

Laboratorio de Hidráulica Aplicada

SALTO GRANDE

LABORATORIO DE HIDRÁULICA



INSTITUTO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNICA HIDRICAS

ESTUDIO SOBRE MODELO DE LAS OBRAS DE SALTO GRANDE

- CAPITULO I -

Investigador Responsable:

Dr. Raúl A. LOPARDO

Investigador Asociado:

Ing. Fernando J. ZARATE

Supervisión:

Dr. Moisés S. BARCHILON

Dr. Alfonso PUJOL

EZEIZA, 30 de abril de 1973.

L.H.A.-9-001-73

Ministerio de Obras y Servicios Públicos
Subsecretaría de Recursos Hídricos
Instituto Nacional de Ciencia y Técnica Hídricas
LABORATORIO DE HIDRAULICA APLICADA

ESTUDIO SOBRE MODELO DE LAS OBRAS DE SALTO GRANDE

CAPITULO I - Proyecto y construcción del modelo

Raúl A. Lopardo, Fernando J. Zárate

Resúmen: Se enumera la documentación recibida por el Laboratorio, de carácter topográfico, geológico e hidrológico. Se calcula el coeficiente de rugosidad necesario para el modelo tridimensional de las obras de Salto Grande y se describe la construcción del mismo.

Descriptores: Modelos físicos; Construcción de modelos

Geográficos/Institucionales: Salto Grande - río Uruguay

Ezeiza, abril de 1973

INTRODUCCION

El Comité Operativo de la Comisión Técnica Mixta de Salto Grande ha encomendado, por contrato de fecha 1^o de diciembre de 1972, a este Laboratorio de Hidráulica Aplicada la realización de los estudios sobre modelo necesarios para verificar el funcionamiento general y particular de las estructuras que integran el proyecto de Salto Grande, y ajustar sus dimensiones y formas, para optimizar técnica y económicamente dichas estructuras.

El estudio se refiere al aprovechamiento hidroeléctrico del río Uruguay, mediante una presa con central generadora, situada a 17,2 Km aguas arriba del hidrómetro del puerto de Concordia.

El modelo general de las obras representa un tramo de río de 1,7 Km de longitud aguas arriba de la presa y 2 Km aguas abajo de la misma, y tiene por objeto el análisis del vertedero de evacuación, el funcionamiento de las centrales, el estudio de los descargadores de fondo y la apreciación de las condiciones de la navegación en la entrada de la esclusa de Ayuí.

En ese mismo modelo general, y previamente al estudio conjunto tridimensional de las obras antes señaladas, se realizará el estudio de las fases o etapas de construcción de la presa de Ayuí.

Paralelamente se ha encomendado el ensayo bidimensional en canal vidriado del vertedero, a efectos de analizar las presiones en la lámina vertiente, calibrar su coeficiente de gasto y verificar el funcionamiento del lecho amortiguador.

I - DOCUMENTACION

a) RELEVAMIENTOS

El Comité Operativo de la Comisión Técnica Mixta de Salto Grande ha puesto a disposición de este Laboratorio los planos de nivelación de la zona a reproducir en el modelo. Se trata de los planos DUA-108 y DUA-4, respectivamente en escalas 1:5.000 y 1:10.000, en los que se representa la planialtimetría del terreno, con curvas de nivel referidas al cero de nivelación general (cero del Riachuelo). En ellos puede apreciarse la batimetría del cauce fluvial y la topografía de las márgenes argentina y uruguaya.

Está representada en plano la poligonal de apoyo, materializada por puntos fijos ubicados en ambas márgenes. Esa poligonal recorre a cada lado del río líneas paralelas al mismo por la zona de barrancas, es decir a cota + 10,00 aproximadamente. Están indicadas las distancias entre los puntos fijos de la triangulación, tanto longitudinales como transversales al río y los ángulos formados entre los lados de vinculación.

En el plano DUA-4 se han trazado dieciocho perfiles transversales al río, de la zona ubicada aguas abajo de la presa. Cada perfil tiene referencias precisas respecto de la poligonal de apoyo y puede reproducirse en planta con total seguridad. En una serie de planillas adjuntas, que obran en poder de este Laboratorio, se detalla para cada perfil transversal su ubicación en planta respecto de la poligonal de apoyo y el valor de cada cota a determinada distancia lineal del punto de encuentro correspondiente. Ello implica la posibilidad de reproducir por secciones, la altimetría transversal total del cauce y sus márgenes hasta cotas que oscilan entre + 20,00 y + 25,00, en la zona de aguas abajo de la presa.

No existiendo planilla de perfiles para el tramo ubicado aguas arriba de la presa, se calcularon planillas similares a las entregadas por la C.T.M. a partir de las curvas de nivel representadas en el plano DUA-4 a fin de compatibilizar los elementos disponibles para la construcción del modelo.

b) GEOLOGIA

De acuerdo a la nota T/84/73 con fecha 18 de enero remitida por la C.T.M. a este Laboratorio se ha requerido prever en el modelo general dos zonas para reproducir con material removible (lecho móvil) ubicadas en ambas márgenes en las proximidades de la presa. Esas zonas a fondo móvil tienen por objeto estudiar posibles socavaciones de las márgenes durante el periodo de construcción de la obra, debiendo tenerse en cuenta en el modelo para el ensayo de las ataguías.

Las superficies a reproducir con material removible se señalan en el croquis C.T.M. N° 1007 adjunto a la nota de referencia, donde se especifica que el fondo móvil debe ser tal que el material removible ocupe la capa superficial, por encima del lecho rocoso (representado a fondo fijo) es decir la cubierta de materia sedimentaria erosionable exclusivamente.

Las cotas para las cuales cambia el tipo de terreno, límite entre estratos rocoso y sedimentario, fueron suministradas por nota T/57/73 con fecha 19 de febrero por la C.T.M. En los croquis C.T.M. N° 1007 a y b, adjuntos a dicha nota se encuentra sobre la topografía del terreno el replanteo de las perforaciones realizadas y las cotas de roca así obtenidas.

c) AFOROS

El Comité Operativo de la Comisión Técnica Mixta de

Salto Grande ha provisto a este Laboratorio de un conjunto de aforos realizados entre los perfiles 750-800. Los planos donde se detallan dichos aforos son DUC-18, DUC-19, DUC-20, DUC-21, DUC-26, DUC-30, DUC-34 y DUC-35.

Los gastos aforados abarcan un intervalo que va desde 600 m³/s hasta 13 m³/s, habiéndose determinado para cada uno de ellos entre 10 (diez) y 30 (treinta) verticales de aforo, con 8 (ocho) medidas de velocidad por cada vertical en promedio.

El detalle general de la información recibida se presenta en la Tabla N^o 1 adjunta, aclarándose que todos los aforos corresponden a fecha mayo de 1950.

La información existente permite también reproducir los perfiles de velocidad en coincidencia con cada vertical. Se detallan además las características geométricas de la sección de escurrimiento (ancho, área y radio hidráulico) y las curvas correspondientes a velocidades superficiales, medias y de fondo para cada gasto.

Los datos referidos a pendientes y características rugosas del prototipo, se encuentran graficados en el plano DUC-119 para distintas alturas hidrométricas de perfiles en la zona de aforos (perfiles 400 al 850).

Analizando los diagramas del plano DUC-119, que dan la variación del coeficiente n de Manning en función del tirante, se llega a un valor medio para el modelo que resulta

$$n \text{ modelo} = 0,0150$$

Mediante la aplicación de la fórmula de Chezy

$$U = C \sqrt{Ri}$$

y expresando C según Manning

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6}$$

se determinan, para aquellos aforos en los que se cuenta con los valores necesarios (radio hidráulico, pendiente, tirante y velocidad), valores del coeficiente n de Manning, de los que se obtiene como valor promedio para el modelo

$$n \text{ modelo} = 0,0153$$

De la comparación entre los dos valores obtenidos, queda fijado el n del modelo en

$$n = 0,0152$$

Los datos respecto de la pendiente de la superficie libre en el prototipo vinculados a los gastos aforados y a las alturas de agua en el perfil 800 se detallan en la Tabla N° 2.

TABLA N° 1

Perfil de Aforo	Plano	Aforo N°	Verticales Tomadas	Q protot. (m ³ /s)	$V_m = \frac{Q}{A}$ (m/s)	Lectura Escala (media)
750-800	DUC-18	2	12	12.834	1,622	12,302
750-800		3	16	12.000	1,620	11,695
750-800	DUC-19	4	14	11.638	1,583	11,775
750-800		5	14	10.628	1,529	11,375
750-800	DUC-20	6	11	10.722	1,641	11,182
750-800		13	12	7.230	1,457	9,240
750-800	DUC-21	7	15	10.818	1,607	11,100
750-800		21	21	4.056	1,248	7,382
750-800	DUC-26	18	11	5.252	1,316	8,150
750-800		16	14	5.894	1,400	8,410
750-800	DUC-30	25	12	2.249	1,065	6,115
750-800		28	20	1.851	0,914	6,013
750-800	DUC-34	35	30	950	0,673	5,230
750-800		-	25	4.848	1,289	7,910
750-800	DUC-35	41	19	613	0,546	5,000
750-800		31	24	1.437,6	0,871	5,635

TABLA N^o 2

Q (m ³ /s)	i ($\frac{cm}{Km}$)	Hp 800 (m)
2.710	34,9	6,515
2.910	34,5	6,654
4.395	31,2	7,594
4.800	30,0	7,853
4.995	28,7	7,955
5.700	29	8,395
7.875	25,2	9,625
11.800	21	11,805
14.500	18	13,20

II - PROYECTO DEL MODELO

a) ESCALAS

El equilibrio dinámico de una partícula líquida en una corriente se establece bajo la acción de las siguientes fuerzas fundamentales: peso, inercia, viscosidad, energía superficial y rozamiento.

En el estudio de modelos habituales de obras hidráulicas como el de Salto Grande, la viscosidad y la energía superficial pueden despreciarse, pues es perfectamente marcado el predominio de las fuerzas gravitacionales.

En esas condiciones, el modelo y el prototipo serán hidrodinámicamente semejantes si, guardándose la similitud geométrica, se cumple la invariabilidad del número de Froude

$$F = \frac{v^2}{g h} ,$$

relación que liga velocidades y dimensiones lineales.

Designando e_L a la escala de longitudes definida como longitud del modelo dividida por longitud homóloga del prototipo, la condición de semejanza de Froude permite obtener la escala de velocidades e_v y de tiempos e_t :

$$e_v = e_t = e_L^{1/2} ,$$

y la escala de gastos líquidos

$$e_Q = e_L^{5/2} .$$

De acuerdo con las condiciones contractuales establecidas por la C.T.M. el modelo debió respetar una escala de longitudes $e_L = 1:125$ que, en relación con el carácter y dimensiones del estudio es suficientemente generosa.

Teniendo en cuenta las relaciones arriba expuestas resultan:

- escala de longitudes $e_L = 1:125$
- escala de velocidades y tiempos $e_v = e_t = 1:11,18$
- escala de gastos $e_Q = 1:174.693$

En los ensayos de desvío del río el efecto de rugosidad del cauce podrá eventualmente ser de importancia. En modelos que reproducen cortos tramos de ríos puede despreciarse este efecto pero, en todo caso, se requiere una calibración previa.

Si se tuvieran en cuenta las fuerzas de rozamiento, debería tenerse presente que, además de la condición de Froude, sería necesario el cumplimiento de la igualdad de coeficientes C de Chezy de prototipo y modelo

$$e_C = 1,$$

lo que implica una escala de rugosidades de Manning

$$e_n = e_L^{1/6},$$

es decir

$$e_n = 1:2,236.$$

Es indudable que las pérdidas de energía deben ser proporcionales al cuadrado de la velocidad, lo que implica la condi-

ción de escurrimiento turbulento rugoso. En este modelo, con gastos que superen los $4.800 \text{ m}^3/\text{s}$ en prototipo se obtienen números de Reynolds tales que aseguran el cumplimiento de la condición citada.

b) DESCRIPCION DEL MODELO

Las dimensiones lineales del modelo vienen dadas por obligaciones contractuales, resultando para la escala elegida de 1:125 una longitud de 29,60 m en la dirección de la corriente.

Definiendo un ancho general a representar de 2750 m de prototipo, indispensables para reproducir adecuadamente las obras en toda su extensión hasta cota + 35 en ambas márgenes con cierto exceso, resultó una dimensión de 22,00 m en el modelo.

El total del modelo queda pues inscripto en un rectángulo de 29,60 x 22,00, que ocupa la parte central de la Nave N° 6 de este Laboratorio, destinada a ensayos sobre modelo hidráulico, con 1.800 m^2 de superficie útil para esos trabajos.

Considerando la máxima altura de agua (cota máxima de embalse + 40,00) resultaría un valor de 0,320 m en el modelo. Para ponerse a cubierto de eventuales maniobras que provoquen mayores niveles se ha dado un margen suficiente a las paredes laterales del cuenco.

Siendo el máximo gasto de crecida en prototipo de $57.000 \text{ m}^3/\text{s}$, la aplicación de la escala correspondiente lleva a considerar para el modelo la necesidad de alimentarlo con 326 l/s.

El modelo general consta de: un adecuado sistema de alimentación, tranquilización, medición y distribución de gastos líquidos; una zona que reproduce el cauce y las márgenes en un cuenco rectangular; un dispositivo de regulación de niveles aguas abajo y otro de recirculación de agua.

El esquema general del modelo se presenta en el plano adjunto.

c) SISTEMA DE ALIMENTACION

La Nave Nº 6 de este Laboratorio posee un sistema general de distribución de agua a presión y una red interconectada de canales-cisterna que permite alimentar individualmente cada modelo.

El modelo general de las obras de Salto Grande requiere un sistema mixto de alimentación, que utiliza el sistema de bombeo general para grandes gastos y un circuito particular para los más pequeños.

El sistema general de bombeo consta de una cisterna de 125 m³ de capacidad, duplicable con la red de canales, un conjunto de cuatro bombas centrífugas que suman 275 l/s y un tanque de nivel constante de 25 m³ de volumen útil que regula el gasto invariable con una precisión mayor del 1%. Dicho tanque posee cuatro bajadas independientes de 10 pulgadas cada una, que eliminan el efecto de posibles variaciones de gasto en ensayos simultáneos de varios modelos. Una de esas tuberías de 10 pulgadas de diámetro se conecta al modelo en un cuenco de tranquilización donde se guiarán los filetes líquidos que ingresan con alta velocidad.

El pasaje del agua al modelo propiamente dicho se produce por un sistema de nido de abejas materializado con ladrillos huecos a efectos de regularizar y direccionar el escurrimiento y provocar una adecuada pérdida de energía. Este método de tranquilización ha sido ya probado con éxito en otros modelos de este Laboratorio.

Para gastos que no excedan de 75 l/s se utiliza una bomba axial que aspira el gasto en un canal vecino al modelo y lo lleva a un sistema de medición por vertedero que eroga sobre el

cuenco de tranquilización, previamente descrito.

En la tubería de 10 pulgadas, se halla instalado un diafragma que permite el aforo de los gastos que ingresan por ella al modelo.

En resumen, podría sintetizarse

75 l/s < Q < 275 l/s	sistema general	aforo por diafragma
Q < 75 l/s	bomba axial	aforo por vertedero
275 l/s < Q < 326 l/s	ambos sistemas	doble aforo,

recordando que 75 l/s equivalen a 13.000 m³/s de prototipo, 275 l/s en modelo a 48.000 m³/s y 326 l/s al gasto máximo de 57.000 m³/s.

d) CONTROL DEL NIVEL

El control de los niveles de agua, tanto en la etapa de calibración del modelo como en la de ensayo y verificación de las obras, se realizará mediante una compuerta móvil ubicada en el límite de aguas abajo del modelo. Dicha compuerta móvil permitirá, para cada gasto, establecer una altura de agua tal, que se verifique en el modelo la ley H-Q dada para el prototipo.

El rango de alturas a regular, abarca valores prototipo comprendidos entre cota 0 y cota 35 m.

e) INSTRUMENTACION

Los gastos menores de 75 litros/segundo se miden por vertedero en el ingreso al modelo. El sistema de medición consta de una zona de tranquilización, una grilla, el canal de aforo y en su extremo un vertedero tipo Rehbock, de las siguientes características:

longitud de la cresta	0,60 m
longitud del canal de aforo	4,50 m
altura del vertedero	0,45 m

La medición de la carga sobre la cresta, que define el gasto erogado, se realiza mediante una toma piezométrica ubicada 1,50 m aguas arriba. La lectura de nivel se concreta con el auxilio de un limnómetro DELFT de 0,32 m de recorrido y 0,1 mm de precisión, en el interior de un tubo piezométrico de 0,10 m de diámetro.

Para los gastos mayores se ha previsto la colocación de un diafragma en la tubería de admisión de 10 pulgadas de diámetro. El diafragma reduce la sección de manera que $d/D = 0,8$ donde d es el diámetro del orificio y D el de la tubería. Las dos tomas de presión (anterior y posterior a la singularidad) se conectan a un manómetro simple de mercurio, con lectura diferencial.

Los niveles de agua a medir para los escurrimientos permanentes en el modelo son tomados en varios puntos (detallados en el plano general de construcción del modelo) utilizándose limnómetros DELFT para las lecturas, en tubos piezométricos ubicados exteriormente al modelo. Se podrá así conocer el nivel en el embalse, en puntos de interés cercanos a las obras, en el perfil 800 y en la zona límite aguas abajo.

La detección de ondas provocadas por el funcionamiento de la central se hará contando con un sistema desarrollado por el sector de instrumentación de este Laboratorio. El equipo cuenta con una sonda de resistencia con su circuito electrónico integrado y el aparato de registro oscilográfico. El instrumento permite obtener con precisión del 1% amplitudes de ondas del orden del centímetro o mayores, con total linealidad en el campo de utilización.

Para la medición de velocidades de escurrimiento se utilizarán, según el tipo de medición lo requiera, un micromolinete KENT de diámetro inferior al centímetro y velocidad mínima detectable de 2,5 cm/seg y un micromolinete DELFT de características físicas similares, pero que permite el registro de las condiciones de turbulencia y sus componentes fundamentales.

En caso de dirección y módulo de ciertas velocidades superficiales se tiene previsto el equipo fotográfico adecuado para la utilización de crónofotografía.

III - CONSTRUCCION DEL MODELO

a) CONSTRUCCION DEL CUENCO

En el interior de la Nave N^o 6 de este Laboratorio se construyó una pared perimetral de mampostería de ladrillos formando el cuenco en cuyo interior se desarrolla el modelo propiamente dicho. Esa pared está naturalmente impermeabilizada, y provista de juntas verticales selladas con Sicaflex.

En la parte destinada a alimentación, el sistema constructivo fue totalmente similar al previamente descrito, estando el canal de aforo con vertedero sobre una losa de hormigón armado que apoya en las paredes laterales del sector de tranquilización.

En los encuentros entre pared de mampostería y piso de cemento alisado, se realizó un acartelamiento con enduido, en una longitud horizontal de 15 cm hacia el interior del modelo y una altura media de 5 cm. La finalidad de este trabajo es evitar o disminuir considerablemente las posibles filtraciones por el encuentro de dos materiales distintos.

b) CONSTRUCCION DEL MODELO

Para la construcción del modelo se comenzó por identificar en la escala correspondiente la ubicación de los puntos fijos de las poligonales de apoyo con el uso de teodolito, materializándolos mediante varillas metálicas de altura tal que permanecieran visibles después de construido el modelo completo.

Vinculando con cuerdas fuertemente tendidas los puntos fijos de las poligonales se ubicaron los puntos de encuentro con esas direcciones de los perfiles transversales releva-

dos topográficamente en el terreno.

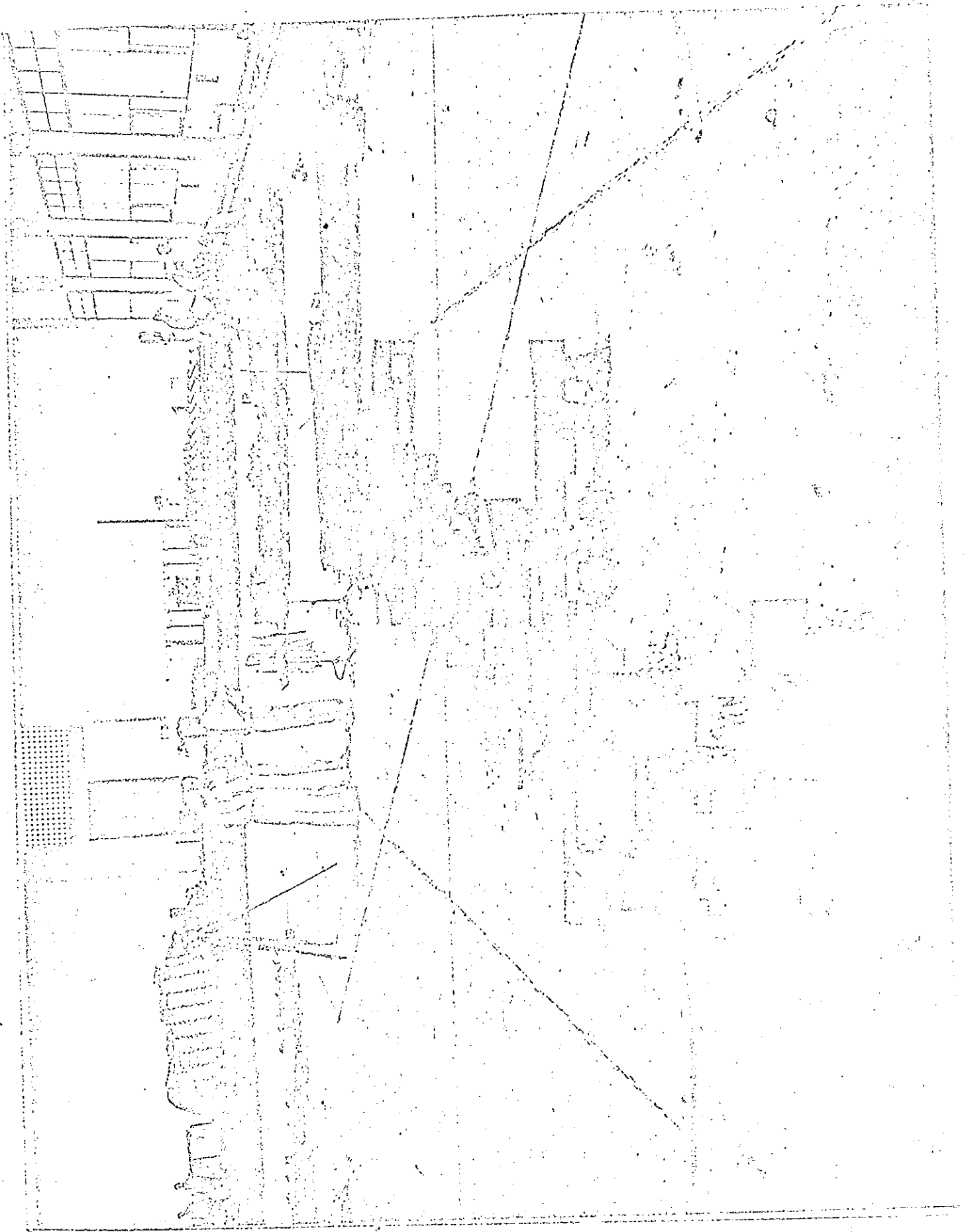
Los perfiles transversales fueron representados en escala con la utilización de placas de hardboard en las cuales se recortó con caladora eléctrica la forma de la topografía. Esos gálibos de hardboard se utilizaron para reproducir las zonas de las márgenes, dejándose para la parte central del río puntos fijos que se unían con mortero de cemento. Ello fue posible debido a la característica de fondo plano que presenta el río Uru-guay en esa zona.

Se nivelaron tornillos sobre los cuales se colocaron los gálibos y se controló la nivelación final del perfil después de haberse fijado el mismo con mortero de cemento.

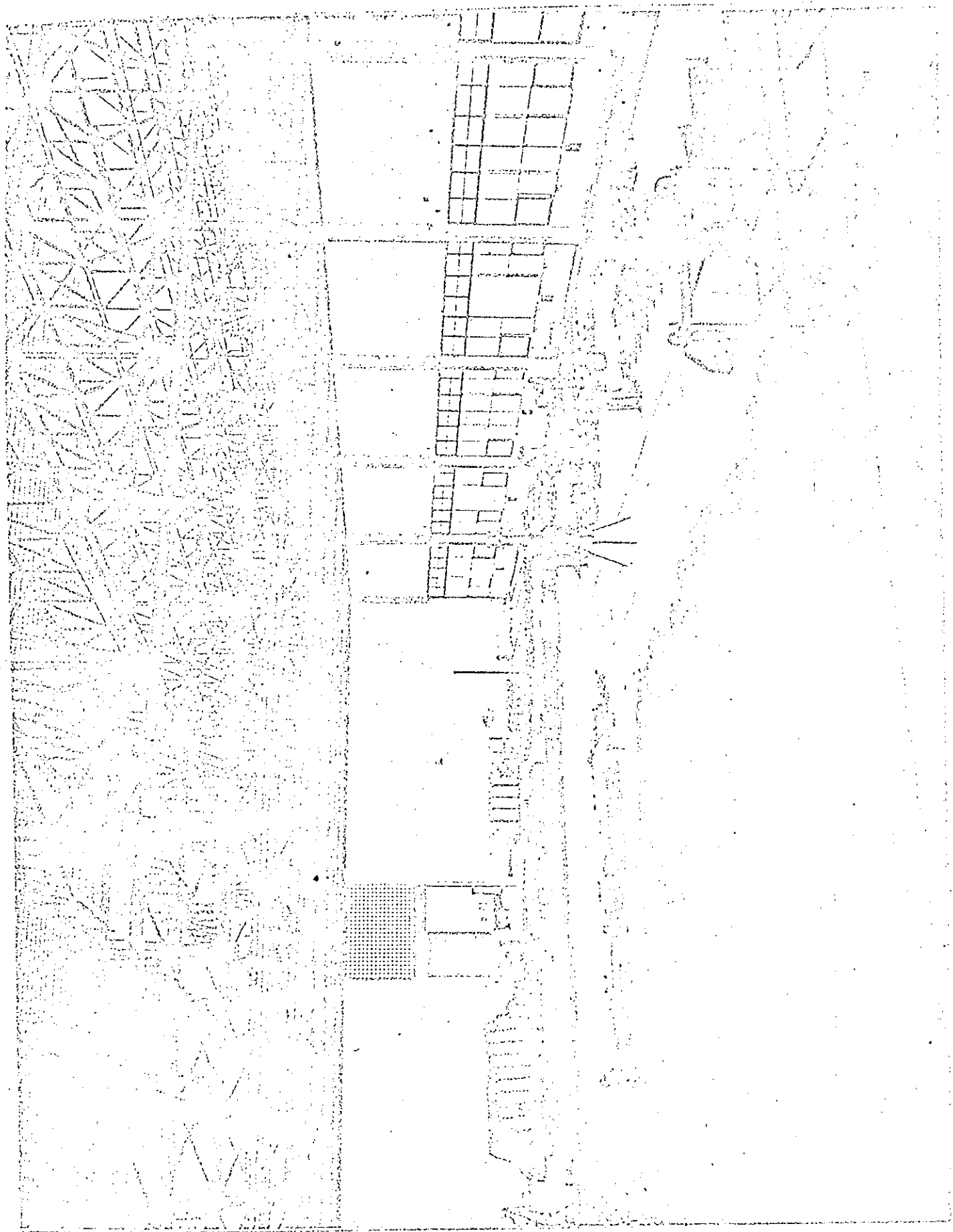
El relleno entre perfiles se realizó en tres capas: una primera de pastón de cascotes con cal, sirviendo de contrapiso de modelo, una segunda de granza muy bien compactada, en espesor de diez centímetros de promedio y la capa superficial, terminado del río, con mortero de cemento y arena en espesor aproximado de cinco centímetros.



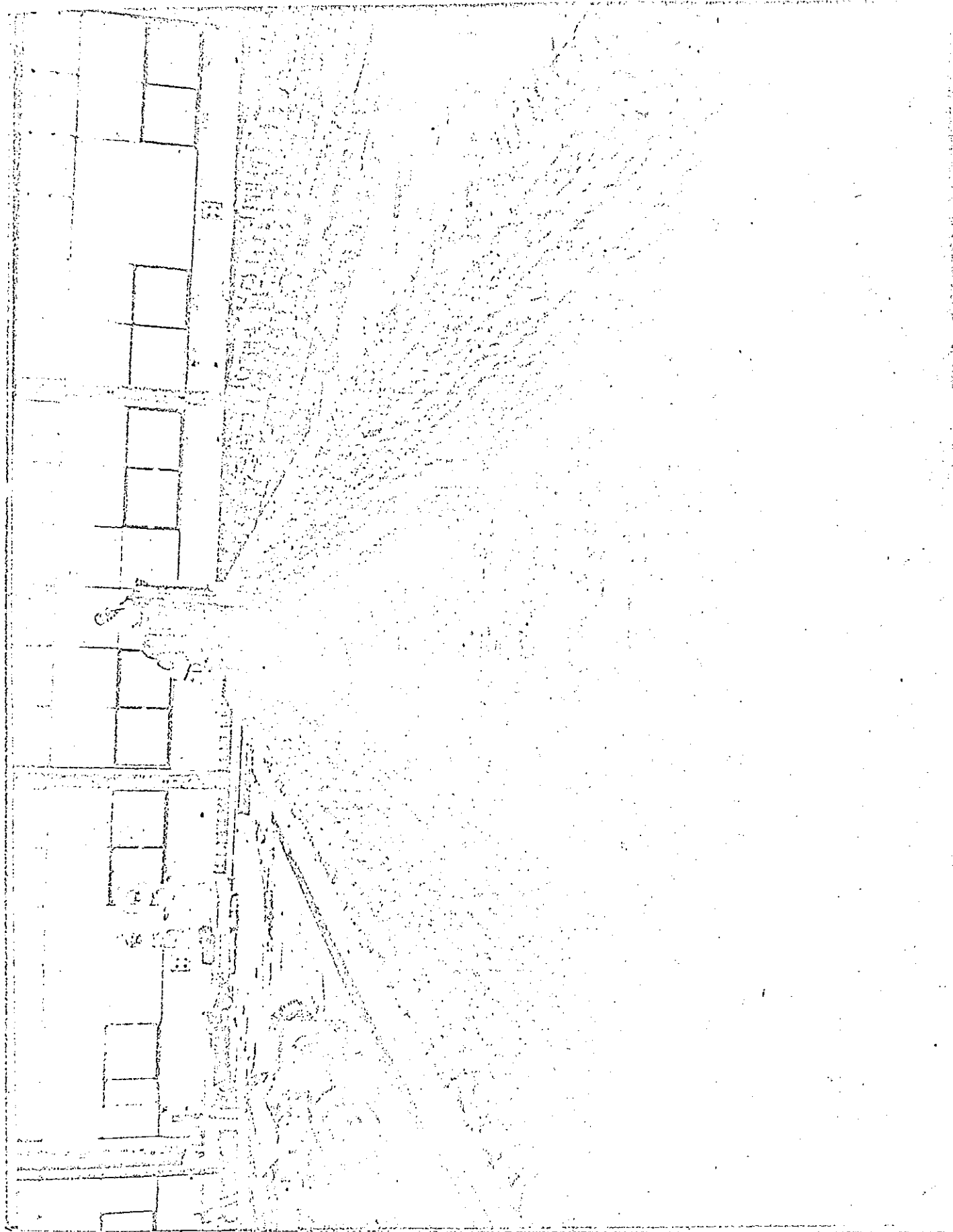
FOTOGRAFIA Nº 1 - COLOCACION DE UN GALIBO DE HARDBOARD



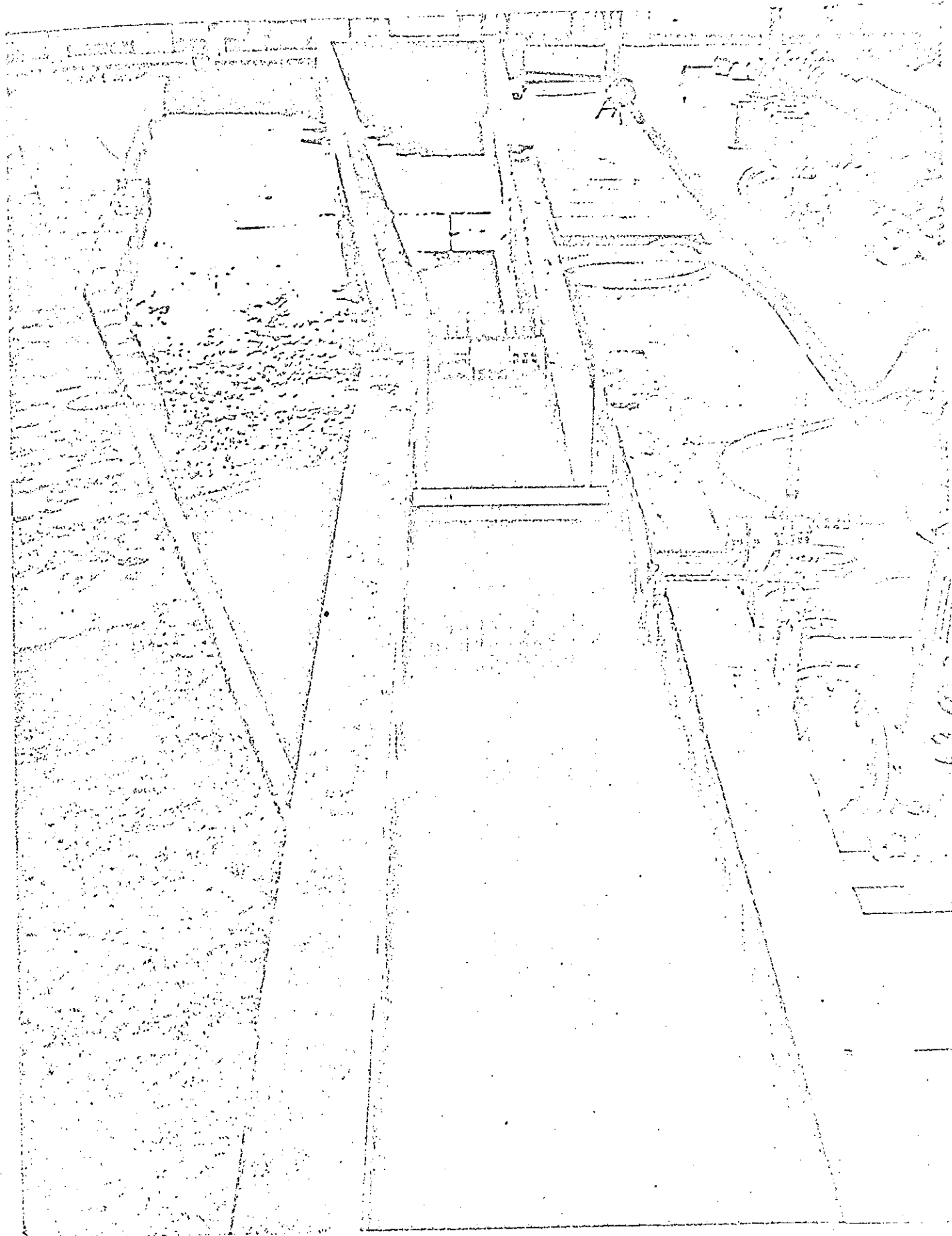
FOTOGRAFIA Nº 2 - VISTA PARCIAL CONSTRUCCION DEL MODELO



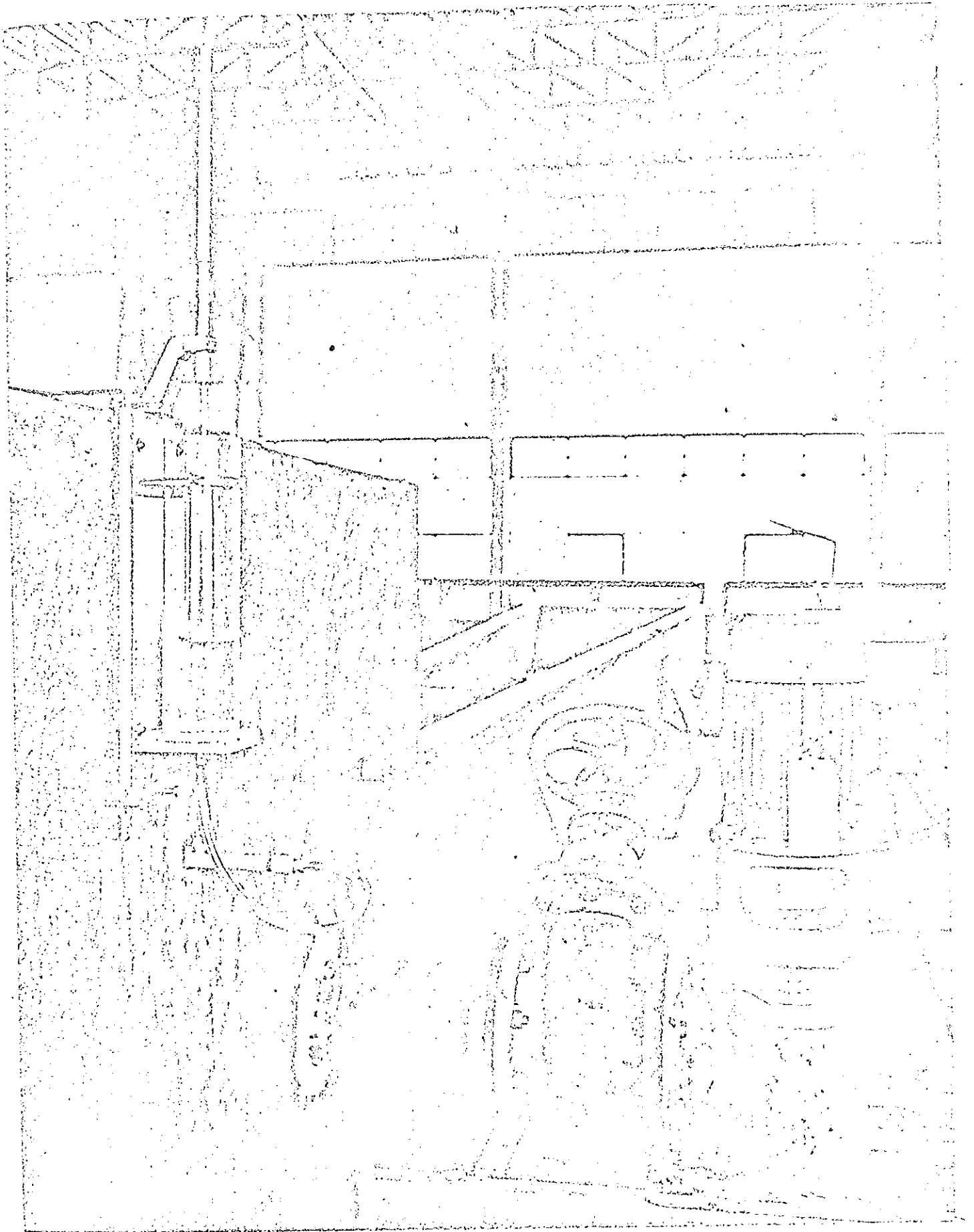
FOTOGRAFIA Nº 3 - VISTA GENERAL CONSTRUCCION DEL MODELO



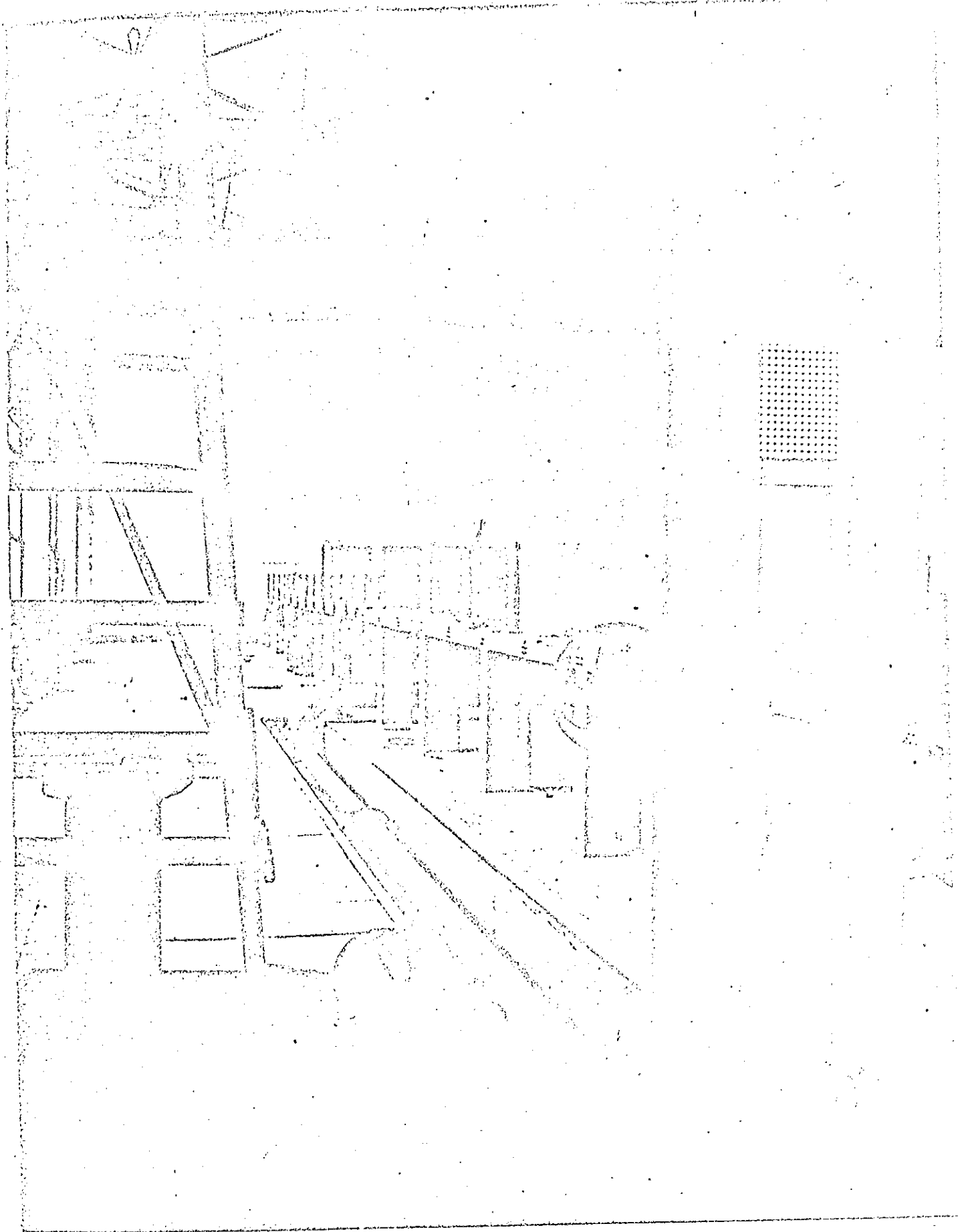
FOTOGRAFIA Nº 4 - DETALLE CONSTRUCCION ZONA DE ALIMENTACION



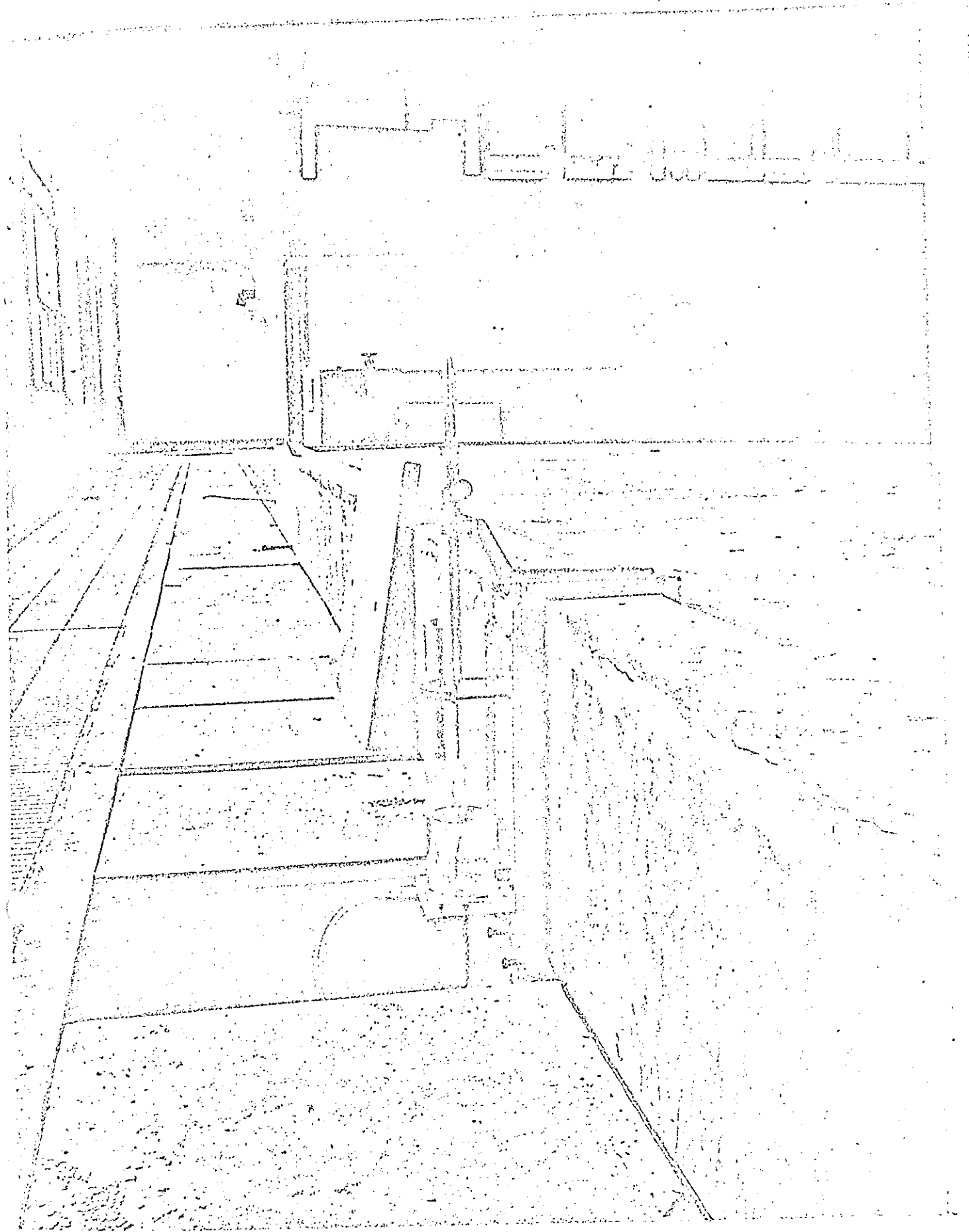
FOTOGRAFIA Nº 5 - CANAL DE AFOROS, VERTEDERO Y ZONA DE ENTRADA



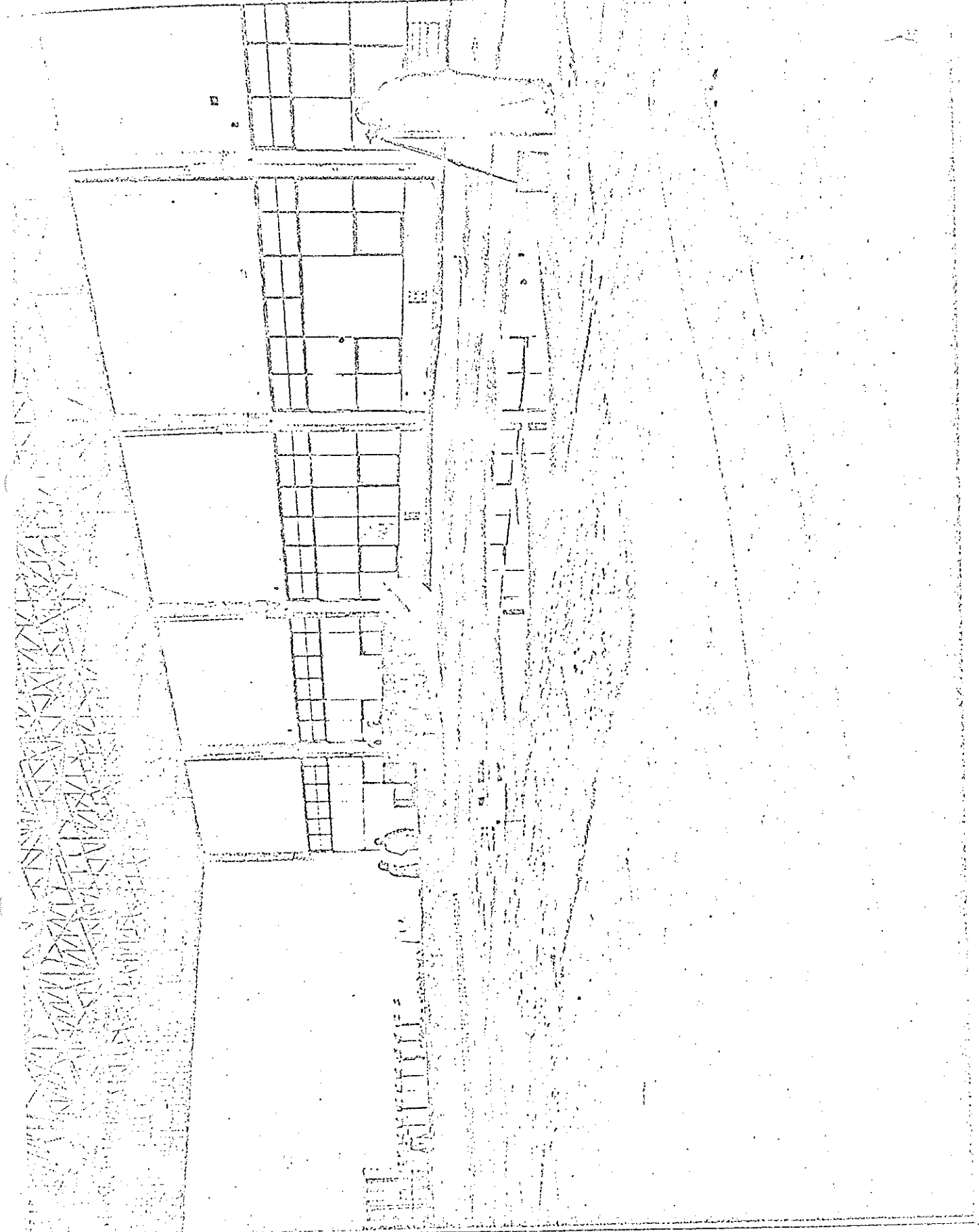
FOTOGRAFIA Nº 6 - CIRCUITO DE ALIMENTACION PARA PEQUEÑOS GASTOS



FOTOGRAFIA Nº 7 - SISTEMA GENERAL DE ALIMENTACION A PRESION



FOTOGRAFIA Nº 8 - DETALLE TUBO PIEZOMETRICO Y LIMNIMETRO



FOTOGRAFIA Nº 9 - VISTA DEL CAUCE TERMINADO Y ZONA A FONDO MOVIL

ESTUDIO SOBRE MODELO DE LAS OBRAS DE SALTO GRANDE - CAPITULO I

FIGURA Nº 1 Planta general del modelo de las obras de: SALTO GRANDE

(Original consultar en la Biblioteca del Laboratorio de Hidraulica Aplicada)