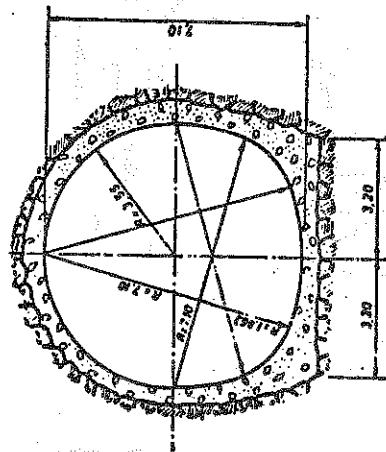
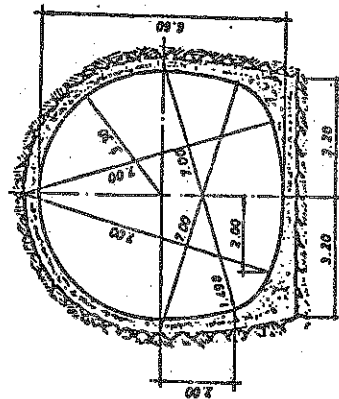


CENTRAL ANTUCO
SECCIONES TRANSVERSALES PRINCIPALES

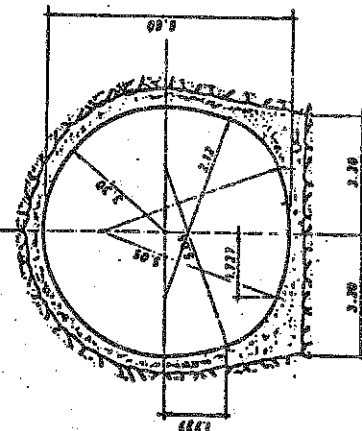
TUNEL COMUN 2



TUNEL POLCURA (FRENTE 2)
Y TUNEL COMUN 1



TUNEL POLCURA (FRENTE 1)



CARACTERISTICAS DE LAS
CURVAS EN PLANTA

VERTICE	ANGULO gr sex.	RADIO m	ADUCCION
VP2	47° 20'	650	POLCURA
VP3	40° 50'	70	
VP6	25° 5'	100	
VC5	15° 28'	100	COMUN 2
VC6	52° 6'	100	

FIGURA N° 6

DETERMINACION DE LA DISTRIBUCION DE VELOCIDADES EN
EL PLANO DE REJAS DE UNA BOCATOMA

Alberto Sepdiveda Vera (*)

RESUMEN

Un problema básico, al que se enfrenta el proyectista de las rejjas de protección de una bocatoma, ya sea superficial o profunda, es el de conocer la distribución de velocidades en el plano de las rejjas.

El objetivo de este trabajo es el de realizar una comparación entre medidas de velocidades efectuadas, ya sea en un prototipo o en un modelo hidráulico, con los valores calculados mediante la composición de dos redes ortogonales de líneas de corriente, calculadas por el método de los elementos finitos.

En conclusión podemos afirmar que la metodología de cálculo aquí indicada, para aplicar el método de los elementos finitos, es lo suficientemente confiable para efectos prácticos. Además, se llama la atención sobre algunas simplificaciones, y otras causas, que originan imprecisiones en la determinación de las velocidades.

(*) Ingeniero Civil, Sección Obras Hidráulicas ENDESA.

1. GENERAL.

Un método para conocer estas velocidades es el de medir- las directamente en un modelo hidráulico reducido, ya sea mediante un tubo de Pitot, un micromolineté o un anemómetro de hilo caliente. Este método es demoroso y caro, pues implica reproducir la bocatoma a una escala conveniente, que permita medir las velocidades con una precisión adecuada.

El método alternativo es el de calcular las velocidades mediante un modelo matemático.

Actualmente el método numérico más cómodo y poderoso es el llamado "método de los elementos finitos".

Como confirmación del cálculo teórico es muy útil con- frontarlos con medidas en el terreno, reproduciendo en lo posible las mismas condiciones hidráulicas y geométricas.

Al emplear el método numérico de cálculo se realizan al- gunas hipótesis simplificadoras, las que alteran la geometría espacial de la bocatoma, por lo que existe incertidumbre en cuanto a la precisión de los cálculos.

2. EL METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS.

2.1 Introducción.

El método de los elementos finitos es una técnica de aná- lisis numérico que permite obtener soluciones aproximadas para una amplia va- riedad de problemas de ingeniería. A causa de su diversidad y flexibilidad esta poderosa herramienta de análisis se está aplicando cada vez más en la solución de una gran gama de problemas. Gracias al gran desarrollo de los computadores digitales se pueden abordar ahora el estudio de problemas cada vez más complejos, como es el caso, por ejemplo, del análisis del flujo sub- sónico compresible en una tobera tridimensional (7.1).

El análisis tridimensional permite reproducir con muy buena precisión la geometría espacial del escurrimiento en estudio, pero in- volucra a su vez una gran complejidad de cálculos, incluso sobrepasando, en pro- blemas relativamente sencillos, la capacidad de los computadores digitales existentes en el país.

La alternativa es reducir el escurrimiento tridimensio-

nal al equivalente en dos planos ortogonales, uno horizontal y otro vertical, y finalmente componer las velocidades en el espacio. De esta manera se pueden emplear computadores de tamaño intermedio, como el IBM-370. Utilizando sub- rutinas, para generar la malla de elementos finitos, y, para interpolar las fun- ciones potencial hidráulico H y función de corriente Ψ , se simplifica enorme- mente el desarrollo de los cálculos.

2.2 Metodología de la aplicación.

En el caso de la determinación de la distribución de ve- locidades en el plano de rejillas de una bocatoma, se puede dividir el cálculo en las etapas siguientes:

- 1) Malla V : se esquematiza un corte vertical de la bocatoma (plano XZ) y se dibuja la malla de elementos finitos (triángulos), definiéndose arbi- trariamente las dos líneas de corriente extremas que limitan el contor- no, por ejemplo $\Psi = 10$ y $\Psi = 90$ (ver Figura 1). Se eligen también los límites de aguas arriba y aguas abajo del flujo, escogiendo en lo posi- ble equipotenciales H , asignándoles o no valores de Ψ (interpolados li- nealmente) en los nudos (puntos o vértices).
- 2) Malla H : se esquematiza un corte horizontal de la bocatoma (plano XY) y se dibuja la respectiva malla de elementos finitos. Igual que en el ca- so de la malla V se definen los extremos de la malla. El o los macho- nes se incorporan a la red de triángulos asignándoles un valor $k_2/k_1 = 50.000$, lo que equivale a considerarlos prácticamente impermeables (7.2) o $k_2/k_1 = 1$ en el caso en que se omitan los machones (ver Figura 2).
- 3) Líneas de corriente en plano XZ : se procesa en un computador la informa- ción de la malla V y se dibujan las líneas de corriente (ver Figura 3). En estricto rigor sólo es necesario dibujar las líneas Ψ de la zona de las rejillas. De aquí se obtienen los datos "b" (espesor de los tubos de flujo que atraviesan las rejillas) y " β " (ángulo que forma la línea de co- rriente Ψ con la coordenada X). La coordenada Z' está contenida en un plano vertical y en el plano de rejillas.
- 4) Líneas de corriente en plano XY : igual a la etapa anterior se procesa la malla H . Se obtienen los datos "a" (análogos a los "b") y " α " (án- gulo entre la coordenada X y la línea de corriente). La coordenada Y' está contenida en un plano horizontal y en el plano de rejillas (ver Figura 4).

- 5) Con los datos (b, β) y (a, α) se calculan las velocidades "V" de los tubos de flujo, "u" (normales al plano de rejillas), "v" y "w" (contenidas en el plano de rejillas).

2.3 Ejemplos de aplicación.

Se aplicó el método de los elementos finitos a dos tipos diferentes de bocatomas:

- 1) Bocatoma superficial.— Tal es el caso de la Bocatoma Laja de la Central Antuco, la que se muestra en las figuras 5 y 6.

Se calcularon las velocidades para las siguientes condiciones:

Q	=	53,00 m ³ /s	caudal captado
Z _e	=	749,50 m	cota en el embalse
A	=	38,00 m ²	área de rejillas interceptada por el escurrimiento.

Los casos estudiados son los siguientes:

- Malla V : una red de 537 triángulos, 316 nudos y ancho de banda del sistema de ecuaciones igual a 14 (caso 1V - 06.03.80).
- Malla H : una red de 521 triángulos, 297 nudos, ancho de banda igual a 15 y $k_2/k_1 = 10^6$ (caso 1H - 24.03.80)

En la Figura 12 (b) se muestra la disposición de los tubos de flujo interceptados por las rejillas (su numeración y su posición).

En las Figuras 7 y 8 se muestran las distribuciones de velocidades calculadas (líneas de trazos). Las secciones se han numerado desde la izquierda hacia la derecha (mirando desde aguas arriba).

- 2) Bocatoma Profunda.— Es el caso de la Bocatoma de la Central Machicura, la que se muestra en las Figuras 9 y 10.

Se han calculado las velocidades para las siguientes condiciones:

Q	=	140,00 m ³ /s
Z _e	=	255,00 m
A	=	113,70 m ²

Los casos estudiados son los siguientes:

- Malla V : una red de 344 triángulos, 203 nudos y ancho de banda igual a 14 (caso V DE 2 - 07.05.80)
- Malla H : una red de 381 triángulos, 222 elementos, ancho de banda

igual a 14 y sin machón central (caso H DE 2 - 05.02.81).

En la Figura 12 (a) se muestra la disposición de los tubos de flujo interceptados por las rejillas.

En la Figura 11 se han dibujado 5 distribuciones de velocidades calculadas (líneas de trazos). Las secciones se han numerado de izquierda a derecha.

A partir de la Figura 5 se invirtieron los ejes coordenados Y y Z, tal como se indica en la Figura 12 (coordenadas Y" y Z").

3. MODELO HIDRAULICO

En el modelo hidráulico reducido, a escala geométrica 1/50, realizado en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Católica de Chile, Campus San Joaquín (7.3), se midieron distribuciones de velocidades mediante un anemómetro de hilo caliente, con sonda para agua, con las mismas condiciones hidráulicas indicadas en el punto 2.3-2).

Las velocidades medidas se han dibujado en la Figura 11 (líneas continuas). En esta figura se aprecia que las distribuciones de velocidades (las medidas en el modelo y las calculadas teóricamente), son notoriamente similares en su forma (excepto para la sección 5).

Se nota una mayor diferencia en el valor de "u", pero en todo caso ella no es exagerada, lo que es explicable, puesto que el método de los elementos finitos permite calcular el valor exacto de "u" (velocidad normal al plano de rejillas), mientras que el anemómetro de hilo caliente proporciona el valor de "V" (módulo del vector velocidad). Esto se aprecia en el cálculo del caudal:

$$Q = \int_0^A u dA$$

Q = 137,8 m³/s por el método de los elementos finitos, y

Q = 143,8 m³/s por las velocidades medidas en el modelo.

4. PROTOTIPO

En la Bocatoma Laja de la Central Antuco se midieron velocidades en 9 secciones diferentes (7-4). Desafortunadamente no se reprodujeron las condiciones hidráulicas indicadas en el punto 2.3-1), siendo éstas un poco diferentes:

- $Q = 50,50 \text{ m}^3/\text{s}$ caudal aforado en el canal Laja
 $Z_e = 749,80 \text{ m}$ nivel de aguas en la poza
 $A = 44,00 \text{ m}^2$ área de rejillas interceptada por el flujo.

Las velocidades se midieron con un molinete hidrométrico marca OTT, con hélice de 100 mm de diámetro del tipo A (para flujo inclinado de hasta 45°). Estas velocidades se han dibujado en las Figuras 8 y 9 con línea continua.

En las secciones 1 a 5 se aprecia una relativa buena concordancia, tanto en forma como en valor, entre las velocidades teóricas calculadas y las medidas en el prototipo. En las secciones de más a la derecha se nota una disminución notable de las velocidades medidas con respecto a las calculadas. Esto se aprecia en el cálculo del caudal:

$$Q = \int_0^A u dA$$

- $Q = 54,3 \text{ m}^3/\text{s}$ por el método de los elementos finitos.
 $Q = 45,6 \text{ m}^3/\text{s}$ por las velocidades medidas en el prototipo.

Se observa una notoria diferencia, de un -9,7%, con el caudal aforado en el canal de aguas abajo de la Bocatoma Laja, también mediante molinete. Este último aforo se considera válido.

Las condiciones hidráulicas son un poco diferentes entre el prototipo y el modelo matemático, lo que se debió a que la pantalla de aguas abajo (ver Figura 5) actuó en este caso como sección de control, siendo que en el cálculo se supuso que la sección de control estaba aguas abajo de dicha pantalla (punto 5 de la figura referida).

En el prototipo se observa visualmente que en la zona de la derecha existía un despegue superior de la vena, con una zona de aguas muertas. Este hecho explicaría las menores velocidades medidas en el prototipo (en la bocatoma), pero a su vez se contradice con el caudal aforado en el canal de aguas abajo de la bocatoma, lo que deberá ser investigado más adelante.

5. COMPARACION DE RESULTADOS

Bocatoma	Método	V (m/s)	$u_{\text{máx.}}$ (m/s)	$u_{\text{mín.}}$ (m/s)	$u_{\text{máx.}}/V$	$u_{\text{mín.}}/V$
Machicura	Elem.Finitos	1.23	1.59	0.70	1.29	0.57
	Modelo	1.23	1.52	0.83	1.23	0.67
Laja	Elem.Finitos	1.39	2.14	0.94	1.54	0.68
	Prototipo	1.15	1.50	0.23	1.30	0.20

V = velocidad media que corresponde según aforo válido (modelo o prototipo) y según bases de cálculo (elementos finitos).

$u_{\text{máx.}}$ = velocidad máxima medida o calculada.

$u_{\text{mín.}}$ = velocidad mínima medida o calculada.

En el cuadro anterior se observa que la relación $u_{\text{máx.}}/V$ es mayor para el cálculo de velocidades por elementos finitos, lo que es lógico, ya que por cálculo se pueden determinar fácilmente las mayores velocidades.

Desafortunadamente las medidas realizadas en la Bocatoma Laja no concuerdan con el aforo realizado en el canal de aducción que la sigue.

En las distribuciones de velocidades de la Bocatoma Laja (Figuras 7 y 8) se observa que la influencia de la grada de subida de la entrada se nota claramente en las calculadas por elementos finitos y sólo se aprecia este efecto en la sección N°3 de las velocidades medidas (Fig.7).

Este efecto se observa en la Bocatoma Machicura (Túnel N°2) tanto para las velocidades calculadas como para las velocidades medidas en el modelo. Además se aprecia una notable similitud entre ellas.

6. CONCLUSIONES

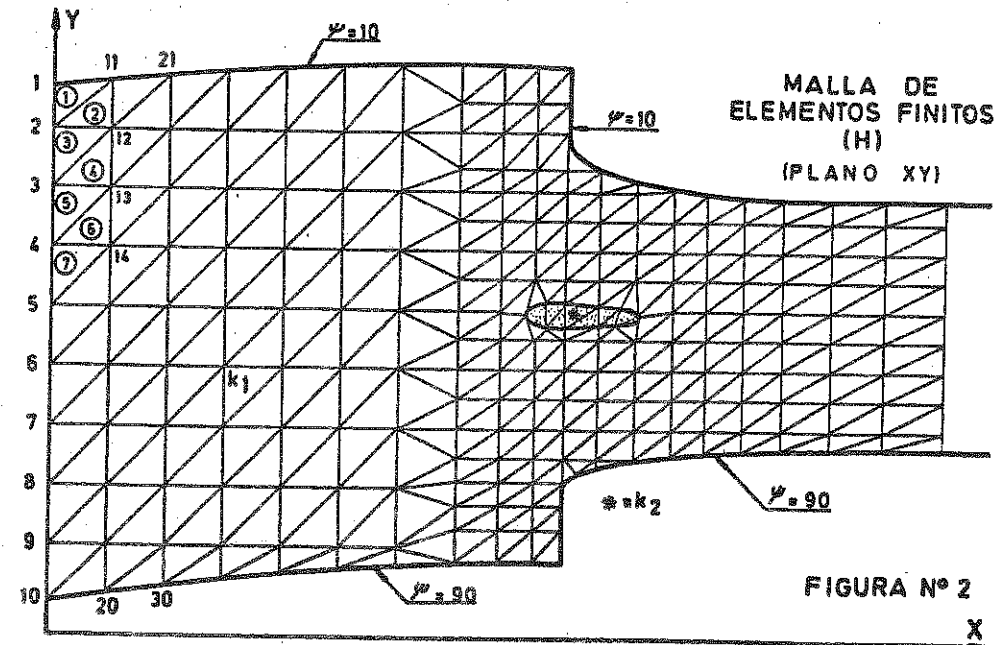
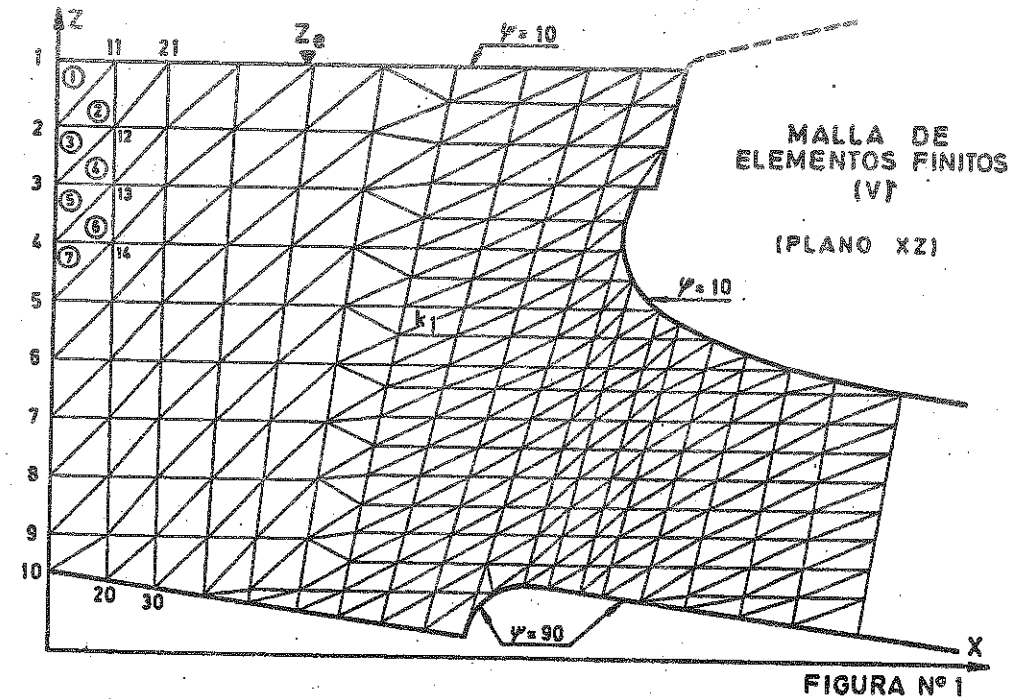
La primera conclusión, aunque no se puede generalizar aún, es que se reproducen mejor las velocidades en el caso de bocatomas profundas que para las bocatomas superficiales.

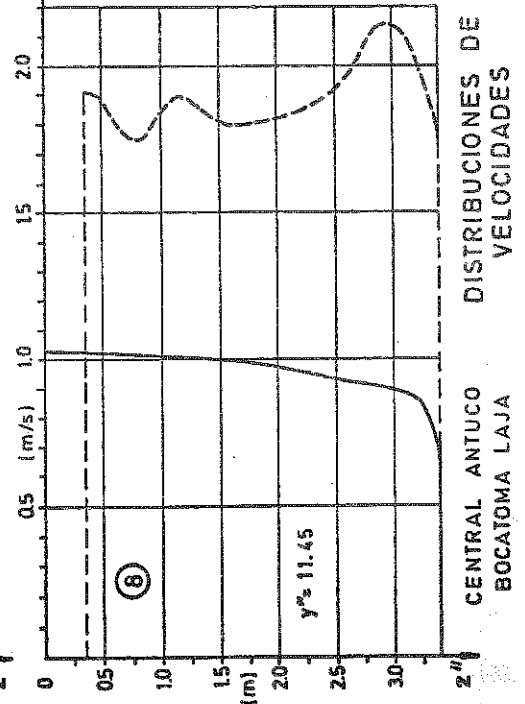
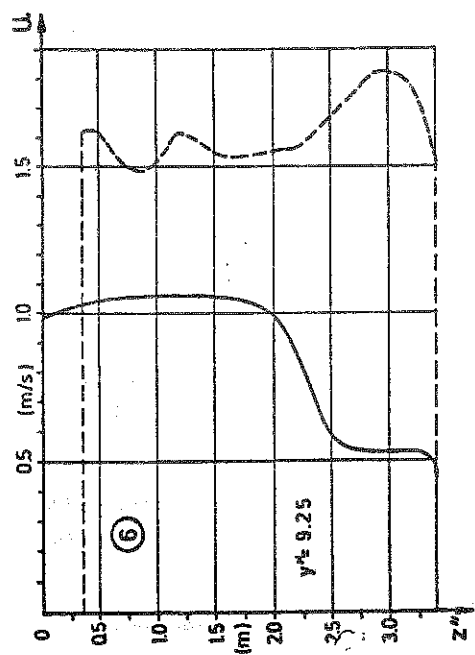
Otra conclusión es que al diseñar una bocatoma deberán impedirse los despegues de vena (hacer transiciones adecuadas), pues el cálculo teórico en sí mismo no detecta este problema.

Finalmente se puede decir que el método de los elementos finitos se puede emplear y permite obtener resultados confiables siempre que no existan despegues de vena en la zona de las rejas, que la bocatoma sea lo más simétrica posible y que la boca de entrada, en la que se ubican las rejas, sea en lo posible rectangular, con transiciones adecuadas (elipses).

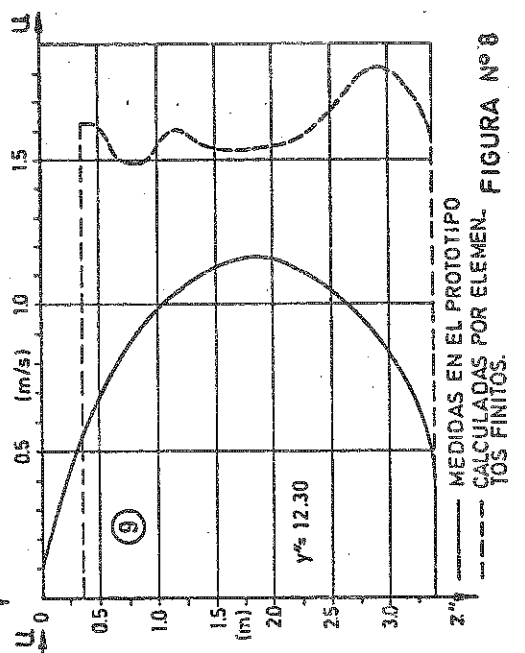
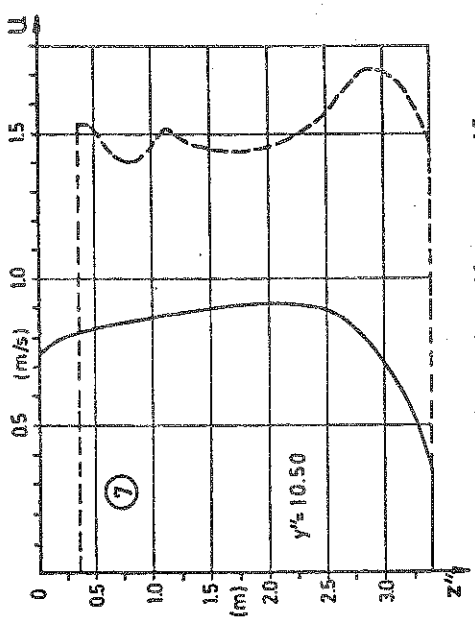
7. BIBLIOGRAFIA

- 7.1 Kenneth H. Huebner: "The Finite Element Method for Engineers".
John Wiley & Sons
- 7.2 División de Estudios Hidráulicos: "Cálculo de escurrimientos en medios permeables anisotrópicos".
Informe DICOH N° EG-300 - ENDESA, Junio de 1981.
- 7.3 DICTUC: "Central Machicura - Estudio en modelo de las obras de evacuación y toma".
Pontificia Universidad Católica de Chile (Facultad de Ingeniería) - Santiago - Octubre de 1980.
- 7.4 División de Estudios Hidrológicos: "Medida de las velocidades en las rejas de la Bocatoma Laja de la Central Antuco".
Informe OICOI N° 4/81 - ENDESA, Julio de 1981.





CENTRAL ANTUCO
BOCATOMA LAJA



MEDIDAS EN EL PROTOTIPO
CALCULADAS POR ELEMEN-
TOS FINITOS.

PROYECTO COLBUN - CENTRAL MACHICURA
BOCATOMA

CORTE A - A

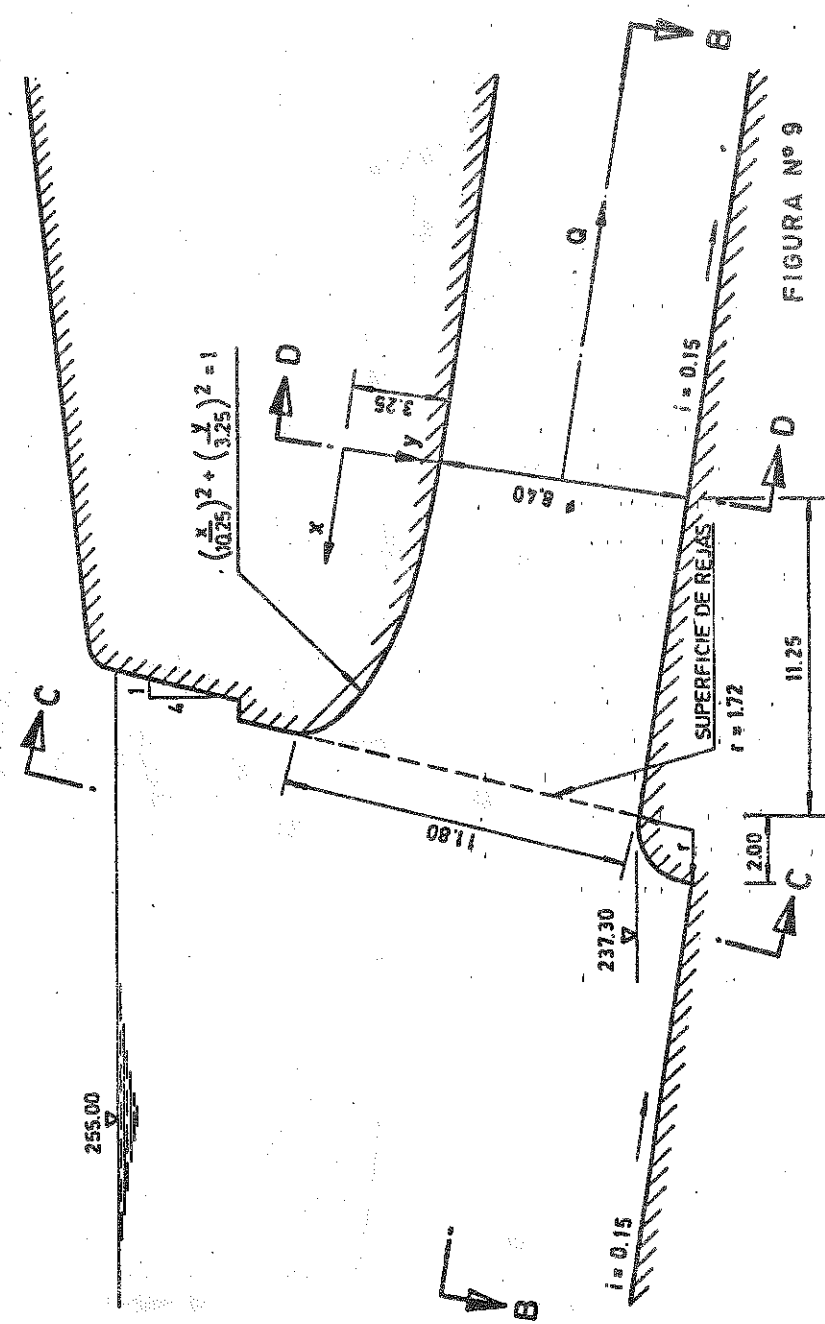


FIGURA Nº 9

CORTE B - B

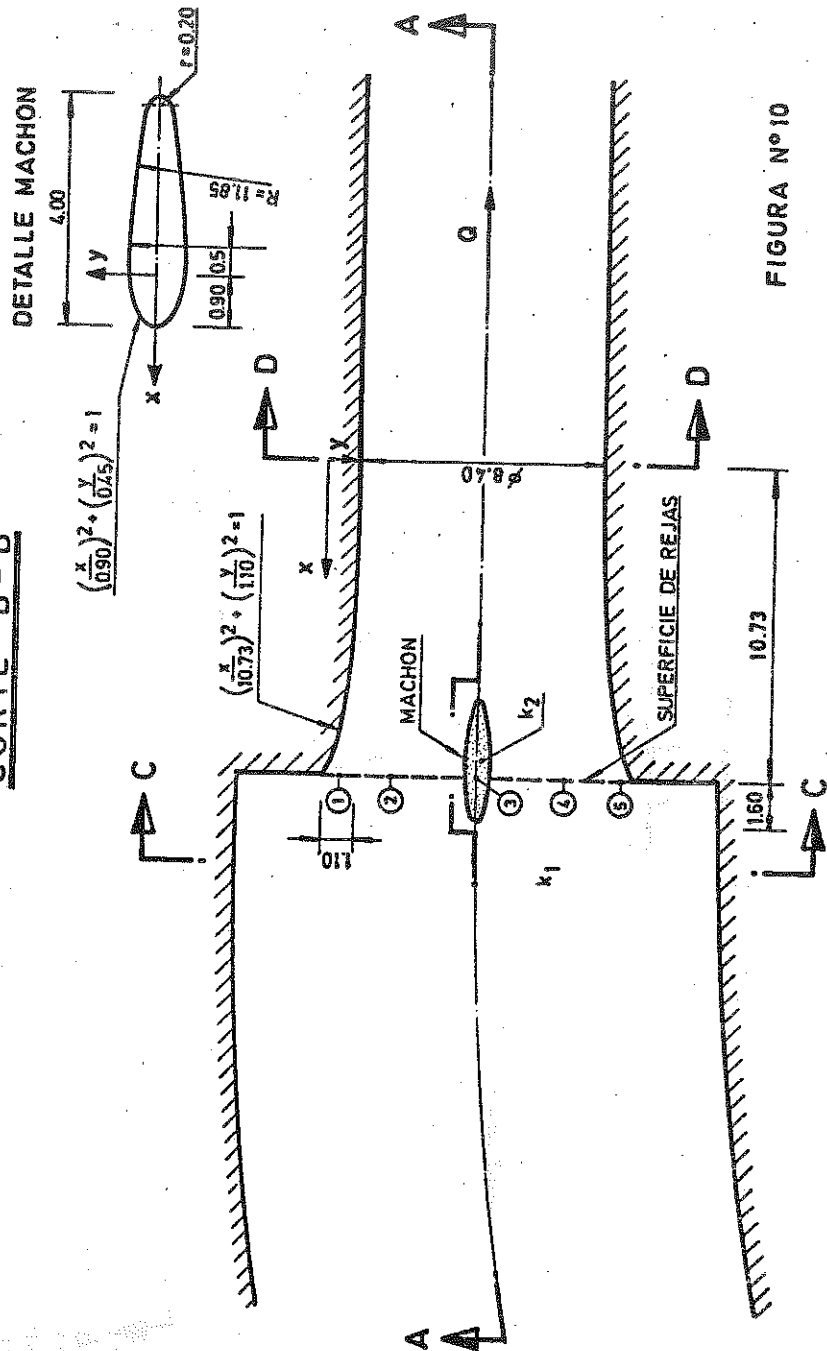
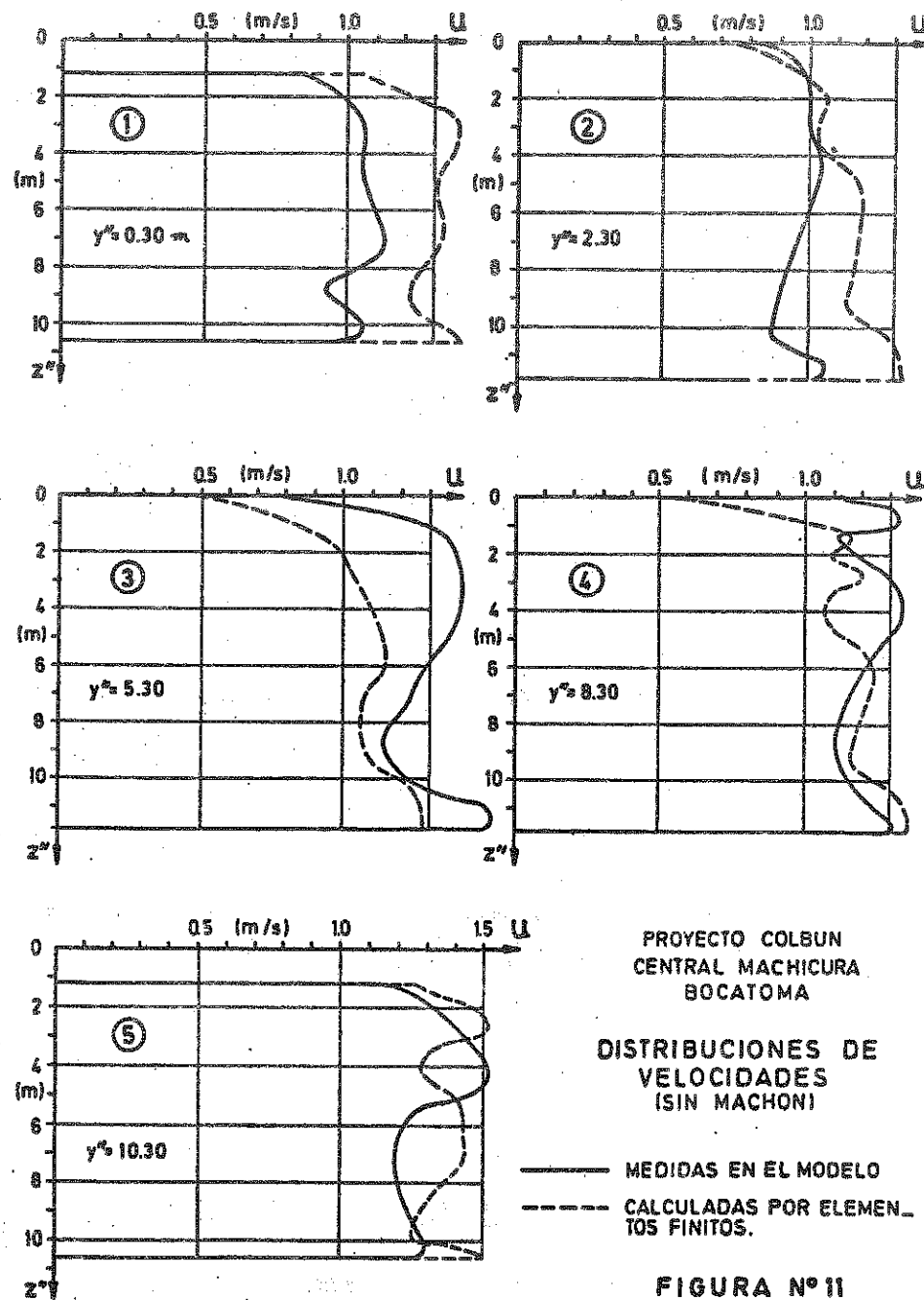


FIGURA N° 10



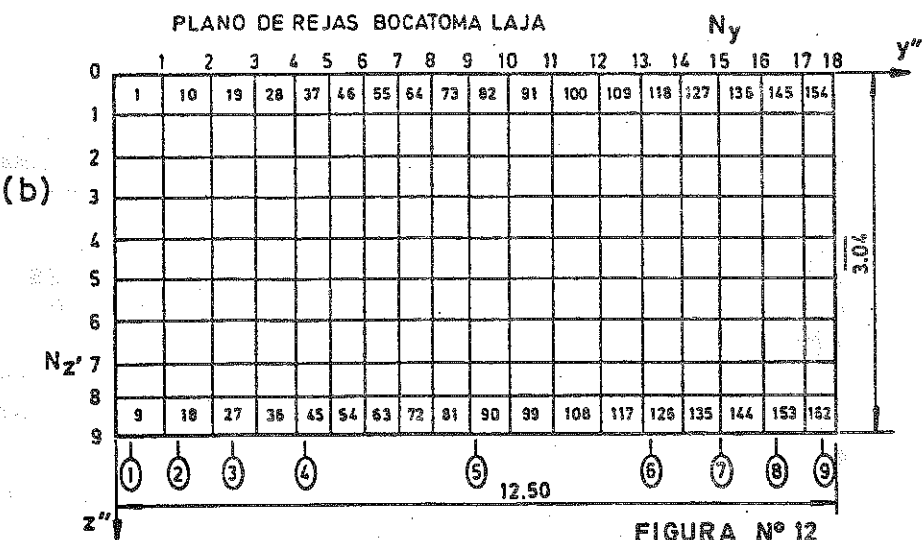
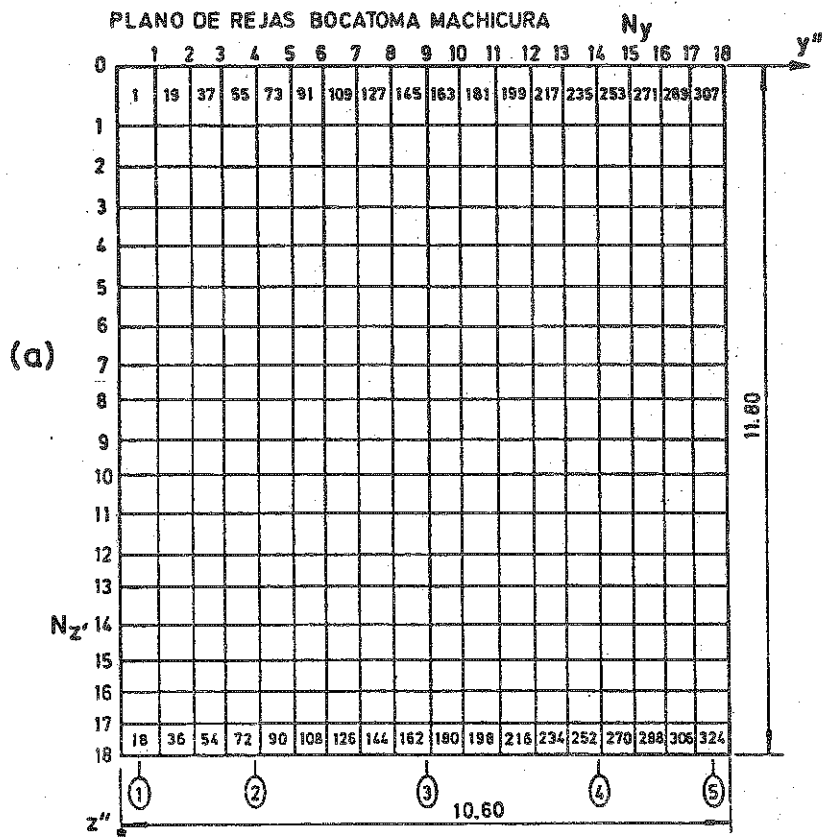


FIGURA Nº 12

DETERMINACION TEORICO-EXPERIMENTAL DE LOS COEFICIENTES DE RESISTENCIA DE UNA CHIMENEA DE EQUILIBRIO DE ORIFICIO RESTRINGIDO

Klaus J. Pontani Riegel (*)

RESUMEN

La determinación de los coeficientes de resistencia es uno de los problemas que enfrenta el ingeniero hidráulico que proyecta una chimenea de equilibrio de orificio restringido.

El objetivo de este trabajo es mostrar en dos casos, el de las centrales Colbún (Chile) y Randens (Francia), los coeficientes que se calcularon mediante la literatura técnica disponible, para luego compararlos con los valores experimentales obtenidos de los respectivos modelos hidráulicos.

Esta comparación permitió evaluar en estas dos obras, hasta qué punto los coeficientes calculados concuerdan con los experimentales y deducir algunas recomendaciones relativas a la forma de abordar dicho cálculo.

(*) Ingeniero Civil, División Estudios Hidráulicos, ENDESA. Profesor Auxiliar Escuela de Ingeniería, Universidad de Chile.