen de nuestros resultados.

- b) Los resultados de los ensayos de corte directo y compresión diagonal que de alguna manera miden la adherencia, muestran una menor resistencia para los especímenes asentados con cal. Un indicio de la causa de la baja resistencia estaría en los ensayos de control, estos nos dicen de una probable mala calidad de las dos marcas de cal utilizadas (pese a que los fabricantes indicaban que era cal hidratada normalizada con más de 80% de CaO), de tal manera que aún no podemos afirmar que los morteros con cal sean menos eficientes para la albañilería con sillar. Lo que sí es evidente es que el uso de la cal hidratada encarecería el costo de una vivienda de 1 ó 2 pisos, ya que los resultados alcanzados para mortero 1:8 pueden ser suficientes en este tipo de construcciones.
- c) El proceso de tratamiento de la unidad utilizado para la construcción de nuestros especímenes, ha demostrado que controla y reduce la alta succión de los bloques de sillar, pero las fallas observadas en los ensayos de corte muestran una adherencia de menor calidad que en albañilería que utiliza ladrillo artesanal (en este tipo de ladrillo se puede observar fallas por tracción diagonal, con sillar siempre obtuvimos fallas por corte en las juntas), aquí recordemos que la succión es sólo uno de los factores que determinan la calidad de la adherencia.

Por otro lado, cabe mencionar que el sistema de tratamiento utilizado no es muy práctico, además que hace más notoria la eflorescencia, lo que nos hace pensar en una posible degradación de la adherencia con la aparición de ésta.

- d) El aumento de la calidad del mortero (1:8 a 1:5) aumentó la resistencia en especímenes pequeños sujetos a corte directo, la compresión diagonal y axial entre 40 a 50%, mientras que en muros a escala natural este incremento fue sólo 15%.

- e) A lo último, agregamos que en la actualidad en Arequipa se viene utilizando el mortero 1:5 para muros de características similares a los ensayados por nosotros, sí consideramos que son viviendas de un solo piso, se recomienda el uso del mortero 1:8 con juntas de 3 cm. Sin embargo el refuerzo vertical en las columnas habría que diseñarlo especialmente para que no degrade la capacidad de carga obtenida al instante de formarse la grieta diagonal.
- f) En la zona de conexión muro-columna se recomienda humedecer al sillar instantes antes de vaciar la columna, para así reducir su alta succión y en vez de utilizar la conexión dentada usar refuerzo horizontal ya que por lo voluminoso del bloque, el dentado no logra su objetivo pudiéndose formar cangrejeras.
- g) La degradación de la rigidez lateral de los muros ensayados muestran un patrón bastante similar a los registrados por muros de albañilería de arcilla confinados.
- h) Debido a la predominancia de la deformación por corte, los muros de sillar fallaron en forma escalonada a través de sus juntas, pese a que su capacidad teórica de flexión era menor que la carga experimental de rotura; y en los ciclos posteriores a la rotura, la carga máxima se mantuvo constante con una magnitud cercana a la capacidad de flexión.
- i) Debe señalarse que defectos constructivos como por ejemplo cangrejeras en los extremos de las columnas, producen un comportamiento sísmico deplorable del sistema, tal como ocurrió en el muro MS2.

**TABLA N° 24: RESUMEN DE LOS RESULTADOS MÁS IMPORTANTES DE
NUESTRA INVESTIGACIÓN Y COMPARACIÓN
CON ENSAYOS EN LADRILLO**

ENSAYO	ALBAÑILERÍA EN SILLAR	ALBAÑILERÍA CON LADRILLO ARTESANAL DE ARCILLA COCIDA (King – Kong)
SUCCIÓN	72 gr/200 cm ² /min (natural) 22 gr/200 cm ² /min (tratado)	70 gr/200 cm ² /min (natural) ref.6 19 gr/200 cm ² /min (tratado) ref.26
CORTE DIRECTO (sin confinamiento)	$\tau^* = 1.63 \text{ kg/cm}^2$ (1:8) $\tau^* = 2.5 \text{ kg/cm}^2$ (1:5) $\tau^* = 1.48 \text{ kg/cm}^2$ (1:1:5)	---
COMPRESIÓN AXIAL	$\bar{f}_m = 45 \text{ kg/cm}^2$ (1:8, 5.3%) $\bar{f}_m = 52.8 \text{ kg/cm}^2$ (1:5, 10.9%)	$\bar{f}_m = 41.2 \text{ kg/cm}^2$ (1:5, 3.8%) ref. 26
COMPRESIÓN DIAGONAL	$v_m = 3.43 \text{ kg/cm}^2$ (1:8, 10.2) $v_m = 4.98 \text{ kg/cm}^2$ (1:5, 11.0%) $v_m = 2.65 \text{ kg/cm}^2$ (1:1:5, 15.0%)	$v_m = 5.76 \text{ kg/cm}^2$ (1:5, 5.0%) ref. 26
CORTE EN MUROS A ESCALA NATURAL	$V_R = 2.04 \text{ kg/cm}^2$ (1:8) $V_R = 2.35 \text{ kg/cm}^2$ (1:5)	$V_R = 3.4 \text{ kg/cm}^2$ (1:5) ref. 26
RELACIONES CONOCIDAS	$f'm/fb = 0.46$ (1:8) $f'm/fb = 0.5$ (1:5) $E/f'm = 426$ (1:5) (i) $E/f'm = 534$ (1:8) (i) $G/E = 0.46$ (1:8) (ii)	$E/f'm = 500$ (ref. 27) $G/E = 0.4$ (ref. 27)

(i) Para fines de Ingeniería se puede asumir $E/f'm = 500$
(ii) Para fines de Ingeniería se puede asumir $G/E = 0.4$

X. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Teniendo en cuenta los resultados y las conclusiones anotadas anteriormente, se propone los siguientes puntos para su investigación:

- i) Si se ha confirmado que con un mortero de mayor calidad vamos a mejorar la capacidad de carga de un muro, sería interesante ensayar nuevamente muretes pero con mortero 1:4 y obtener tal vez una falla por tensión diagonal, con el consiguiente aumento de la capacidad de carga. De producirse esto ensayaríamos un muro con mortero 1:4 y refuerzos de 4 $\phi \frac{1}{2}$ ".
- ii) Ya que la utilización de la unión dentada muro-columna no cumplió su objetivo y además el muro MS2 tuvo problemas de cangrejera, se propone ensayar nuevamente dos muros con mortero 1:5, sin unión dentada, con y sin refuerzo horizontal.
- iii) El número de especímenes ensayados en este proyecto es muy reducido como para proponer una norma, por lo tanto sería conveniente la realización de una mayor cantidad de ensayos en especímenes a escala reducida y ratificar o rectificar las relaciones obtenidas para predecir cargas de fallas en especímenes a escala natural.
- iv) Realizar ensayos de corte directo con confinamiento variable para determinar exactamente la adherencia y el coeficiente de fricción de la albañilería de sillar.
- v) Ensayar especímenes pequeños utilizando morteros con cal hidratada (de calidad plenamente garantizada, 80% de CaO), para así ratificar o rectificar los resultados obtenidos en este proyecto. Además, realizar esto mismo con especímenes sin tratamiento previo (sin mojar) y mortero con cal, e investigar el efecto de la edad del mortero con cal sobre la resistencia al corte.
- vi) Investigar en efecto del refuerzo vertical en las columnas diseñándolo especialmente como para que pueda observar la carga que produce el agrietamiento diagonal.
- vii) Se propone ensayar a carga lateral muros a escala natural variando la carga vertical con el objeto de estudiar su efecto en la resistencia al corte y además su ductilidad.

XI ARCHIVO FOTOGRÁFICO



FOTO N°1
VISTA DE LA CANTERA DE AÑASHUAYCO
(N.O. DE AREQUIPA)

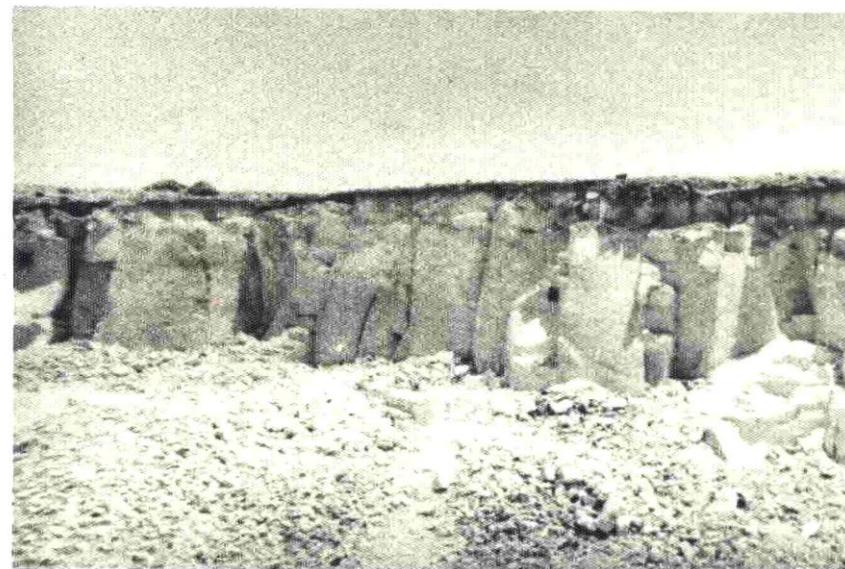


FOTO N°2



FOTO N°3
PICAPEDRERO PALANQUEANDO UN BLOQUE DE SILLAR
LUEGO DE HABER SIDO VOLCADO



FOTO N°4
BLOQUE INICIAL DEL BLOQUE CON BARRETA DE PUNTA PLANA



FOTO N° 5
REFINADO FINAL DEL BLOQUE

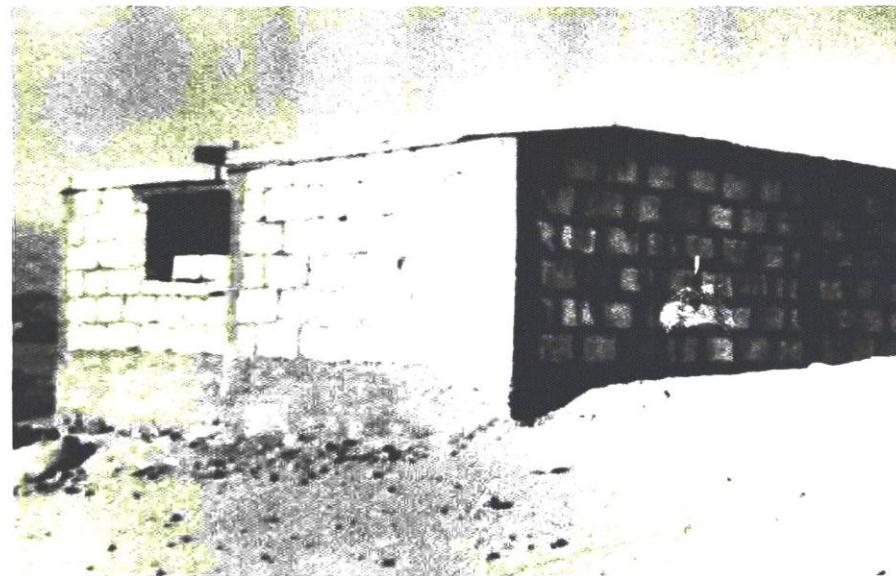




FOTO N°7
MONASTERIO DE SANTA CATALINA
FAMOSA CONSTRUCCION CON PIEDRA SILLAR



FOTO N° 8



FOTO N° 10

PORTAL DE FLORES EN LA PLAZA DE ARMAS DE AREQUIPA, DESPUES DEL TERREMOTO DE 1868
(COLECCION DEL INGENIERO ANIBAL DIAZ)

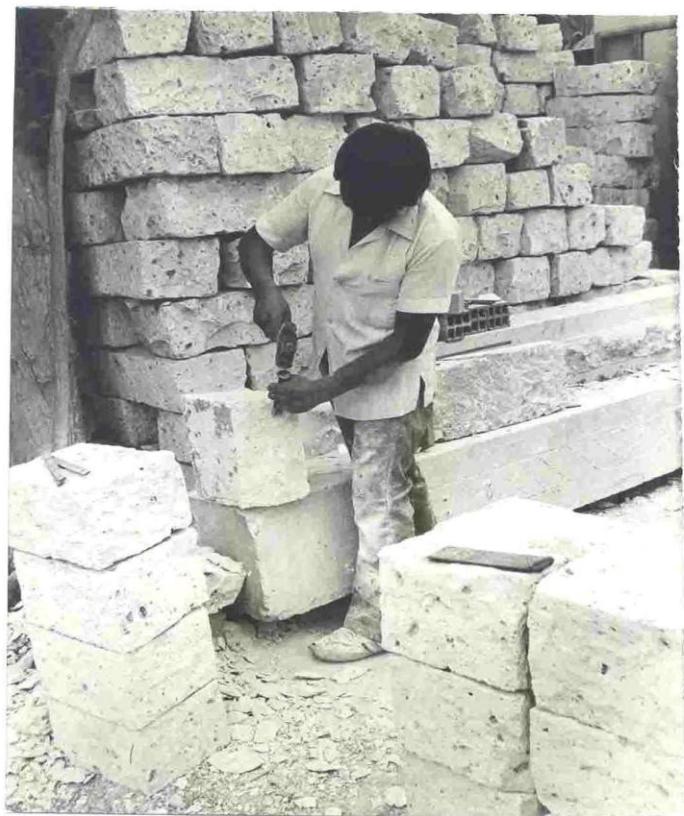


FOTO N°II
PREPARACION DE LOS BLOQUES
PARA EL ENSAYO DE COMPRESSION AXIAL



FOTO N°12
PREPARACION DE LAS UNIDADES COMPONENTES
DE LOS MURETES Y MUROS A ENSAYAR

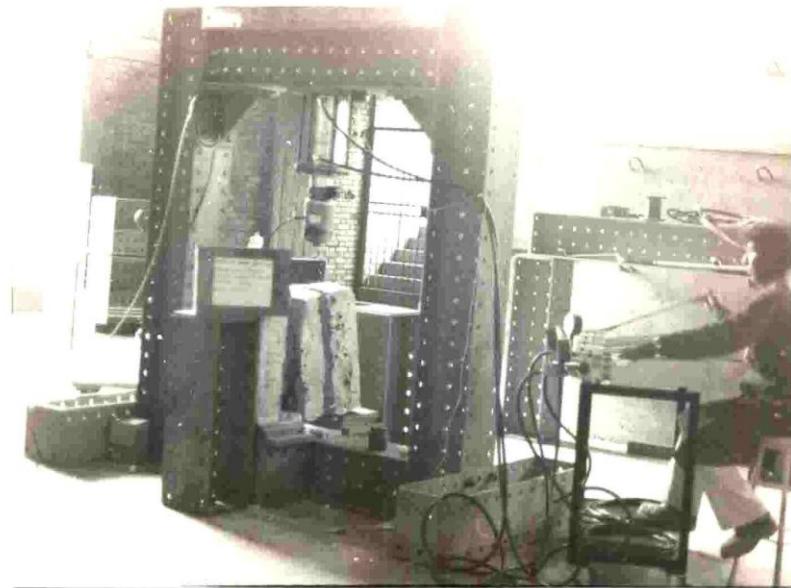


FOTO N° 15
DISPOSITIVO DE ENSAYO DE CORTE DIRECTO
(SIN CONFINAMIENTO)

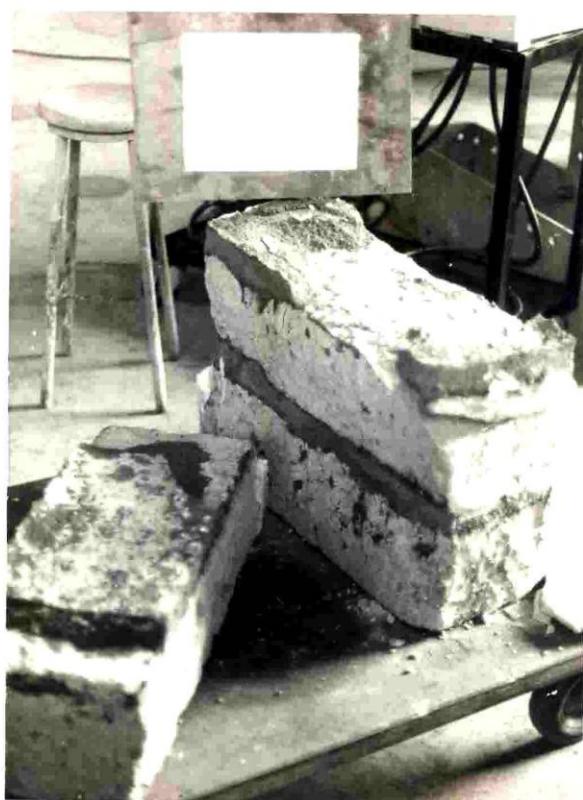


FOTO N° 16
FALLA TIPICA EN EL ENSAYO DE CORTE DIRECTO
NOTEMOS LA ADHERENCIA LOGRADA

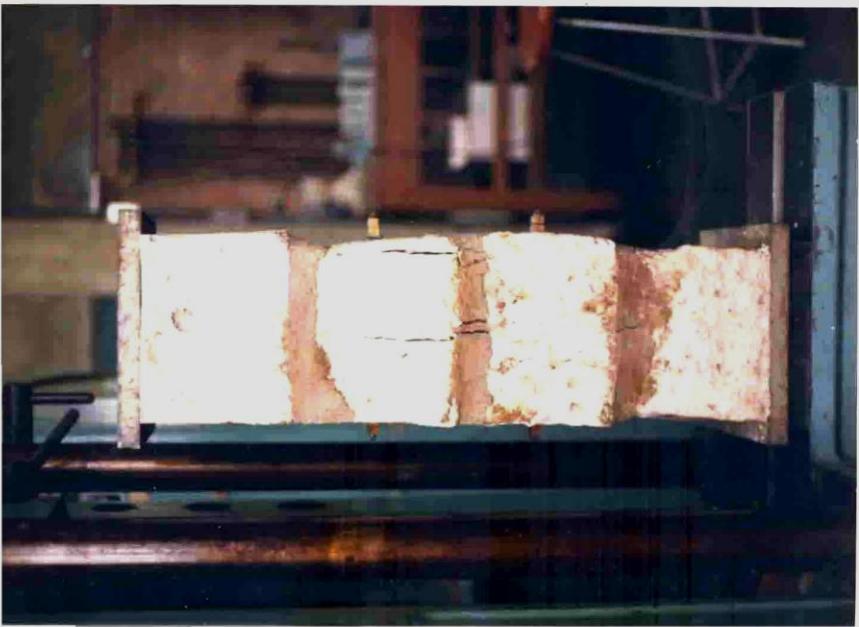


FOTO N°18
FALLA TIPICA EN EL ENSAYO
DE COMPRESSION AXIAL , NOTESE LA FISURA VERTICAL

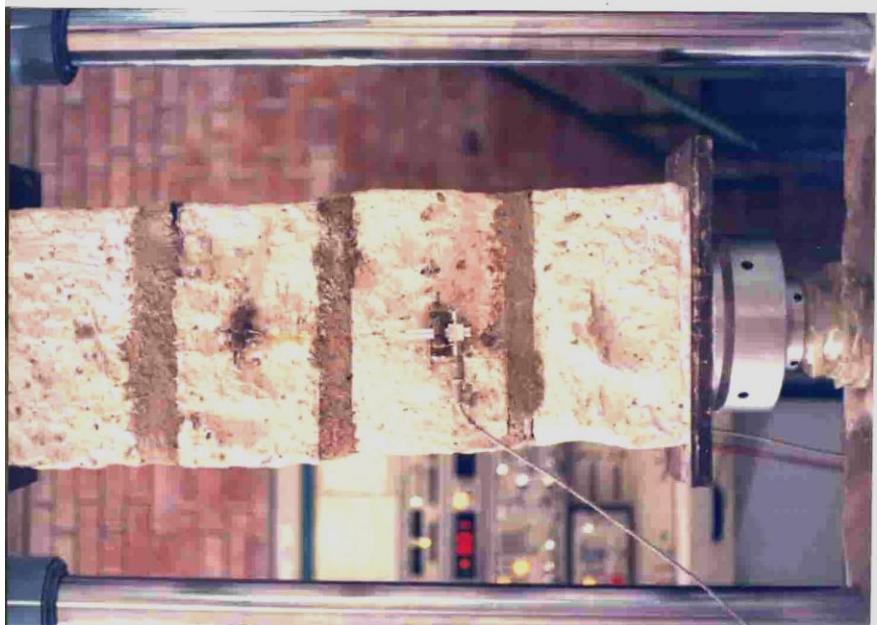


FOTO N°17
DISPOSITIVO DEL ENSAYO
DE COMPRESSION AXIAL EN PILAS



FOTO N°19
ENSAYO DE COMPRESION DIAGONAL Y EQUIPO UTILIZADO

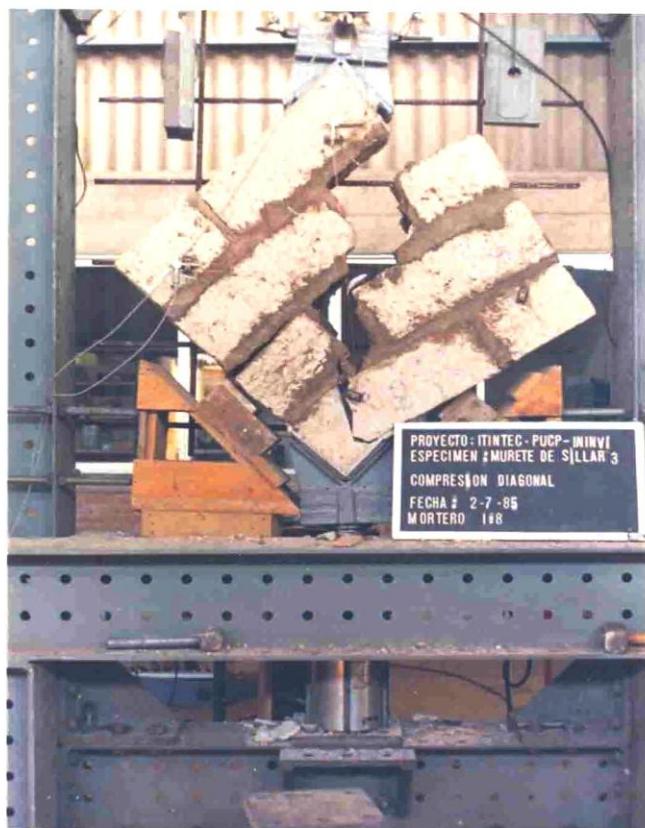


FOTO N° 20
FALLA TIPICA LOGRADA PARA EL MORTERO 1:8
EN EL ENSAYO DE COMPRESION DIAGONAL



FOTO N° 21

PRIMERA ETAPA DE CONSTRUCCION DEL MURO
MEDIA ALTURA Y JUNTAS VERTICALES DE ULTIMA HILADA SIN MORTERO



FOTO N° 22

EFLORESCENCIA PERSISTENTE, AUN DESPUES DE HABER APLICADO LA PINTURA DE CAL



FOTO N° 23

VISTA GENERAL DEL DISPOSITIVO DE ENSAYO Y LOS INSTRUMENTOS DE CONTROL PARA EL ENSAYO DE CORTE EN MUROS A ESCALA NATURAL

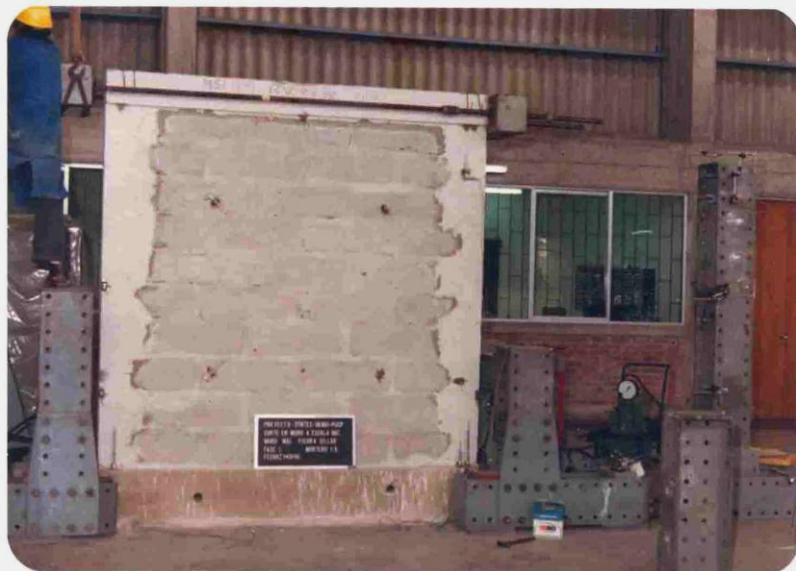


FOTO N° 24

UBICACION DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDICION (LVDT's)



FOTO N° 25
FASE N°8 EN EL ENSAYO DEL MURO MSI (MORTERO 1:8)
APLICANDO DESPLAZAMIENTO NEGATIVO, NOTEMOS EL TIPO DE
FALLA ESCALONADA, TÍPICO DE FALLA POR CORTE EN LAS JUNTAS

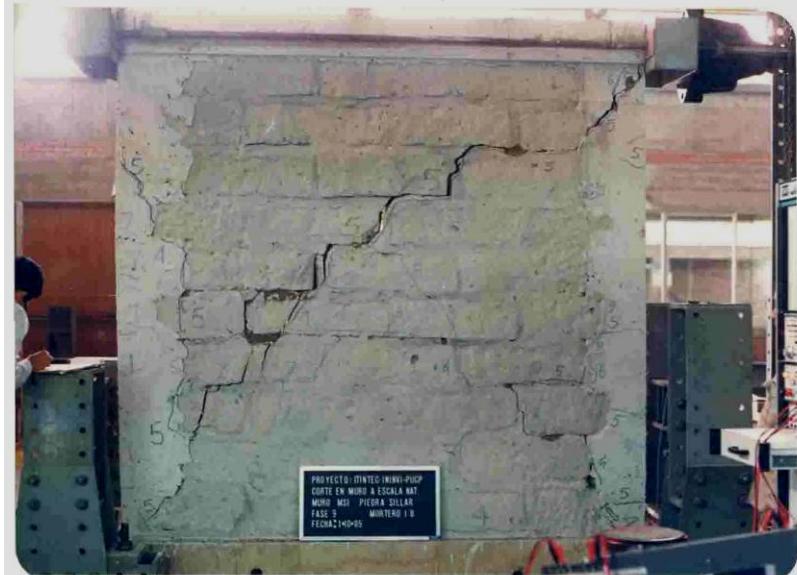


FOTO N° 26
FASE N°9 EN EL ENSAYO DEL MURO MSI (MORTERO 1:8)
APLICANDO DESPLAZAMIENTO POSITIVO, TAMBIÉN SE
PRESENTA LA FALLA ESCALONADA.



FOTO N° 27
FASE N° 5 EN EL ENSAYO DEL MURO MS2

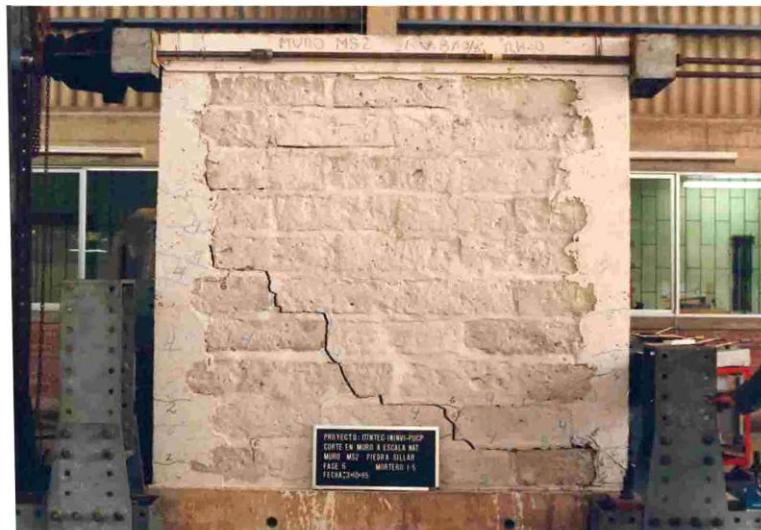


FOTO N° 28
FASE N° 6 EN EL ENSAYO DEL MURO MS2 APLICANDO
DESPLAZAMIENTO POSITIVO, PODEMOS VER EL DESPLAZAMIENTO
INFERIOR DERECHO Y ADEMÁS COMPARREMOS EL COMPORTAMIENTO
CON LA ANTERIOR FASE

PROYECTO: ITINTEC-ININVI-PUCP
CORTE EN MURO A ESCALA NAT.
MURO MS2 PIEDRA SILLAR
FASE 6 MORTERO 1:5
FECHA: 3-10-85



FOTO N° 29

ESTADO FINAL DE LA COLUMNA DERECHA, ZONA INFERIOR
ES NOTORIO EL DESPLAZAMIENTO DEL BLOQUE Y SU
SEPARACION DE LA COLUMNA .



FOTO N° 30

RECONOCIMIENTO POST- ENSAYO DEL MURO MS2
PODEMOS IDENTIFICAR LA CANGREJERA Y DISTINGUIR
COMO SE DEFORMO EL REFUERZO VERTICAL

A N E X O : RESUMEN

EL SILLAR

Canteras

Según estudios realizados, el monto de sillar que se extiende por el subsuelo de Arequipa abarca una superficie de 50 km con un espesor de 250 m.

Existen diferentes variedades de sillar, según la cantera, siendo los mas utilizados el sillar blanco de las canteras de Añashuayco y Los Quicos y el sillar rosado de las canteras de Yura, Quishuarani y Añashuayco.

En la quebrada de Añashuayco, ubicada a 5 km de la ciudad se viene explotando este material desde hace mucho tiempo, dejando a la vista grandes murallones de 20 a 30 m de alto que nos muestra parte del gran potencial existente.

EXPLOTACIÓN Y USO ACTUAL

La explotación del sillar se realiza en forma artesanal. Esta forma de explotación, además de su poca productividad, acarrea peligro y afecta la salud de las canteras por las condiciones en que realiza esta labor.

Actualmente, el sillar es utilizado en Arequipa como en albañilería confinada, con vigas y columnas de concreto armado, encontrándose utilizada en edificios de 1 y 2 pisos. Se utiliza también como recubrimiento de edificaciones de ladrillo y concreto armado con fines ornamentales.

El sillar constituye un material alternativo para la construcción de viviendas como lo atestiguan las numerosas viviendas existentes, habiendo probado tener características adecuadas a través de numerosas construcciones antiguas.

Sin embargo, su utilización se realiza actualmente de manera empírica, por lo que con un mejor conocimiento del material y de la albañilería con él construida, se podrá posibilitar su uso en forma mas racional y segura.

PRIMERA ETAPA DE INVESTIGACIÓN

El material de estudio fue el proveniente de la cantera de Añashuayco que es considerada como una de las que posee los mejores sillares.

Normalmente se preparan bloques de 20 x 32 x 55 cm denominados corrientes y de 20 x 25 x 60 cm denominados especiales.

La utilización de equipo mecánico, empleado para la fabricación de enchapes, presenta el inconveniente del gran desgaste que sufren las sierras de acero para el cortado de sillar.

En la siguiente tabla (N° 1) resumimos los resultados de dicha primera etapa de investigación.

TABLA N° 1: PROPIEDADES FÍSICAS DE BLOQUES DE SILLAR

ENSAYO	RESULTADOS
Geometría (Norma ITINTEC 331.018) Ref. 5	Dimensiones nominales : Dimensiones ensayadas (cm) $\ell = 60 \text{ cm}$, $a = 25 \text{ cm}$ $\ell = 60.6$, $a = 24.6$, $e = 18.4$ $e = 20 \text{ cm}$ $\ell = 55 \text{ cm}$, $a = 32 \text{ cm}$ $\ell = 56.4$, $a = 32$, $e = 19.2$ $e = 20 \text{ cm}$
Peso específico (Norma ASTM C-127-59) Ref. 6	1.26 gr/cm ³
Absorción (%) (Norma ITINTEC 331.018)	27.88 (ref. 5) 30.88 (ref. 5)
Coeficiente de saturación (Norma ITINTEC 331.018)	1.00 (el máximo valor)

SEGUNDA ETAPA DE INVESTIGACIÓN

CONTROL DE PARÁMETROS

Para evitar fuertes dispersiones en los resultados de los ensayos tanto de compresión axial, corte directo, compresión diagonal y corte en muros a escala natural; y de este modo tener definida a la variable en estudio, realizándose la mínima cantidad de ensayos, se controló al máximo las siguientes variables:

Succión.- En base a normas ITINTEC se realizaron ensayos de succión, con diferentes tiempos de sumergido o tratamiento de la unidad (similar a lo que se ensaya en ladrillos). La succión natural del bloque de sillar es de 72 gr/min.; pero sumergido el bloque 10 min. y oreándolo 2 min obtuvimos una succión de 23 grs., éste fue el sistema de reducción en los bloques.

Calidad del bloque de sillar.- El lote de bloques utilizado pertenece al utilizado por ININVI para la determinación de las propiedades físicas y que ya mencionamos anteriormente. En resumen el bloque de sillar representa características similares a las del ladrillo tipo II (ladrillo artesanal). Ver tabla R-1.

ENSAYO DE CORTE DIRECTO (sin carga de confinamiento)

Por medio de este ensayo determinamos de manera cualitativa los dos morteros que lograron mayor adherencia.

Se ensayaron los siguientes morteros: 1:1:8, 1:0:8, 1:1:5, 1:0:5 proporciones de cemento, cal y arena. Eran cuatro especímenes por cada tipo de mortero y todos con una edad de 28 días.

En la tabla R-2 se resumen los resultados de este ensayo y en ella podemos apreciar la baja adherencia que mostraron los morteros con cal hidratada, muy posible que sea por la mala calidad de la cal utilizada que es lo que se expende convenientemente en nuestro mercado, por lo tanto utilizaremos los morteros 1:5 y 1:8.

ENSAYOS DE COMPRESIÓN AXIAL

En estos ensayos determinamos la resistencia a la compresión ($f'm$) y el módulo de elasticidad (E_m).

Se ensayaron 4 pilas con mortero 1:8 y 4 pilas con mortero 1:5, todos con 28 días de edad. La tabla R-3 muestra los resultados obtenidos.

Una explicación de la baja resistencia a la compresión experimentada podría ser “el efecto junta” que en este caso se hace mas notoria debido a la gran diferencia entre módulos de elasticidad; también puede ser causa de esta baja

resistencia el hecho de la dificultad de construir un elemento perfectamente vertical y que tenga características uniformes con bloques tan irregulares. Por estas razones se introducen excentricidades accidentales que reducen la resistencia.

La falla característica fue un agrietamiento vertical.

De nuestros resultados obtuvimos relaciones como : $f'm/fb = 0.46$ y 0.53 (relación entre la resistencia a la compresión axial de la albañilería y la unidad de albañilería), para los morteros $1:8$ y $1:5$; $E/f'm = 426$ (mortero $1:5$) y 534 (mortero $1:8$), notemos pues que son valores que se encuentran en los rangos normales para albañilería.

Ver tabla R-4.

ENSAYOS DE COMPRESIÓN DIAGONAL

Por medio de estos ensayos fue posible determinar el módulo de corte (G), el esfuerzo de corte ($v'm$) y a partir de ellos verificar algunas relaciones con E_m y $f'm$.

Los muretes ensayados eran cuadrados (de bloque y medio de lado), juntas de 3 cm y una edad de 28 días.

En las tablas R-5 y R-6, detallamos los resultados del ensayo, o sea los esfuerzos cortantes ($v'm$) y los módulos de corte (G).

La resistencia característica al corte ($v'm$) calculada fue de 3.08 kg/cm^2 . ($1:8$) y 4.43 kg/cm^2 . ($1:5$) y la relación $G/E = 0.37$ ($1:5$) y 0.3 ($1:8$), siendo $G/E = 0.4$ el valor que nos señala el reglamento para unidades de arcilla cocida.

ENSAYOS DE CORTE EN MUROS A ESCALA NATURAL

El objetivo de este ensayo era estudiar la capacidad estructural de los muros de sillar mediante el ensayo ante cargas alternadas, así podremos notar cuán importante es el confinamiento que le dan los marcos de concreto y establecer diferencias en rigidez, formas de falla, cargas últimas y comportamiento inelástico entre los dos diferentes morteros a utilizar ya que ensayaremos 2 muros, uno con mortero $1:5$ y otro con mortero $1:8$.

Una característica importante de los muros ensayados fueron el refuerzo vertical $4 \phi 3/8"$, definidos en razón de un simple cálculo para una estructura de un piso, además asimilando que ésta es la cuantía que utilizan actualmente los pobladores de los Pueblos Jóvenes de Arequipa.

Otra característica importante fue el edentado de la unión muro columna. Las dimensiones del muro fueron asumidas en base a razones de simetría (composición de hiladas) y compatibilidad con el dispositivo de ensayo.

Los muros fueron construidos a ritmo de $\frac{1}{2}$ altura por día. El concreto utilizado se preparó en mezcladora y fue vibrado durante el vaciado, en la viga de cimentación se utilizó concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ y para el marco de confinamiento $f'c = 175 \text{ kg/cm}^2$.

El muro N° 1, que utilizó mortero 1:8 (cemento:arena) para el asentado de los bloques de sillar; tuvo una falla por corte en las juntas o también llamada falla escalonada. Este tipo de falla es una de las más características que pueden ocurrir en muros sometidos a carga lateral, se expresa con un cambio brusco de la rigidez que por ejemplo en este muro tuvo lugar durante la quinta fase de carga.

Existen algunas relaciones empíricas que predicen las cargas de agrietamiento (tomando en cuenta el tipo de falla) a partir de ensayos con especímenes a escala reducida y de la carga de rotura (Pto. R) que dice:

$$V_R / \sqrt{f_m} = 0.24 \text{ y } V_R / \bar{v}_m = 0.31$$

En el muro N° 1, el pto. R nos representa una resistencia al corte $VR = 2.6 \text{ kg/cm}^2$; siendo $v_m = 3.43 \text{ kg/cm}^2$ (ensayo de compresión diagonal con mortero 1:8) y $f_m = 45 \text{ kg/cm}^2$ (ensayo de compresión axial con mortero 1:8), obtenemos:

$$VR / \sqrt{f_m} = 0.39 \text{ y } VR / \bar{v}_m = 0.76$$

Se aprecia que los valores obtenidos tienen muy poco que ver con los arriba mencionados para albañilería de ladrillo.

De otro lado el muro N° 2, asentado con mortero 1:5, tuvo una carga de agrietamiento (pto. R) cercana a la del muro N° 1, pero no es posible hacer comentarios de sus resultados debido a que posteriormente al ensayo se detectó una "cangrejera" en la base de la columna derecha, lo que sin duda ha influenciado en el resultado del ensayo.

Finalmente vale la pena mencionar dos características importantes que se dieron en los ensayos: La primera anota que el 60% de los dientes de las columnas se desprendieron del muro, esto obedece a una mala adherencia entre bloque y concreto, por lo tanto el adentado agrava el problema. La segunda anota que los muros ensayados mostraron una gran aflorescencia (a consecuencia del tratamiento de la unidad), que se aminoró con la pintura de cal que se les aplicó previo al ensayo

TABLA N° R-1

Prop. Físicas Sillar	Prop. Mecánicas Sillar	Ladrillo Tipo II
Geometría: (cm) 60.6 x 24.6 x 18.4	Resist. a Compresión 87.86 kg/cm ²	Resist. a compresión 70 kg/cm ²
Peso específico 1.26 gr/cm ³	Módulo de rotura 13.8 kg/cm ²	Módulo de rotura 7 kg/cm ²
Absorción 30.9%	Módulo de elasticidad 56,875 kg/cm ²	Absorción sin límite
Coefic. de Saturación 1.00		Coef. de Saturación sin límite

TABLA N° R-2
RESULTADOS DEL ENSAYO DE MEDICIÓN ADHERENCIA
POR CORTE DIRECTO
(Sin carga de confinamiento)

Especímenes: Pilas con bloques de sillar
(4/cada mortero)

Mortero Cemento:cal:arena	τ (kg/cm ²)	τ^* (kg/cm ²)	C.V. (%)
1 : 0 : 8	2.58	1.63	36.9
1: 0 : 5	3.10	2.50	19.5
1 : 1 : 8	1.67	1.47	12.2
1 : 1 : 5	2.05	1.48	27.8

$$\tau^* = \tau (1 - C.V.) = \text{Resistencia característica a Corte Directo}$$

TABLA N° R-3
RESULTADOS DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN AXIAL (f'm)

Especímenes: Pilas con bloques de sillar
(4/cada mortero)

Mortero	fm (kg/cm ²)	f'm (Kg/cm ²)	C.V. (%)	f'm/fb
1:8	45.00	40.40	5.3	0.46
1:5	52.75	46.70	10.9	0.53

$$f'm = 0.8975 \times fm (1 - 1.5(C.V. - 0.1))$$

TABLA N° R-4
MÓDULOS DE ELASTICIDAD DE LA PILA : Em
(Promedio de 3 pilas)

Mortero	Em (kg/cm ²)	C.V. (%)	E/f'm
1 : 8	21573	10.2	534
1 : 5	19876	12.8	425.6

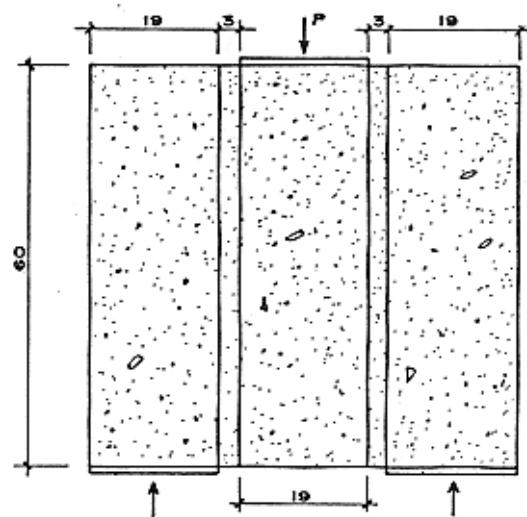


FIG. 8 Ensayo de corte directo
(sin confinamiento)

Escala 1'75

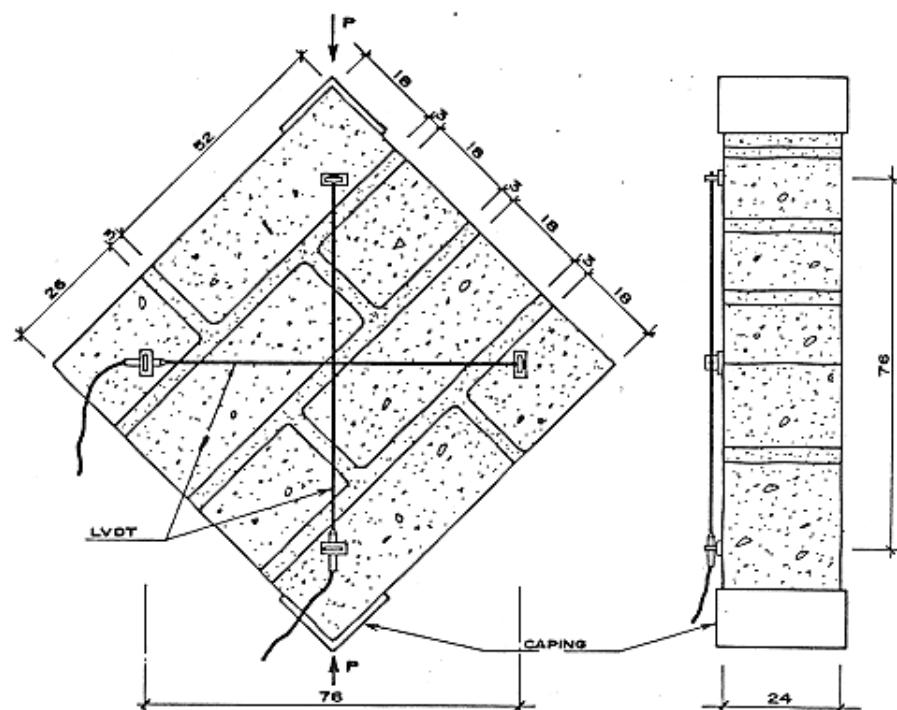


FIG. 9 Ensayo de compresión diagonal

Escala 1'10

FIG. 11 Características de los muros (escala 1/20)

FIG. 10 Ensayo de compresión axial en pilas de Sillar (1/2 bloque)

TABLA N° R-5
RESULTADO DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN DIAGONAL

Especímenes: Muretes de 81 x 81 cm

Mortero	\bar{v}_m (kg/cm ²)	\bar{v}_m (kg/cm ²)	C.V. (%)	N° Muretes
1:8	3.43	3.08	10.2	4
1:5	4.98	4.43	11.0	4
1:1:5	2.65	2.26	14.7	3

TABLA N° R-6
Módulo de corte G*
(Promedio de 4 muretes)

Mortero	G (kg/cm ²)	C.V. (%)	G/E
1 : 8	6217	17.1	0.30
1 : 5	7263	23.8	0.37

Estos son ensayos en muretes, pero en nuestros ensayos en muros calculamos G/E = 0.46 (mortero 1.8), por lo tanto podemos asumir el valor que nos da el reglamento G/E = 0.4.

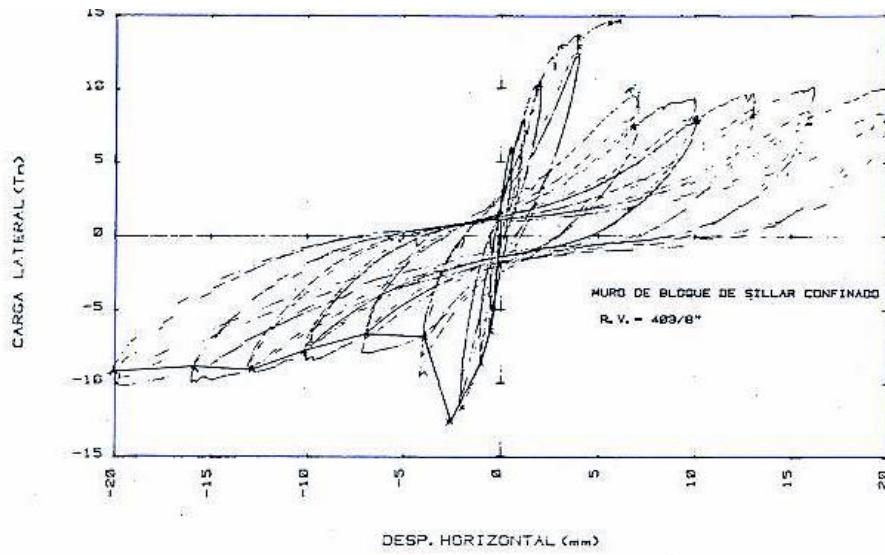


FIG. 20 Muro MS1 – Mortero 1:8

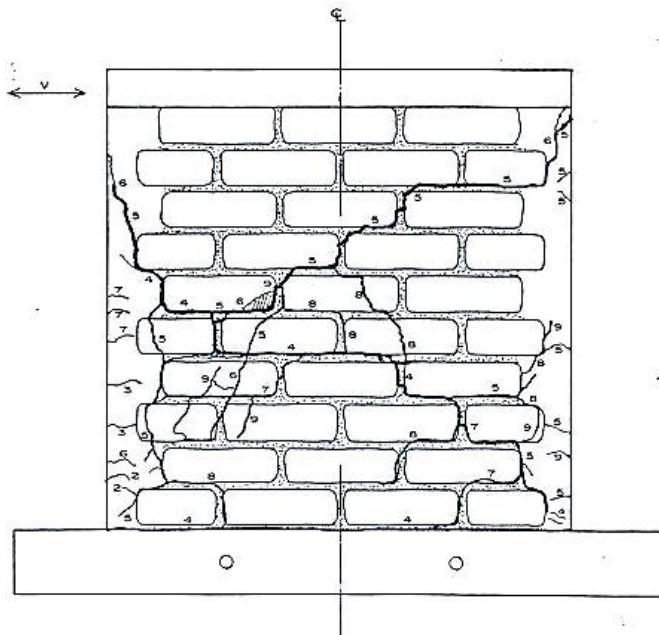


FIG. 18 Estado final de agrietamiento muro MS2 (mortero 1:8)

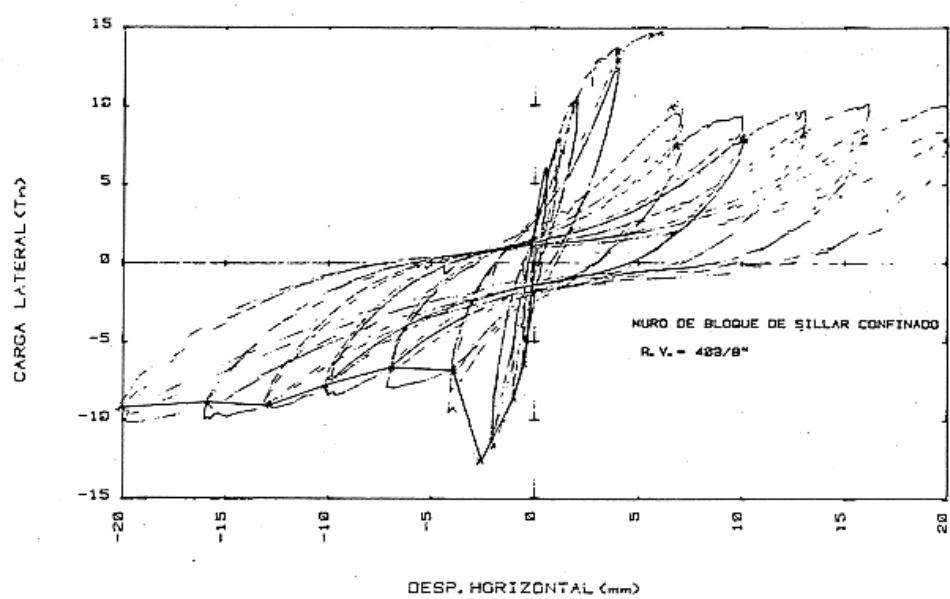


FIG. 32 Muro MS2 – Mortero 1:5

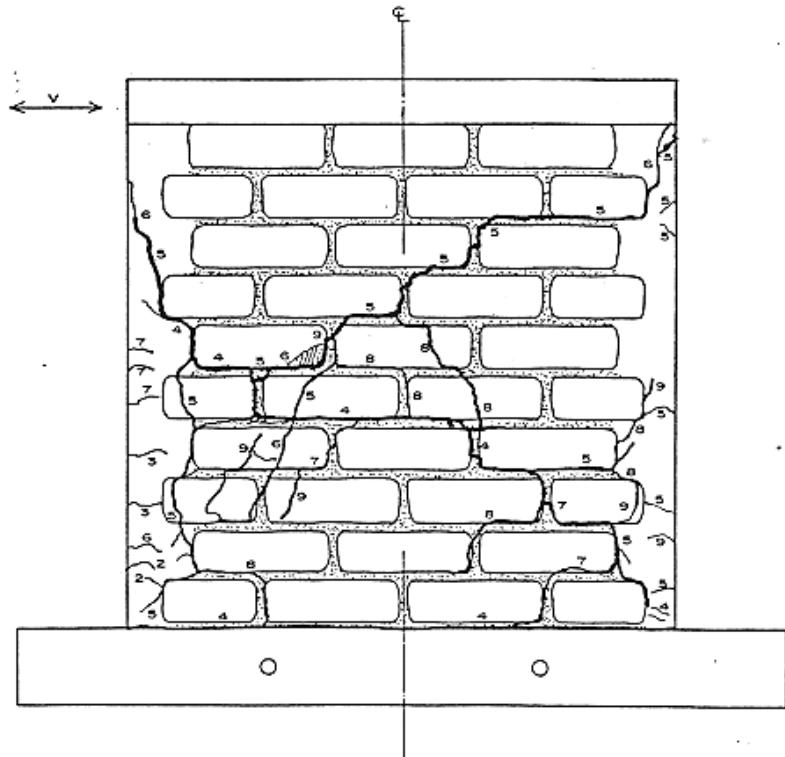


FIG. 19 Estado final de agrietamiento muro MS2 (mortero 1:5)

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Si bien es cierto que aún no contamos con una cantidad suficiente de ensayos, cuyos resultados nos permitan proponer normas referentes al sillar; considero que del presente trabajo se podría concluir y recomendar lo siguiente:

- a) En la primera parte del Proyecto: "USO DEL SILLAR EN LA CONSTRUCCIÓN", ejecutado por ININVI, se llegó a la conclusión de que el bloque de sillar presenta características superiores al ladrillo de arcilla tipo II; en este proyecto, en el que hemos investigado las cualidades del sillar como unidad de albañilería, sólo se ha verificado características ligeramente superiores en ensayo a pequeña escala, pero en ensayos a escala natural no se ha verificado esta superioridad y tampoco se cumplen los análisis teóricos en el rango elástico.

En la tabla N° 24 mostramos un resumen de nuestros resultados.

- b) Los resultados de los ensayos de corte directo y compresión diagonal que de alguna manera miden la adherencia, muestran una menor resistencia para los especímenes asentados con cal. Un indicio de la causa de la baja resistencia estaría en los ensayos de control, estos nos dicen de una probable mala calidad de las dos marcas de cal utilizadas (pese a que los

fabricantes indicaban que era cal hidratada normalizada con más de 80% de CaO), de tal manera que aún no podemos afirmar que los morteros con cal sean menos eficientes para la albañilería con sillar. Lo que sí es evidente es que el uso de la cal hidratada encarecería el costo de una vivienda de 1 ó 2 pisos, ya que los resultados alcanzados para mortero 1:8 pueden ser suficientes en este tipo de construcciones.

- c) El proceso de tratamiento de la unidad utilizado para la construcción de nuestros especímenes, ha demostrado que controla y reduce la alta succión de los bloques de sillar, pero las fallas observadas en los ensayos de corte muestran una adherencia de menor calidad que en albañilería que utiliza ladrillo artesanal (en este tipo de ladrillo se puede observar fallas por tracción diagonal, con sillar siempre obtuvimos fallas por corte en las juntas), aquí recordemos que la succión es sólo uno de los factores que determinan la calidad de la adherencia.

Por otro lado, cabe mencionar que el sistema de tratamiento utilizado no es muy práctico, además que hace más notoria la eflorescencia, lo que nos hace pensar en una posible degradación de la adherencia con la aparición de ésta.

- d) El aumento de la calidad del mortero (1:8 a 1:5) aumentó la resistencia en especímenes pequeños sujetos a corte directo, la compresión diagonal y axial entre 40 a 50%, mientras que en muros a escala natural este incremento fue sólo 15%.
- e) A lo último, agregamos que en la actualidad en Arequipa se viene utilizando el mortero 1:5 para muros de características similares a los ensayados por nosotros, sí consideramos que son viviendas de un solo piso, se recomienda el uso del mortero 1:8 con juntas de 3 cm. Sin embargo el refuerzo vertical en las columnas habría que diseñarlo especialmente para que no degrade la capacidad de carga obtenida al instante de formarse la grieta diagonal.
- f) En la zona de conexión muro-columna se recomienda humedecer al sillar instantes antes de vaciar la columna, para así reducir su alta succión y en vez de utilizar la conexión dentada usar refuerzo horizontal ya que por lo voluminoso del bloque, el dentado no logra su objetivo pudiéndose formar cangrejeras.
- g) La degradación de la rigidez lateral de los muros ensayados muestran un patrón bastante similar a los registrados por muros de albañilería de arcilla confinados.
- h) Debido a la predominancia de la deformación por corte, los muros de sillar fallaron en forma escalonada a través de sus juntas, pese a que su capacidad teórica de flexión era menor que la carga experimental de rotura; y en los ciclos posteriores a la rotura, la carga máxima se mantuvo constante con una magnitud cercana a la capacidad de flexión.

- i) Debe señalarse que defectos constructivos, como por ejemplo cangrejeras en los extremos de las columnas, producen un comportamiento sísmico deplorable del sistema, tal como ocurrió en el muro MS2.

**TABLA RESUMEN DE LOS RESULTADOS MAS IMPORTANTES
DE NUESTRA INVESTIGACIÓN Y COMPARACIÓN
CON ENSAYOS EN LADRILLOS**

ENSAYO	ALBAÑILERÍA EN SILLAR	ALBAÑILERÍA CON LADRILLO ARTESANAL DE ARCILLA COCIDA (King – Kong)
SUCCIÓN	72 gr/200 cm ² /min (natural) 22 gr/200 cm ² /min (tratado)	70 gr/200 cm ² /min (natural) Ref.26 19 gr/200 cm ² /min (tratado) Ref.26
CORTE DIRECTO (sin confinamiento)	$\tau^* = 1.63 \text{ kg/cm}^2$ (1:8) $\tau^* = 2.5 \text{ kg/cm}^2$ (1:5) $\tau^* = 1.48 \text{ kg/cm}^2$ (1:1:5)	---
COMPRESIÓN AXIAL	$\bar{f}_m = 45 \text{ kg/cm}^2$ (1:8, 5.3%) $\bar{f}_m = 52.8 \text{ kg/cm}^2$ (1:5, 10.9%)	$\bar{f}_m = 41.2 \text{ kg/cm}^2$ (1:5, 3.8%) Ref. 26
COMPRESIÓN DIAGONAL	$v_m = 3.43 \text{ kg/cm}^2$ (1:8, 10.2) $v_m = 4.98 \text{ kg/cm}^2$ (1:5, 11.0%) $v_m = 2.65 \text{ kg/cm}^2$ (1:1:5, 15.0%)	$V_m = 5.76 \text{ kg/cm}^2$ (1:5, 5.0%) Ref. 26
CORTE EN MUROSA ESCALA NATURAL	$V_R = 2.04 \text{ kg/cm}^2$ (1:8) $V_R = 2.35 \text{ kg/cm}^2$ (1:5)	$V_R = 3.4 \text{ kg/cm}^2$ (1:5) Ref. 26
RELACIONES CONOCIDAS	$f'm/f_b = 0.46$ (1:8) $f'm/f_b = 0.5$ (1:5) $E/f'm = 426$ (1:5) (i) $E/f'm = 534$ (1:8) (i) $G/E = 0.46$ (1:8) (ii)	$E/f'm = 500$ (Ref. 27) $G/E = 0.4$ (Ref. 27)

- (i) para fines de Ingeniería se puede asumir $E/f'm = 500$
(ii) Para fines de Ingeniería se puede asumir $G/E = 0.4$



FOTO N° 17
DISPOSITIVO DEL ENSAYO.
DE COMPRESION AXIAL EN PILAS

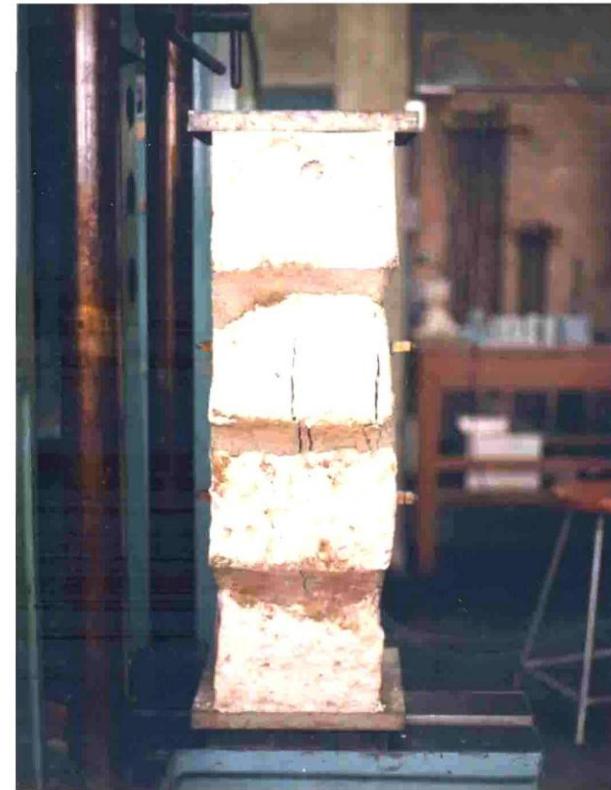


FOTO N° 18
FALLA TIPICA EN EL ENSAYO
DE COMPRESION AXIAL , NOTESE LA FISURA VERTICAL



FOTO N°19
ENsayo de compresión diagonal y equipo utilizado

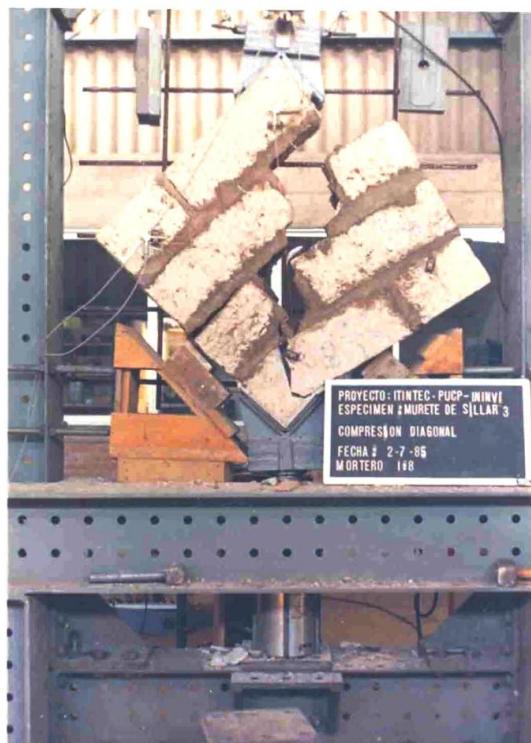


FOTO N° 20
FALLA TÍPICA LOGRADA PARA EL MORTERO 118
EN EL ENSAYO DE COMPRESIÓN DIAGONAL

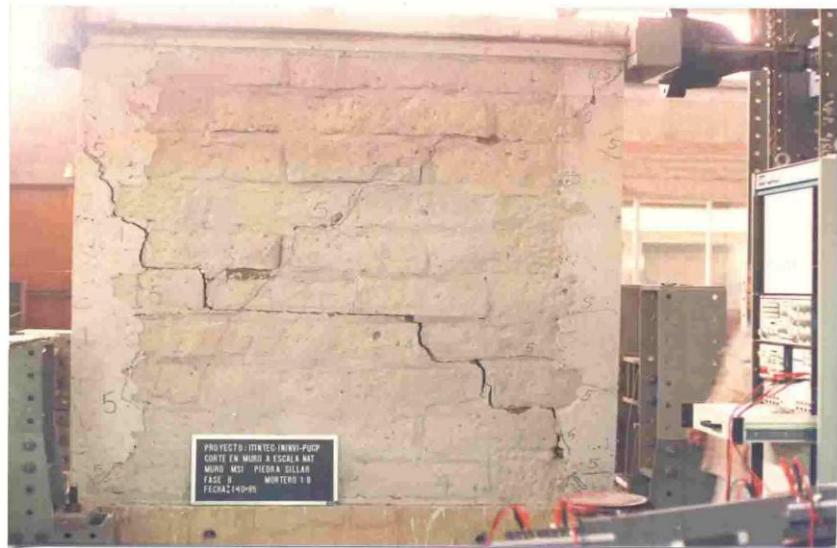


FOTO N° 25
FASE N°8 EN EL ENSAYO DEL MURO MSI (MORTERO 1:8)
APLICANDO DESPLAZAMIENTO NEGATIVO, NOTEMOS EL TIPO DE
FALLA ESCALONADA, TIPICO DE FALLA POR CORTE EN LAS JUNTAS

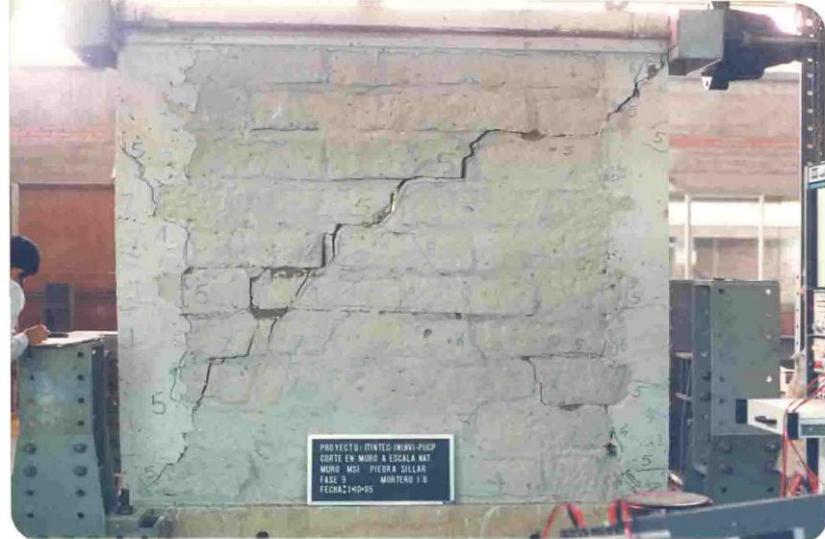


FOTO N° 26
FASE N°9 EN EL ENSAYO DEL MURO MSI (MORTERO 1:8)
APLICANDO DESPLAZAMIENTO POSITIVO, TAMBIEN SE
PRESENTA LA FALLA ESCALONADA.

REFERENCIAS

1. Wiliam F. Jenks : "Notas acerca de la Geología de la Región de Arequipa". Universidad San Agustín de Arequipa
2. Clarence N. Femer : "Geología de los alrededores de Arequipa".
3. Fernando Arredondo : Las Rocas en la construcción, Madrid 1967.
4. Materiales de Construcción (Pétreos, Vegetales y Metálicos) F. Orús – Madrid 1946.
5. Uso del Sillar en la Construcción (Primera parte) Informe Final Convenio ININVI – ITINTEC 3169 (1984).
6. El Sillar como Material de Construcción.
Bach. Luis Carrauri y Víctor Zorrilla. Tesis de grado UNI – 1966.
7. El Sismo del 16 de Febrero de 1979 en Arequipa
II Congreso Nacional de Ingeniería Civil. Ing. Juan Bariola, Ing. Ángel San Bartolomé – Cuzco 1980.
8. Diseño y Construcción de Estructura de Mampostería.
(NORMAS Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal – México).
9. Normas Standard ITINTEC (331.017, 331.018). Julio 1978.
10. Tecnología del Mortero. Algunas anotaciones
Héctor Gallegos (GRUCIA).
11. Algunos apuntes acerca del efecto de la mano de obra en la calidad de albañilería. Héctor Gallegos (GRUCIA).
12. Búsqueda experimental de una prueba sencilla y económica para determinar la adhesión mortero-unidad de albañilería.
Mónica Svojsik de Beeck y Héctor Gallegos Vargas.
13. Cyclic Test of Three Different Types of Masonry Wells.
Héctor Gallegos, Carlos Casabonne (GRUCIA).
14. Ensayos de Corte Directo en Albañilería.
Héctor Gallegos, Carlos Cassabonne (GRUCIA)
15. F. Bonhome, C. de Vidis y L. Jorquera, La Cal Hidráulica en los Morteros para Albañilería, Centro de Vivienda y Construcción. Universidad de Chile.

16. T. Ritchie y J.I. Davinson, Factors Affecting Bond Strength and Resistance to Moisture Penetration of Brick Masonry, National Research Council, Division of Building Research, Informe N° 23, Ottawa (Jul. 1963).
17. Diseño de Muros de Mampostería. Roberto Meli. Universidad Nacional Autónoma de México. Enero 1971.
18. Propiedades Mecánicas de la Mampostería. R. Meli, Alejandro Reyes. Universidad Nacional Autónoma de México. Diciembre 1970.
19. Modos de Falla en Muros de Albañilería Armada sometidos a Cargas Horizontales Cíclicas. Hidalgo y Lüders. Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile, 1983.
20. Ensayos de Carga Lateral en Muros de Albañilería Ladrillo Confinados por elementos de Concreto Armado. Ernesto Valle. Tesis de Grado. Pontificia Universidad Católica del Perú, 1981.
21. Ensayos de Carga Lateral en muros con Bloques Huecos de Concreto. Pejerrey y Ramírez. Tesis de Grado. Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Chiclayo, 1984.
22. Masonry in Framed Building : an Investigation into the Strength and Stiffness of Masonry Infillings. S.V. Pbyakov. Moscú, 1957.
23. Muros de Albañilería. Pruebas de Corte – GRUCIA INGENIEROS CONSULTORES, 1976.
24. Comportamiento de Elementos de Albañilería de Ladrillo en Ensayos de Compresión Axial, Corte Directo y de Compresión Diagonal. Ing. ángel San Bartolomé. II Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Cusco, 1980.
25. Report N° EERC 75/15-A Literature Survey – Compressive Tensile Bond and Shear Strength of Masonry by R. Mayes and R. Clough. Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.
26. Ensayos de Carga Lateral en Muros de Albañilería Confinados. Correlación de Resultados entre especímenes a escala natural y probetas pequeñas. Ing. Ángel San Bartolomé. V Congreso Nacional de Ingeniería Civil. Tacna, 1984.
27. Normas Técnicas de Edificación = Norma E-070 Albañilería – ININVI 01-82.
28. Reglamento Nacional de Construcciones.
29. Construyendo con Ladrillo – ININVI. Lima – Perú, 1971.

30. Albañilería Estructural. Apuntes de clase. Héctor Gallegos.
31. H.K. Hilsdorf, Investigation into the Failure Mechanism of Brick Masonry, Technische Hochschule. Informe N° 40. Munich, 1965.
32. Comportamiento de Muros de Mampostería Sujetos a Carga Lateral R. Meli, G. Salgado. Universidad Nacional Autónoma de México.
33. Efectos del Refuerzo sobre la Resistencia, Rigidez y Ductilidad de Muros de Albañilería Confinada.
Tesis de Grado : Aldo Pastorutti. PUCP, 1985.

ÍNDICE

		Pág.
INTRODUCCIÓN		
I	EL SILLAR.....	
a)	Formación.....	
b)	Yacimientos.....	
c)	Composición Mineralogía.....	
d)	Forma de Extracción.....	
e)	Herramientas e Insumos Utilizados.....	
f)	Formas y Dimensiones de los Bloques.....	
g)	Rendimientos de la Mano de Obra y Costos de Producción.....	
h)	Sistemas Constructivos.....	
i)	Costos Comparativos.....	
II	RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	
1)	Efectos del Sismo del 16 de Febrero de 1979 sobre las Edificaciones de Sillar en Arequipa.....	
2)	Algunas Normas Técnicas.....	
3)	Uso del Sillar en la Construcción (1ra. parte).....	
4)	Conclusión de la Recopilación Bibliográfica.....	
III	DEFINICIÓN DE OBJETIVOS.....	
IV	PROGRAMA EXPERIMENTAL - PROPUESTAS.....	
1)	Investigación de la Adherencia Mortero-Unidad.....	
2)	Ensayos de Compresión Axial en Pilas.....	
3)	Ensayos de Compresión Diagonal en Muretes.....	
4)	Ensayos de Carga Lateral Cíclica en Muros a Escala Natural..	
5)	Ensayos de Control de Materiales.....	
6)	Cronograma General.....	
7)	Gráficos.....	
V	ENSAYOS DE CONTROL DE MATERIALES : Resultados.....	

VI.	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS EN ELEMENTOS DE ALBAÑILERÍA.....
a)	Ensayos de Succión.....
b)	Ensayo de Corte Directo.....
c)	Ensayo de Compresión Axial.....
d)	Ensayo de Compresión Diagonal.....
VII	PROCESAMIENTO DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE MUROS A ESCALA NATURAL.....
i)	Identificación de los muros.....
ii)	Definición de Programas de Cómputo a utilizarse.....
iii)	Definiciones.....
iv)	Denominación y Contenido de los Files grabados.....
v)	Gráficos de la información instrumental.....
vi)	Anotaciones durante el ensayo.....
VIII	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....
A.	Análisis Elástico.....
B.	Modos de Falla y Análisis de los Gráficos.....
C.	Predicción de la Carga de Fisuración (V_F) y de la carga de agrietamiento (V_R).....
D.	Degrado de la Rígidez Lateral (K/ko).....
E.	Disipación de Energía y Amortiguamiento Equivalente.....
F.	Coeficiente Indicativo de Ductilidad (FD).....
F.	Degrado de la Capacidad de Carga.....
IX	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....
X	LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.....
XI	ARCHIVO DE FOTOS.....
ANEXO : RESUMEN.....	
REFERENCIAS.....	

RELACIÓN DE TABLAS

- TABLA N° 1 : Propiedades físicas de bloques de sillar.....
- TABLA N° 2 : Propiedades mecánicas de bloques de sillar.....
- TABLA N° 3 : Evaluación comparativo del bloque de sillar
- TABLA N° 4 : Cronograma de la construcción y ensayos de especímenes
- TABLA N° 5 : Ensayo a compresión en morteros
- TABLA N° 6 : Ensayo a tracción del refuerzo vertical
- TABLA N° 7 : Resistencia a la compresión del concreto utilizado
- TABLA N° 7^a: Análisis Granulométrico de la arena utilizada
- TABLA N° 8 : Ensayo de succión (previo tratamiento de bloques de sillar a escala reducida)
- TABLA N° 9 : Medición de adherencia por corte variando tiempo de inmersión de bloques de sillar
- TABLA N° 10: Ensayo de succión (S). Bloques de dimensión natural
- TABLA N° 11: Resultados del ensayo de medición de adherencia por corte directo
- TABLA N° 12: Resultados del ensayo de compresión axial ($f'm$)
- TABLA N° 13: Módulo de elasticidad en pilas (E_m)
- TABLA N° 14: Resultado del ensayo de compresión diagonal
- TABLA N° 15: Módulo de corte (G)
- TABLA N° 15^a: Files grabados para elaboración de gráficos
- TABLA N° 15^b: Límites de las lecturas obtenidas por los canales de control para los ciclos iniciales y ciclos estables de cada fase
- TABLA N° 16: Relaciones de módulos E , G y $f'm$
- TABLA N° 16^a: Relación de disipación de energía

- TABLA N° 17: Rigidez lateral (K)
- TABLA N° 18: Rigidez lateral inicial
- TABLA N° 19: Degradación de la rigidez lateral (k/ko)
- TABLA N° 20: Coeficiente indicativo de la ductilidad (FD)
- TABLA N° 21 Amortiguamiento equivalente : A (%)
- TABLA N° 22: Deterioro de la capacidad de carga (D.C.C)
- TABLA N° 23: Resultados experimentales
- TABLA N° 24: Resumen de los resultados mas importantes de la investigación y comparación con ensayos de ladrillo

RELACIÓN DE FIGURAS

- FIG. 1 : Efecto de la succión del tabique en la adherencia con mortero (Ref. 15)
- FIG. 2 : Resistencia a la adherencia por corte variando el tiempo de inmersión del ladrillo (Ref. 25)
- FIG. 3 : Efecto del proporcionamiento del mortero en la adherencia entre mortero y pieza (Ref. 15).
- FIG. 3^a : Efecto de la irregularidad de las piezas y de su succión en la resistencia a la compresión.
- FIG. 4 : Transportador de muretes
- FIG. 5 : Dispositivo mecánico de ensayo de corte directo en piedra sillar
- FIG. 6 : Dispositivo mecánico de ensayo de compresión diagonal en murete de piedra sillar
- FIG. 7 : Dispositivo mecánico de ensayo de muro con carga lateral
- FIG. 8 : Ensayo de corte directo (sin confinamiento)
- FIG. 9 : Ensayo de compresión diagonal
- FIG. 10 : Ensayo de compresión axial en pilas de sillar (1/2 bloque)
- FIG. 11 : Características de los muros
- FIG. 11a : Detalles del refuerzo de muros
- FIG. 12 : Ubicación del refuerzo de muros
- FIG. 13 : Análisis granulométrico de arena utilizada
- FIG. 13a : Fallas típicas en ensayo de corte
- FIG. 14 : Falla típica en ensayo de compresión axial
- FIG. 15 : Curvas P vs. deformación en ensayos de compresión axial
- FIG. 16 : Fallas típicas en ensayo a compresión diagonal
- FIG. 17 : Curvas P vs. deformación en ensayo de compresión diagonal

- FIG. 17^a : Definiciones (ejemplo)
- FIG. 18 : Estado final de agrietamiento. Muro MS1 (mortero 1:8)
- FIG. 19 : Estado final de agrietamiento. Muro MS2 (mortero 1:5)
- FIG. 20 : Gráfico carga V vs. desplazamiento horizontal Muro MS1 (mortero 1:8)
- FIG. 21 : Gráfico desplazamiento horizontal vs. desplazamiento horizontal superior de columna MS1
- FIG. 22 : Gráfico desplazamiento horizontal vs. deformación superior refuerzo vertical MS1
- FIG. 23 : Gráfico desplazamiento horizontal vs. deformación inferior refuerzo vertical MS1
- FIG. 24 : Gráfico desplazamiento horizontal vs. deformación refuerzo vertical izquierdo MS1
- FIG. 25 : Gráfico desplazamiento horizontal vs. deformación refuerzo vertical derecho MS1
- FIG. 26 : Gráfico desplazamiento horizontal vs. desplazamiento horizontal central de columna Izquierda MS1
- FIG. 27 : Gráfico desplazamiento horizontal vs. desplazamiento horizontal central de columna derecha MS1
- FIG. 28 : Gráfico desplazamiento horizontal vs. desplazamiento horizontal inferior izquierdo MS1
- FIG. 29 : Gráfico desplazamiento horizontal vs. desplazamiento horizontal inferior derecho MS1
- FIG. 30 : Gráfico desplazamiento horizontal vs. deformación diagonal izquierda MS1
- FIG. 31 : Gráfico desplazamiento horizontal vs. deformación diagonal derecha MS1
- FIG. 32 : Gráfico carga V vs. desplazamiento horizontal Muro MS2 (mortero 1:5)
- FIG. 33 : Gráfico desplazamiento horizontal vs. desplazamiento horizontal superior de columna MS2

- FIG. 34 : Gráfico desplazamiento horizontal vs. deformación inferior de refuerzo vertical MS2
- FIG. 35 : Gráfico desplazamiento horizontal vs. deformación refuerzo vertical izquierdo MS2
- FIG. 36 : Gráfico desplazamiento horizontal vs. deformación refuerzo vertical derecho MS2
- FIG. 37 : Gráfico envolvente del desplazamiento horizontal inferior en columna MS2
- FIG. 38 : Gráfico deformación del refuerzo vertical izquierdo MS2
- FIG. 39 : Gráfico envolvente de la deformación del refuerzo vertical MS2
- FIG. 40 : Gráfico desplazamiento horizontal vs. Desplazamiento horizontal central de columna izquierda MS2
- FIG. 41 : Gráfico desplazamiento horizontal vs. Desplazamiento horizontal central de columna derecha MS2
- FIG. 42 : Gráfico desplazamiento horizontal vs. Desplazamiento horizontal inferior izquierdo MS2
- FIG. 43 : Gráfico desplazamiento horizontal vs. Desplazamiento horizontal inferior derecho MS2
- FIG. 44 : Gráfico desplazamiento horizontal vs. Deformación diagonal izquierda MS2
- FIG. 45 : Gráfico desplazamiento horizontal vs. deformación diagonal derecha MS2
- FIG. 46 : Posición deformada de los muros ensayados
- FIG. 47 : Gráfico carga V vs. desplazamiento lateral en ciclo inicial (MS1)
- FIG. 48 : Gráfico carga V vs. desplazamiento lateral en ciclo inicial MS2
- FIG. 49 : Gráfico carga V vs. deformación de diagonal, ciclo elástico Ref 33
- FIG. 50 : Gráfico desplazamiento horizontal vs. deformación de diagonales, ciclo elástico Ref. 33

- FIG. 51 : Gráfico carga V vs. deformación de diagonales, ciclo elástico MS1
- FIG. 52 : Gráfico carga V vs. deformación de diagonales, ciclo elástico MS2
- FIG. 53 : Gráfico desplazamiento horizontal vs. Deformación vertical en columna (rango elástico) Ref. 33
- FIG. 54 : Gráfico desplazamiento horizontal vs. Deformación refuerzo vertical ciclo inicial Muro MS1
- FIG. 55 : Gráfico desplazamiento horizontal vs. deformación refuerzo vertical ciclo inicial Muro MS2
- FIG. 56 : Gráfico carga lateral vs. desplazamiento horizontal. Primeros ciclos de cargas máximas MS1
- FIG. 57 : Gráfico carga lateral vs. desplazamiento horizontal. Primeros ciclos de carga máximas MS2
- FIG. 58 : Gráfico carga lateral vs. desplazamiento horizontal. Ciclos estables MS1
- FIG. 59 : Gráfico carga lateral vs. desplazamiento horizontal. Ciclos estables MS2
- FIG. 60 : Gráfico de envolventes de cargas máximas
- FIG. 61 : Gráfico de envolventes de ciclos estables
- FIG. 62 : Gráfico degradación de la rigidez
- FIG. 63 : Gráfico de relación de disipación de energía
- FIG. 64 : Gráfico amortiguamiento equivalente
- FIG. 65 : Gráfico de la variación del coeficiente indicativo de la ductilidad
- FIG. 66 : Gráfico de la degradación de la capacidad de carga