

Rubén Escobar T
621.838
6/3/03. P298



ESCUELA SUPERIOR
POLITECNICA DEL LITORAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

"EFECTOS DEL FLUJO SECUNDARIO Y SU INFLUENCIA
EN EL RENDIMIENTO DE UN ALABE DE COMPRESOR"

TESIS DE GRADO
PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE :
INGENIERO MECANICO

POR :
MANUEL PATINO LOPEZ

GUAYAQUIL - ECUADOR - OCTUBRE 1978



BIBLIOTECA

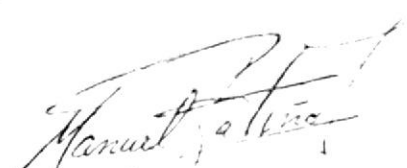
"EFECTOS DE FLUJO SECUNDARIO Y SU INFLUENCIA EN
EL RENDIMIENTO DE UN ALABE DE COMPRESOR"

DIRECTOR DE TESIS



ING. MARCO PAZMINO

AUTOR



MANUEL PATINO LOPEZ

DECLARACION EXPRESA:

DECLARO QUE: Hechos, ideas y doctrinas expuestos-
en esta tesis son de mi exclusiva responsabilidad,
y que el patrimonio intelectual de la misma corres-
ponde a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITO -
RAL.

(Reglamento de Exámenes y Títulos Profesionales de
la ESPOL).

DEDICATORIA:

A LA ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA
DEL LITORAL

*A mis queridos padres, por su siempre
abnegada ayuda*

*A mis hermanos que me alentaron
constantemente*

*A mis Compañeros de
Estudio*

C O N T E N I D O

	Pag.
PREFACIO	
NOMENCLATURA	
1.- Introducción	1
2.- Descripción General de un Túnel de Viento	3
3.- Características del Túnel de Viento de la ESPOL	10
4.- Estudio de los parámetros que intervienen en el flujo secundario	
4.a Influencia de la turbulencia	16
4.b Variación del Número de Reynolds	17
4.c Formación de Vórtices	20
4.d Comportamiento de la capa límite	27
4.e Efectos del Flujo secundario en la eficiencia del álabe	35
4.f Descripción de las características de flujo en turbinas y - compresores.	37
5.- Diseño y Construcción del álabe	
5.a Selección del material	41
5.b Coordenadas	44
5.c Selección de puntos críticos para medidas	49
5.d Construcción del álabe	51
6.- Mediciones experimentales	63
7.- Análisis de los resultados experimentales	80
8.- Conclusiones y Recomendaciones	88
9.- Apéndice:	
a) Tablas	90
b) Gráficos	130
Referencias Bibliográficas.	180

P R E F A C I O

El presente tema de tesis fué sugerido por el M.S. Arthur Henderson, profesor de Ingeniería Mecánica del Sunderland Institute Polytechnic, a quien debo agradecer su ayuda especialmente en lo que a experimentación se refiere.

De manera muy especial presento mi profundo a gradecimiento al Director de Tesis, Ing. Marco A. Pazmiño B., por su decidida guía y apoyo brindados en la elaboración de la presente tesis.

N O M E N C L A T U R A

- A = Area proyectada del álabo, $l \times c$
- c = Cuerda del álabo
- C_D = Coeficiente de resistencia del perfil
- C_{Df} = Coeficiente de resistencia de fricción
- C_{Dp} = Coeficiente de resistencia de forma
- C_{Ds} = Coeficiente de resistencia secundario
- C_{Dt} = Coeficiente de resistencia total
- C_L = Coeficiente de sustentación o levante
- C_p = Coeficiente de presión
- D = Fuerza de resistencia o arrastre
- d = distancia considerada desde la pared vertical del túnel
- g = Aceleración de la gravedad
- h = Espesor máximo del álabo
- L = Fuerza de sustentación o levante
- l = longitud del álabo
- R = Número de REynolds
- R_0 = Número de REynolds en flujo laminar
- R_t = Número de Reynolds en flujo turbulento
- t = tiempo
- U = Velocidad del fluido
- x = distancia considerada desde el borde de ataque
- α = Angulo de ataque
- ρ = Densidad del fluido

γ = Peso específico

μ = Viscosidad dinámica del fluido

ν = Viscosidad cinemática del fluido

δ = Espesor de la capa límite

1. INTRODUCCION

El mundo de hoy está modelado en todos sus dominios por innumerables técnicas surgidas de los conocimientos científicos.

La ciencia de hoy es una realidad compleja de la cual es difícil dar una explicación general. Es a la vez una actitud frente a la naturaleza, un conjunto de conocimientos, un método de explicación y de acción.

La visión global lleva a afirmar que la finalidad de la ciencia es un mejor conocimiento y comprensión de todo lo que existe. Es por medio de la técnica, que obtenemos el uso cada vez más racional, seguro, económico y cómodo de los conocimientos.

La presente investigación trata de la acción de un flujo uniforme paralelo en un túnel de viento sobre un elemento: álabe de compresor. El patrón de flujo cerca de los extremos de los álabes es difícil de predecir debido a los efectos de la capa límite de las paredes. Debido a estas capas límites y al hecho de que hay un determinado número de álabes en cada etapa de un compresor, flujos secundarios son creados y, consecuentemente, el patrón de flujo se complica.

La tesis comprende la construcción de los álabes necesarios para la experimentación, que fueron dos, el uno sin perforaciones de medición de presión, con el fin de probar con él un determinado método que fue el de balance de fuerzas y el otro con las perforaciones para la aplicación del método de distribución de presiones.

Luego, la fase de la experimentación que se cubrió para distintos números de Reynolds, y ángulos de ataque, y como mencioné anteriormente, la experimentación por dos métodos; y, finalmente, los análisis de los resultados y conclusiones.

La importancia de la investigación es el estudio de la capa límite, el fenómeno que en ella se produce y el conocimiento de las fuerzas que se presentan en los álabes de las turbomáquinas, lo cual es básico para el diseño y construcción de estos elementos siendo la aerodinámica el estudio del aire en movimiento se ubica nuestro tema en dicha ciencia, cuyo campo comprende la observación del aire, el enunciado de las leyes que gobiernan los distintos tipos de movimiento y el desarrollo de métodos teóricos para descifrar el problema del movimiento en el aire.

Cabe mencionar, pues, que los principios estudiados para los álabes son, básicamente, los mismos que se utilizan para las alas de los aviones.

2. DESCRIPCION GENERAL DE UN TUNEL DE VIENTO.-

Un túnel de viento es básicamente, un equipo que proporciona un flujo de aire constante y uniforme de aire sobre un modelo, o una es tructura de tamaño completo colocada en la sección de trabajo, los otros componentes del túnel sirven para generar este flujo uniforme.

Hay tres tipos principales de túneles de viento que mencionaremos brevemente a continuación:

- 1.- Túneles de Circuito Abierto
- 2.- Túneles de Circuito Cerrado
- 3.- Túneles de Aire Comprimido.

TUNELES DE CIRCUITO ABIERTO.-

Los túneles de este tipo consisten esencialmente de un ducto, generalmente de sección transversal cuadrada o rectangular, a través de la cual es succionado el aire por un extractor que está colocado en el extremo de salida. Dicho extractor toma aire fresco de la atmós fera, el cual es obligado a pasar por unas resistencias de cartón en forma de panales, lo cual da el carácter de uniformidad al flujo. Las mencionadas resistencias de cartón suelen ser colocadas en la campana de entrada. El aire atravesará la sección de trabajo y finalmente descargado.

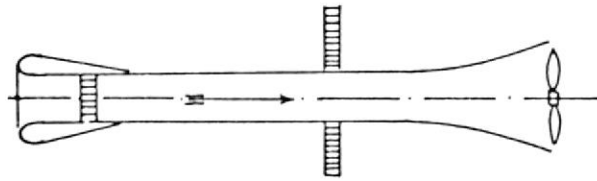


Fig. 2.1 Túnel de Circuito Abierto

TUNELES DE CIRCUITO CERRADO.-

La característica de este tipo de túneles es que, en lugar de que el aire sea descargado libremente, es conducido a través de un circuito cerrado, por medio de convenientes guías para llevar el - aire suavemente por cada una de las curvaturas de ángulo recto, a - traviesa también las resistencias de cartón con el fin mencionado anteriormente.

A objeto de que el retorno no sea demasiado rápido como para - que no desaparezcan las perturbaciones provocadas por el extractor se - provoca una expansión gradual del ducto de retorno hasta casi cu - tro veces el área de la sección de prueba, seguida por una rápida - contracción justo antes de la sección de prueba.

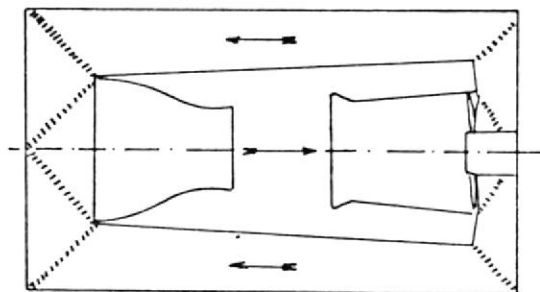


Fig. 2.2 Túnel de Circuito Cerrado

TUNELES DE AIRE COMPRIMIDO.-

Consiste de un túnel de circuito cerrado totalmente protegido por un casco de acero capaz de resistir las condiciones de presión. Para economizar espacio y llenar el túnel en el casco, el ducto de retorno toma una forma anular rodeando la sección de trabajo.-

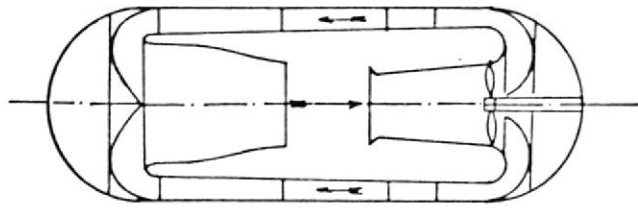


Fig. 2.3 Túnel de Aire comprimido

PRINCIPALES COMPONENTES DE UN TUNEL DE VIENTO SUBSONICO.-

Las partes principales que conforman un túnel de viento subsónico son:

- a) Extractor o ventilador
- b) Difusor
- c) Contracción
- d) Pantallas de metal entrelazado
- e) Paneles de cartón
- f) Medidores de Presiones, y
- g) Cámara de Prueba.

a) **EXTRACTOR O VENTILADOR.** -

Son máquinas usadas para expulsar o proporcionar aire u otros gases hasta una presión de 50 cm de agua. Como a bajas presiones la compresibilidad del gas o el aire puede ser despreciada el diseño teórico de la máquina es similar que para bombas. Existen de dos tipos de flujo axial y centrífugo. Los de tipo axial son usados en lugares donde el volumen de aire operado es muy grande y las presiones son bajas.

Los de tipo centrífugo, en cambio, son utilizados cuando el volumen requerido es comparativamente pequeño y la presión es relativamente alta.

El extractor o ventilador consiste de una serie de álabes montados en un eje, el cual está conectado al eje matriz. Los álabes pueden ser fundidos íntegramente con el eje o individualmente conectados a él. Una cubierta cilíndrica es colocada alrededor del ventilador o extractor con apenas suficiente espacio libre para que los álabes puedan rotar sin tocar la cubierta.

b) **DIFUSORES**

La aceleración o deceleración del fluido es una característica esencial de algunas partes de la mayoría de las turbomáquinas. El problema se presenta del hecho que la capa límite está propensa a separarse si la razón de difusión es muy rápida, y grandes pérdidas en la pre -

sión de estancamiento son entonces inevitables. Por otro lado, si la razón de difusión es muy baja el fluido está expuesto a una excesiva longitud de pared, la cual por sí misma es ya un inconveniente, con lo cual las pérdidas por fricción se harían predominantes.- Es pues, necesario, para el ingeniero de diseño encontrar la razón de difusión para la cual los dos efectos quedan minimizados.

En la práctica, generalmente se lo diseña como una expansión de 5- grados de ángulo incluido.

c) CONTRACCION.-

Se la hace con el objeto de aumentar la velocidad en la cámara de prueba. Se tiene, en este caso un problema similar al expuesto anteriormente, si la velocidad incrementa lentamente la contracción será muy larga; y, si la contracción se la hace muy corta, gradientes de velocidad negativos deben ocurrir en cada extremo con el riesgo resultante de separación de capa límite.

Algunos métodos matemáticos, ninguno de ellos ideal, son aconsejables para el diseño de contracciones.

d) PANTALLAS DE METAL ENTRELAZADO.-

El objeto de colocar este tipo de pantallas en un túnel de viento es el de reducir la variación de la velocidad media con lo que se logra reducir, a la vez, las componentes longitudinales de la turbulen -

cia.-

Se logra reducir esta variación debido a que en las regiones - en que la velocidad es mayor que el promedio, la fuerza de arrastre que se presenta en las pantallas, debida al flujo será también mayor.

Son necesarias algunas pantallas o rejillas en serie para reducir la turbulencia a un nivel aceptable y las variaciones de la velocidad media son, por consiguiente, casi eliminadas, las que permanecen son el resultado de las imperfecciones del entrelazado o asperezas de la última pantalla.

e) PANALES DE CARTON

Las pantallas, así como las contracciones, reducen los componentes longitudinales de la turbulencia o la variación de la velocidad media. Las componentes laterales de la velocidad media y una mayor turbulencia puede ser reducida más efectivamente por un panel: el modo - de acción de un panel de celdas elongadas en la dirección del flujo es cualitativamente obvio.

f) MEDIDORES DE PRESION.-

En este acápite solamente mencionaremos algunos aparatos que sirven para medir presiones en los túneles de viento, en el próximo capítuu

lo describiremos el trasductor de presiones que posee la ESPOL.-

Son utilizados , con este objeto, ampliamente en los túneles de viento los trasductores de presión y los multimanómetros, que no son otra cosa que una batería de manómetros para medir varias presiones-simultáneamente.

g) CAMARA DE PRUEBA.-

Es la sección de área constante en donde se coloca el modelo que se desea probar en el túnel de viento, esta sección se la hace de material transparente.-

Es pues, en esta sección donde se colocan los aparatos que toman las mediciones, tales como el tubo de pitot, medidores de arrastre y levante, etc.

3. CARACTERISTICAS DEL TUNEL DE VIENTO DE LA ESPOL.-

El túnel de viento subsónico que posee La Escuela Superior Politécnica es hecho casi totalmente de fibra de vidrio, presentando en su parte interna superficies muy lisas dadas por el material - que se utiliza para dar el acabado en fibra de vidrio el cual es - el Gel-Coat.

Las funciones básicas del túnel de viento mencionado son las - mediciones de levante, de arrastre o resistencia, de presiones y de coordenadas verticales y horizontales.

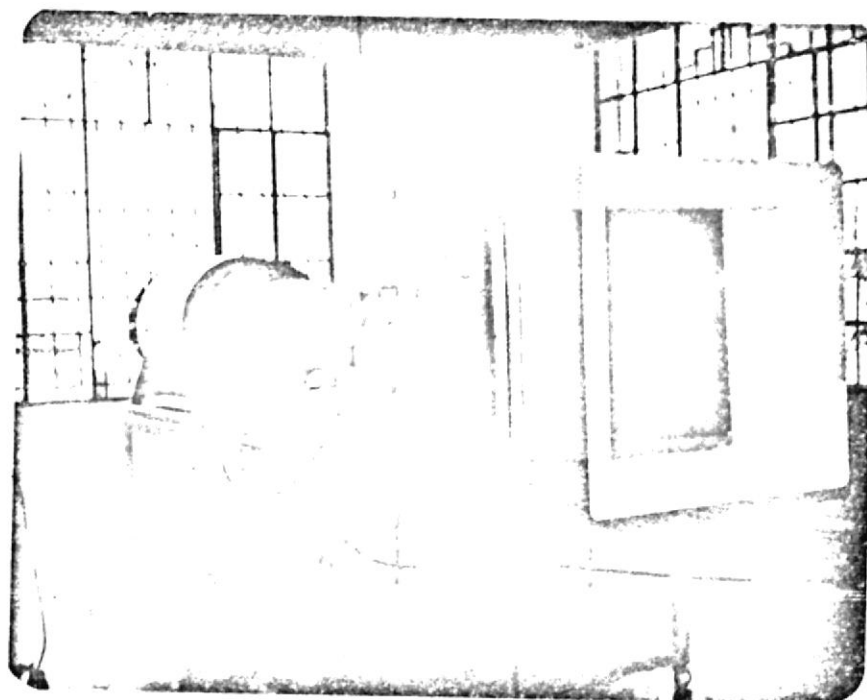


Fig. 3.1 Túnel de Viento Subsónico de la ESPOL

El sistema consiste de cuatro componentes mayores: el conjunto de dinamómetros, el transductor de presiones y la caja de control, además de los componentes mencionados anteriormente.

CONJUNTO DE DINAMOMETROS.-

Mide las fuerzas de levante y arrastre con dos dinamómetros individuales que están en condiciones a responder a fuerzas actuantes en ángulos rectos una de la otra.

Los dinamómetros son similares en construcción y operación y utilizan pares de balancines de aluminio, como se muestra en la figura - 3.2.

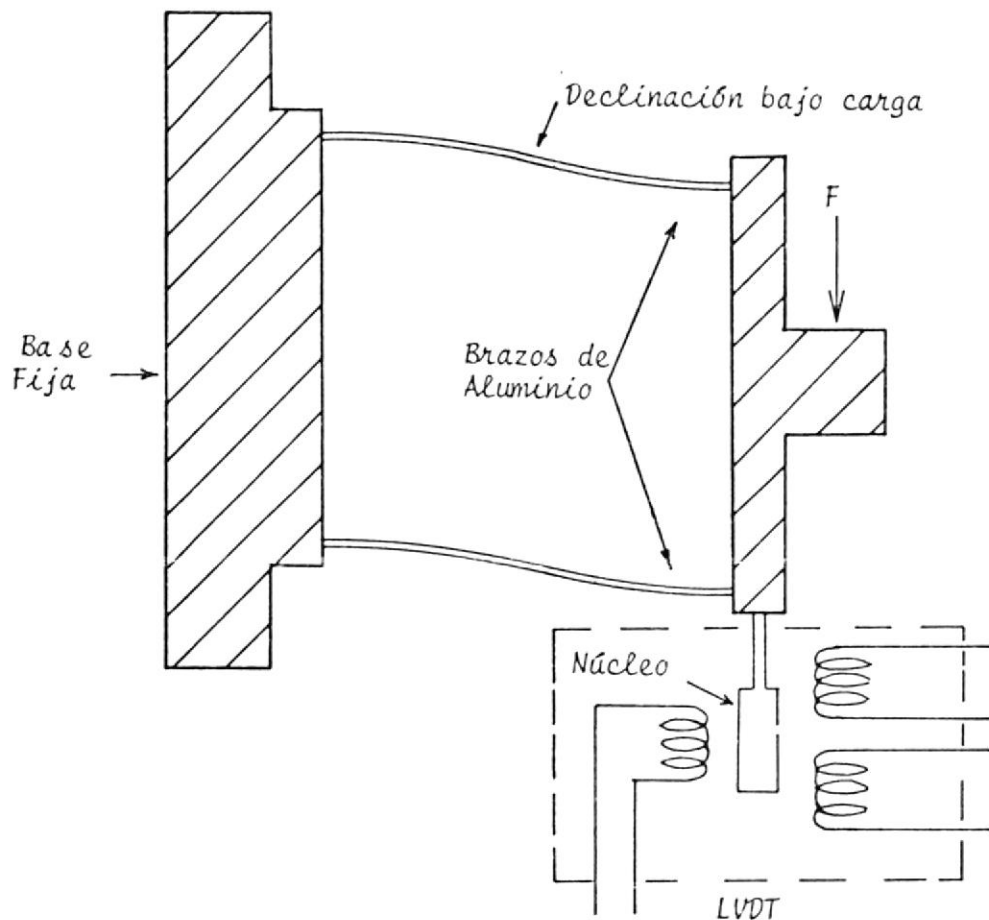


Fig. 3.2 Diagrama de dinamómetro

Estos balancines son diseñados para responder con gran sensibilidad a fuerzas dentro de sus esperados rangos de carga.

Una fuerza de levante o arrastre aplicada al dinamómetro produce una deflexión de los balancines la cual es directamente proporcional a la magnitud de esa fuerza. Esta deflexión es advertida por un transformador diferencial de variable lineal (LVDT), el núcleo del cual está fijo a una armadura móvil. Las señales de salida de cada devanado del LVDT son detectadas por puentes completos de diodos.

Las señales resultantes del diferencial de corriente directa representa la dirección y magnitud de la fuerza aplicada al dinamómetro.

El voltaje de entrada al transformador es obtenido de un transformador regulado el cual entrega $6v \pm 1\%$ desde la línea de voltaje de 95 a 130 volt.

TRANSDUCTOR DE PRESIONES.-

Este es un dispositivo que convierte cambios de presión a señales eléctricas. Es de tipo diferencial un fuelle de metal y un LVDT (ver figura 3.3). Las presiones dinámicas son aplicadas a l fuelle y las presiones estáticas son aplicadas a la cámara sellada que rodea el fuelle.

Cualquier cambio de presión en el trasductor resulta en un desplazamiento del núcleo. Este desplazamiento, el cual es una función lineal del cambio en presión, es percibido por el LVDT. La señal eléctrica

ca de salida desde el LVDT representa la presión diferencial.

13

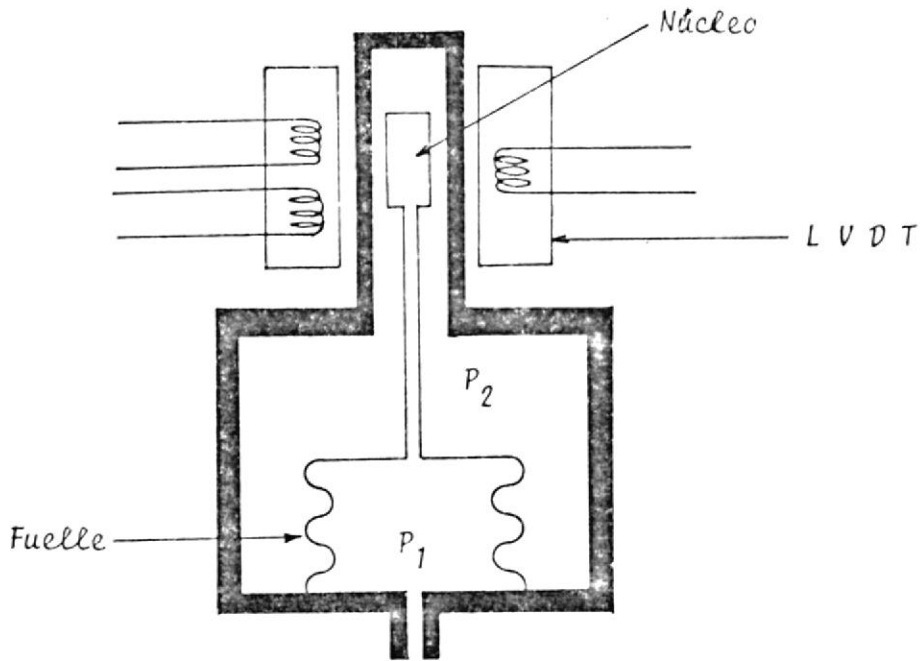


Fig. 3.3 Diagrama de Transductor de presiones

CAMARA DE PRUEBA.-

La velocidad puede ser medida en cualquier punto localizado en la línea central de la sección de prueba por medio del tubo de pitot que tiene movimiento vertical y el cual está en un dispositivo que se moviliza longitudinalmente en el centro de la sección de prueba.

La posición exacta de la velocidad examinada por un par de potenciómetros de vueltas múltiples. Las señales eléctricas de salida de estos potenciómetros representa las coordenadas X y Y de la prueba.

CAJA DE CONTROL.-

Las señales eléctricas que representan las cinco variables: levan

te, arrastre, presión, X y Y son transmitidas a la caja de control por medio de un cable interconector de clavija.

Potenciómetros reguladores son provistos en el circuito para a justar las señales del voltaje de entrada al medidor digital. El me didor digital puede así ser calibrado para leer directamente en - cualquier unidad deseada.

OTROS COMPONENTES DEL TUNEL DE VIENTO.-

El túnel de viento subsónico de la ESPOL, posee, de los componentes mencionados en el capítulo anterior, la campana de entrada, los panales de cartón, filtros de fibra de vidrio, pantallas de metal entrelazado, contracción, luego de la cámara de prueba el difusor, otra vez panales de cartón, y finalmente el extractor.

Los panales de cartón ocupan el área de 76,2 x 76,5 cm en la - entrada del túnel y la profundidad de sus celdas es de 10,2 cm. Se trata de celdas triangulares.

Los filtros de fibra de vidrio, están constituidos por aproximadamente cinco capas de tela mat, es decir fibra de vidrio sin pro cesar, tienen como objetivo el impedir que penetren impurezas a la - sección de trabajo.

Las tres pantallas de metal entrelazado, están colocadas en serie

El extractor es de flujo axial y es operado por un motor eléctrico trifásico cuyas características son las siguientes: 10 caballos de potencia (Hp); 1740 revoluciones por minuto (rpm); 60 ciclos por segundo (Hz); 230 voltios (v).

antes de la sección de trabajo. -

4. ESTUDIO DE LOS PARAMETROS QUE INTERVIENEN EN EL FLUJO SECUNDARIO

4.a INFLUENCIA DE LA TURBULENCIA.-

Puede argumentarse que en un túnel de viento atmosférico la turbulencia debe ser pequeña, no solamente debido a que el incremento de ella generalmente simula los efectos de un número de Reynolds incrementado, sino debido a que en flujo turbulento la capa límite de un cuerpo es más fácilmente convertida en turbulenta y las condiciones son más definidas que en un flujo no turbulento. Consideraremos por ejemplo la medición del arrastre de un cuerpo aerodinámico. Si el flujo es muy turbulento, la capa límite se hará turbulenta justamente cerca de la nariz a un razonablemente alto número de Reynolds y una variación clara de arrastre con el número de Reynolds será medida. Hay consiguientemente una posibilidad de extrapolación a mayores números de Reynolds, donde la capa límite será turbulenta aún en flujo no turbulento. Sin embargo, si el cuerpo es probado en un túnel de baja turbulencia, el arrastre resulta situado en alguna curva de transición, por ejemplo, la capa límite será parcialmente laminar y parcialmente turbulenta, y cualquier extrapolación se hace imposible. Por otro lado, puede ser argumentado que además en el presente es imposible correlacionar la medición de turbulencia con los efectos que ella produce en los diferentes fenómenos, además como el aire libre es considerado no turbulento, túneles deberán tener tan baja turbulencia como sea posible.

Pero, dado que como veremos posteriormente el fenómeno de FLUJO SECUNDARIO se presenta principalmente en los extremos de un perfil aerodinámico ubicado en la sección de prueba de un túnel de viento y que

dicho efecto es detectado solamente si existe turbulencia, es necesario, provocarla. Lo cual se obtiene colocando un elemento tal como el papel lija.

4.6 VARIACION DEL NUMERO DE REYNOLDS.

NUMERO DE REYNOLDS.

En los ensayos aerodinámicos realizados en los túneles de viento la fuerza predominante, además de la debida al gradiente de presiones es la fuerza debida a la viscosidad.

La relación adimensional de fuerzas de inercia a la fuerza de viscosidad se la conoce como el número de Reynolds.

La fuerza de inercia es igual a una masa multiplicada por una aceleración. La masa es igual a la densidad ρ multiplicada por el volumen que a su vez es proporcional al cubo de una cierta longitud característica L^3 . La masa es pues proporcional a ρL^3 . La aceleración es proporcional a una cierta velocidad característica U dividida por un tiempo, o sea proporcional a $\frac{U}{T}$. El tiempo a su vez es proporcional a la longitud característica L dividida por la velocidad U . Luego la aceleración es proporcional a $\frac{U^2}{L}$ y la fuerza de inercia es proporcional a $\frac{\rho L^3 U^2}{L}$ o sea, L fuerza de inercia $\rho L^2 U^2$

En lo que respecta, a la fuerza de viscosidad se parte de Newton, que dice que dicha fuerza es igual a $\mu A \frac{\delta u}{\delta y}$ de lo cual se deduce que la fuerza de viscosidad es proporcional a $\mu U L$

$$\frac{\text{Fuerza de inercia} \sim \rho L^2 U^2}{\text{Fuerza de Viscosd.} \quad \mu U L} = \frac{\rho L U}{\mu} = \frac{L U}{\nu}$$

Relación a lo cual hemos dicho se la conoce como el número de Reynolds.

$$R = \frac{\rho L U}{\mu} = \frac{L U}{\nu} \quad (4.1)$$

Para el caso en que haya predominio de las fuerzas viscosas - los ensayos del modelo y del prototipo deben ser con idéntico número de Reynolds, para considerarlos dinámicamente semejantes.

El número de Reynolds mide la importancia relativa de cada una de las variables que intervienen en un fenómeno en que la fuerza predominante es la viscosidad, es decir la ρ, μ, U, L . Cuanto mayor es el número de Reynolds menos importancia tiene la fuerza de viscosidad en el fenómeno y viceversa. No es la viscosidad dinámica el parámetro significativo, sino R.

Como la densidad del aire es mucho menor que la del agua, en los ensayos con aire las fuerzas de inercia serán más débiles, con lo que las de la viscosidad se harán relativamente más importantes. Así el aire relativamente se comporta como un fluido más viscoso que el agua. En los túneles de viento los ensayos se hacen según la ley de Reynolds, en cambio en los ensayos de máquinas hidráulicas suele desprejarse la viscosidad.

La sustentación máxima y el coeficiente de arrastre mínimo son funciones del número de Reynolds.

El orden de magnitud de este efecto está dado por:

$$\frac{(C_{L \max})_1}{(C_{L \max})_2} \approx \frac{(C_{D \min})_2}{(C_{D \min})_1} \approx \left\{ \frac{R_1}{R_2} \right\}^{0.12} \quad (4.2)$$

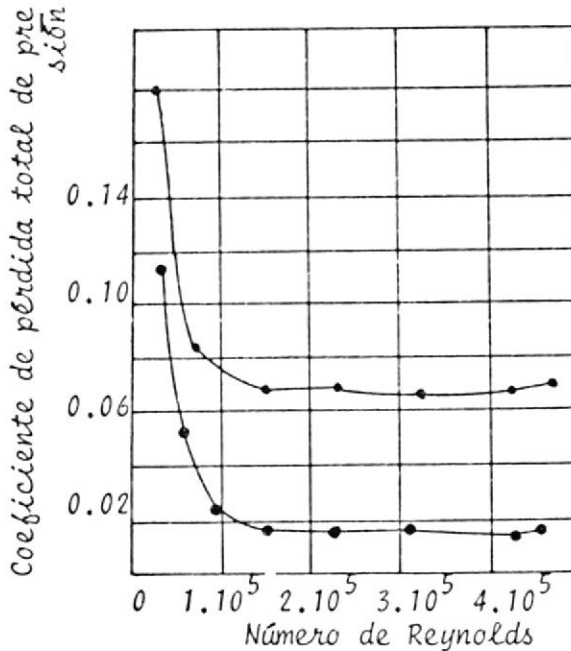


Fig. 4.1 Variación de la pérdida total de presión con el número de Reynolds.

Las investigaciones hechas por Howell sugieren que el efecto del número de Reynolds se hace presente por debajo del valor de 300.000 pero la NACA señala que el efecto es insignificante para valores de Reynolds entre 2.2×10^5 y 4.7×10^5 . Por debajo del valor de 2.2×10^5 el efecto se hace presente y las pérdidas de presión se incrementan. Los resultados de Rhoden confirman las conclusiones de la NACA de que hay un pequeño efecto del número de Reynolds en la región de $2 \times 10^5 < R < 5 \times 10^5$.

4.c FORMACION DE VORTICES.

Consideremos un perfil aerodinámico moviéndose a través del aire debido a una fuerza de tracción.

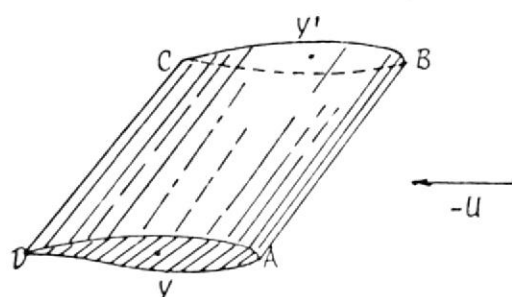


Fig. 4.2 Perfil Aerodinámico

Para fijar mejor nuestras ideas consideremos que el perfil se mueve horizontalmente y sin rotación, con velocidad constante U en aire que se encuentre en reposo. Por la primera ley del movimiento la fuerza de tracción, el peso y la fuerza aerodinámica debida a la presión deben formar un sistema en equilibrio. La distribución de presión será consiguientemente la misma si nosotros consideramos la velocidad $-U$ a ser impuesta en todo el sistema de aire y perfil.

El perfil estará entonces en reposo y el aire fluirá sobre él con la velocidad $-U$, lo que quiere decir, que el aire estará en movimiento con velocidad $-U$ a una distancia dada corriente arriba del perfil, cerca de él y en la estela, la distribución de velocidad del flujo se rá modificada por la presencia del perfil.

Nuestro propósito es examinar la característica general del flujo perturbado, el cual en la hipótesis presente, es un movimiento estable.

Además el perfil es conocido que experimenta en estas circunstan -

cias una fuerza de sustentación perpendicular al flujo y en este caso verticalmente hacia arriba, nosotros concluimos que la componente vertical hacia arriba de la fuerza aerodinámica en la superficie inferior (el intradós) debe exceder la componente vertical hacia abajo de la superficie (el extradós) del perfil. Esto muestra que el promedio de la presión sobre el intradós debe exceder el promedio de la presión sobre el extradós.

Ahora consideremos fig. 4.3 la cual representa una sección del perfil aerodinámico de la fig. 4.2 producida por un plano vertical paralelo a la luz del perfil.

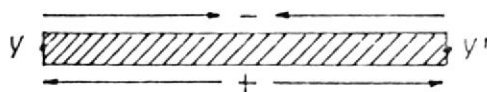


Fig. 4.3 Sección del perfil aerodinámico

Si nosotros vemos desde un plano intermedio a un punto dado tal como y si es que lo hacemos a lo largo del extradós o del intradós debemos arribar a la misma presión en y . Así hay una caída de presión - si nosotros nos movemos hacia afuera a lo largo del intradós hacia y - y una caída adicional mientras nos movemos hacia el interior a lo largo del extradós hacia el plano intermedio de simetría. Además el aire es impelido en la dirección de presión decreciente, síguese que una partícula de aire incide en el borde de ataque AB y pasa sobre el extradós, el cual llamaremos lado de succión del perfil, adquiere una - velocidad componente paralela a la luz y hacia el plano intermedio. Una partícula que pase sobre el intradós, el cual llamaremos lado de pre

sión del perfil, adquiere una velocidad componente paralela a la luz pero alejándose del plano intermedio.

Las trayectorias de tales partículas son mostradas esquemáticamente en fig. 4.4.

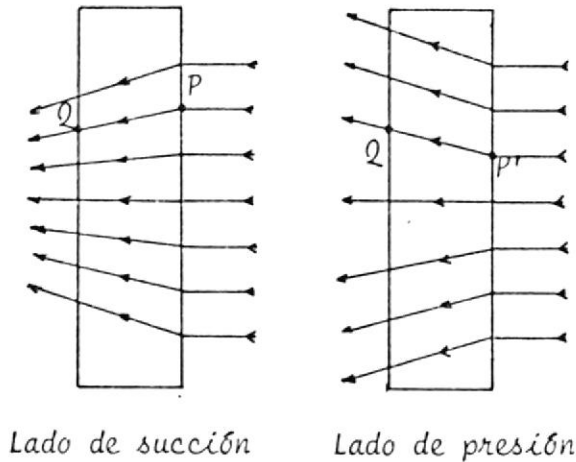


Fig. 4.4 Trayectoria de las partículas

Las partículas que dejan el borde de salida CD en un punto dado Q deben consiguientemente haber incidido en el borde de ataque en puntos diferentes P ó P' de acuerdo si ellas han arribado a Q por la vía de lado de sección o de presión, además estas partículas arribarán a Q en diferentes velocidades, como se puede ver en la fig. 4.3. Por otro lado las partículas en cuestión deben tener la misma velocidad que, debido a que la presión es continua y además, por el teorema de Bernoulli, es constante a través del fluido, síguese que el valor de P_n debe ser el mismo en Q si es que la partícula arriba por el lado de succión o el de presión.

Esta discontinuidad de dirección de la velocidad en el borde de salida significa que la interfase entre las dos líneas de corriente de aire de los lados de succión y de presión es una lámina vorticial,

y la igualdad de las velocidades muestran que las líneas de vórtice y las líneas de corriente, con las cuales entonces ellas coinciden, bisectan el ángulo entre las dos velocidades en un punto tal como Q.

Nosotros arribamos ahora a una figura preliminar del flujo que atraviesa en perfil, el flujo de aire se divide en el borde de ataque, pasa sobre los lados de succión y de presión para reunirse en una lámina vórticial Σ la cual forma la estela, siendo Σ el lugar de las líneas de vórtice las cuales se desarrollan desde el borde de salida.

A objeto de visualizar como los vórtices pudieren formarse en un flujo estable, es mejor suponer que el perfil aerodinámico va a iniciar en movimiento respectivamente, en aire, con la velocidad U originada por un impulso aplicado adecuadamente, la velocidad U del perfil subsecuentemente será mantenida por una fuerza de tracción.

Es evidente que después de un tiempo finito t trascurrido - desde el inicio del movimiento, la lámina vórticial formada en la interfase entre las dos láminas entre las cuales el avanzante perfil - separa el fluido, será de una extensión finita.

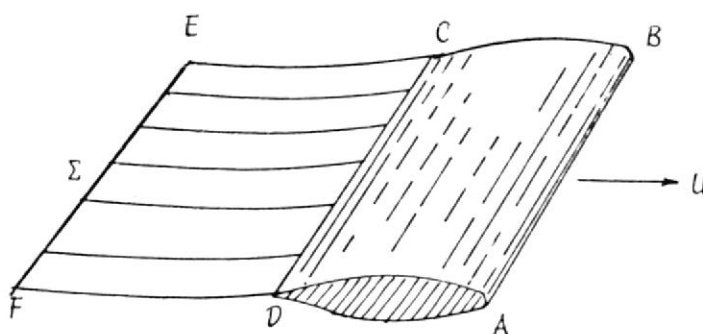


Fig. 4.5 Separación de la estela en el álabe

Fig. 4.5 intenta ilustrar el general estado de los hechos, la estela Σ está representada por CDEF. Además las líneas de vórtice no pueden terminar en el fluido, como ya se ha mencionado, la lámina está ligada en sí y se lo conoce como vórtice inicial. Con el incremento de t la estela Σ se alarga.

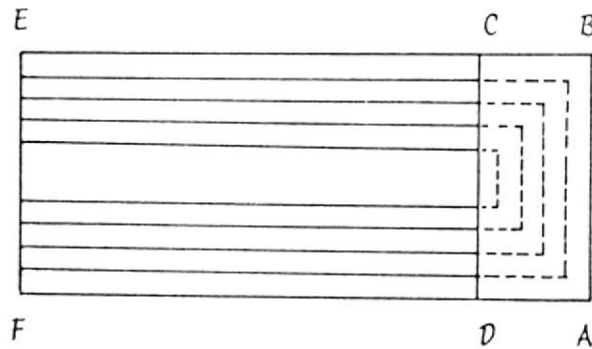


Fig. 4.6 Esquema de líneas de vórtices

Fig. 4.6 muestra esquemáticamente las líneas de vórtices desde el lado de succión. Si consideramos el perfil remplazado por aire moviéndose con velocidad U las líneas de vórtice deben ser cerradas. Los vórtices ligados son mostrados por las líneas cortadas en la superficie del perfil, donde en este diagrama esquemático las líneas completas de vórtice son representadas como rectángulos. Como el patrón de alargamiento con el lapso de tiempo viene a ser el de un perfil; atrás del cual viajan vórtices en forma de herradura. Este alargamiento debe incrementar la energía en la estela, de tal manera que energía debe ser suministrada al sistema. Así nosotros explicamos la necesidad de la fuerza de tracción para mantener el movimiento, y la resistencia allí implicada, la cual es conocida como resistencia secundaria.

Se pudo pensar que la aparición de circuitos con circulación, cuando tales circuitos no existían en el estado inicial de reposo.

INESTABILIDAD DE LA LAMINA VORTICE.-

La capa saliente de vórtice libre mostrada en la fig. 4.5 es encontrada que es inestable y que no puede persistir. La capa tiende a enrollarse tal como una hoja de papel y los filamentos de vórtice giran alrededor uno del otro como las cuerdas de una soga.

Así, a una suficiente distancia atrás del aeroforme una sección de la estela por un plano perpendicular a la dirección del movimiento mostraría dos vórtices cilíndricos cuya distancia de separación es menor que la luz. Un cálculo aproximado muestra que si estos 2 cilindros son considerados como teniendo secciones circulares, la distancia de sus centros es la fracción $\pi/4$ de la luz y el diámetro de los círculos es la fracción 0,171 de la luz. Este diámetro entonces en el caso de una luz de 20 ft. sería de sobre 3 ft, de tal manera que los vórtices son de tamaño considerable. Debemos recordar que las líneas de vórtices las cuales giran para formar núcleos se convierten en espirales de tal manera que la asunción del enrollamiento cilíndrico de los vórtices no es exacto.

Experimentos realizados por FAGE y SIMMONS en un aeroforme de razón de aspecto de 6 mostraron que el enrollamiento completo a cerca de 13 cuerdas de distancia atrás del borde de salida.

El enrollamiento de la estela para formar vórtices helicoidales se representa en una figura como consistiendo solamente de estos vórtices conocidos como vórtices de los extremos.

El estado real de la estela es un compromiso entre este modelo y el que presenta a la estela como lámina u hoja vórtical.

Las dos grandes contribuciones de Lanchester (1.869-1.945) a la aerodinámica y la base de la moderna teoría de vuelo, fueron: i) el concepto de circulación como causa de la sustentación; ii) el concepto de los vórtices en los extremos como la causa del arrastre secundario.

4.d COMPORTAMIENTO DE LA CAPA LIMITE.-

Cuando un fluido pasa por una superficie sólida, el fluido que está en contacto inmediato con la pared permanece en reposo. Es, sin embargo, una observación común que, para un fluido de poca viscosidad como el aire o el agua, en la distancia que el fluido ha viajado a lo largo de la pared no es demasiado grande, entonces la velocidad crece rápidamente desde cero en la pared a su valor en el flujo principal, el crecimiento toma lugar dentro de un delgado espesor de fluido cercano a la pared. En este espesor el gradiente de velocidad es muy grande, de tal manera, que aunque la viscosidad sea pequeña, el esfuerzo cortante puede ejercer una considerable influencia sobre el movimiento.

Sí, por ejemplo, un fluido está pasando a lo largo de una placa plana y la velocidad del flujo tiene un valor constante U , entonces la velocidad crece desde cero en la placa al valor U dentro de una pequeña distancia desde la placa.

Cuando el flujo llega al borde de ataque de la placa el fluido prácticamente tiene la velocidad U en todas las distancias desde la placa: el fluido próximo a la placa es entonces forzado a permanecer en reposo mientras el flujo principal fluye con velocidad U . De esta manera los esfuerzos cortantes son introducidos, lo cual retarda al fluido vecino al que está en contacto con la placa. El efecto retardante de los esfuerzos constantes internos se extiende más y más,

así que el fluido pasa a lo largo de la placa, el espesor de la capa del fluido restante se incrementa continuamente. Esto se ilustra en la Fig. 4.7 donde se grafica la velocidad contra distancia desde la placa, en varias secciones, la distancia desde la pared siendo mostrada en una escala altamente agrandada.

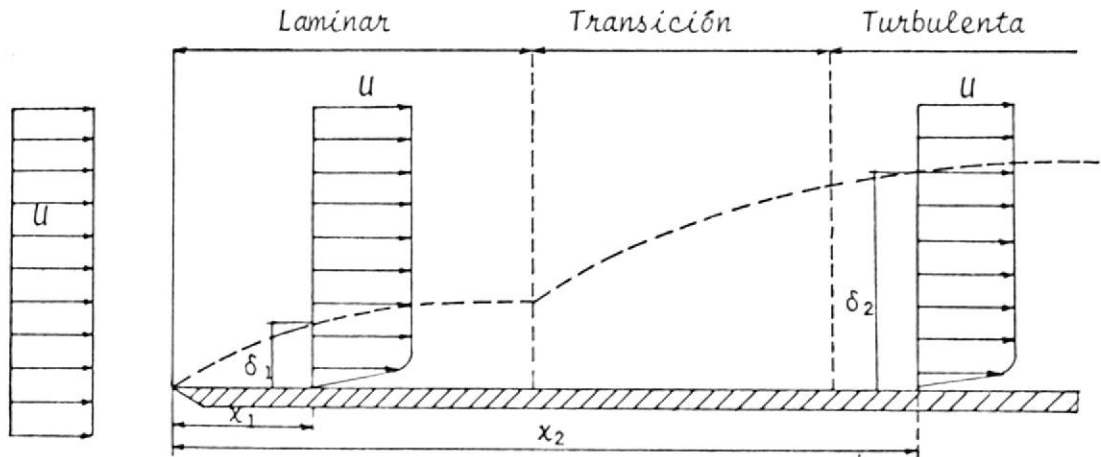


Fig. 4.7 Espesor creciente δ de la capa límite de una placa

Alrededor de la superficie del sólido existe, pues, la capa límite donde el gradiente de velocidad generalmente es muy grande, así que aún con valores muy pequeños de velocidad el esfuerzo cortante asume valores que no pueden ser despreciados. Fuera de la capa límite, donde el gradiente es pequeño, la influencia del esfuerzo cortante es despreciable.

La fuerza de rozamiento entre las diferentes capas de velocidades distintas, la denominaremos resistencia de fricción.

Aunque la capa límite sea delgada puede producir pérdida notables, pero éstas son pequeñas comparadas con las producidas al desprenderse la corriente de la pared.

La fig. 4.7 representa una placa fija sumergida en una corriente uniforme en el infinito, cuya velocidad en el infinito es U y permanece uniforme en el infinito, cuyo valor es el mismo en el infinito. El fluido es contacto con la placa por adherencia que se fija, como ya hemos expresado, y las capas sucesivas sufren un crecimiento. A medida que la corriente avanza por la placa más capas de fluido quedan afectadas por este proceso.

En el caso representado en la figura a una distancia X , el flujo laminar se hace inestable y comienza a desarrollarse la turbulencia en el interior de la capa límite. A una distancia X_2 la capa límite es francamente turbulenta, aumenta más y más aguas abajo el espesor de la misma.

Las conclusiones de este estudio son inversas y su importancia es evidente en que, en esta capa límite tienen lugar exclusivamente los fenómenos de la viscosidad en los fluidos poco viscosos (aire y agua).

Hemos mencionado separadamente las características de la capa límite laminar y turbulenta, cuando el cuerpo es de una longitud tal que la capa límite cambia de laminar a turbulenta y ambas regiones toman una contribución apreciable a la fuerza friccional, relaciones combinadas son requeridas.

Las relaciones necesarias son las siguientes:

$$C_{Df} = \frac{0.074}{R^{0.2}} \left(1 - \frac{x_0}{c} \right)^{0.8} \quad (4.3)$$

Siendo: R , el número de Reynolds considerando la cuerda del álabe
 x_0 , distancia a la cual la capa límite es laminar
 x_t , distancia a la cual se convierte turbulenta

$$\frac{R_t}{R} = \frac{x_t}{c} \quad (4.4)$$

Y finalmente,

$$x_t - x_0 = \frac{36.9}{R_t^{0.38}} x_t \quad (4.5)$$

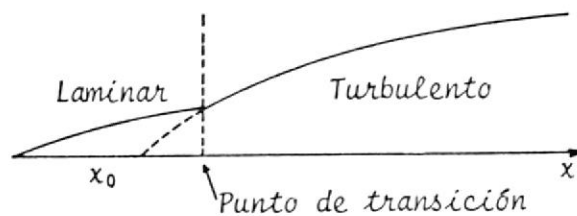


Fig. 4.8 Perfil de flujo laminar y turbulento

DESPRENDIMIENTO DE LA CAPA LÍMITE.- RESISTENCIA DE FORMA.-

La noción de la capa límite, expuesta anteriormente condujo al concepto de resistencia de superficie. El fenómeno de desprendimiento de -

la capa límite que expandidamente conduchía al concepto de resistencia de forma.

En la fig. 4.8 se ve que el espesor de la capa límite aumenta con la distancia a partir del borde de ataque de la placa, la que se explica por la deceleración que sufre el fluido a causa del esfuerzo constante (VISCOSIDAD).

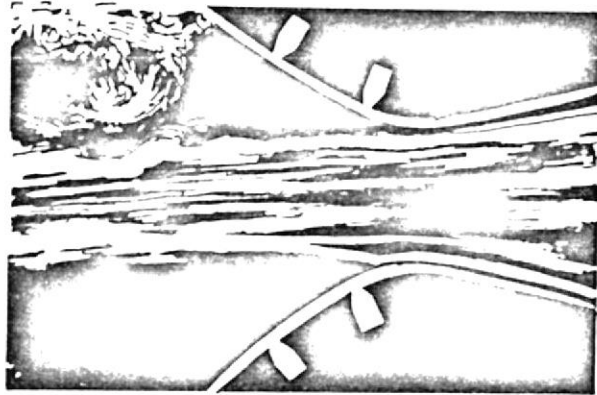


Fig. 4.9 Flujo en ducto de sección variable

Si tenemos un conducto de sección variable como el de la fig. 4.9 y hacemos que el flujo vaya de derecha a izquierda, con lo que se trataría de un conducto convergente, la aceleración del flujo, compen- sa la deceleración que sufre por el esfuerzo constante, y se opone al aumento de espesor de la capa límite.

Si, por el contrario, hacemos que el flujo vaya de izquierda a derecha, con lo que se trataría de un conducto divergente, la presión aumenta en la dirección de la corriente y el gradiente de presiones se opone al movimiento y tiende a retardar el flujo, con lo que se suma este efecto con el efecto decelerador producido por el esfuerzo cons- tante. Entonces la capa límite se separa del contorno.

La explicación de este fenómeno que se conoce con el nombre de desprendimiento de la capa límite o simplemente desprendimiento se ha ce en la fig. 4. 10 .

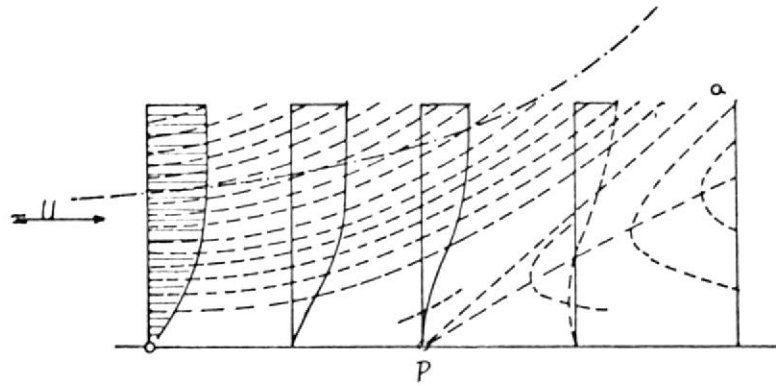


Fig. 4.10 Esquema del fenómeno de desprendimiento de la capa límite

El flujo en las proximidades del contorno se va continuamente decelerando a causa de la viscosidad hasta que en el punto A la velocidad sería cero. La forma del contorno exigiría aún una disminución mayor de la velocidad porque allí el contorno diverge; pero como esto es imposible el flujo se separa del contorno al mismo tiempo que se produce un contraflujo producido por el gradiente de presiones adversos. Corriente de la línea de desprendimiento se crea una zona de baja presión.

Corriente arriba la presión será más alta que corriente abajo. El cuerpo sumergido en el fluido experimentará una figura debida a este gradiente de presiones dirigido de izquierda a derecha.

En la fig. 4.9 el cuerpo (contorno) está fijo, y el fluido se mueve de izquierda a derecha. Si ahora el fluido queda fijo y el cuerpo se mueve de derecha a izquierda la fuerza se opondrá al movimiento, -

será una resistencia de forma, por depender de la forma del cuerpo.

Resistencia de forma es la producida por un gradiente de presiones adverso que se origina al desprenderse la capa límite y que depende en gran manera de la forma del contorno.

Agreguemos además que dicha separación ocurre cerca del borde de salida del perfil, con el incremento del ángulo de ataque esta región se extiende gradualmente hasta la forma mostrada en la fig.-4.11 y durante este crecimiento la fuerza de sustentación sufre una caída.

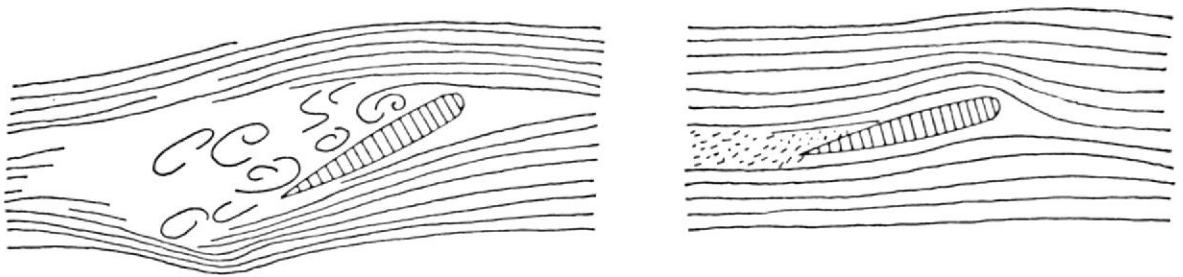


Fig. 4.11 Separación de la capa límite a diferente ángulo de ataque

Por tanto, la resistencia de fricción está causada directamente por la viscosidad; la resistencia de forma directamente por el gradiente de presiones; pero indirectamente por la viscosidad que junto con la forma adversa del contorno producen el desprendimiento de la capa límite.

El conjunto de la resistencia de forma, y la de fricción se de-

nomina resistencia de perfil y Este más el coeficiente de resistencia secundaria es el coeficiente de resistencia total

$$C_D = C_{Dp} + C_{Df} \quad (4.6)$$

Siendo:

C_{Dp} el Coeficiente de Resistencia de forma

C_{Df} el Coeficiente de Resistencia de fricción

C_D el Coeficiente de Resistencia del perfil.

4.e EFECTOS DEL FLUJO SECUNDARIO EN LA EFICIENCIA DEL ALABE.-

Hemos mencionado anteriormente que la más importante característica de la capa límite es que bajo ciertas condiciones se forma un flujo en dirección contraria al principal. También hemos expresado que el flujo secundario se identifica con los vórtices debidos a las paredes en contacto con el perfil.

Dicho flujo secundario ofrece, pues, resistencia al flujo principal la cual es conocida como resistencia secundaria.

Howell sugirió que dichas pérdidas pueden ser calculadas usando la siguiente relación.

$$C_{Ds} = 0.018 C_L^2 \quad (4.7)$$

Siendo C_L el coeficiente de sustentación o levante del álabo.

Cálculos de este tipo condujeron a Howell y otros a estimar la eficiencia de una etapa de un compresor, cuyos resultados se muestran en la fig. 4.12. Es de particular interés notar la gran proporción de las pérdidas secundarias por lo cual se ha dirigido mucha atención al problema de reducir estas pérdidas.

Dado que la razón de coeficiente de sustentación a coeficiente de resistencia presenta en buena forma el rendimiento del álabo, nosotros definiremos la eficiencia del mismo de la siguiente forma:

$$\eta = 1 - \frac{C_{Dt}}{C_L} \quad (4.8)$$

Siendo C_{Dt} la resistencia total, compuesta en este caso, de la resistencia de perfil definida anteriormente y de la resistencia de bida al flujo secundario

$$C_{Dt} = C_D + C_{Ds} \quad (4.9)$$

Vemos que el coeficiente de resistencia secundaria disminuye la eficiencia del álabe y también que la ecuación 4.7 nos presenta el aumento de dicho coeficiente con el incremento del coeficiente de sustentación.

Mencionaremos además que otros investigadores han encontrado que la razón de aspecto (longitud/ cuerda) interviene en la determinación del flujo secundario de la siguiente manera

$$C_{Ds} \sim \frac{1}{l/c} \quad (4.10)$$

Lo que nos permite apreciar que habrá mayor efecto del flujo secundario para perfiles de baja razón de aspecto.

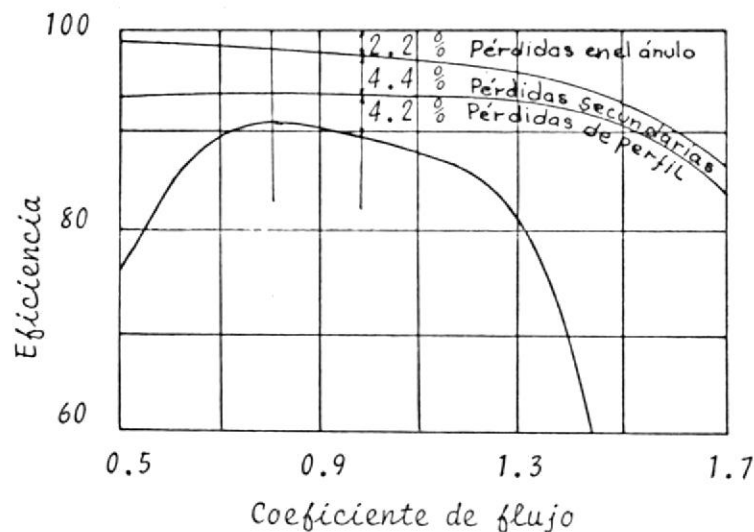


Fig. 4.12 Pérdidas en una etapa de compresión

4.6 DESCRIPCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE FLUJO EN TURBINAS Y COMPRESORES.-

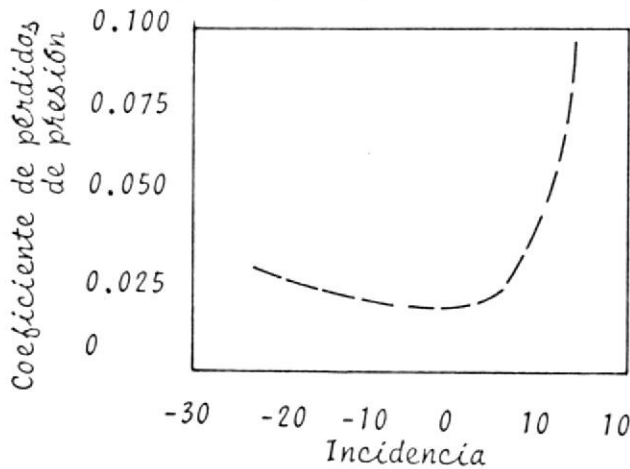


Fig. 4.13 Características de compresores

Una serie de resultados de un compresor de etapas de baja velocidad es mostrado en la fig. 4.13. Estos resultados son presentados en la forma de un coeficiente de pérdidas por presión $\Delta P_0 / \frac{1}{2} \rho u^2$ contra incidencia α . Hay un pronunciado incremento en las pérdidas totales con el aumento de la incidencia, más allá de cierto valor y la cascada es atascada en esta región. La incidencia procesa a la cual el atascamiento ocurre es difícil definir. - Físicamente, el atascamiento es caracterizado por la separación del flujo del lado de succión de la superficie del álabe. Con el decrecimiento de la incidencia, pérdidas de presión totales se incrementan también y un punto de atascamiento en incidencias negativas puede ser definido como se hizo anteriormente. El rango de trabajo es convencionalmente definido como el rango de incidencia entre estos dos límites.

Un conocimiento preciso de la extensión del rango de trabajo, obtenido de pruebas de cascada bidimensionales, es de gran importancia cuando se procura asegurar la confiabilidad de los álabes para cambios de condiciones de operación.

Un ángulo de incidencia referencial puede ser más convenientemente de finido si está en un punto medio del rango de trabajo o, menos precisamen- te en la condición de mínima pérdida pérdida. Estas dos condiciones no ne cesariamente proporcionan la misma incidencia.

Otros investigadores, como Carter, han elegido una incidencia óptima dada por la mayor razón de sustentación a resistencia.

De los resultados de pruebas en cascadas, las resistencias de perfil- de compresores de álabes de la misma geometría pueden ser estimados. A es tas pérdidas estimadas se debe añadir las debidas a los ámulos (separación entre etapas) y las pérdidas secundarias.

Los coeficientes estimados por Howell, son para las pérdidas en los - ámulos.

$$C_{Da} = 0.02 \frac{s}{\ell} \quad (4.11)$$

Y para las llamadas pérdidas secundarias

$$C_{Ds} = 0.018 C_L^2 \quad (4.7)$$

Donde s , es la separación en los álabes y ℓ la longitud del mismo. - Cálculos de este tipo han sido hechos por Howell y otros para estimar la e ficiencia de un compresor de etapas.

Figura 4.12 muestra la variación de la eficiencia con el coeficiente de flujo y es de particular interés notar la magnitud relativa de la re -

sistencia de perfil en comparación con las otras, especialmente en el punto de diseño.

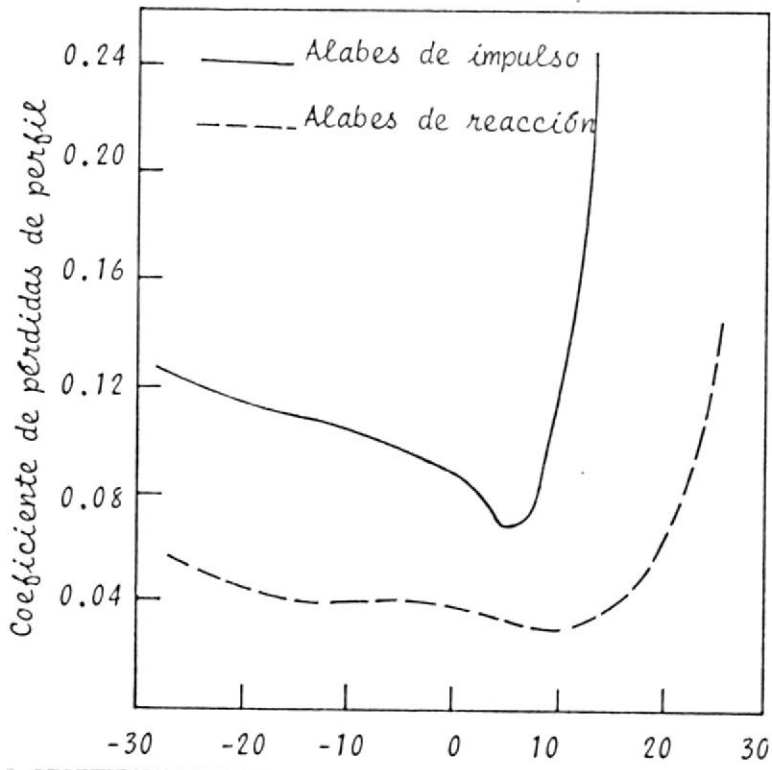


Fig. 4.14 Variación de pérdidas de perfil con la incidencia para turbinas típicas

La fig.4.14 muestran resultados de dos juegos de álabes de turbinas en cascada, impulso y reacción. El término reacción es usado aquí para denotar, en un sentido cualitativo, que el fluido se acelera a través de la hilera de álabes y experimenta así una caída de presión durante su pasaje. No hay cambio de presión a través de una hilera de álabes de impulso. El rendimiento expresado como $\lambda = \Delta p_0 / p_{02} - p_2$ contra incidencia.

Siendo Δp_0 el cambio de presión total

p_{02} la presión total

p_2 la presión estática.

De estos resultados se observa que los álabes de reacción tienen un rango mucho más amplio de baja pérdida de eficiencia que los álabes de impulso, un resultado esperado debido a que las capas límite están sometidas a un gradiente de presión favorable.

Hay una diferencia fundamental entre los flujos en una turbina y un compresor que necesita enfatizarse. Un flujo a través de un canal en el cual la presión media está disminuyendo (flujo está acelerando) experimenta una relativa pequeña pérdida en la presión total, en contraste con el flujo a través de un canal en el cual la presión está incrementándose (flujo decelerando) donde las pérdidas pueden ser altas. Esta diferencia en el flujo es reflejada en las turbinas por un amplio rango de pérdidas menores en rendimiento y en compresores por un ligeramente angosto rango.

En consecuencia para limitar las pérdidas de presión total durante la difusión del flujo es necesario que la razón de deceleración sea atenuada. Es principalmente debido a esto que los compresores de flujo axial necesitan tener muchas etapas para una razón de presiones dada comparada con una turbina axial la cual necesita solamente de pocas etapas.

5. DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL ALABE

5.a SELECCION DEL MATERIAL.-

El material que se utilice para la construcción del álabe debe reunir las siguientes condiciones:

- a) Debe ser material de moldeo
- b) Debe ser liviano
- c) Debe ser de superficie pulida o lisa
- d) Debe ser posible realizar en él perforaciones longitudinales
- e) Debe ser fácil de perforar transversalmente
- f) No debe ser quebradizo.

- a) Debe ser material de moldeo.-

Decimos esto debido a la facilidad de construir el álabe fundiéndolo en un molde. Con lo cual se evita la ardua tarea de maquinación de material metálico.

- b) Debe ser liviano.

Va que todo el diseño y construcción del túnel de viento es en e se sentido.

- c) Condición de superficie lisa.

Esta condición tiene gran influencia en el arrastre de una sección aeroforme especialmente en altos números de Reynolds.

Una superficie dada puede ser aerodinámicamente lisa para flujo - por debajo de un cierto valor de número de Re y rugosa por encima de - este valor.

Los experimentos realizados por Jacobs, Schrenk y Dearborn muestran que los efectos de protuberancias aisladas dependen apreciable - te de su posición y tamaño, cuando las protuberancias son numerosas y relativamente grandes un gran incremento en arrastre es probable si ellas están situadas cerca del borde de salida, especialmente si ellas - están en la superficie superior.

d) Debe ser posible realizar en el perforaciones longitudinales.

Dada la dificultad de hacer perforaciones de 12" de longitud a la falta de brocas en esa longitud y a la vibración que se produciría con una broca de esa dimensión, es preferible buscar otra solución.

Como ya se ha seleccionado material que se pueda moldear podemos - agregar entonces que se pueda retirar de él alambres o tubos, lo cual - elimina la posibilidad de hacerlo en aluminio.

Se utilizaron tubos de acero inoxidable debido a la posibilidad - de que no se puedan retirar los tubos en ese caso se atravesaría tras - versalmente el álabe y los tubos, labor que no es sencilla.

e) Debe de ser fácil perforar transversalmente.

Nos referimos con estos a que para perforar transversalmente el -

álabe debemos tener la facilidad de que el material no sea muy duro, se pueda ver que coincida la perforación transversal con la longitudinal, y además que no la traspase, la conclusión de esto es la utilización de un material transparente.

f) No debe ser quebradizo.

Con esto se quiere decir que no debe ser un material frágil, sino que resista al uso y manipuleo.

El material que cumple las condiciones requeridas es fibra de vidrio, el uso del cual está incrementándose día a día; tiene como características generales de ser 4 veces más fuerte que un entramado de madera convencional, igual al esfuerzo longitudinal del acero en espesores similares y tiene el peso de las aleaciones de aluminio. En general quizás sus más grandes ventajas son que elimina el gasto y el tiempo consumido para calafatear, pintar y preservar, en el caso de los armazones de madera; la corrosión en las de hierro y además parece tener vida infinita.

Las coordenadas que determinan la forma de los álabes de la presente investigación proporcionan perfiles aerodinámicos asimétricos, que son los que proporcionan un mayor coeficiente de levante, como se puede observar en la Fig. 5.1.-

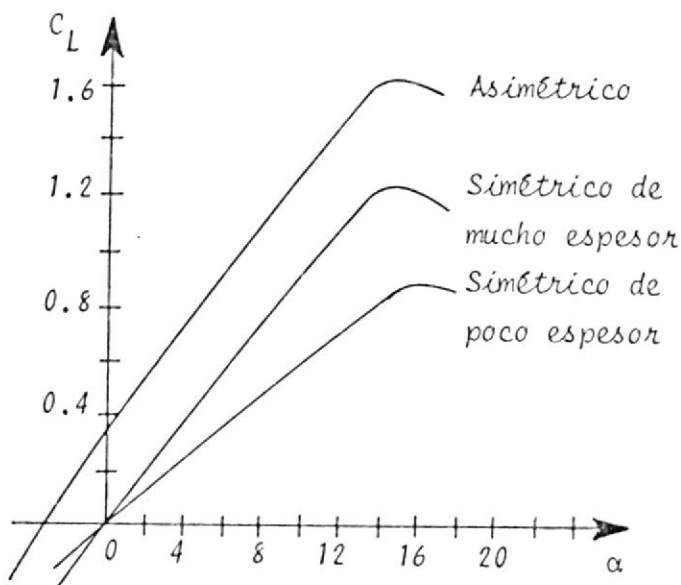


Fig. 5.1 Comparación de diferentes perfiles

La línea base del perfil la constituye un arco circular y el ángulo comprendido entre los bordes de ataque y salida del álabe es de 30° .

$$\text{El radio del arco es igual a: } \frac{c/2}{\text{Sen } 15^\circ} \quad (5.1)$$

Siendo la cuerda, $c = 10,16 \text{ cm}$, y

la longitud, $l = 30,48 \text{ cm}$

TABLA - A

RAZONES DE LAS DIMENSIONES DEL PERFIL ASIMETRICO.

x/c	y/c
0.000	0.00
0.005	0.0085
0.01	0.0122
0.02	0.0167
0.03	0.0208
0.04	0.0232
0.05	0.0254
0.06	0.0277
0.07	0.0297
0.08	0.0315
0.09	0.0331
0.1	0.0346
0.15	0.0404
0.2	0.0446
0.25	0.0474
0.3	0.0493
0.35	0.05
0.4	0.0494
0.45	0.0478
0.5	0.0452
0.55	0.0415
0.6	0.0271
0.65	0.0322
0.7	0.0269
0.75	0.0211
0.8	0.016
0.85	0.0114
0.9	0.0072
0.95	0.0037
1.00	0.0011

TABLA B

Considerando el valor de C, las coordenadas se convierten en:

x	y	y modificado
0.00	0.00	
0.00508	0.0864	
0.1016	0.124	
0.2032	0.1697	
0.3048	0.2113	
0.4064	0.2357	
0.508	0.2581	
0.6096	0.2814	
0.7112	0.3018	
0.8128	0.32	
0.9144	0.3363	
1.016	0.3515	
1,524	0.4105	
2,032	0.4531	
2,54	0.4816	
3,048	0.5009	
3,556	0.508	
4,064	0.5019	
4,572	0.4856	
5,08	0.4592	
5,588	0.4216	0.4366
6,096	0.3769	0.4069
6,604	0.3272	0.3722
7,112	0.2733	0.3333
7,62	0.2144	0.2894
8,128	0.1626	0.2526
8,636	0.1158	0.2208
9,144	0.0732	0.1932
9,652	0.0376	
10,16	0.0112	

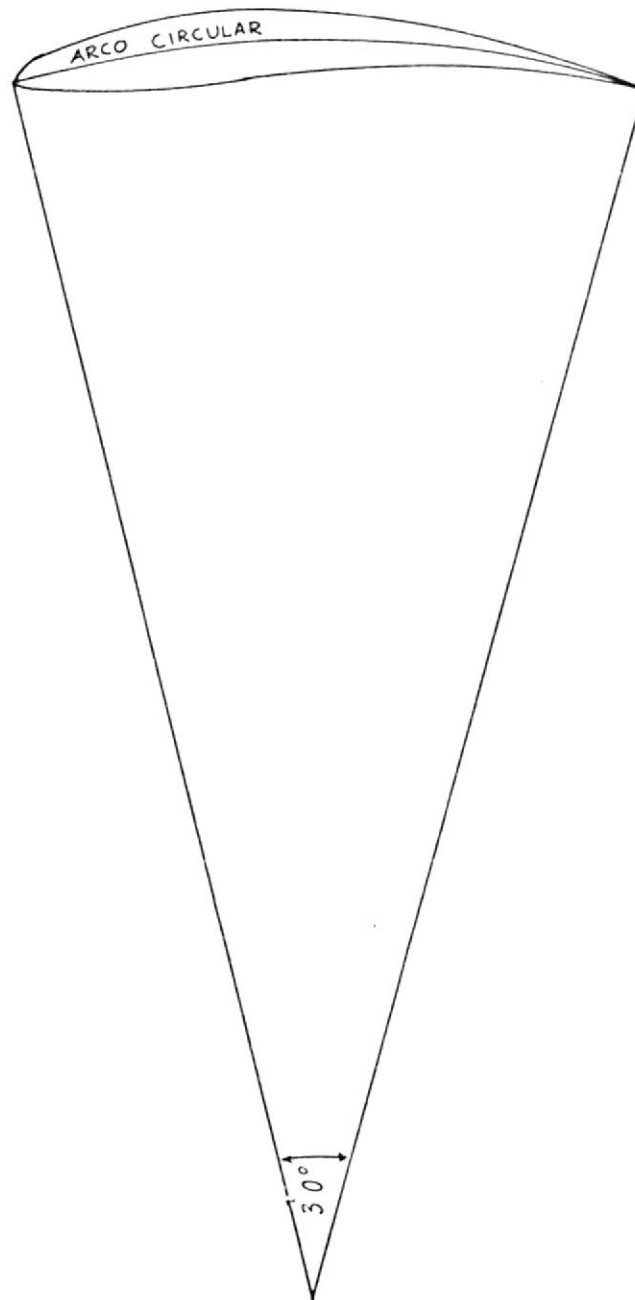


Fig. 5.2 Graficación de las coordenadas del álabe

Graficando las coordenadas x e y , Fig. 5.2, se observó que la sección de salida del álabe era demasiado delgada, lo cual impediría tomar medidas de presión, por lo cual se decidió modificar dicha sección aumentando las ordenadas progresivamente a partir de la abscisa $c/2$, de la siguiente forma:

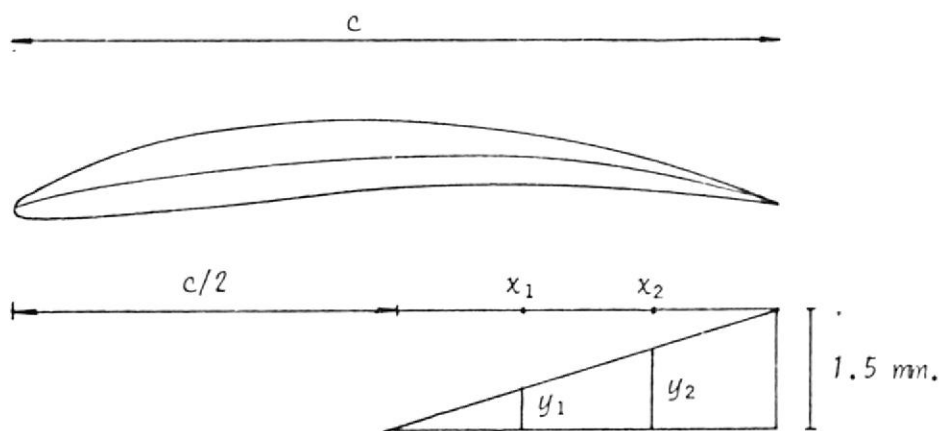


Fig. 5. 3 Aumento de ordenada en la segunda mitad del álabe

Al punto ubicado en \underline{c} no se le añade ordenada. Y a los puntos subsiguientes se les añade ²según la relación obtenida del triángulo graficado. Ver Fig. 5.3.-

$$\frac{y}{x - \frac{c}{2}} = \frac{1.5}{c - c/2} \quad (5.2)$$

De donde se obtiene el valor y que debe ser incrementado al valor de la ordenada que consta en la tabla.

$$y = \frac{1.5}{c - c/2} \left(x - \frac{c}{2} \right)$$

$$y = \frac{1.5}{c/2} \left(x - \frac{c}{2} \right)$$

$$y = \frac{1.5}{5,08} \left(X - \frac{c}{2} \right)$$

$$y = \frac{1.5}{5,08} (X - 5,08) \quad (5.3)$$

El valor final obtenido es observado en la misma tabla B bajo el título de y modificado.

5.c SELECCION DE PUNTOS CRITICOS PARA MEDIDAS.-

Puesto que queremos conocer la distribución de presión en el álab e y para tener la mejor información posible es necesario hacer una buena selección de los puntos en los cuales se desean tomar las medidas necesarias para el análisis.

La selección se la hace entonces en base a las distribuciones de presión de formas aerodinámicas de las cuales se desprende o concluye que es fundamental tener mayor información principalmente en el borde de ataque y le sigue en importancia el borde de salida.

La distribución planteada fue la siguiente en porcentaje de α - cuerdo a partir del borde de ataque:

%C
0
10
15
25
40
60
75
90

De esa distribución se deseaba obtener un punto para 0% y 2 puntos para cada una de las otras distancias.

Además, dado que a 90% de cuerda el espesor del álabe es muy delgado para que quepan dos perforaciones longitudinales, se resolvió separarlas, una a aproximadamente 88% y la otra a 91%, la primera tendría conexión con la superficie superior y la otra con la superficie inferior del álabe.

5.d CONSTRUCCION DEL ALABE.-

El primer paso necesario para la construcción de los álabes es la construcción de un álabe de madera, a partir del cual se confecciona el molde de fibra de vidrio. Obteniendo éste y asegurada su durabilidad, se procede a la elaboración del álabe de fibra de vidrio.

Posteriormente, y con el mismo molde se construye el álabe de fibra con las perforaciones para las mediciones de presión correspondientes.

CONFECCION DEL MODELO DE MADERA.

Se seleccionó un tipo de madera denominado PALO DE VACA por su característica de no ser poroso.

Se utilizó para este trabajo una sierra circular. Se tomó un bloque de dimensiones ligeramente superiores a las del álabe, dibujándose en su sección transversal la del álabe luego de regular el avance para el corte de la sierra circular se procedió a cortar. Seguidamente se desplazó longitudinalmente la madera, de tal manera que todo el bloque presentaba el mismo corte. Se reguló el avance para el próximo corte y así sucesivamente hasta darle la forma deseada. Se procedió de la misma manera para dar forma a la sección superior e inferior del álabe.

CONFECCION DEL MOLDE DE FIBRA DE VIDRIO.

MATERIAL UTILIZADO.

- 1.- Cera
- 2.- Alcohol Polivinilico
- 3.- Gel Coat, se denomina así al producto obtenido de la mezcla de lo siguiente:
 - a) Oxido de Titanio
 - b) Calidria Asbestos (Resina Grado 244)
 - c) Resina PoliÉster
- 4.- Fibra de vidrio
- 5.- Resina PoliÉster
- 6.- Catalizador (Solución Orgánica de Peróxidos)

En los trabajos que se realizan con fibra de vidrio hay que efectuar las siguientes etapas.

- 1.- Aplicación de Desmoldantes
- 2.- Aplicación de Gel Coat
- 3.- Fundición
- 4.- Prensado
- 5.- Desmolde

Procederemos a describir la parte de la construcción del molde que va a dar forma a la sección superior del álabo, y que tendrá la cavidad para efectuar el moldeo del álabo, a la cual denominaremos-caja.

APLICACION DE DESMOLDANTES.

Se aplicó a una superficie metálica, donde hubo de efectuarse el trabajo y también al álabe de madera. Luego de un corto tiempo se hizo una segunda aplicación. Para obtener un mejor desmoldamiento se suele aplicar una capa de alcohol polivinílico, en este caso así se hizo.

APLICACION DE GEL-COAT.

Se utiliza este material en fibra de vidrio principalmente con el objeto de dar buen acabado a la pieza que se funde, el cual se lo puede obtener preparado con pigmento blanco o neutral, esto es, sin ninguna coloración.

Se agregó catalizador al get-coat y se aplicó en la sección superior del álabe de madera y en las superficies metálicas vecinas al mismo.

Se esperó que se realice la reacción química del gel-coat con el catalizador y se solidifique.

FUNDICION.

Se conoce así al trabajo que se realiza aplicando resina piliéster con catalizador a la tela mat, iniciándose una reacción química exotérmica que al concluir nos proporciona el producto deseado, de alta re -

sistencia y de poco peso.

Procederemos a describir ligeramente el proceso.

Se cortó tela mat en rectángulos de 36 x 13 cm, colocándose una de estas capas sobre la sección superior del álabe, y con una brocha se aplicó resina poliéster con catalizador colocándose entonces otra capa de tela y la respectiva resina poliéster acelerada.

Se pusieron en total 5 capas de tela.

PRENSADO.

Terminada la etapa de fundición del material le sucede la acción de hacer presión sobre el material fundido a objeto de que este se adhiera bien al álabe de madera y tome perfectamente su forma.

Para esto se colocaron dos prensas que ejercían su acción sobre una barra de madera a fin de que la presión sea uniforme en toda la longitud del álabe.

DESMOLDE.

Luego de un tiempo, el cual depende de la cantidad de catalizador - que se agregue, se procedió a quitar las prensas. Dicho catalizador actúa en la reacción química acelerándola.

Se separó el molde de fibra de vidrio del álabe de madera y de la super

fície metálica, a la cual estaba unido por sus bordes.

CONSTRUCCION DE LA TAPA DEL MOLDE.

Una vez concluida la labor relativa a la caja se procedió a construir la tapa, la cual va a dar forma, posteriormente, a la parte inferior del ábabe de fibra de vidrio.

Se colocó el ábabe de madera nuevamente en la sección confeccionada del molde, y se atravesaron dos pernos perpendiculares a la caja que alcanzan el ábabe de madera, atrayéndole hacia ella, de esta manera el ábabe quedó bien adherido a la caja.

Se procedió luego, a colocar cera en el ábabe y en los bordes de la caja. El resto de la construcción se hizo de la misma manera descrita para la construcción de la caja.

Luego del tiempo de prensado, se separó la tapa del molde, se sacaron los pernos, seguidamente el ábabe de la caja, y se macicó las hoquedas producidas por los pernos.

REFORZAMIENTO DE MADERA.

A dos tiras de madera de 33 cm de longitud se clavaron tres tiras de 11 cm, a estas se les dio la forma de la superficie externa de la tapa. Se colocó dicho armazón en el exterior de la tapa y se adhirió a ésta por medio de fundición de fibra de vidrio por sobre la tira trasversal cen-

tral. Se realizó trabajo similar en el exterior de la caja. Labor que fue efectuada a fin de evitar que con el tiempo y el uso dicho molde se deforme.

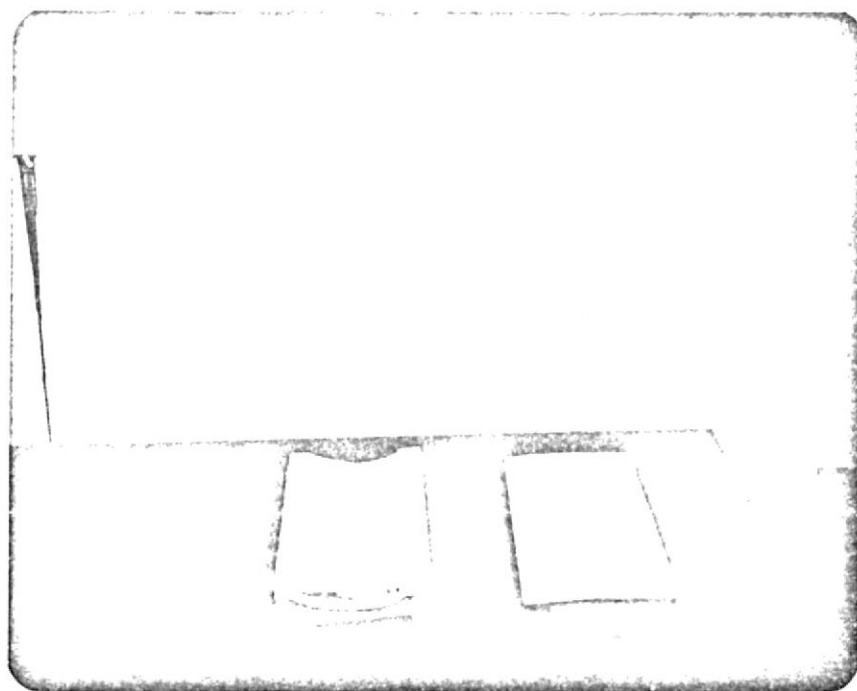


Fig. 5.4 Molde del álabo

BREVE ANALISIS DEL TRABAJO EFECTUADO.

Con la acción del gel-coat las superficies interiores del molde quedaron con magnífico acabado.

Con la ayuda de los pernos perdidos se dió mayor precisión al volumen que deseamos obtener.

Por último, con el reforzamiento del molde se proporcionó mayor

seguridad.

CONFECCION DEL ALABE DE FIBRA DE VIDRIO.

Se utilizó para esta labor la misma lista de materiales mencionada en la construcción del molde. Además, se utilizó pigmento azul y varillas de soldadura autógena de 1/8" de diámetro y de longitudes de 25,4-cm (5) y de 5 cm(2), las cuales se soldaron, obteniendo la forma de una parrilla.

APLICACION DE DESMOLDANTES.- Se aplicó una capa de cera en las secciones del molde, incluidos los bordes. Luego de 30 minutos se hizo otra aplicación de cera.

APLICACION DE GEL-COAT.- Se deseó dar al álabé asimétrico, color azul, para guardar uniformidad con los álabes simétricos que posee el Laboratorio de Dinámica de Fluidos de La ESPOL, por lo cual al gel-coat preparado se le agregó pigmento azul, con lo cual tomó color celeste, luego, con mayor cantidad de pigmento tomó el color azul deseado.

Se agregó catalizador al get-coat y se aplicó en la caja y en la tapa, cuidadosamente a fin de no hacerlo en los bordes de las mismas. Se aplicó nuevamente cera en los bordes.

FUNDICION.- Luego de que el gel-coat se solidificó, se preparó la resina poliéster con el catalizador y se procedió a la fundición del álabé, trabajo para el cual la tela mat se había cortado en capas de dimenu

siones ligeramente inferiores a 30,48 x 10.16 cm. Se colocó la primera capa en la caja y se le aplicó resina acelerada (se denomina así a la resina a la cual se ha agregado catalizador), posteriormente, se colocó otra capa y se aplicó la resina. Se superpuso, entonces, la parrilla metálica, colocando en las separaciones de las varillas pedazos de fibra de vidrio. Seguidamente se continuó con el proceso de fundi - ción descrito.

PRENSADO.- Se colocó la tapa y se prensó por espacio de 48 horas.

DESMOLDE.- Al cabo de este tiempo se retiraron las prensas y se extra - jo el álabe del molde tomando las precauciones necesarias para no gol - pear y desportillar el modelo.

Dicho álabe consta en el lado derecho de la fig. 5.5.

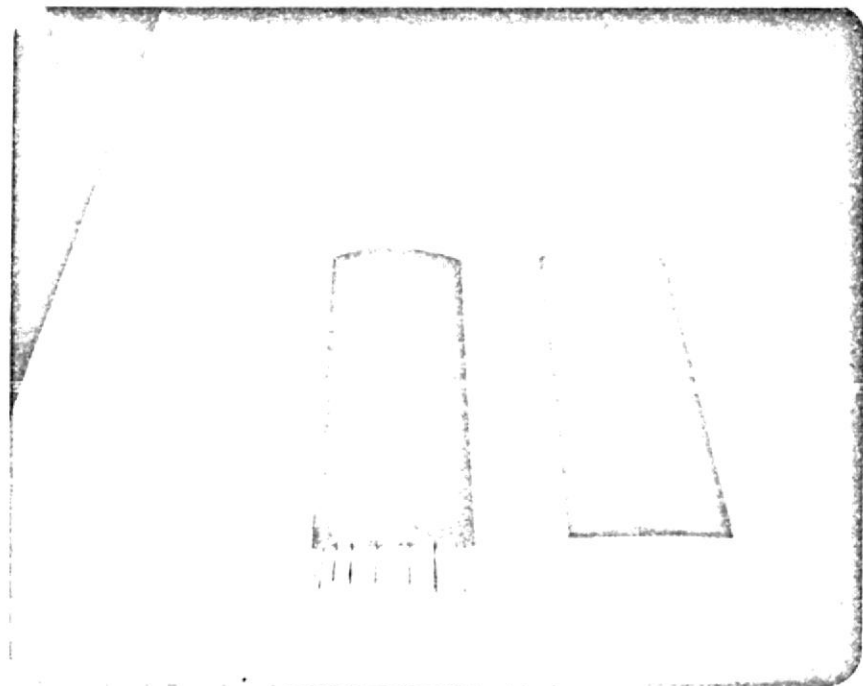


Fig. 5.5 Alabes de fibra de vidrio

BREVE ANALISIS DE LA CONFECCION DEL ALABE.

Es importante, para el proceso de fundición tener en cuenta la dosis que recomiendan los fabricantes que es de 2 onzas de catalizador por galón de resina.

Es recomendable dar 2 o 3 aplicaciones de gel-coat a fin de poder superar sin mayor dificultad algún problema superficial.

Las reacciones químicas que permiten la fundición de fibra de vidrio generan fuerte calor, dichas reacciones generan cambios en la forma que se desea obtener, por lo cual hubo necesidad de utilizar la parrilla metálica, para que actuando de alma, evite al fundirse sin ella.

CONFECCION DEL ALABE DE FIBRA DE VIDRIO CON PERFORACIONES LONGITUDINALES.-

Se utilizó la misma lista de materiales, mencionada anteriormente, además 15 tubos de acero inoxidable de 1/16 de pulgada de diámetro.

Se construyó un alma metálica similar a la anterior a excepción del diámetro de las dos fracciones pequeñas que se lo escogió de 1/16".

Para atravesar los tubos de acero inoxidable en el molde fue necesario perforar las secciones trasversales del molde en las coordenadas seleccionadas.

APLICACION DE DESMOLTANTE .- Se aplicó este al molde de fibra de vidrio incluyendo los bordes y a los tubos de acero, luego se atravesó el molde con los tubos y se volvió a aplicar cera.

APLICACION DEL GEL-COAT.

A objeto de facilitar la perforación transversal del álabe, que comunique la superficie del álabe con la perforación longitudinal respectiva, se utilizó gel-coat neutral, que como ya mencionamos anteriormente, es transparente.

FUNDICION.- Dado que los tubos de acero inoxidable y el alma metálica ocupaban considerable área transversal, no era factible poner mayor cantidad de fibra de vidrio, razón por la cual hubo necesidad de separar en 3 capas la tela mat que se obtiene en el mercado.

Se procedió con la fundición en forma similar a la descrita anteriormente y una vez cubiertos los tubos de acero indicados en la sección inferior del molde se colocó el alma metálica, de tal manera que las varillas de la misma no coincidan con los tubos de acero, es decir con una disposición alternativa, tubo- varilla -tubo, etc.

Se prosiguió con la fundición procurando poner material entre el alma y los tubos superiores. Concluido esto se colocó la tapa del molde.

PRENSADO.- Se realizó este en forma similar a lo descrito anteriormente.

Debido al interés de retirar los tubos de acero, lo cual permitiría la obtención de las perforaciones longitudinales, se tuvo cuidado de poner poco catalizador a fin de que la reacción sea lenta y se pueda apreciar fácilmente en que momento era conveniente retirar los mismos. Con vista del material expulsado del molde debido a la acción de las prensas, se conocía el desarrollo de las reacciones y el momento en el cual se empezaba a poner consistente el material.- Se procedió entonces a mover ligeramente cada tubo con unos alicates, para posteriormente proceder a sacar los tubos antes de que haya mucha resistencia a dicho movimiento. Esto se hizo aproximadamente dos horas después de terminada la fundición.

DESMOLDE.- Finalmente se procedió a retirar las prensas y al álabe del molde, con las precauciones debidas para no lastimar el modelo.

Este álabe es el que consta a la izquierda en la fig. 5. 5.

INSPECCION DEL ALABE.

De la inspección se determinó que el álabe presentaba una ligerísima comba en su parte central, además de pequeñas porosidades superficiales.

Se inspeccionaron también con ayuda de un alambre muy fino los agujeros y se pudo apreciar que en el interior los agujeros superior con el inferior se comunicaban, esto sucedía en los agujeros ubicados a 9 y 76 mm del borde de ataque del álabe.

CORRECIÓN DE FALLAS.-

Se decidió para corregir la comunicación de los agujeros aumentar la separación entre los mismos, lo cual se logró de la siguiente forma: con ayuda de la fresadora se hicieron canales longitudinales que alcanzaron los agujeros afectados. Esto se hizo en la sección inferior del álabe; se procedió a encerar dos tubos de acero y se los colocó en los agujeros de la sección superior afectados, se vertió resina poliéster acelerada en los canales confeccionados y se ubicaron otros 2 tubos encima de la resina. Se cubrieron éstos con resina. Posteriormente, se retiraron los tubos de acero de tal manera que quedaron confeccionados los nuevos agujeros de la sección inferior del álabe. De la misma forma, se procedió con los agujeros de la sección superior del álabe.

Respecto a las porosidades se las destruyó, agrandando un poco las oquedades, luego se vertió material en ellas, luego de finalizadas las reparaciones se pulieron las áreas en donde se había agregado material.

La ligera combadura que tenía el álabe se la corrigió en lo posible mediante prensamiento.

6. MEDICIONES EXPERIMENTALES.-

La experimentación realizada empezó con mediciones de presión dinámica en la mitad del álabo, es decir, a 150 mm de sus extremos, en un rango de ángulos de ataque de $+ 10^\circ$ a $- 10^\circ$. Dichos valores constan en la tabla 4.

Para poder tomar dichas mediciones, previamente, se colocaron fragmentos de unos 5 cm de largo de los tubos de metal utilizados para la construcción de los agujeros longitudinales, en el extremo del álabo, siendo fijados en cada uno de dichos agujeros por medio de cemento de contacto.

Dichos tubos de metal se conectaron al transductor de presiones mediante tubos de plástico que el equipo posee, permitiendo el selector que tiene el transductor obtener las presiones dinámicas en cada punto de medición del álabo.

Los valores de P_0 observados en las mencionadas tablas, fueron obtenidos colocando el tubo de Pitot del túnel en una sección anterior al álabo.

La graficación de estos resultados se hace mediante el coeficiente de presión, el cual está definido de la siguiente manera.

$$C_p = \frac{P_m - P_s}{P_u - P_s} \quad (6.1)$$

Siendo P_m , la presión total en cada uno de los puntos en la superficie del álabo.

P_s , la presión estática en el túnel

P_u , la presión en la región de flujo no perturbado por el álabo.

El transductor de presión proporciona directamente la diferencia del numerador y del denominador, separadamente, siendo la primera P_n y la segunda P_o , ya mencionadas, las cuales son presiones dinámicas.

Definido el coeficiente de presión, el cual consta en las ordenadas de los gráficos de distribución de presión falta mencionar las abscisas, las cuales están constituidas por la distancia horizontal desde el borde de ataque al centro de cada punto de medición. Esta distancia la expresamos en porcentaje de cuerda, constando estos valores en la tabla 2.

Los valores de las ordenadas de los puntos de medición constan en la tabla 3.

DETERMINACION DEL COEFICIENTE DE SUSTENTACION O LEVANTE.-

De la integración de las curvas dadas de la graficación del coeficiente de presión versus el porcentaje de cuerdas (figuras 1 a la 11) se obtiene la fuerza de sustentación.

Estas áreas determinadas por dichas curvas se las obtuvo por medio de un planómetro. Obtenida el área debe ser corregida por el corres-

pendiente factor de escala y finalmente mediante la ecuación respectiva obtener el coeficiente de sustentación buscado.

Medidas las áreas de las figuras mencionadas constan dichos valores en la tabla 6.

El factor de escala estará dado, así:

En las abscisas, % C ; 1 cm representa $\frac{\text{cuerda}}{10}$

En las ordenadas, C_p ; 1 cm representa 0,2

Consiguientemente,

$$1 \text{ cm} = 0.02 \text{ cuerda}^2$$

El coeficiente de sustentación lo obtendremos, de la siguiente manera:

$$C_p = \frac{P_m - P_s}{P_u - P_s} = \frac{P_n}{P_o} \quad (6.2)$$

$$P_o = \frac{1}{2} \rho u^2 \quad (6.3)$$

$$\text{Area efectiva} = \frac{\overline{P_n}}{P_o} \times C \quad (6.4)$$

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho U^2 C} \quad (6.5)$$

Siendo, L la fuerza de sustentación por unidad de longitud,
 U la velocidad del fluido no perturbado, y
 C la cuerda del álabe

$$C_L = \frac{\text{Area Efectiva}}{C} \quad (6.6)$$

$$C_L = \frac{A \text{ fig.} \times \text{Factor Escala}}{C}$$

$$C_L = \frac{A \text{ fig.} \times 0.02 C}{C}$$

$$C_L = A \text{ fig.} \times 0.02 \quad (6.7)$$

Constan los valores del coeficiente de sustentación en la misma tabla 6 y graficados en la figura 14.

DETERMINACION DEL COEFICIENTE DE RESISTENCIA.

Igualmente, se graficaron los valores del coeficiente de presión versus la ordenada de los puntos de medición, obteniéndose curvas del tipo de las figuras 12 y 13. De la determinación del área encerrada por la curva, tomando en consideración que los lazos de la curva tienen signos opuestos, se obtuvo la fuerza de resistencia de forma.

La diferencia de esas áreas se puede obtener directamente del planímetro. Obtenida, se la debe corregir por su debido factor de escala y mediante las ecuaciones que correspondan establecer el coeficiente de resistencia de forma.

El factor de escala está dado, así:

En las abscisas, Y ; 1 cm representa 0,0005 metros.

En las ordenadas, C_p ; 1 cm representa 0,2

Por consiguiente,

$$1 \text{ cm}^2 = 1 \times 10^{-4}$$

Mientras, el coeficiente buscado lo obtendremos, de las siguientes ecuaciones:

$$\text{Area efectiva} = \frac{P_n}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2} \times h \quad (6.8)$$

$$C_{Dp} = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho u^2 c} \quad (6.9)$$

Siendo D , la fuerza de resistencia de forma por unanimidad de longitud, y

h , el espesor máximo del álabe

$$C_{Dp} = \frac{\text{Area efectiva}}{C} \quad (6.10)$$

$$C_{Dp} = \frac{A \text{ fig.} \times \text{Factor Escala}}{C}$$

$$C_{Dp} = \frac{A \text{ fig.} \times 1 \times 10^{-4}}{C} \quad (6.11)$$

Valores que constan en la tabla 7.

RELATIVAS A LA TURBULENCIA. -

Como se ha mencionado anteriormente el flujo secundario es un fenómeno que se produce, para casos de perfiles aerodinámicos, en las regiones cercanas a las paredes del túnel en contacto con el perfil.

Dada la suavidad de las paredes del túnel y a diseño mismo, el es-

pesor de la capa límite producida por las paredes del mismo, es muy delgado, del orden de los 2 mm y dado que la primera sección de orificios está a 2.5 mm no es factible estudiar dicho efecto, en tales circunstancias.

Por este motivo nos vimos en la necesidad de ampliar dicha capa límite, lo cual logramos colocando en la pared del túnel un elemento tal como papel lija de madera, en una extensión de 1 metro de longitud y con 25 cm de ancho.

A objeto de conocer el espesor de la capa límite obtenida se tomaron mediciones de presión con el tubo de Pitot en posición horizontal a través de la longitud del álabe. Los resultados obtenidos constan en la tabla 8 y graficados en la fig. 17.

Estos valores se los utiliza para determinar el coeficiente de presión en la zona afectada. Hemos visto, que para la determinación de dicho coeficiente dividimos P_n para P_o , en la zona afectada por la turbulencia esto no se hace, sino que en lugar de dividir para el valor de P_o se divide para el valor que presenta la capa límite a una distancia de la pared del túnel dada.

Lo cual se hace porque, como hemos mencionado cerca de la pared del túnel se produce una capa límite debida a ella, en la cual se presenta retardamiento del fluido, y por lo que no se debe dividir para P_o que es el valor del flujo no afectado sino para el valor que le corresponda a dicha distancia en la capa límite.

Se procedió, posteriormente, a tomar mediciones a diferentes - distancias del extremo del álabe, cubriendo con cinta engomada los orificios de las secciones que no se estén probando.

Se omiten las lecturas de dichas pruebas, incluyendo solamente los valores de los coeficientes de presión (tablas 9 a 14).

Se omiten, también, los gráficos correspondientes a dichos coe ficientes de presión tanto los relativos a la sustentación como los de resistencia, incluyendo solamente tablas y gráficos de dichos re sultados, los cuales constan en las tablas 15 y 16 y gráficos 18 a 22 en lo que a sustentación se refiere y 23 a 27 en lo que a resis- tencia de forma respecta.

DETERMINACION DEL COEFICIENTE DE RESISTENCIA DE FRICCIÓN.

Se realizó, también, una prueba que consistió en lo siguiente: se adhirieron hilos de algodón en el extremo de uno de los tubos utilizados para la construcción de los agujeros y se lo introdujo en el túnel de tal manera que los hilos se aproximen al álabe. Se observó que cierta distancia del borde de ataque los hilos tomaban di rección contraria al flujo evidenciando que separación había ocurrido.

Se realizó esta prueba en la sección media del álabe para dife- rentes ángulos de ataque y para Reynolds máximo, los resultados cons tan en la tabla 17.

Para la obtención de C_{Df} necesitamos conocer el valor del número de Reynolds. Para lo cual determinamos el valor de la velocidad del aire.

Tomemos un valor de la presión dinámica antes del álabe, por ejemplo 0,109 metro de agua.

$$\frac{u^2}{2g} = P_0 \quad (6.3)$$

$$u = \{ 2 g P_0 \}^{1/2} \quad (6.12)$$

$$u = \{ 2 \times 9,81 \times 0,109 \times 1000 / 1,18 \}^{1/2}$$

$$u = 42,57 \text{ metros / segundo}$$

$$R = \frac{C u}{\nu} \quad (6.13)$$

$$\nu_{\text{aire}} = 15 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$R = 289.488$$

A manera de ejemplo, presentaremos la obtención de C_{Df} para el ángulo de ataque de 2°

$$C_{Df} = \frac{0.074}{R^{0.2}} \left(1 - \frac{x_0}{C}\right)^{0.8} \quad (6.14)$$

De la tabla 17,

$$\frac{x_t}{C} = 0.39$$

$$\frac{x_t - x_0}{R_t^{0.38}} = \frac{36,9}{x_t} \quad (6.15)$$

$$\frac{x_t - x_0}{x_t} = \frac{36,9}{(0.39 R)^{0.38}}$$

$$\frac{x_t - x_0}{x_t} = 0.47$$

$$\frac{x_0}{x_t} = 0,53$$

$$\frac{x_0}{C} = (0.39) (0.53) ; \frac{x_0}{C} = 0.21$$

$$C_{Df} = 0.005$$

Los valores de los coeficientes de resistencia de fricción para diversos ángulos de ataque, constan en la tabla 18. Puede determinarse, entonces, los coeficientes de resistencia del perfil y la razón de coeficiente de sustentación al coeficiente de resistencia del perfil, valores que constan en la tabla 19 y graficados en las figuras 14 y 16.

UTILIZACION DEL CONJUNTO DE DINAMOMETROS.-

Se procedió, además, a determinar los coeficientes de sustentación y de resistencia, por otro método, cual es, utilizando el conjunto de dinamómetros, para lo cual se colocó el álabe sin perforaciones, al cual se le hizo una base metálica, en el soporte de los dinamómetros. El transductor de presión indica directamente los valores de las fuerzas de sustentación y de resistencia existentes. Posteriormente mediante relaciones conocidas, se determinan los coeficientes respectivos.

Dichas relaciones son:

$$C_L = \frac{L}{(\rho_{\text{Agua}} \quad g \quad Pn \quad A)} \quad (6.16)$$

$$C_D = \frac{D}{(\rho_{\text{Agua}} \quad g \quad Pn \quad A)} \quad (6.17)$$

$$C_L = \frac{L}{(\gamma P_n) A} \quad (6.18)$$

$$C_D = \frac{D}{(\gamma P_n) A} \quad (6.19)$$

Dados:

L y D en kilogramos fuerza
 γ en kilogramos fuerza/m³
 P_n en metros de agua
 c y l en metros

Cabe notar que el coeficiente de resistencia obtenido por este método incluye la resistencia de forma y de fricción, es decir, es coeficiente de resistencia de perfil.

Los coeficientes obtenidos por este método constan en la tabla 20 y graficados en la figura 15.

VARIACION DE LA TURBULENCIA.-

Se procedió, también, a variar la longitud del papel lija de -madera, se disminuyó la misma de 1 metro a 1/2 metro, a objeto de -observar la influencia que provoca la disminución de la sección de-

turbulencia en los coeficientes estudiados.

Estos resultados constan en la tabla 21 y graficados en la figura 28.

Se tomaron además mediciones de la distribución de presión con dicha variación de longitud, para el ángulo de ataque de 4° .

Tales coeficientes de presión constan en la tabla 22.

Los valores respectivos de los coeficientes de sustentación y de resistencia constan en la tabla 23, así como la razón de dichos coeficientes a su valor bidimensional y están graficados en las figuras 29 - 30 - 31.

VARIACION DEL NUMERO DE REYNOLDS.-

Todas las pruebas mencionadas hasta aquí se llevaron a efecto estando el extractor del túnel de viento en contacto con el difusor del mismo, por lo cual hemos dado en llamar dichas pruebas a Reynolds máximo.

El túnel de viento subsónico de la ESPOL posee un tornillo sin fin que permite separar el extractor del difusor, con tal separación se logra una disminución en la velocidad.

Dado un valor de Reynolds que sea la mitad del anterior se calculó la presión a la que debía funcionar el túnel.

Los cálculos son los siguientes:

$$P_0 = \frac{u^2}{2g} \quad (6.3)$$

$$\frac{u_1}{u_2} = \left\{ \frac{(P_0)_1}{(P_0)_2} \right\}^{1/2} \quad (6.20)$$

$$(P_0)_1 = 0.109 \text{ metro de agua}$$

$$u_1 = 42,6 \text{ metros/segundo}$$

$$u_2 = 21,3 \text{ metros/segundo}$$

$$(P_0)_2 = \frac{u_2}{u_1} \sqrt{(P_0)_1}$$

$$(P_0)_2 = \frac{u_2}{u_1} \sqrt{(P_0)_1}$$

$$(P_0)_2 = 0.027 \text{ metro de agua}$$

Obtuvimos dicho valor en el túnel de viento y tomamos mediciones de presión en la mitad del álabo, los valores de los coeficientes de

presión correspondientes constan en la tabla 24. Se graficaron estos coeficientes de presión, en la forma explicada anteriormente, para obtener los coeficientes de sustentación y resistencia que constan en la tabla 25 y en la figura 34.

Igualmente, que para Reynolds máximo, se procedió en este caso a tomar mediciones de presión a través de la longitud del álabo a objeto de considerar las variaciones de presión debida a la presencia del papel lija de madera, constan dichos valores en la tabla 26 y en la figura 36 para la extensión de 1 metro.

Los coeficientes de presión para el ángulo de ataque de 4° constan en la tabla 27. De la graficación de las curvas determinadas por estos coeficientes y su integración se obtuvieron los coeficientes de sustentación y resistencia de la tabla 28, cuyas gráficas corresponden a los números 37 y 38.

También, se varió para este valor de Reynolds la longitud del papel lija de madera a una extensión de $1/2$ metro, constando los valores de la capa límite de la pared en la tabla 29 y graficados en la figura 41.

Se experimentó para $\alpha=4^\circ$ y se obtuvo los valores de coeficientes de presión que constan en la tabla 30, graficados los cuales se determinaron los coeficientes de sustentación y resistencia que constan en la tabla 31 y graficados en las figuras 42 y 43.

DETERMINACION DEL COEFICIENTE DE ARRASTRE DEBIDO AL FLUJO SECUNDARIO.-

Para determinar este coeficiente, en base de la experimentación realizada, se procedió a medir el área comprendida por las curvas de las figuras 23 a 26 y la línea horizontal determinada por el coeficiente de arrastre a 150 mm.- Dicha medición se efectuó en la región en que actúa la capa límite con la finalidad de obtener el coeficiente de arrastre secundario promedio en esa zona.

Dicho coeficiente promedio, está dado por

$$C_{Ds} = \frac{\text{Area} \times \text{factor escala}}{\text{Longitud}}$$

Relación en la cual la longitud es de 1 cm, y el factor de escala es el determinado de la siguiente manera

En las abscisas : d ; 1 cm representa 1 cm,

En las ordenadas : C_D ; 1 cm representa 0.01

Consecuentemente:

$$1 \text{ cm}^2 = 0.01$$

Promediamos los valores de coeficientes de levante de las figuras 18, 19, 20 y 21 en dicha zona, de la misma manera que la rea

lizado anteriormente. El factor de escala es un este caso de 0.1. Todos estos valores constan en la tabla 32 y la gráfica $\overline{C_{D_s}}$ versus C_L^2 la podemos ver en la figura 48.

En dicha tabla constan además de los valores de C_{D_s} y C_L mencionados, los valores de los coeficientes de resistencia total, la razón de este coeficiente al de sustentación y finalmente el coeficiente de resistencia secundario obtenido por la ecuación de Howell. Vemos que existe gran afinidad entre los valores experimentales y la ecuación de Howell.

En la tabla 33 constan los valores de la eficiencia del álabe y los porcentajes de pérdidas secundarios y los del perfil.

Vemos en ella que la porporción de las pérdidas secundarios es realmente considerable.

7. ANALISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES.-

Primeramente, examinaremos de una manera general los resultados obtenidos experimentalmente y posteriormente enfatizaremos sobre los mismos en lo que a flujo secundario respecta y que es el motivo principal de este trabajo.

Las figuras 1 a la 11 muestran la distribución de presión en la mitad del álabe para diferentes ángulos de ataque. La fuerza de sustentación en el álabe debida a la región de succión y a la de presión está dada por el área del diagrama.

Mientras las curvas 12 y 13 presentan los valores de coeficientes de presión graficados contra las ordenadas de los agujeros de medición para algunos valores de ángulos de ataque.

La figura 14 presenta en forma resumida los valores de los coeficientes de sustentación y de arrastre para diferentes ángulos de ataque. Vemos en ella que el máximo coeficiente de sustentación se produce a un ángulo de ataque de 4° y que el mínimo coeficiente de arrastre se da para $\alpha = 0^\circ$.

Además, notamos que a partir del máximo valor de sustentación hay la caída explicada anteriormente debida al desprendimiento de la capa límite y que se conoce con el nombre de atascamiento.

La figura 16 nos proporciona las relaciones de coeficientes de-

sustentación sobre los de resistencia (C_L/C_D) para los ángulos de ataque estudiados. Con esta figura seleccionamos los ángulos de ataque con los que en adelante proseguremos nuestro estudio, y \bar{e} los corresponden a los valores de -2, 0, + 2 y + 4, que ofrecen mayores valores de la razón mencionada.

Los resultados de las mediciones con los dinamómetros relativos a los valores de los coeficientes de sustentación y arrastre constan en la figura 15.

Vemos que las curvas resultantes concuerdan en su forma y también en los rangos de valores. Ahora bien, la diferencia entre ambos métodos se debería a fallas de experimentación, como por ejemplo las debidas a que el rango del transductor de presión para la medición de las fuerzas no es muy amplio, a la necesidad de un mejor tubo de Pitot, a las variaciones de presión del aire externo, etc.

Mencionaremos además que los dinamómetros proporcionan fuerzas promedio en el álabo, mientras que la distribución de presión nos proporciona información en diferentes secciones del mismo. El porcentaje de exactitud de este último método en lo que se refiere al arrastre no es muy exacto debido a que se necesitaría una mayor cantidad de agujeros de medición.

Vemos en las figuras 18 a 21 los valores del coeficiente de sustentación graficados versus la distancia desde la pared del tra-

nel de viento, para diferentes ángulos de ataque, y en la figura 22 vemos resumidas las 4 figuras anteriores, estando los coeficientes de sustentación divididos por sus correspondientes valores para flujo en la mitad del álabo. Vemos en esta figura que la forma de las curvas obtenidas es la misma y que los valores del coeficiente son mayores en la región donde se presenta el flujo secundario.

Dicha similitud de formas nos permite visualizar bien lo que ocurre con la distribución de coeficiente de sustentación en la longitud del álabo y evidenciar algún error de medición.

Observamos que los valores del coeficiente en la mitad del álabo se reducen en grado mayor que los otros, con lo que podría concluir que el flujo bidimensional es más sensible a las variaciones con el ángulo de ataque que los valores de las otras secciones del álabo.

Vemos en las figuras 23 a 26 los valores del coeficiente de resistencia de forma graficados versus la distancia desde la pared del túnel de viento, para los ángulos de ataque que estamos probando. Y en la figura 27 vemos resumidas las 4 figuras anteriores, estando en las ordenadas la razón de coeficiente de resistencia del perfil al valor correspondiente en la mitad del álabo.

Vemos en esta figura una distribución de arrastre muy similar, para los diferentes

En lo que al coeficiente de fricción, respecta, diremos que realmente su valor es pequeño comparado con el coeficiente de resistencia de forma, que para los cuatro ángulos seleccionados su valor es constante.

De la observación de las figuras 32 y 33 podemos decir que la disminución de turbulencia afecta la razón de coeficientes de sustentación disminuyéndola igual cosa podemos decir de la razón de coeficientes de resistencia del perfil.

De la observación de las figuras 14 y 34, tenemos que los valores del coeficiente de sustentación son mayores para el número de Rey - nolds mayor, mientras que para el coeficiente de resistencia de perfil hay mayor concordancia.

Relacionando las figuras 16 y 35 en las que está graficado la razón de coeficientes C_L/C_D , con el número de Reynolds mayor que la se - gunda, que dicha razón es mayor para el número de Reynolds mayor, lo - cual viene a ser una consecuencia de lo expresado en el párrafo an - terior.

De las figuras 46 y 47 en las que se ha graficado la razón de coeficientes de sustentación y resistencia a su valor en la mitad del - álabe versus la distancia de la pared del túnel, podemos decir lo mis - mo que cuando comparanos bajo las mismas condiciones, pero en veloci - dad máxima, en este caso de Reynolds menor, vemos que el efecto es me -

nor, sobre todo en lo que a la resistencia respecta.

Si comparamos las curvas 32 y 46 observamos que la forma de las curvas está en gran concordancia inclusive el rango de valores, lo que me hace concluir que esta variación de Reynolds estudiada produce sólo un pequeño efecto en el coeficiente de sustentación.

Observando las curvas 33 y 47 podemos decir que la forma de las curvas nuevamente está en concordancia, pero para cuando la turbulencia es mayor (caso de 1 metro de papel lija de madera) el efecto sobre el coeficiente de resistencia también lo es.

REFERENTE A LA INFLUENCIA DE LA TURBULENCIA.-

En el túnel de viento subsónico de la ESPOL podemos decir que la turbulencia es muy pequeña, para decir esto nos basamos en que las fluctuaciones de la velocidad son muy pequeñas en una sección transversal del túnel, por supuesto, sin la presencia de algún objeto perturbador.

Es entonces necesario, para estudiar el flujo secundario, descrito en el artículo 4.c, aumentar la turbulencia en la región en que es conocido se presenta el fenómeno, para lo cual se colocó un elemento capaz de formarla, cual es el papel lija de madera y se lo puso en una longitud de 1 metro por un ancho de 25 cm.

Experimentalmente, lo que demuestra lo mencionado, en que sin el elemento lija el espesor de la capa límite en la región próxima a la-

pared del túnel donde hay turbulencia es de 2 mm; con 0.5 metro de longitud de dicho elemento el espesor aumenta a 6mm, como se puede observar en la tabla 21, graficada en la figura 36 y finalmente con una longitud de 1 metro dicho espesor es de 10 mm. (tabla 8 y figura 17).

REFERENTE AL NUMERO DE REYNOLDS.-

Para este análisis relacionaremos primeramente el efecto del número de Reynolds en el coeficiente de sustentación a 150 mm para los Reynolds 289.488 y 144.744, estudiados, valores que constan en las tablas 7 y 23, graficados en las figuras 14 y 34. De ahí obtenemos que los coeficientes de sustentación son mayores para mayores números de Reynolds.

Ahora bien, si restringimos el estudio a la zona donde el flujo secundario está presente, y relacionamos para los valores estudiados de Reynolds, ángulo de ataque de + 4° y 1 metro de lija, veremos en los gráficos correspondientes (18 y 37) que esta variación de Reynolds no es suficiente para variar ostensiblemente al coeficiente de sustentación.

En lo que al orden de magnitud del efecto del número de Reynolds respecta, digámonos que se debe cumplir:

$$\frac{(C_L \text{ max})_1}{(C_L \text{ max})_2} = \frac{(C_D \text{ mín})_2}{(C_D \text{ mín})_1} \approx \frac{R_1^{0.12}}{R_2} \quad (4.2)$$

$$\frac{1.478}{1.304} \approx \frac{0.018}{0.016} \approx \frac{0.12}{2}$$

$$1.13 = 1,13 \approx 1.09$$

Tenemos que los resultados obtenidos satisfacen plenamente las relaciones requeridas.

REFERENTE A LA FORMACIÓN DE VORTICES.-

Debido a los sistemas vorticiales mencionados en la sección respectiva de este trabajo, vemos que se produce una deflexión de la corriente atrás del ala hacia abajo. Precisamente, esta deflexión produce la sustentación; el cuerpo desvía la gran masa de aire, que pasa alrededor del perfil y le imprime una velocidad descendente, experimentando una fuerza hacia arriba: El levante o sustentación, lo cual se esperaba de acuerdo con las ecuaciones estudiadas.

REFERENTE AL COMPORTAMIENTO DE LA CAPA LIMITE.-

Hemos manifestado en un acápite anterior que el incremento del ángulo de ataque crea un gradiente de presiones desfavorable en el extradós, que hace que la capa límite se desprenda. Si este desprendimiento ocurre cerca del borde de ataque, no existe en la mayor parte del extradós la distribución de presiones que origina la sustentación, y tiene lugar la pérdida, la cual es visible en la figu-

ra 14 luego del máximo valor de sustentación a los 4°.

De lo expresado se deduce que el desprendimiento de la capa límite favorece las pérdidas de flujo secundario.

8. CONCLUSIONES.-

Mientras mayor sea la razón de turbulencia que cubre el álabo, mayor sería el efecto del flujo secundario sobre el mismo.

Si bien el incremento del número de Reynolds aumenta los valores de los coeficientes de sustentación, en las regiones donde el flujo es bidimensional, vemos que para la región en que la turbulencia del túnel está presente, esta misma turbulencia impide notar la diferencia expuesta para flujo bidimensional. Considero que su influencia se notaría a Reynolds mucho menores.

La capa límite y su desprendimiento favorecen el efecto secundario. Por lo tanto los perfiles fluido dinámicos se diseñan de manera que el desprendimiento se produzca lo más corriente abajo que sea posible. Lo ideal sería que no existiese desprendimiento de capa límite en ningún sector del cuerpo aerodinámico.

Respecto de la influencia de los vórtices tenemos que otorgar a los vórtices de los extremos la responsabilidad de las pérdidas debidas al flujo secundario, mientras mayor diámetro tengan mayor su efecto. Lo cual ocurre cuando la razón de aspecto es menor.

Hemos visto además que el coeficiente de sustentación influye grandemente en el coeficiente de flujo secundario, es decir que a la ventaja de obtener un coeficiente de sustentación mayor para tener un incremento en eficiencia le acompaña la desventaja de que ese ma-

yor coeficiente aumenta al mismo tiempo la resistencia secundaria.

Considero que la más importante recomendación que puede hacerse en que con el estudio de las características de los álabes, se proyecte una próxima etapa, la cual puede ser el diseño de un compresor, extractor, etc.

Con la misma finalidad se podría investigar en el túnel con álabes en cascada, pudiendo de esta manera lograr una mejor visión de la influencia recíproca que este arreglo pudiera acarrear y determinar entonces, con mayor precisión, los efectos totales en la eficiencia de los compresores que son en la gran mayoría de los casos, del tipo de etapas múltiples.

De conformidad a la información que se tiene respecto a la magnitud del efecto del flujo secundario, la investigación realizada confirma la importancia de dicho efecto.

9.

APENDICE A

TABLAS

LISTA DE TABLAS

No.	Pág.
A	45
B	46
1	94
2	95
3	96
PRUEBAS A MAXIMA VELOCIDAD DEL AIRE EN EL TUNEL	
4	97
5	99
6	101
7	102
8	103
9 - 14	104
15	110
16	111
17	112
18	113
19	114
20	115

No.	Pág.
21	92
21	116
22	117
23	118
PRUEBAS A LA MITAD DE LA MAXIMA VELOCIDAD DEL AIRE	
24	119
25	121
26	122
27	123
28	124
29	125
30	126
31	127

No.		Pág.
		93
32	<i>Coefficientes de resistencia secundaria. Valores para Velocidad máxima del aire y 1 metro de papel lija</i>	128
33	<i>Eficiencia del álabe. Valores para velocidad máxima y 1 metro de papel lija</i>	129

Tabla No. 1

ABCISAS DE LOS AGUJEROS DE MEDICION, EN MILIMETROS.

	150	100	50	25	10	5	2.5
1	0	0	0	0	0	0	0
2	9	9	9	9	9	9	9
3	16	16	16	16	16	16	16
4	26	26	26	26	26	26	26
5	42	42	42	42	42	42	42
6	61	61	61	61	61	61	61
7	78	78	78	78	78	78	78
8	90	90	90	90	90	90	90
1	9	8.5	8.5	9	9	9	9
2	16.5	16.5	16	15.5	15.5	15.5	15.5
3	25	25	25	26	26	26	26
4	41	41	41	41	41	41	41
5	61	60	60	60	60	60	60
6	75	75	75	75	75	75	75
7	93	93	93	93	93	93	93

Tabla No. 3

ORDENADAS DE LOS AGUJEROS DE MEDICION, EN MILIMETROS.-

	150	100	50	25	10	5	2.5
1	1.5	1.5	1.78	2.0	2.0	2.29	2.29
2	8.4	8.4	8.5	8.4	9.2	8.9	8.3
3	10.7	10.7	11.1	11.3	11.3	11.4	11.3
4	12.8	12.8	13.1	13.5	13.6	13.6	13.6
5	14.0	14	14	14.6	14.9	14.9	14.9
6	13.2	13.2	13.2	13.5	13.7	13.6	13.6
7	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	10.6	10.5
8	7.1	7.1	6.9	6.9	7.0	7.1	7.1
1	0.25	0.25	0.0	0.25	0.25	0.0	0.0
2	0.51	0.51	0.25	0.38	0.51	0.51	0.51
3	0.90	0.90	0.90	1.02	1.14	1.27	1.27
4	1.9	1.9	1.8	2.03	2.03	2.29	2.29
5	2.3	2.3	2.3	2.4	2.54	2.67	2.79
6	1.8	1.8	2.03	2.03	2.16	2.29	2.29
7	0.25	0.25	0.51	0.51	0.51	0.51	0.635

Tabla No. 4
PRESIONES DINAMICAS.-

VALORES A 150 mm Y VELOCIDAD MAXIMA . -

	+ 10	+ 8	+ 6	+ 4	+ 2	0
P ₀	+0.114	+0.109	+0.107	+0.107	+0.107	+0.108
P ₁	+0.059	+0.083	+0.093	+0.101	+0.106	+0.098
P ₂	-0.244	-0.224	-0.212	-0.196	-0.154	-0.085
P ₃	-0.226	-0.212	-0.206	-0.195	-0.164	-0.110
P ₄	-0.203	-0.196	-0.195	-0.192	-0.171	-0.126
P ₅	-0.159	-0.162	-0.167	-0.172	-0.110	-0.125
P ₆	-0.097	-0.114	-0.125	-0.145	-0.141	-0.115
P ₇	-0.060	-0.062	-0.070	-0.087	-0.096	-0.095
P ₈	-0.055	-0.051	-0.046	-0.060	-0.064	-0.052
P ₁	+0.068	+0.055	+0.047	+0.38	-0.017	-0.015
P ₂	+0.052	+0.041	+0.036	+0.029	+0.014	-0.007
P ₃	+0.044	+0.035	+0.031	+0.027	+0.015	-0.001
P ₄	+0.037	+0.030	+0.029	+0.026	+0.019	+0.011
P ₅	+0.027	+0.023	+0.023	+0.023	+0.018	+0.-14
P ₆	+0.016	+0.016	+0.017	+0.018	+0.015	-0.014
P ₇	-0.035	-0.029	-0.034	-0.010	-0.008	-0.001

Continuación de Tabla No. 4

PRESIONES DINAMICAS

VALORES A 150 mm Y VELOCIDAD MAXIMA . -

	- 2	- 4	- 6	- 8	- 10
P_0	+0.117	+0.120	+0.127	+0.128	+0.128
P_1	+0.044	-0.025	-0.036	-0.038	+0.054
P_2	-0.043	-0.010	+0.022	+0.038	+0.051
P_3	-0.075	-0.046	-0.017	-0.002	-0.01
P_4	-0.099	-0.075	-0.049	-0.035	-0.024
P_5	-0.106	-0.088	-0.066	-0.057	-0.051
P_6	-0.102	-0.090	-0.074	-0.069	-0.068
P_7	-0.084	-0.073	-0.061	-0.060	-0.062
P_8	-0.055	-0.060	-0.055	-0.053	-0.053
P_1	-0.041	-0.068	-0.079	-0.066	-0.064
P_2	-0.015	-0.030	-0.081	-0.069	-0.063
P_3	-0.004	-0.014	-0.076	-0.070	-0.065
P_4	+0.011	+0.006	-0.054	-0.071	-0.067
P_5	+0.018	+0.014	-0.018	-0.063	-0.067
P_6	+0.018	+0.017	+0.000	-0.051	-0.064
P_7	-0.001	+0.002	+0.006	-0.037	-0.048

NOTA : En lo sucesivo sólo constarán los valores de los coeficientes de presión y se omitirán las lecturas de las presiones dinámicas, con el objeto de evitar un exceso de material.

Tabla No. 5

COEFICIENTES DE PRESION C_p .-

VALORES A 150 mm Y VELOCIDAD MAXIMA.-

	+ 10	+8	+6	+4	+2	0
1	+0.52	+0.76	+0.87	+0.94	+0.99	+0.91
2	-2.14	-2.05	-1.98	-1.83	-1.44	-0.79
3	-1.98	-1.94	-1.92	-1.82	-1.53	-1.02
4	-1.78	-1.80	-1.82	-1.79	-1.60	-1.17
5	-1.39	-1.49	-1.56	-1.60	-1.49	-1.16
6	-0.85	-1.05	-1.17	-1.36	-1.32	-1.07
7	-0.53	-0.57	-0.65	-0.81	-0.90	-0.88
8	-0.48	-0.47	-0.43	-0.56	-0.60	-0.48
1	+0.60	+0.50	+0.44	+0.36	+0.16	-0.14
2	+0.46	+0.38	+0.34	+0.27	+0.13	-0.07
3	+0.39	+0.32	+0.29	+0.25	+0.14	-0.01
4	+0.32	+0.28	+0.27	+0.24	+0.18	+0.10
5	+0.24	+0.21	+0.21	+0.21	+0.17	+0.13
6	+0.14	+0.15	+0.16	+0.17	+0.14	+0.13
7	-0.31	-0.36	-0.32	-0.09	-0.08	-0.01

Continuación de Tabla No. 5

COEFICIENTES DE PRESION C_p .

VALORES A 150 mm Y VELOCIDAD MAXIMA.

	-2	-4	-6	-8	-10
1	+0.38	-0.21	-0.28	-0.30	-0.42
2	-0.37	-0.08	+0.17	+0.30	+0.39
3	-0.64	-0.38	-0.13	-0.02	+0.08
4	-0.85	-0.63	-0.39	-0.27	-0.19
5	-0.91	-0.73	-0.52	-0.45	-0.40
6	-0.87	-0.75	-0.58	-0.54	-0.53
7	-0.72	-0.61	-0.48	-0.47	-0.48
8	-0.47	-0.50	-0.43	-0.41	-0.41
1	-0.35	-0.48	-0.62	-0.52	-0.50
2	-0.13	-0.25	-0.63	-0.54	-0.49
3	-0.03	-0.12	-0.59	-0.55	-0.51
4	+0.09	+0.05	-0.42	-0.55	-0.52
5	+0.15	+0.12	-0.14	-0.49	-0.51
6	+0.15	+0.14	0.00	-0.40	-0.50
7	-0.01	+0.02	+0.05	-0.29	-0.38

Tabla No. 6

COEFICIENTES DE SUSTENTACION O LEVANTE

VALORES A 150 mm Y VELOCIDAD MAXIMA .-

	A. fig. (cm ²)	C _L
+10	69.1	1,382
+ 8	69.2	1,384
+ 6	67.1	1,342
+ 4	73.9	1,478
+ 2	67.35	1,347
+ 0	48.1	0.962
- 2	36.4	0.728
- 4	24.15	0.483
- 6	2.25	0.045
- 8	-8.15	-0.170
-10	-10.4	-0.208

Tabla No. 7
 COEFICIENTE DE ARRASTRE DE FORMA.-
 VALORES A 150 mm Y VELOCIDAD MAXIMA.

ANGULO DE ATAQUE	AREA EFECTIVA	COEFICIENTE DE ARRASTRE
α	A. fig.	C_{Dp}
10	116,25	0.114
8	126,6	0.124
6	84.8	0.083
4	57.0	0.056
2	20.15	0.020
0	10.45	0.0103
-2	45.9	0.045
-4	65.5	0.064
-6	77.	0.076
-8	80.85	0.079
-10	82.65	0.081

ESPESOR DE LA CAPA LIMITE DE LA PARED DEL TUNEL.- PARA 1 METRO DE LIJA DE MADERA Y VELOCIDAD MAXIMA.-

<i>d</i>	PRESION DINAMICA
<i>mm</i>	Mts. de Agua
0	0,028 - 0,029
1	0,040 - 0,041
2	0,051 - 0,052
2,5	0,055 - 0,056
3	0,062 - 0,063
4	0,075 - 0,076
5	0,086
6	0,097
7	0,106 - 0,107
8	0,116
9	0,123
10	0,129 - 0,130
25	0,136 - 0,137
50	0,136 - 0,137
100	0,136 - 0,137
150	0,136 - 0,137

Tabla No.9
COEFICIENTE DE PRESION C_p

VALORES A 100m Y VELOCIDAD MAXIMA

	+4	+2	0	-4
1	+0.996	+1.0	+0.96	+0.58
2	-1.59	-1.03	-0.78	-0.35
3	-1.55	-1.09	-0.89	-0.56
4	-1.61	-1.22	-1.06	-0.77
5	-1.44	-1.15	-1.03	-0.81
6	-1.22	-1.0	-0.91	-0.75
7	-0.65	-0.61	-0.63	-0.60
8	-0.45	-0.39	-0.35	-0.30
1	+0.39	+0.20	+0.09	-0.19
2	+0.31	+0.19	+0.12	-0.03
3	+0.30	+0.22	+0.16	+0.07
4	+0.31	+0.26	+0.23	+0.18
5	+0.29	+0.26	+0.26	+0.22
6	+0.25	+0.24	+0.25	+0.23
7	-0.01	+0.06	+0.09	+0.08

Tabla No. 10

COEFICIENTES DE PRESION C_p

VALORES A 50 mm Y VELOCIDAD MAXIMA

	+4	+2	0	-2
1	+0.93	+1.	+0.99	+0.72
2	-1.72	-1.29	-0.87	-0.48
3	-1.69	-1.36	-1.03	-0.72
4	-1.73	-1.45	-1.19	-0.91
5	-1.56	-1.36	-1.16	-0.94
6	-1.30	-1.19	-1.03	-0.88
7	-0.75	-0.75	-0.77	-0.72
8	-0.50	-0.49	-0.45	-0.41
1	+0.34	+0.18	-0.01	-0.29
2	+0.23	+0.14	+0.01	-0.11
3	+0.22	+0.16	+0.08	-0.02
4	+0.25	+0.22	+0.17	+0.13
5	+0.23	+0.22	+0.19	+0.16
6	+0.19	+0.21	+0.20	+0.18
7	-0.02	-0.03	+0.03	+0.04

Tabla No. 11

COEFICIENTES DE PRESION C_p

VALORES A 25 mm Y VELOCIDAD MAXIMA

	+4	+2	0	-2
1	+0.76	+0.99	+1.02	+0.98
2	-1.56	-1.21	-0.87	-0.57
3	-1.53	-1.29	-1.03	-0.81
4	-1.54	-1.36	-1.14	-0.99
5	-1.39	-1.29	-1.15	-1.06
6	-0.96	-1.09	-0.99	-0.95
7	-0.60	-0.64	-0.70	-0.80
8	-0.34	-0.40	-0.40	-0.43
1	+0.35	+0.20	-0.03	-0.20
2	+0.28	+0.18	+0.02	-0.08
3	+0.29	+0.21	+0.09	-0.0
4	+0.29	+0.26	+0.17	+0.12
5	+0.26	+0.24	+0.19	+0.15
6	+0.24	+0.24	+0.20	+0.17
7	-0.04	+0.0	+0.02	-0.02

COEFICIENTES DE PRESION C_p

VALORES A 10 mm Y VELOCIDAD MAXIMA *

	+4	+2	0	-2
1	+0.56	+0.80	+0.87	+0.87
2	-1.23	-1.02	-0.66	-0.32
3	-1.13	-1.1	-0.73	-0.47
4	-1.08	-1.03	-0.83	-0.61
5	-1.0	-1.02	-0.89	-0.73
6	-0.70	-0.79	-0.75	-0.69
7	-0.48	-0.52	-0.48	-0.44
8	-0.35	-0.37	-0.34	-0.27
1	+0.33	+0.20	-0.0	-0.20
2	+0.30	+0.21	+0.06	-0.02
3	+0.30	+0.23	+0.12	+0.06
4	+0.31	+0.27	+0.17	+0.13
5	+0.27	+0.25	+0.17	+0.14
6	+0.21	+0.21	+0.15	+0.14
7	-0.04	-0.05	-0.05	-0.02

* VALORES AFECTADOS POR LA CAPA LIMITE DE LA PARED

Tabla No. 13

COEFICIENTES DE PRESION C_p

VALORES A 5 mm Y VELOCIDAD MAXIMA *

	+4	+2	0	-2
1	-0.23	+0.18	+0.71	+0.88
2	-1.62	-1.28	-0.84	-0.42
3	-1.58	-1.26	-0.94	-0.62
4	-1.53	-1.36	-0.10	-0.84
5	-1.53	-1.39	-1.21	-1.01
6	-1.16	-1.12	-1.04	-0.98
7	-0.78	-0.70	-0.67	-0.67
8	-0.56	-0.46	-0.39	-0.36
1	+0.43	+0.38	+0.19	-0.06
2	+0.37	+0.33	+0.19	+0.04
3	+0.36	+0.36	+0.26	+0.16
4	+0.37	+0.38	+0.30	+0.23
5	+0.32	+0.34	+0.30	+0.26
6	+0.27	+0.30	+0.28	+0.26
7	-0.10	-0.03	-0.01	+0.02

* VALORES AFECTADOS POR LA CAPA LIMITE DE LA PARED

Tabla No. 14

COEFICIENTES DE PRESION C_p

VALORES A 2.5 mm Y VELOCIDAD MAXIMA.*

	+4	+2	0	-2
1	-1,34	-0.43	+0.48	+0.67
2	-2,25	-1.77	-1.15	-0.59
3	-2,33	-1.97	-1.43	-0.98
4	-2,30	-2.0	-1.59	-1.25
5	-2,15	-2.0	-1.74	-1.51
6	-1,59	-1.66	-1,64	-1.51
7	-1,26	-1.16	-1.02	-1.02
8	-0.84	-0.79	-0.64	-0.56
1	+0.72	+0.52	+0.16	-0.13
2	+0.56	+0.39	+0.15	-0.05
3	+0.54	+0.43	+0.23	+0.13
4	+0.46	+0.41	+0.28	+0.21
5	+0.39	+0.39	+0.31	+0.28
6	+0.30	+0.31	+0.30	+0.28
7	-0.30	-0.23	-0.13	-0.08

* VALORES AFECTADOS POR LA CAPA LIMITE DE LA PARED

COEFICIENTES DE LEVANTE PARA VELOCIDAD MAXIMA . -

-2

0

+ 2

+ 4

DISTANCIA	C_L	$C_L/C_{L_{2D}}$	C_L	$C_L/C_{L_{2D}}$	C_L	$C_L/C_{L_{2D}}$	C_L	$C_L/C_{L_{2D}}$
2.5	2.00	1.35	1.84	1.40	1.48	1.55	1.18	1.62
5.	1.38	0.93	1.27	0.96	1.07	1.12	0.86	1.18
10.	0.99	0.67	0.94	0.71	0.85	0.90	0.58	0.80
25.	1.25	0.84	1.13	0.86	0.95	0.99	0.86	1.18
50.	1.41	0.95	1.08	0.82	1.01	1.06	0.76	1.05
100.	1.35	0.91	1.27	0.97	0.96	1.01	0.71	0.98
150.	1.48	1.00	1.32	1.00	0.95	1.00	0.73	1.00

Tabla No. 17

REGION EN LA QUE SE PRESENTA LA CAPA LIMITE TURBULENTA EN EL ALABE.

α	$\frac{x_t}{c}$
10	58
8	58
6	47
4	47
2	39
0	33
-2	33
-4	31
-6	31
-8	23
-10	11

Tabla No. 18

COEFICIENTES DE ARRASTRE O RESISTENCIA DE FRICCIÓN.-
VALORES PARA VELOCIDAD MÁXIMA.-

α	R	C_{Df}
10	296053	0,0042
8	289488	0,0042
6	286820	0,0047
4	286820	0,0047
2	286820	0,0050
0	288160	0,0051
-2	299923	0,0051
-4	303745	0,0050
-6	312480	0,0051
-8	313706	0,0054
-10	313706	0,0057

Tabla No. 19

COEFICIENTES DE SUSTENTACION Y DE RESISTENCIA DEL PERFIL.
VALORES A 150 mm Y VELOCIDAD MAXIMA.

ANGULO DE ATAQUE	COEFICIENTE DE SUSTENTACION	COEFICIENTE DE RESISTENCIA	
α	C_L	C_D	C_L/C_D
10	1,382	0,118	11,71
8	1,384	0,128	10,81
6	1,342	0,088	15,25
4	1,478	0,061	24,23
2	1,347	0,025	53,88
0	0.962	0,016	60,13
-2	0.728	0,050	14,56
-4	0.483	0,069	7,00
-6	0.045	0,081	0,56
-8	-0.170	0,084	-2.00
-10	-0.208	0,087	-2.39

Tabla No. 20

COEFICIENTES DE LEVANTE Y DE RESISTENCIA O ARRASTRE.-

METODO DE LOS DINAMOMETROS.-

ANGULO DE ATAQUE	FUERZA DE LEVANTE PROMEDIO Kg.	FUERZA DE ARRASTRE PROMEDIO Kg.	PRESION DINAMICA PROMEDIO	COEF. DE LEVANTE C_L	COEF. DE ARRASTRE C_D
+ 10	4.009	0.205	0.106	1.216	0.0622
+ 8	4.050	0.1778	0.118	1.103	0.048
+ 6	3.994	0.151	0.1085	1.183	0.045
+ 4	3.935	0.1338	0.1105	1.145	0.039
+ 2	3.871	0.1345	0.1185	1.05	0.037
0	2.871	0.1093	0.1093	0.844	0.032
- 2	2.446	0.103	0.1118	0.703	0.030
- 4	1.984	0.100	0.1113	0.573	0.029
- 6	1.695	0.101	0.1155	0.472	0.028
- 8	0.640	0.167	0.1205	0.1707	0.045
- 10	0.523	0.275	0.126	-0.0133	0.07

Tabla No. 21

ESPESOR DE LA CAPA LIMITE PARA 1/2 METRO DE LONGITUD DE LA LIJA DE MADERA Y VELOCIDAD MAXIMA.-

d (mm)	PRESION DINAMICA (Mts. de Agua)
0.0	0,035; 0,036
0.5	0,042; 0,043
1	0,052
2	0,060; 0,061
2.5	0,065
3	0,073; 0,074
4	0,085; 0,086
5	0,093; 0,094
6	0,100; 0,101
7	0,106
8	0,107
9	0,108
10	0,108
25	0,108
50	0,108
100	0,108
150	0,107; 0,108

Tabla No. 22

VALORES DEL COEFICIENTE DE PRESION A UN ANGULO DADO ($\alpha = +4^\circ$) PARA
1/2 METRO DE LONGITUD DE LIJA DE MADERA Y VELOCIDAD MAXIMA. -

	2.5*	5*	10	25	50	100	150
1	+0.20	+0.58	+0.79	+0.81	+0.94	+0.99	+0.99
2	-2.21	-1.60	-1.55	-1.63	-1.66	-1.70	-1.71
3	-2.15	-1.64	-1.52	-1.62	-1.65	-1.64	-1.70
4	-2.28	-1.50	-1.52	-1.64	-1.70	-1.71	-1.72
5	-2.08	-1.07	-1.39	-1.48	-1.52	-1.54	-1.55
6	-1.63	-1.07	-0.98	-1.13	-1.25	-1.31	-1.28
7	-0.99	-0.60	-0.55	-0.74	-0.84	-0.85	-0.90
8	-0.58	-0.53	-0.46	-0.40	-0.47	-0.52	-0.53
1	+0.43	+0.31	+0.26	+0.25	+0.31	+0.33	+0.33
2	+0.33	+0.20	+0.21	+0.20	+0.20	+0.23	+0.25
3	+0.33	+0.21	+0.17	+0.21	+0.20	+0.23	+0.25
4	+0.33	+0.24	+0.20	+0.23	+0.24	+0.24	+0.25
5	+0.28	+0.22	+0.19	+0.19	+0.20	+0.21	+0.22
6	+0.19	+0.17	+0.15	+0.17	+0.17	+0.17	+0.18
7	-0.18	-0.16	-0.18	-0.11	-0.05	-0.04	-0.06

* VALORES INFLUENCIADOS POR LA CAPA LIMITE DE LA PARED

Tabla No. 23

COEFICIENTES DE LEVANTE Y DE ARRASTRE.-

VALORES PARA UN ANGULO DE ATAQUE DE 4° CON 1/2 METRO DE PAPEL LIJA
DE MADERA Y VELOCIDAD MAXIMA.-

DISTANCIA	C_L	$C_L / C_{L_{2D}}$	C_{Dp}	C_D	$\frac{C_D}{C_{D_{2D}}}$
2.5	1,776	1,263	0.116	0.119	1,57
5	1,256	0.893	0.057	0.060	0.79
10	1,124	0.799	0.059	0.062	0.82
25	1,218	0.866	0.067	0.070	0.92
50	1,37	0.974	0.062	0.065	0.86
100	1,377	0.979	0.073	0.076	1.00
150	1,406	1.00	0.073	0.076	1.00

Tabla No. 24

COEFICIENTES DE PRESION.-

VALORES A 150 mm Y 1/2 VELOCIDAD MAXIMA.-

	+10	+ 8	+ 6	+ 4	+ 2	+ 0
1	0.64	+0.78	+0.94	+1.0	+0.98	+0.83
2	-1.27	-1.43	-1.58	-1.13	-0.83	-0.35
3	-1.27	-1.38	-1.49	-1.15	-0.96	-0.48
4	-1.12	-1.22	-1.42	-1.16	-1.07	-0.58
5	-0.83	-0.95	-1.23	-1.00	-0.98	-0.60
6	-0.39	-0.53	-0.96	-0.84	-0.80	-0.48
7	-0.15	-0.19	-0.55	-0.56	-0.72	-0.42
8	-0.15	-0.16	-0.24	-0.22	-0.30	-0.18
1	+0.68	+0.64	+0.51	+0.38	+0.20	+0.08
2	+0.56	+0.53	+0.40	+0.35	+0.20	+0.13
3	+0.53	+0.48	+0.38	+0.35	+0.24	+0.22
4	+0.46	+0.47	+0.38	+0.35	+0.31	+0.28
5	+0.41	+0.41	+0.34	+0.33	+0.31	+0.30
6	+0.32	+0.34	+0.30	+0.31	+0.30	+0.32
7	0.00	0.00	+0.09	+0.13	+0.02	+0.12

Continuación de Tabla No. 24

COEFICIENTES DE PRESION.-

VALORES A 150 mm Y 1/2 VELOCIDAD MAXIMA.-

	- 2	- 4	- 6	- 8	- 10
1	+0.50	-0.03	-0.06	-0.09	-0.10
2	-0.05	+0.17	+0.37	+0.47	+0.51
3	-0.24	-0.06	+0.10	+0.24	+0.25
4	-0.37	-0.23	-0.04	+0.00	+0.01
5	-0.44	-0.30	-0.13	-0.09	-0.08
6	-0.34	-0.23	-0.12	-0.09	-0.13
7	-0.27	-0.16	-0.06	-0.04	-0.07
8	-0.16	-0.14	-0.06	-0.04	-0.04
1	-0.10	-0.36	-0.43	-0.28	-0.21
2	+0.02	-0.03	-0.43	-0.28	-0.21
3	+0.13	+0.03	-0.34	-0.31	-0.21
4	+0.27	+0.19	-0.13	-0.21	-0.24
5	+0.27	+0.25	+0.06	-0.22	-0.22
6	+0.29	+0.27	+0.12	-0.13	-0.21
7	+0.11	+0.11	+0.10	-0.02	-0.13

Tabla No. 25

COEFICIENTES DE LEVANTE Y DE ARRASTRE.-

VALORES PARA 150 mm Y 1/2 VELOCIDAD MAXIMA.-

ANGULO DE ATAQUE	COEFIC. DE LEVANTE	COEFI. DE ARRASTRE DE FORMA	COEFI. DE RESISTENCIA DEL PERFIL	RAZON DE COEFICIENTES
α	C_L	C_{D_p}	C_D	C_L / C_D
+ 10	1,039	0.083	0.087	11.9
+ 8	1.084	0.097	0.101	10.7
+ 6	1,304	0.100	0.104	12.5
+ 4	1,1	0.046	0.050	22
+ 2	1,004	0.014	0.018	55.8
+ 0	0,656	0.016	0.020	32.8
- 2	0,425	0.040	0.044	9.7
- 4	0.232	0.044	0.048	4.8
- 6	-0.092	0.055	0.059	-1.6
- 8	-0.215	0.054	0.058	-3.7
- 10	-0.227	0.059	0.063	-3.6

Tabla No. 26

ESPESOR DE LA CAPA LIMITE DE LA PARED DEL TUNEL.-

PARA 1 METRO DE PAPEL LIJA DE MADERA Y 1/2 VELOCIDAD MAXIMA.-

DISTANCIA mm	PRESION DINAMICA mts. DE AGUA
1	0.006
2	0.006
3	0.009
4	0.012
5	0.014
6	0.016 ; 0,017
7	0.017 ; 0,018
8	0.018 ; 0,019
9	0.020
10	0.021
11	0.022
25	0.022
50	0.022
100	0.022
150	0.022

Tabla No. 27

COEFICIENTES DE PRESION A UN ANGULO DADO (4°),-

VALORES PARA 1 METRO DE PAPEL LIJA DE MADERA Y 1/2 VELOCIDAD MAXIMA,-

DISTANCIA	2.5*	5.0 *	10.0*	25.0	50.0	100	150
1	-0.47	-0.03	+0.79	+0.84	-1.63	-1.50	-1.54
2	-2.59	-1.60	-0.79	-1.57	+0.89	+1.00	+0.97
3	-2.53	-1.53	-0.70	-1.51	-1.58	-1.43	-1.59
4	-2.53	-1.50	-0.68	-1.51	-1.58	-1.5	-1.59
5	-2.41	-1.40	-0.56	-1.30	-1.32	-1.25	-1.38
6	-1.71	-0.97	-0.35	-1.14	-1.16	-1.10	-1.23
7	-1.35	-0.63	-0.07	-0.76	-0.79	-0.70	-0.82
8	-1.24	-0.50	-0.02	-0.57	-0.47	-0.35	-0.46
1	+0.82	+0.47	+0.65	+0.05	+0.18	+0.21	+0.21
2	+0.59	+0.37	+0.63	+0.14	+0.34	+0.33	+0.31
3	+0.59	+0.27	+0.63	+0.11	+0.18	+0.21	+0.31
4	+0.47	+0.27	+0.63	+0.11	+0.21	+0.21	+0.21
5	+0.35	+0.23	+0.61	+0.05	+0.18	+0.21	+0.18
6	+0.24	+0.13	+0.56	+0.00	+0.16	+0.18	+0.18
7	-0.35	-0.07	+0.30	-0.22	-0.05	0.00	-0.08

* VALORES AFECTADOS POR LA CAPA LIMITE DE LA PARED

Tabla No. 28

COEFICIENTES DE LEVANTE Y DE ARRASTRE.-

VALORES PARA UN ANGULO DE ATAQUE DE 4° CON 1 METRO DE PAPEL LIJA
DE MADERA Y 1/2 VELOCIDAD MAXIMA.-

DISTANCIA	C_L	$C_L / C_{L_{2D}}$	C_{Dp}	C_D	$\frac{C_D}{C_{D_{2D}}}$
2.5	2,188	1,626	0.113	0.117	1.98
5	1,243	0.923	0.083	0.087	1.48
10	0.956	0.710	0.051	0.055	0.93
25	1.161	0.743	0.048	0.052	0.88
50	1,29	0.958	0.057	0.061	1.03
100	1.244	0.924	0.059	0.063	1.07
150	1.346	1.00	0.055	0.059	1.00

Tabla No. 29

ESPESOR DE LA CAPA LIMITE DE LA PARED DEL TUNEL.-

PARA 1/2 METRO DE PAPEL LIJA DE MADERA Y 1/2 VELOCIDAD MAXIMA.-

DISTANCIA	PRESION DINAMICA
0	0,008
1	0,011
2	0,015
2.5	0,018
3	0,020
4	0,023 - 0,024
5	0,025
6	0,026
7	0,026 ; 0,027
8	0,026 ; 0,027
9	0,026 ; 0,027
10	0,026 ; 0,027
25	0,026 ; 0,027
50	0,026 ; 0,027
100	0,026 ; 0,027
150	0,026 ; 0,027

Tabla No. 30

COEFICIENTES DE PRESION.-

VALORES PARA UN ANGULO DE ATAQUE DE 4° CON 1/2 METRO DE PAPEL LIJA DE MADERA Y 1/2 VELOCIDAD MAXIMA.-

DISTANCIA	2.5 *	5 *	10	25	50	100	150
1	0.00	+0.47	+0.82	+0.85	+0.95	+0.96	+0.98
2	-2.08	-1.76	-1.44	-1.59	-1.52	-1.57	-1.67
3	-2.03	-1.76	-1.46	-1.59	-1.55	-1.57	-1.69
4	-2.08	-0.73	-1.47	-1.59	-1.59	-1.61	-1.70
5	-1.87	-0.65	-1.33	-1.41	-1.41	-1.43	-1.50
6	-1.54	-0.25	-1.12	-1.07	-1.23	-1.25	-1.30
7	-0.89	-0.75	-0.70	-0.63	-0.84	-0.79	-0.91
8	-0.51	-0.43	-0.39	-0.48	-0.48	-0.43	-0.52
1	+0.46	+0.27	+0.25	+0.22	+0.25	+0.30	+0.31
2	+0.35	+0.25	+0.21	+0.15	+0.18	+0.23	+0.24
3	+0.25	+0.16	+0.11	+0.13	+0.13	+0.18	+0.11
4	+0.33	+0.22	+0.21	+0.19	+0.20	+0.23	+0.24
5	+0.33	+0.22	+0.21	+0.15	+0.20	+0.20	+0.22
6	+0.30	+0.16	+0.18	+0.13	+0.16	+0.18	+0.19
7	-0.08	+0.08	-0.07	-0.19	-0.07	-0.04	-0.07

* VALORES AFECTADOS POR LA CAPA LIMITE.-

Tabla No. 31

COEFICIENTES DE LEVANTE Y DE ARRASTRE.-

VALORES PARA UN ANGULO DE ATAQUE DE 4° CON 1/2 METRO DE PAPEL LIJA
DE MADERA Y 1/2 VELOCIDAD MAXIMA.-

DISTANCIA	C_L	$C_L/C_{L_{2D}}$	C_{Dp}	C_D	$C_D/C_{D_{2D}}$
2.5	1,691	1,201	0.097	0.101	1.68
5	1,427	1,013	0.07	0.074	1.23
10	1,201	0.853	0.041	0.045	0.75
25	1,196	0.849	0.050	0.054	0.90
50	1,358	0.965	0.037	0.041	0.68
100	1,287	0.914	0.057	0.061	1.02
150	1,408	1.00	0.056	0.060	1.00

Tabla No. 32

COEFICIENTES DE RESISTENCIA SECUNDARIA.-

VALORES PARA VELOCIDAD MAXIMA Y 1 METRO DE PAPEL LIJA DE MANDERA.-

ANGULO DE ATAQUE	C_{Ds}	C_D	$C_{D,t}$	C_L	C_L^2	$C_{D,t}/C_L$	C_{Ds}
							$0.018 C_L^2$

4	0.045	0.061	0,106	1.53	2.34	0.069	0.042
2	0.038	0.024	0.062	1.38	1.92	0.045	0.035
0	0.021	0.008	0.029	1.21	1.46	0.024	0.026
-2	0.014	0.041	0.055	0.91	0.83	0.06	0.015

Tabla No. 33

EFICIENCIA DEL ALABE.-

VALORES PARA VELOCIDAD MAXIMA Y 1 METRO DE PAPEL LIJA DE MADERA.

ANGULO DE ATAQUE	EFICIENCIA DEL ALABE	PERDIDAS SECUNDARIAS PORCENTAJE	PERDIDAS DEL PERFIL PORCENTAJE
4	93,1	2,9	4.0
2	95.5	2.7	1.7
0	97.6	1.7	0.7
-2	94.0	1.5	4.5

A P E N D I C E B

G R A F I C O S

NOMINA DE LAS FIGURAS INCLUIDAS

Fíg. No.		Página
2.1	Túnel de circuito abierto. Tomada del libro de Golstein (Referencia No. 1)	4
2.2	Túnel de circuito cerrado. Tomada del libro de Golstein (Referencia No. 1)	4
2.3	Túnel de aire comprimido. Tomada del libro de Golstein (Referencia No. 1)	5
3.1	Túnel de viento subsónico de la ESPOL	10
3.2	Diagrama de dinamómetro	11
3.3	Diagrama de transductor de presiones	13
4.1	Variación de la pérdida total de presión con el número de Reynolds. Tomada del libro de Dixon (Referencia No. 4)	19
4.2	Perfil aerodinámico. Tomada del libro de Milne-Thomson (Referencia No. 5)	20
4.3	Sección del perfil aerodinámico. Tomada de Referencia No. 5	21
4.4	Trayectoria de las partículas. Tomada de Referencia No. 5	22
4.5	Separación de la estela en el álabe. Tomada de Referencia No. 5	23
4.6	Esquema de líneas de vórtices. Tomada de Referencia No. 5	24

<i>Fíg. No.</i>	<i>Página</i>
4.7 <i>Espesor creciente δ de la capa límite de una placa. Tomada del libro de Mattaix (Ref. No. 2)</i>	28
4.8 <i>Perfil de flujo laminar y turbulento</i>	30
4.9 <i>Flujo en ducto de sección variable. Tomada del libro de Mattaix (Ref. No. 2)</i>	31
4.10 <i>Esquema del fenómeno de desprendimiento de la capa límite (Tomada de la Referencia No. 1)</i>	32
4.11 <i>Separación de la capa límite a diferente ángulo de ataque (Tomada de Referencia No. 1)</i>	33
4.12 <i>Pérdidas en una etapa de compresión. (Tomada de la Referencia No. 4)</i>	36
4.13 <i>Características de compresores . (Tomada de Referencia No. 4)</i>	37
4.14 <i>Variación de pérdidas de perfil con la incidencia para turbinas típicas (Ref. No. 4)</i>	39
5.1 <i>Comparación de diferentes perfiles</i>	44
5.2 <i>Graficación de las coordenadas del álabe</i>	47
5.3 <i>Aumento de las ordenadas en la segunda mitad del álabe</i>	48
5.4 <i>Molde del álabe</i>	56
5.5 <i>Alabes de fibra de vidrio</i>	58

GRAFICOS OBTENIDOS DE LA EXPERIMENTACION

No.		Pág.
	PRUEBAS A MAXIMA VELOCIDAD DEL AIRE EN EL TUNEL	
1 - 11	Coefficientes de presión (C_p) versus porcentaje de cuerda (% c), para $-10^\circ < \alpha < 10^\circ$, para 150 mm.	137
12 -13	Coefficientes de presión (C_p) versus ordenadas, para $\alpha = 6^\circ$ y $\alpha = 4^\circ$, a 150 mm.	143
14	Coefficientes de sustentación (C_L) y de resistencia de perfil (C_D) para 150 mm. Método de distribución de presiones.	145
15	Coefficientes de sustentación (C_L) y de resistencia de perfil (C_D). Método de los dinamómetros (balance de fuerzas)	146
16	Razones del coeficiente de sustentación al de resistencia de perfil, para 150 mm.	147
17	Presiones dinámicas (P. D.) versus distancia (d). Espesor de la capa límite de la pared del túnel, para 1 metro de papel lija de madera	148
18 -21	Coefficientes de sustentación (C_L) versus distancia (d), para 1 metro de papel lija y $\alpha = 4, 2, 0$ y -2	149
22	Razones del coeficiente de sustentación a su valor en la mitad del alabe (flujo bidimensional) versus distancia, para 1 metro de papel lija.	153
23 -26	Coefficientes de resistencia de forma (C_{Dp}) versus distancia (d), para 1 metro de papel lija i los siguientes valores de $\alpha = 4, 2, 0$ y -2 .	154

No.	Pág.
27 Razones del coeficiente de resistencia de forma a su valor en la mitad del álabé (flujo bidimensional), para 1 metro de papel lija.	158
28 Presiones dinámicas (P.D.) versus distancia (d). Espesor de la capa límite de la pared del túnel, para 1/2 metro de papel lija	159
29 Coeficientes de sustentación (C_L) versus distancia (d), para $\alpha = 4^\circ$ y 1/2 metro de papel lija.	160
30 Coeficientes de resistencia de forma (C_{Dp}) versus distancia (d), para $\alpha = 4^\circ$ y 1/2 metro de papel lija.	161
31 Razones del coeficiente de resistencia de forma a su valor en la mitad del álabé (flujo bidimensional), para $\alpha = 4^\circ$ y 1/2 metro de papel lija.	162
32 Razones del coeficiente de sustentación (C_L) a su valor en la mitad del álabé, para $\alpha = 4^\circ$. Comparación para 1 metro y 1/2 metro de papel lija.	163
33 Razones del coeficiente de resistencia de forma a su valor en la mitad del álabé, para $\alpha = 4^\circ$. Comparación para 1 metro y 1/2 metro de papel lija.	164
PRUEBAS A LA MITAD DE LA MAXIMA VELOCIDAD DEL AIRE	
34 Coeficientes de sustentación (C_L) y de resistencia de perfil (C_p), para 150 mm. Método de distribución de presiones	165
35 Razones del coeficiente de sustentación al de resistencia de perfil, para 150 mm.	166

No.	135 Pág.
36 Presiones dinámicas (P. D.) versus distancia (d). Espesor de la capa límite de la pared del túnel, para 1 metro de papel lija.	167
37 Coeficientes de sustentación (C_L) versus distancia (d), para $\alpha = 4^\circ$ y 1 metro de papel lija.	168
38 Coeficientes de resistencia de forma versus distancia (d), para $\alpha = 4^\circ$ y 1 metro de papel lija.	169
39 Razones del coeficiente de sustentación a su valor en la mitad del álabo, para $\alpha = 4^\circ$ y 1 metro de lija.	170
40 Razones del coeficiente de resistencia de forma a su valor en la mitad del álabo, para $\alpha = 4^\circ$ y 1 metro de papel lija.	171
41 Presiones dinámicas (P. D.) versus distancia (d). Espesor de la capa límite de la pared del túnel para 1/2 metro de papel lija.	172
42 Coeficientes de sustentación (C_L) versus distancia (d), para $\alpha = 4^\circ$ y 1/2 de papel lija.	173
43 Coeficientes de resistencia de forma (C_{Dp}) versus dis- tancia (d). Para $\alpha = 4^\circ$ y 1/2 metro de papel lija.	174
44 Razones del coeficiente de sustentación a su valor en la mitad del álabo, para $\alpha = 4^\circ$ y 1/2 metro de lija.	175
45 Razones del coeficiente de resistencia de forma a su va- lor en la mitad del álabo, para $\alpha = 4^\circ$ y 1/2 metro de pa- pel lija de madera.	176

No.	Pág.
46 Razones del coeficiente de sustentación a su valor en la mitad del álabe. Comparación para 1/2 velocidad máxima y $\alpha = 4^\circ$ entre 1 metro y 1/2 metro de papel lija	177
47 Razones del coeficiente de resistencia de forma a su valor en la mitad del álabe. Comparación para 1/2 velocidad máxima y $\alpha = 4^\circ$ entre 1 metro y 1/2 metro de lija.	178
48 Coeficientes de resistencia secundaria versus el cuadrado de coeficientes de sustentación. Para velocidad máxima del aire en el túnel.	179

Figura 1

$\alpha = 10^\circ$

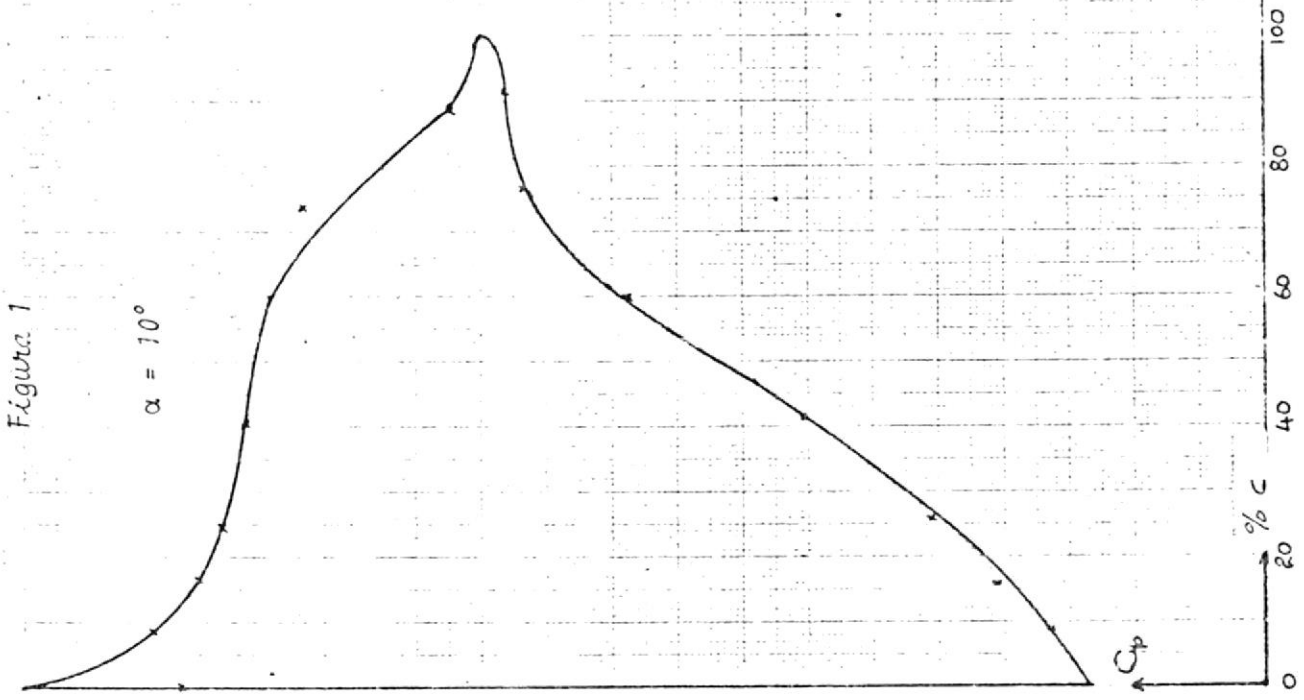
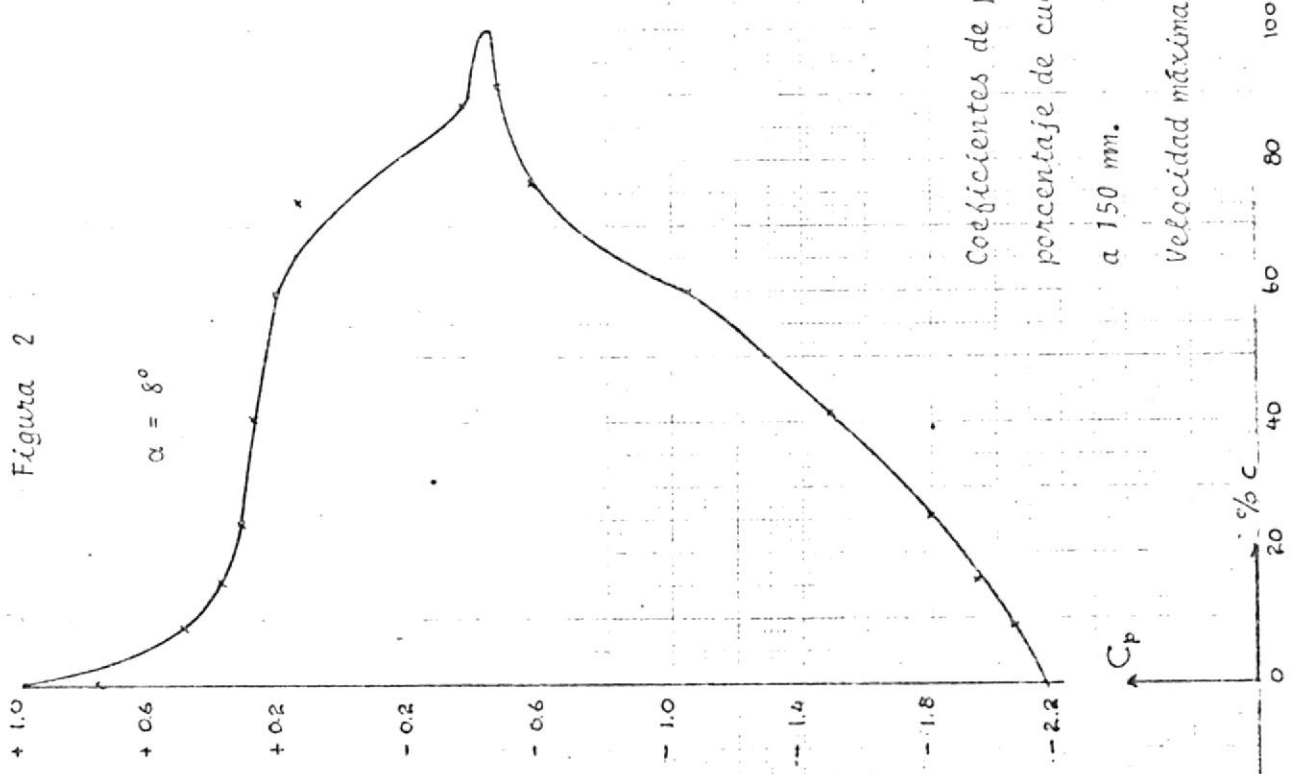


Figura 2

$\alpha = 8^\circ$



Coefficientes de presión versus porcentaje de cuerda. Valores a 150 mm. Velocidad máxima

Figura 3

$\alpha = 6^\circ$

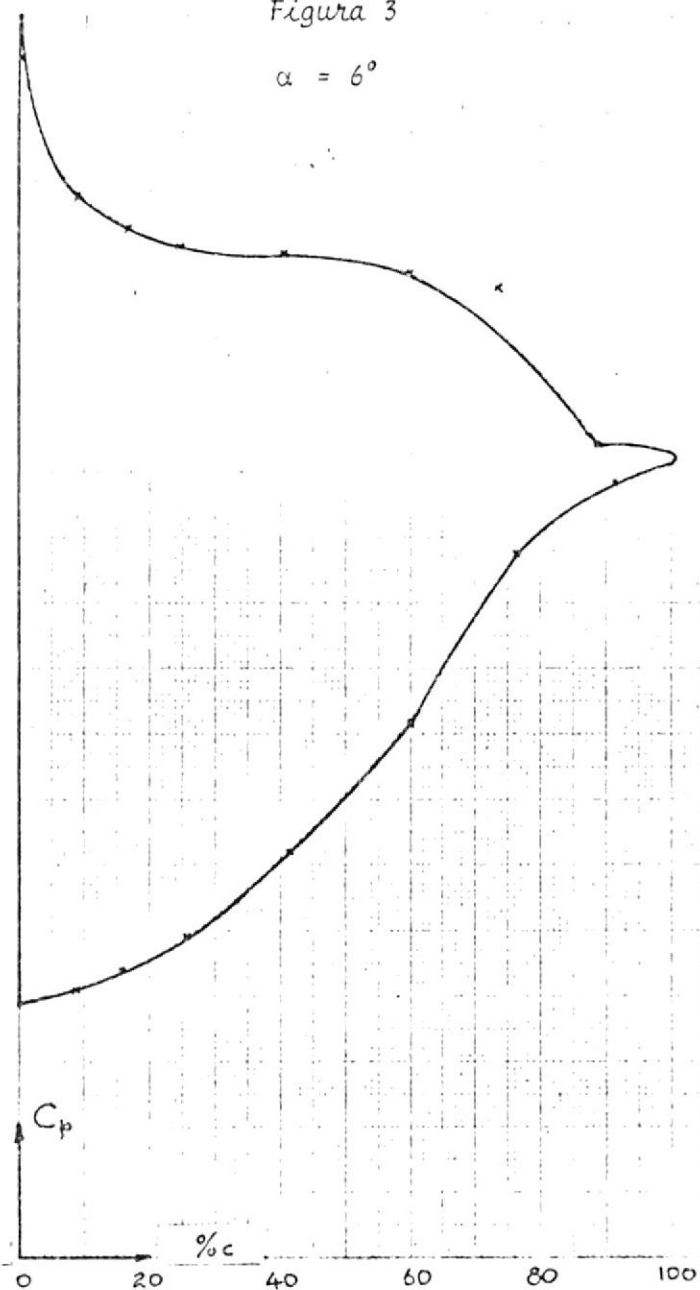
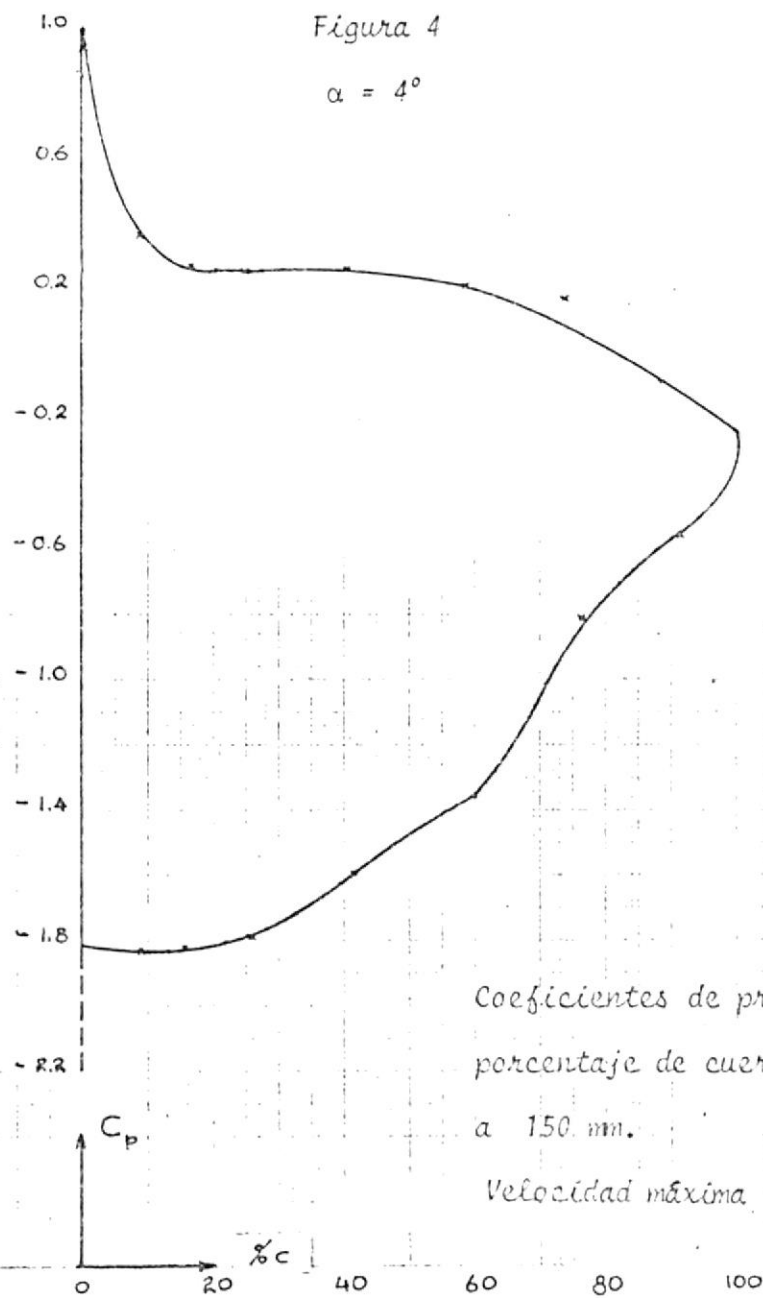


Figura 4

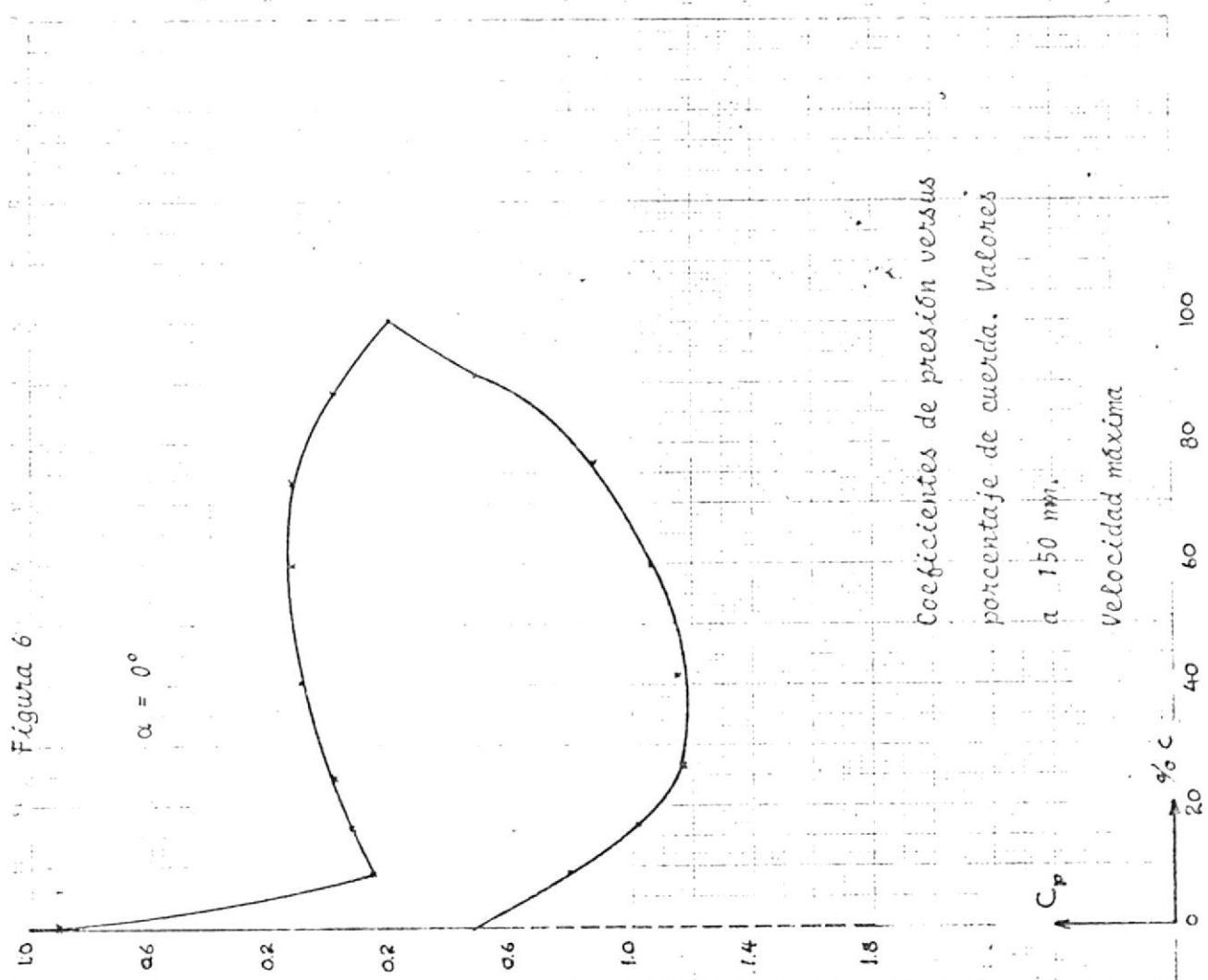
$\alpha = 4^\circ$



Coeficientes de presión versus
porcentaje de cuerda. Valores
a 150 mm.
Velocidad máxima

Figura 6

$\alpha = 0^\circ$



Coefficientes de presión versus porcentaje de cuerda. Valores a 150 m/m. Velocidad máxima

Figura 5

$\alpha = 2^\circ$

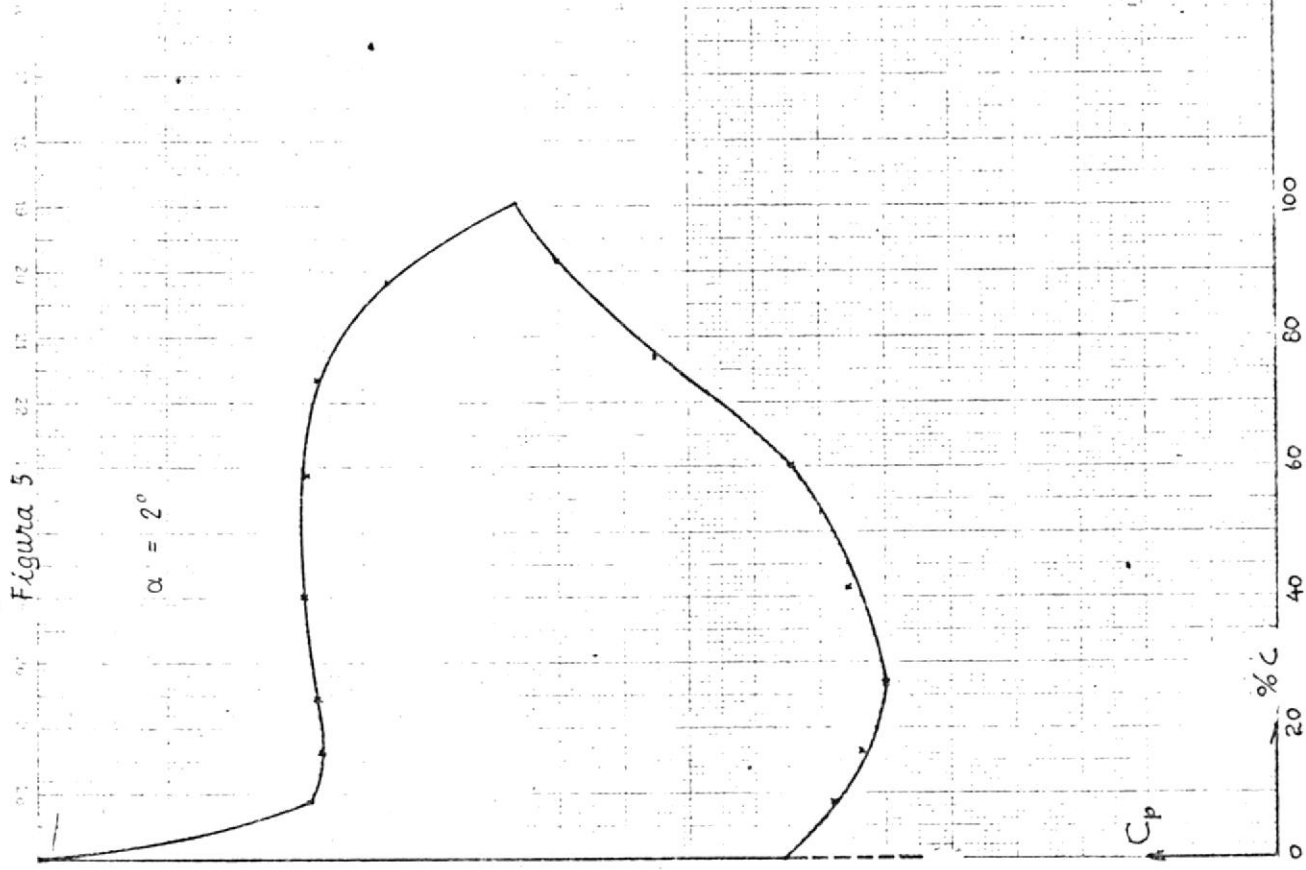


Figura 7

$\alpha = -2^\circ$

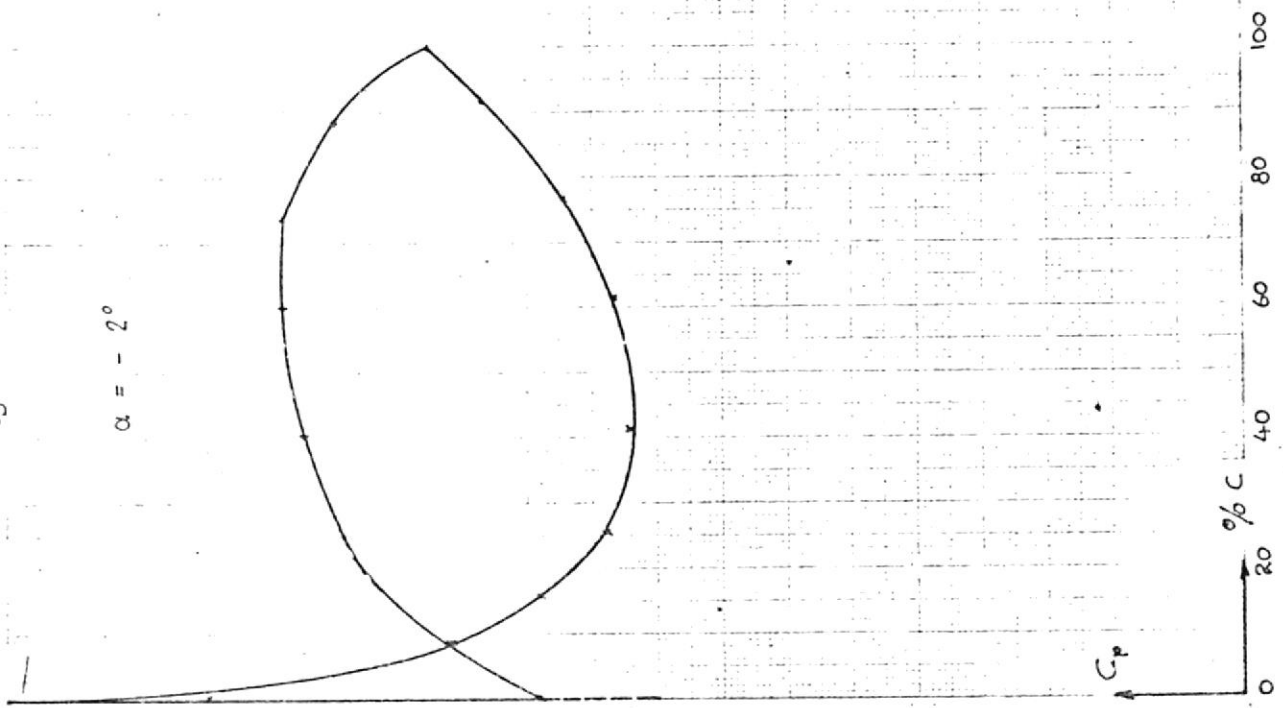
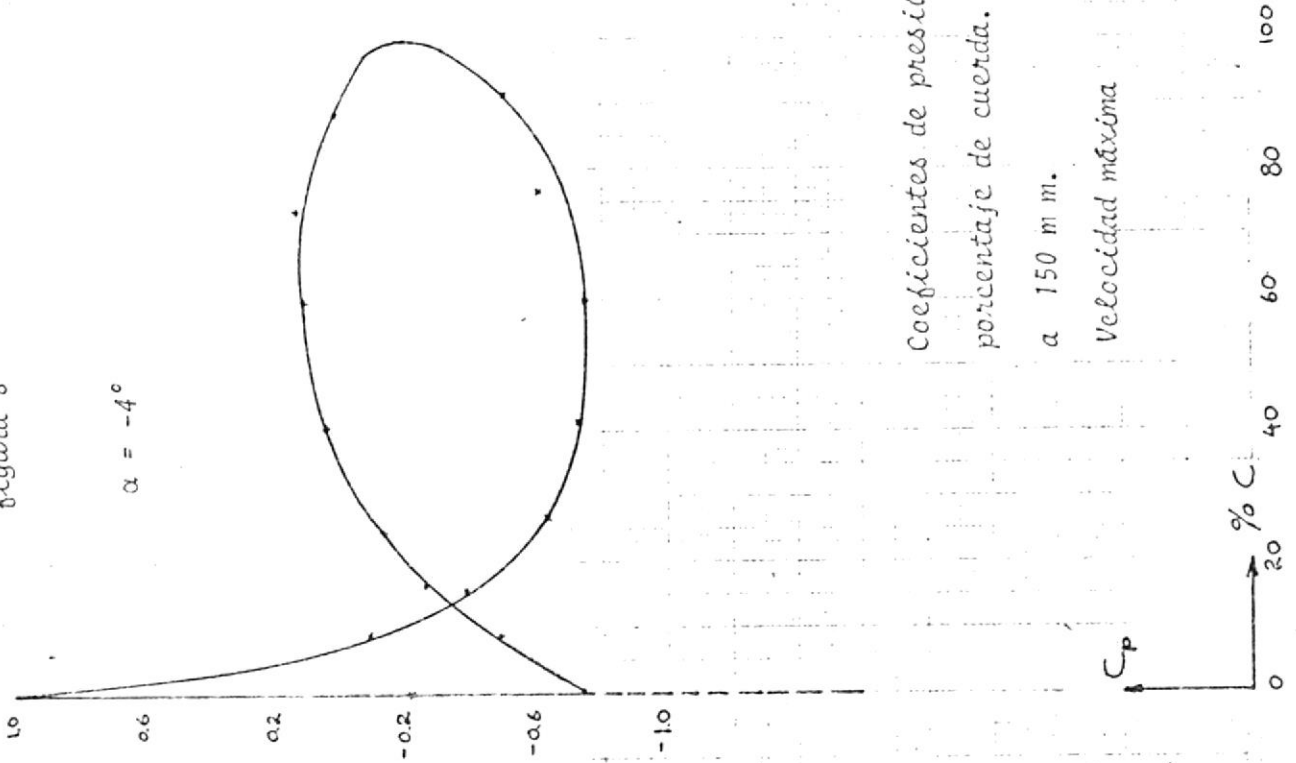


Figura 8

$\alpha = -4^\circ$



Coefficientes de presión versus
porcentaje de cuerda. Valores

a 150 m m.

Velocidad máxima

Figura 9

$\alpha = -6^\circ$

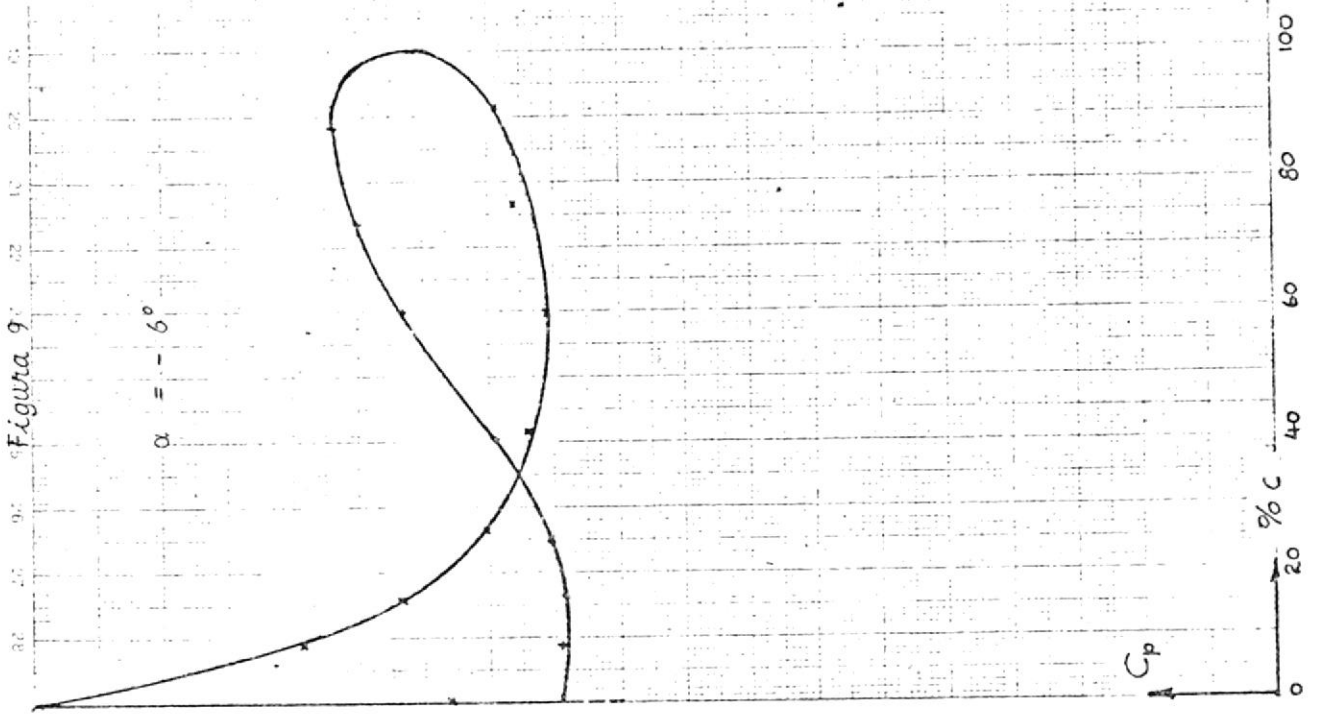
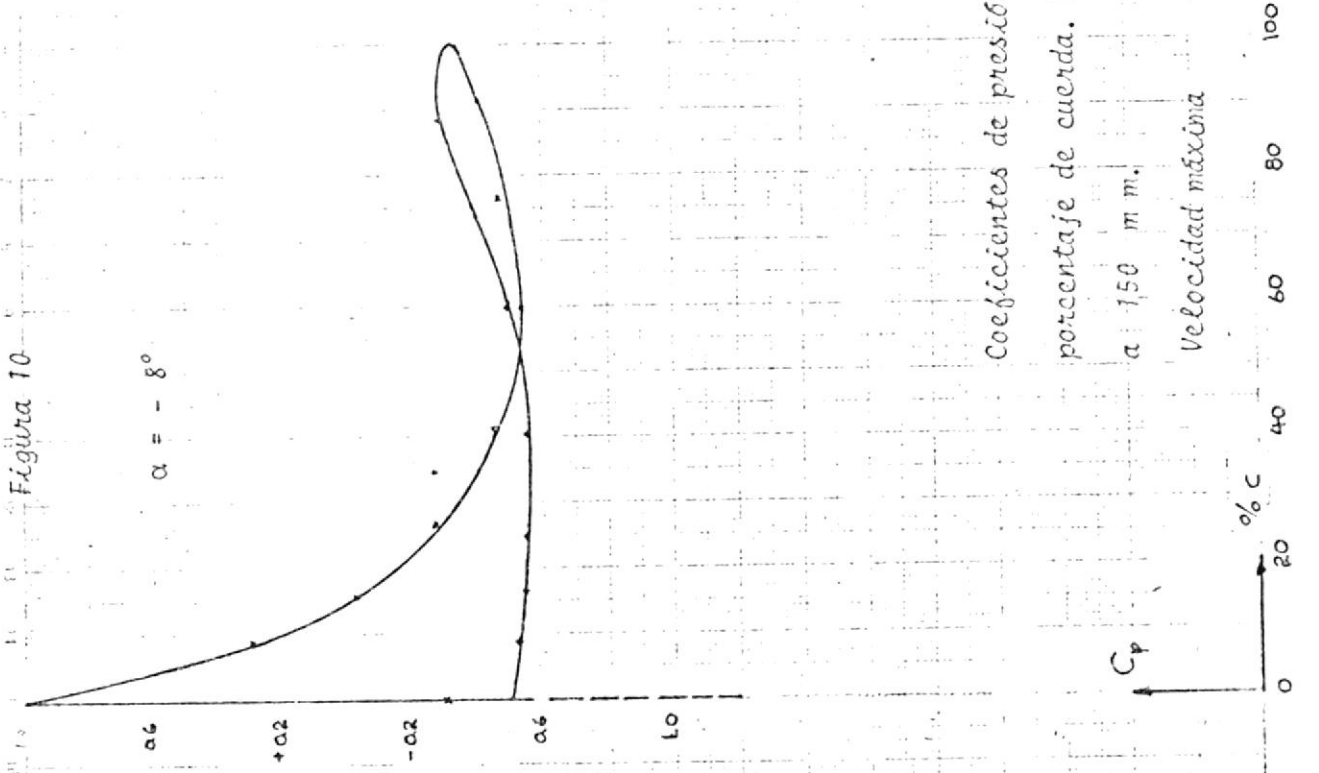


Figura 10

$\alpha = -8^\circ$



Coefficientes de presión versus

porcentaje de cuerda. Valores

a 150 m m.

Velocidad máxima

Coefficientes de presión versus
porcentaje de cuerda. Valores
a 150 m m.
Velocidad máxima

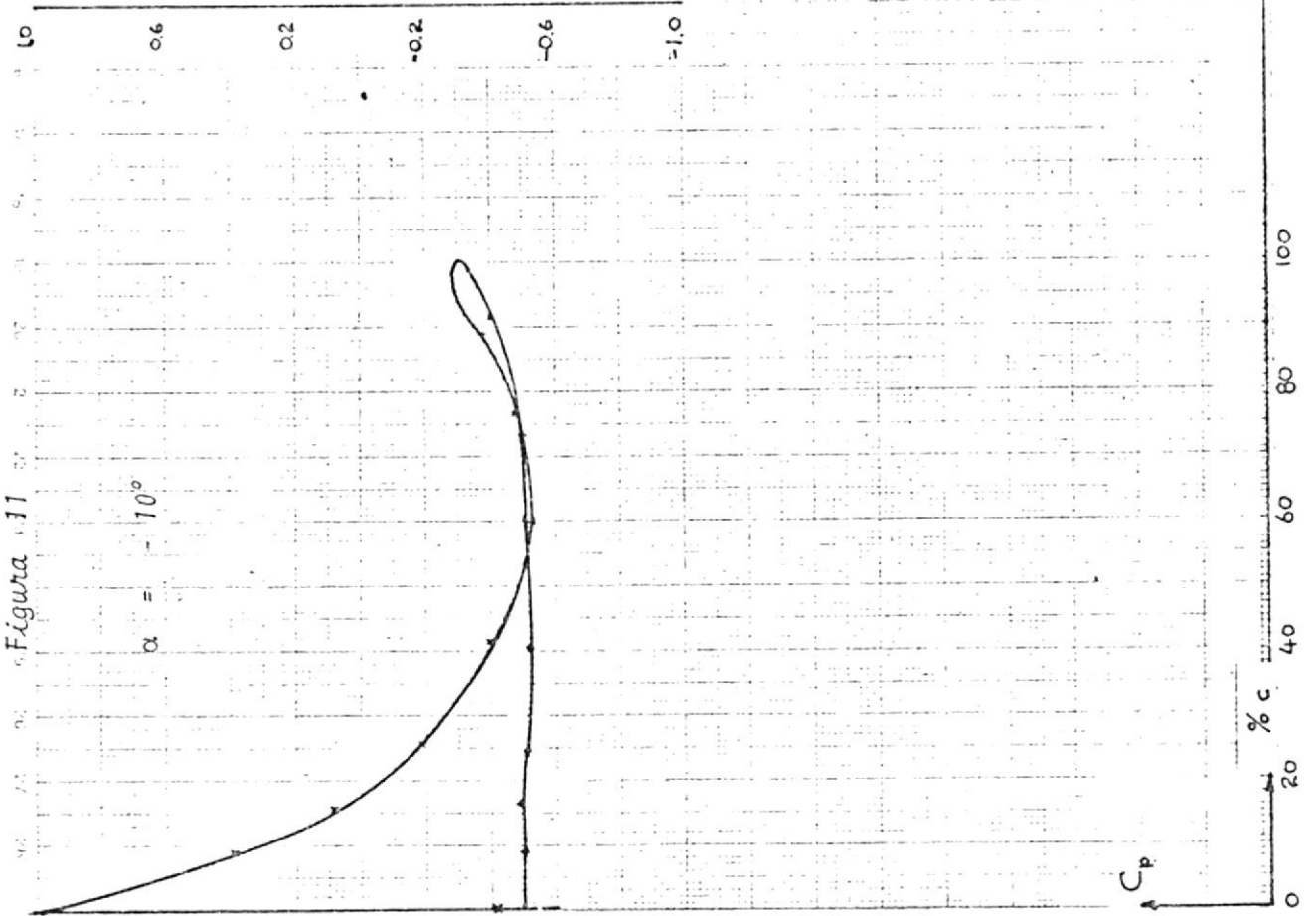


Figura 11

$\alpha = -10^\circ$

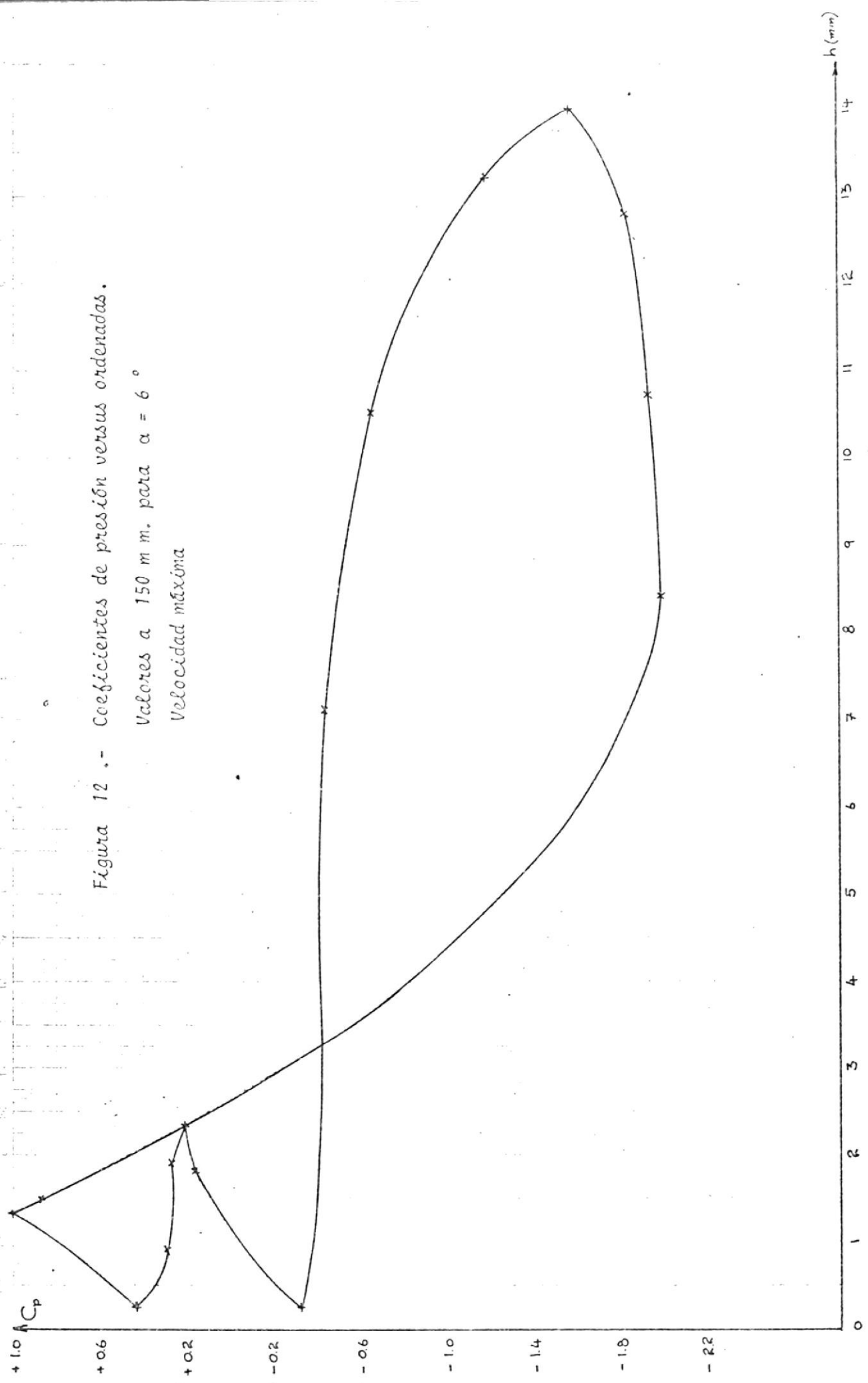


Figura 12 .- Coeficientes de presión versus ordenadas.
 Valores a 150 m m. para $\alpha = 6^\circ$
 Velocidad máxima

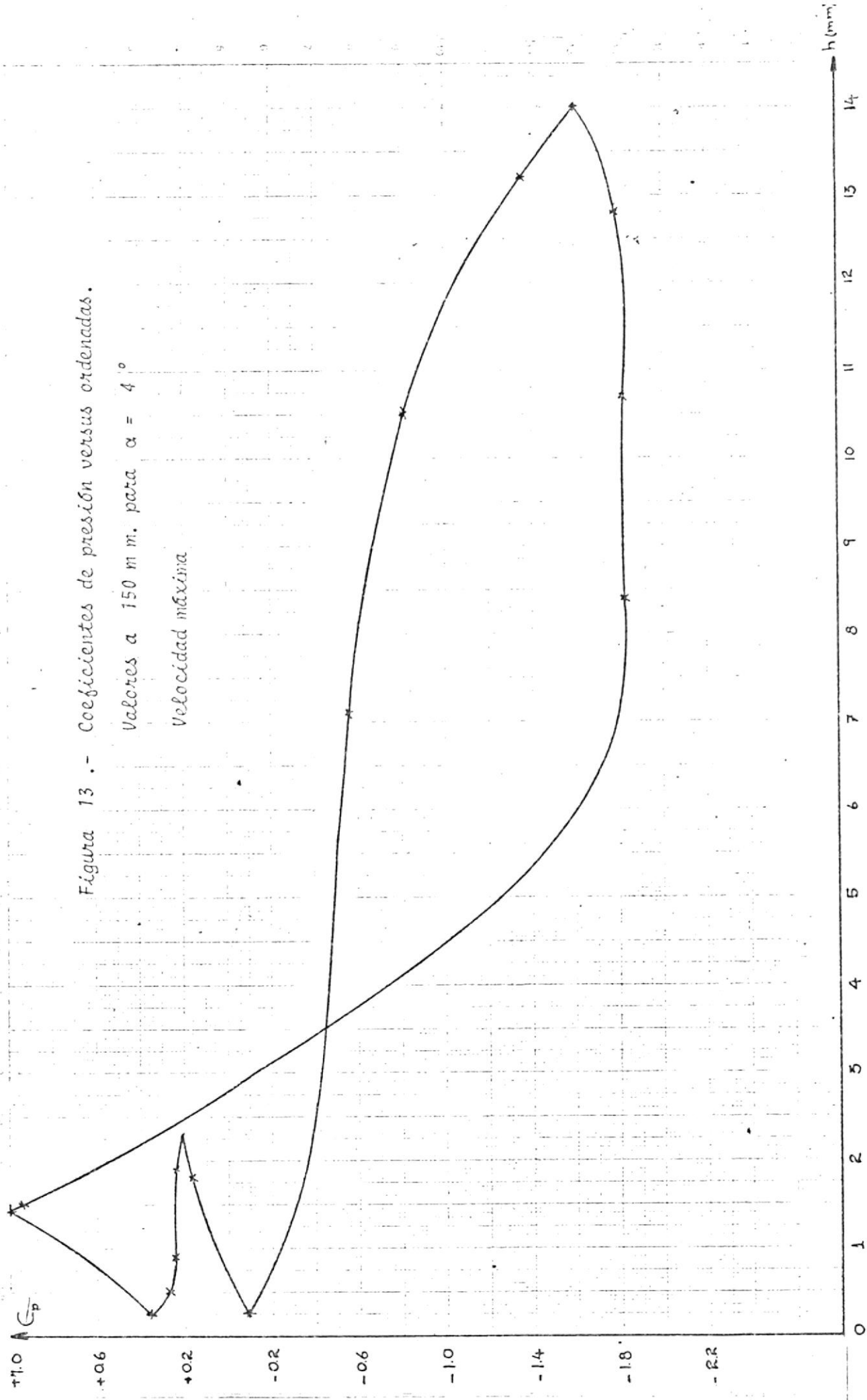


Figura 13.- Coeficientes de presión versus ordenadas.
 Valores a 150 m m. para $\alpha = 4^\circ$
 Velocidad máxima

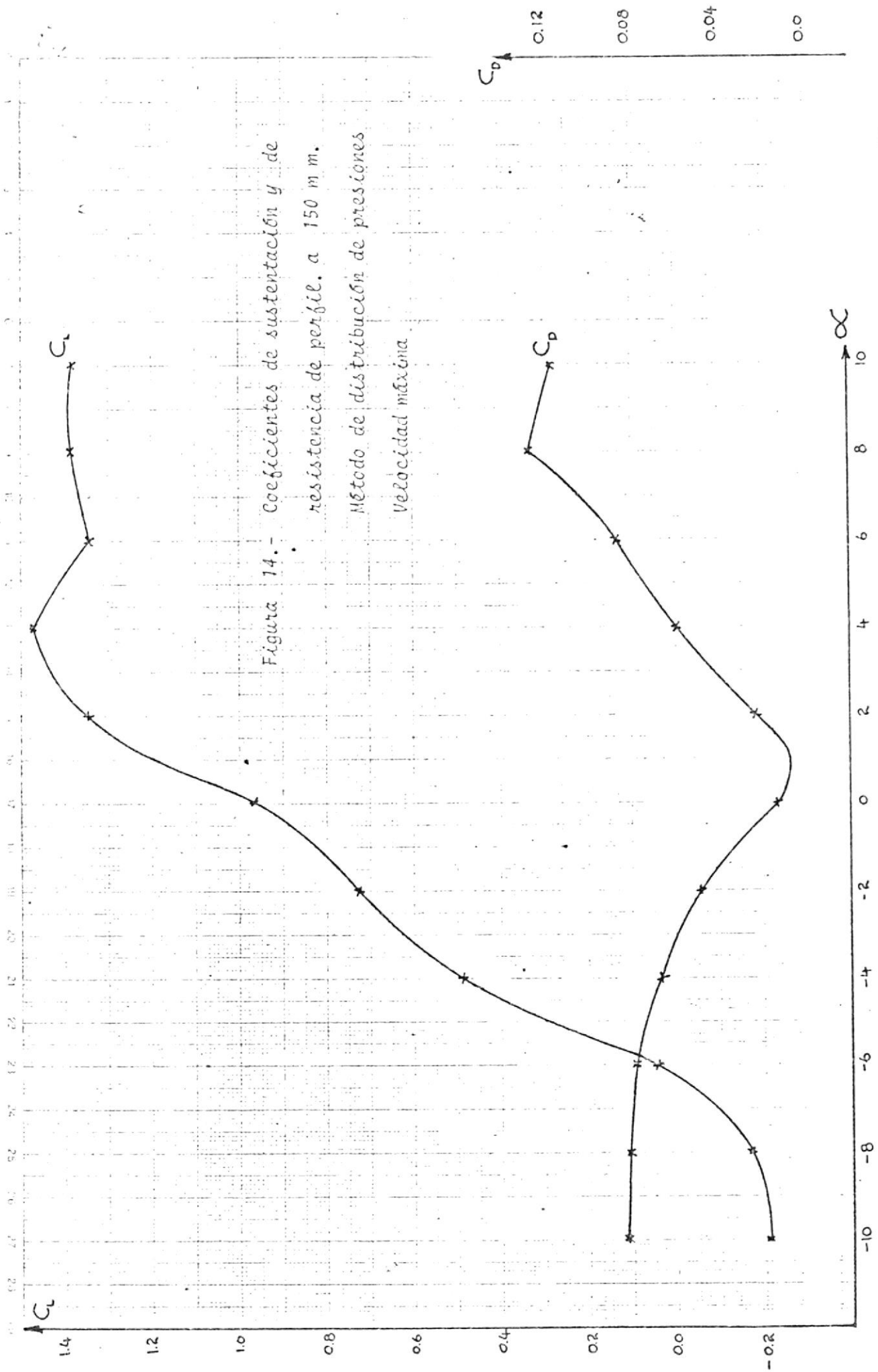


Figura 14.- Coeficientes de sustentación y de resistencia de perfil. a 150 m m.
Método de distribución de presiones
Velocidad máxima

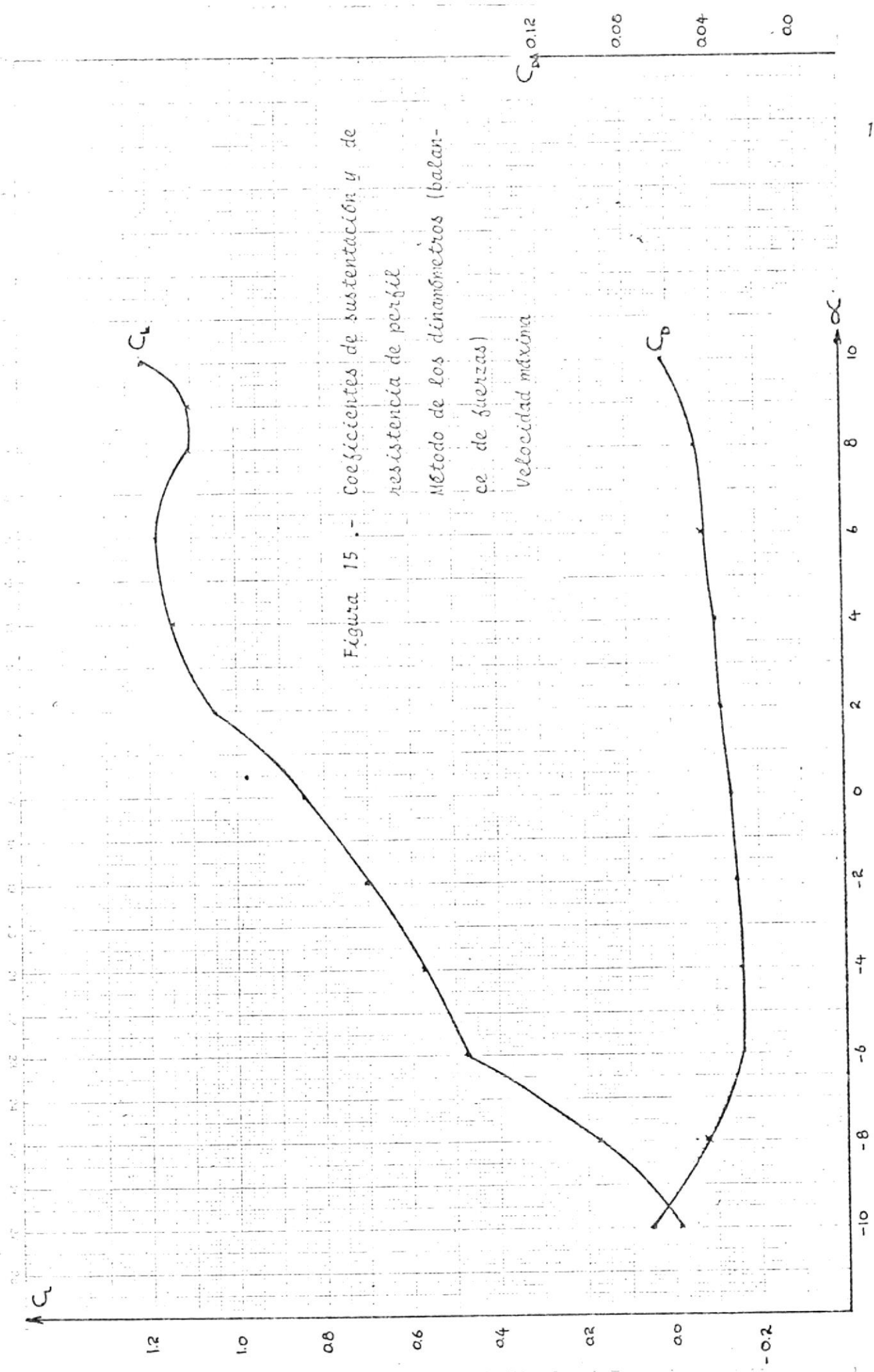


Figura 15. - Coeficientes de sustentación y de resistencia de perfil
 Método de los dinamómetros (balanza de fuerzas)
 Velocidad máxima

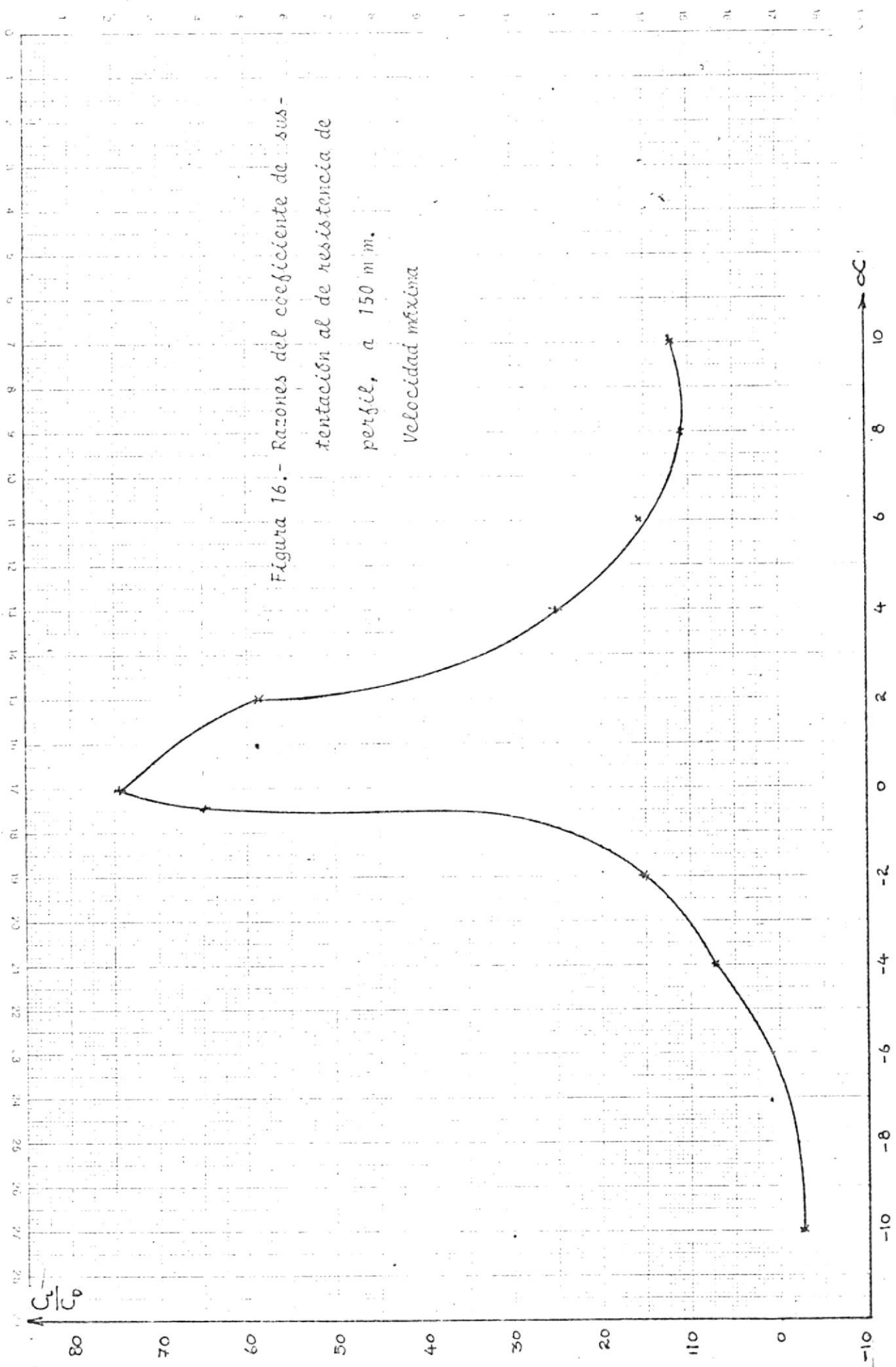


Figura 16.- Razones del coeficiente de sustentación al de resistencia de perfil, a 150 m.m. Velocidad máxima

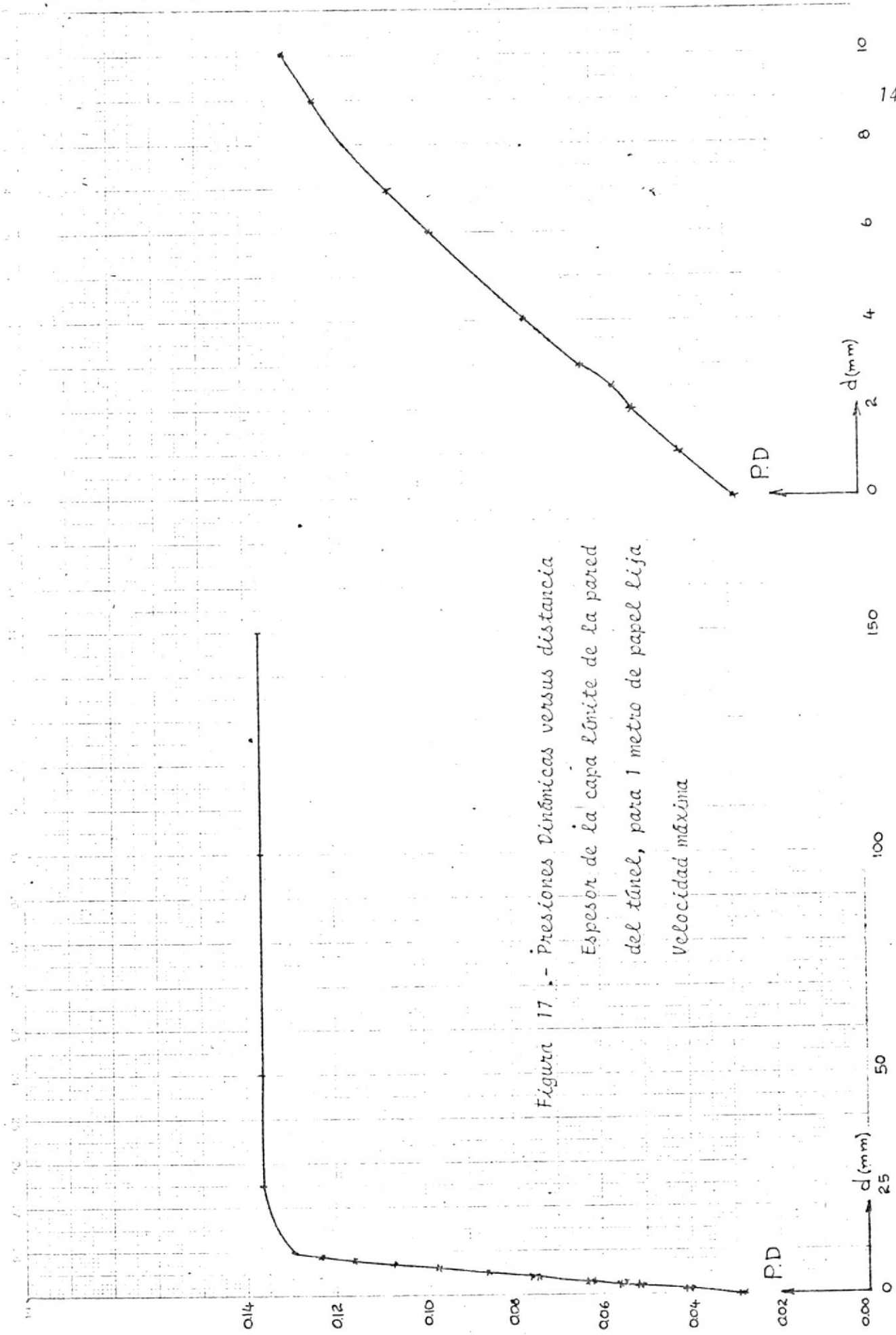


Figura 17 . - Presiones Dinámicas versus distancia
 Espesor de la capa límite de la pared
 del túnel, para 1 metro de papel lija
 Velocidad máxima

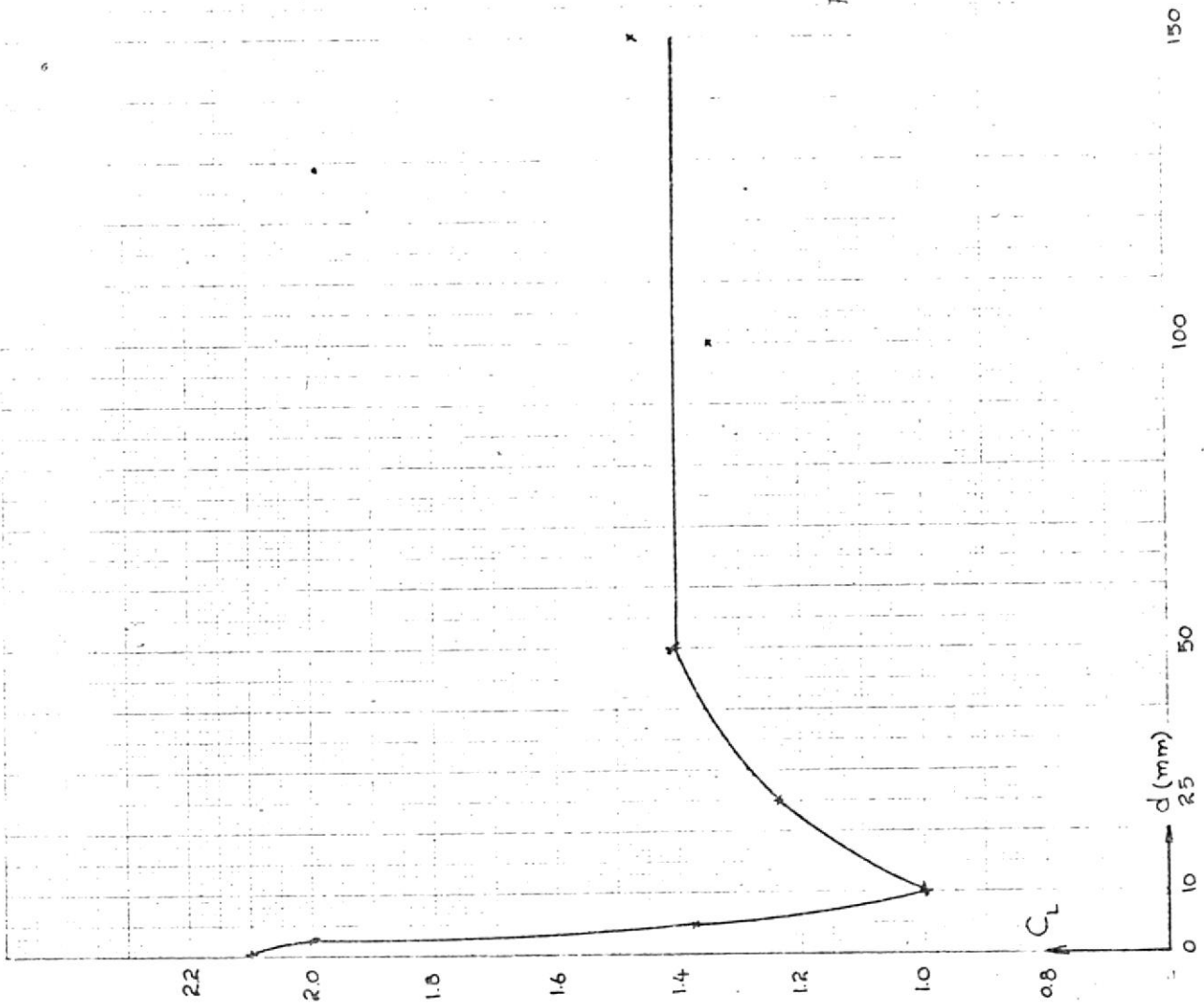


Figura 18.- Coeficientes de sustentación versus distancia, para 1 metro de papel

lija y $\alpha = 4^\circ$
Velocidad máxima.

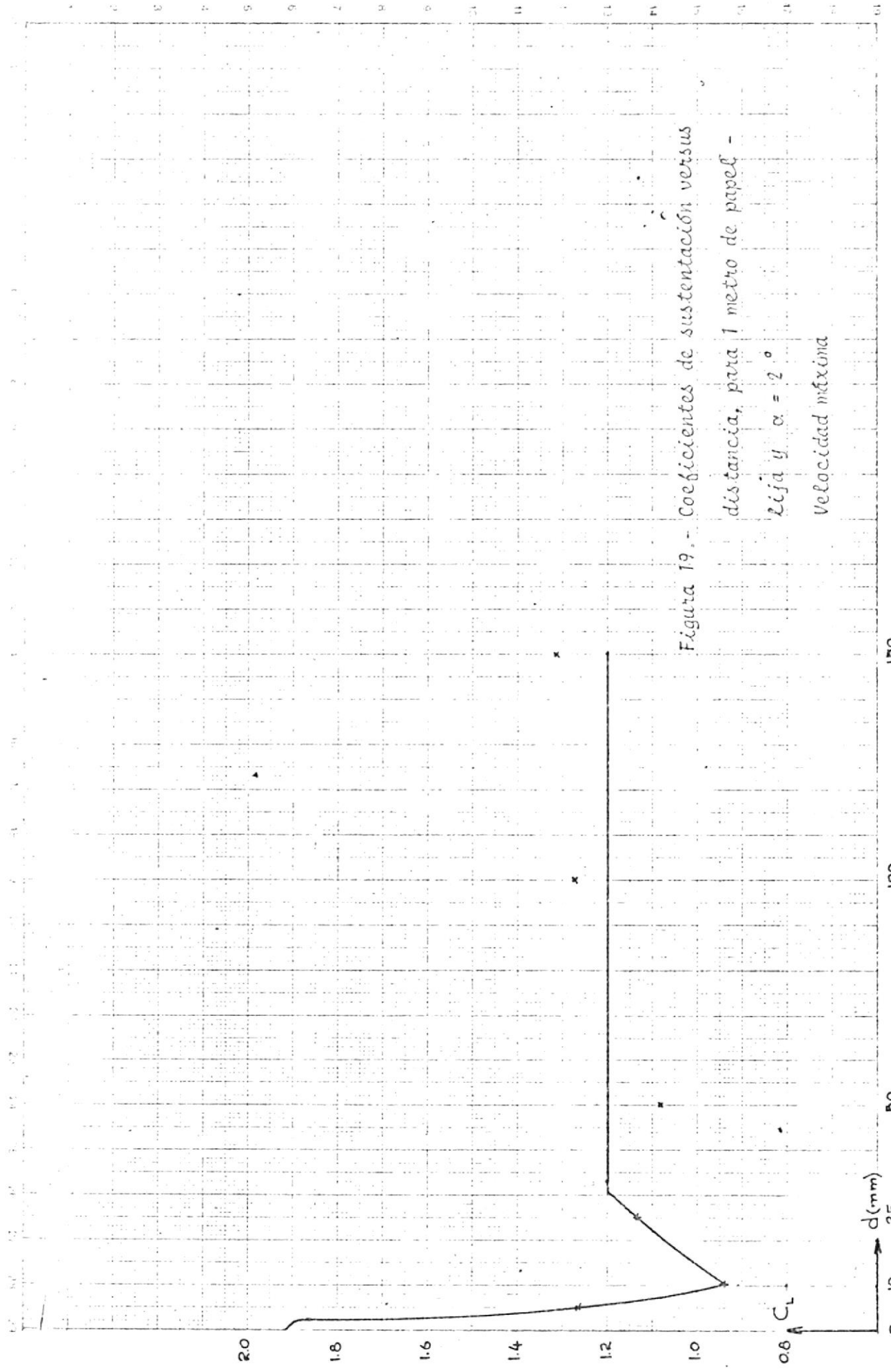
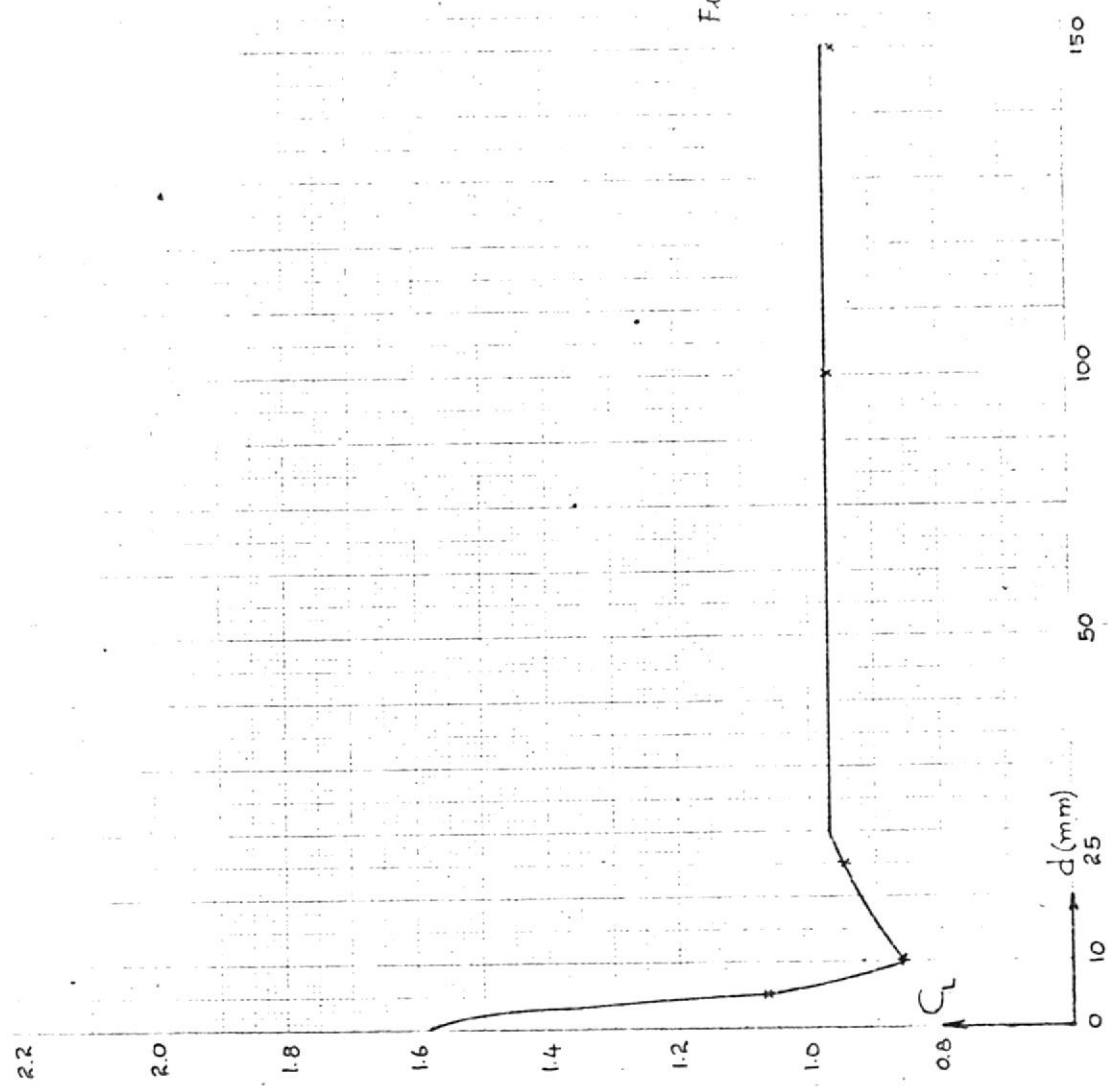


Figura 19. - Coeficientes de sustentación versus distancia, para 1 metro de papel -
lija y $\alpha = 2^\circ$
Velocidad máxima

Figura 20. Coeficientes de sustentación versus distancia, para 1 metro de papel -
lija y $\alpha = 0^\circ$
Velocidad máxima



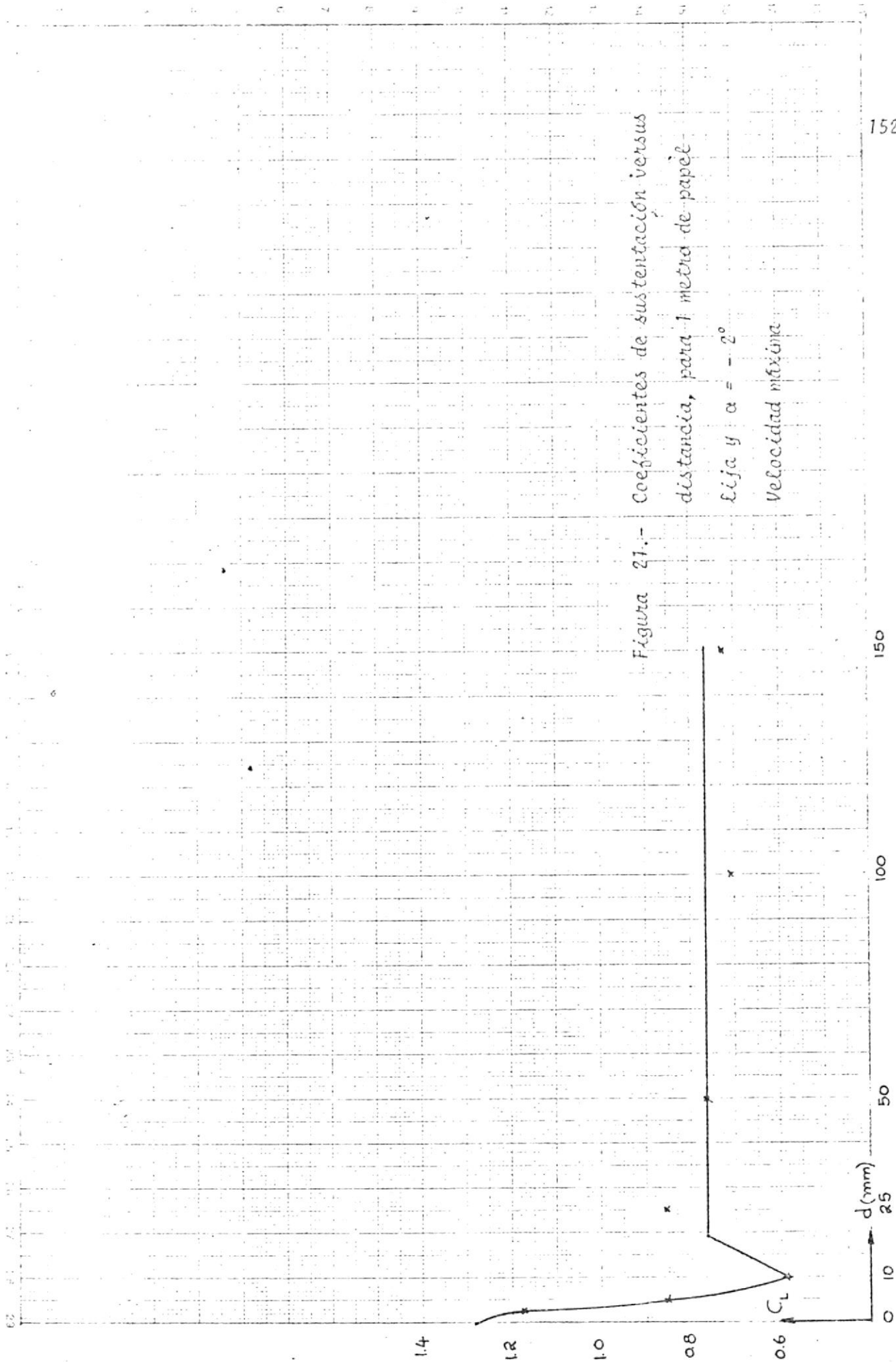


Figura 21.- Coeficientes de sustentación versus distancia, para 1 metro de papel
 Lija y $\alpha = -2^\circ$
 Velocidad máxima

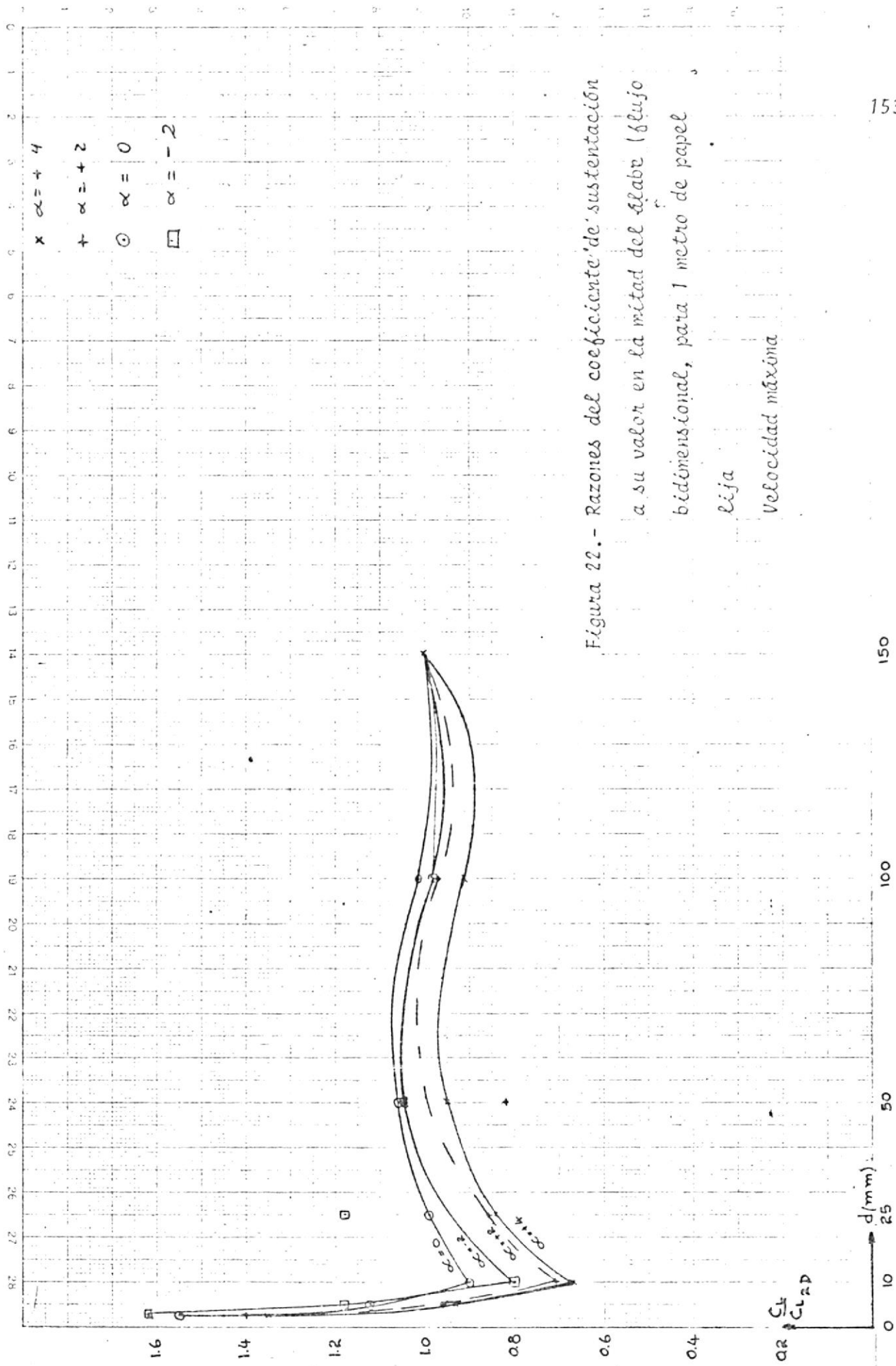


Figura 22.- Razones del coeficiente de sustentación
 a su valor en la mitad del glabe (flujo
 bidimensional, para 1 metro de papel
 lija
 Velocidad máxima

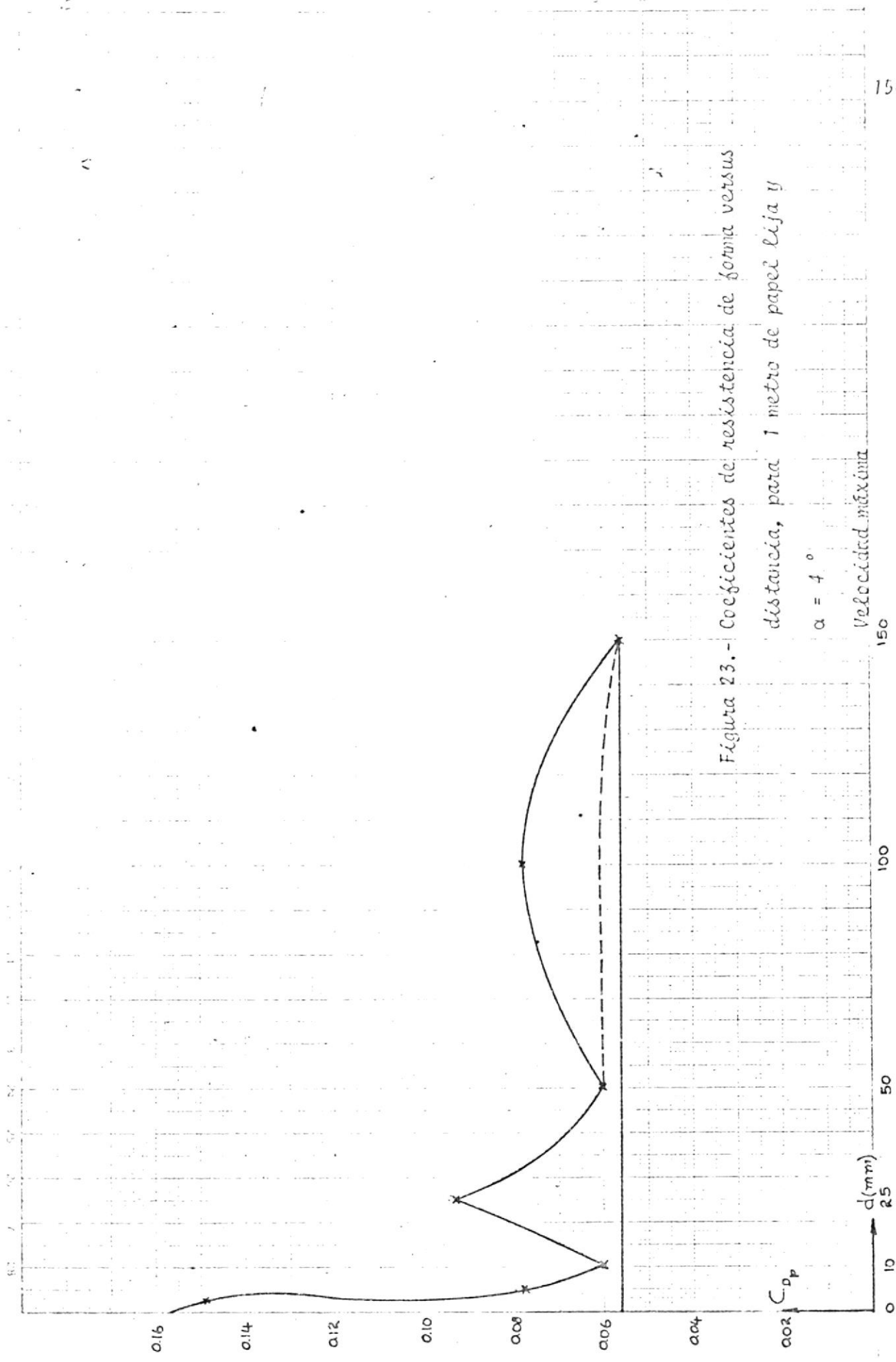


Figura 23.- Coeficientes de resistencia de forma versus distancia, para 1 metro de papel lija y $\alpha = 4^\circ$

Velocidad máxima

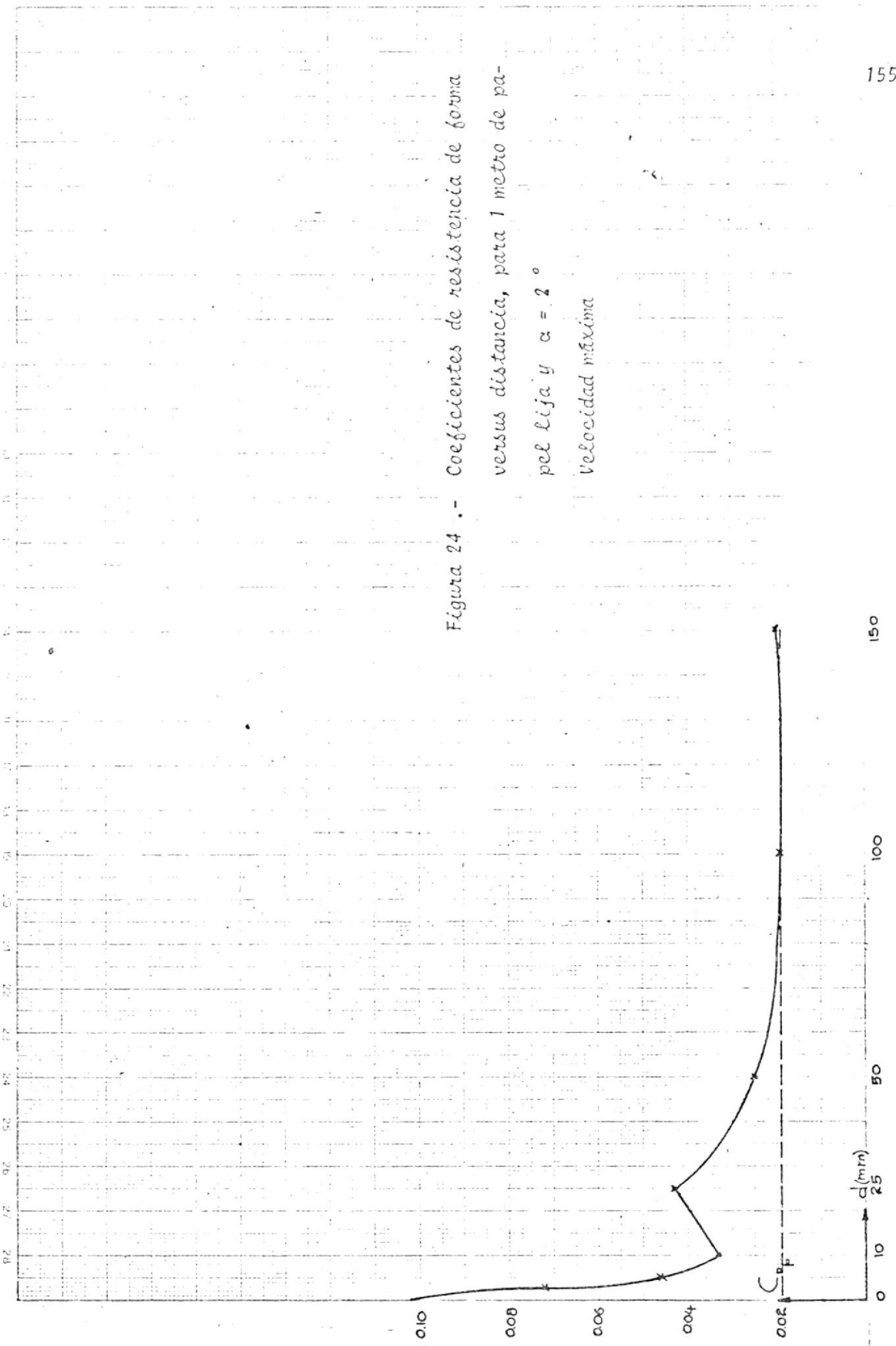


Figura 24 .- Coeficientes de resistencia de forma
 versus distancia, para 1 metro de pa-
 pel lija y $\alpha = 2^\circ$
 Velocidad máxima

Figura 25.- Coeficientes de resistencia de forma
versus distancia, para 1 metro de pa-
pel lija y $\alpha = 0^\circ$
Velocidad máxima

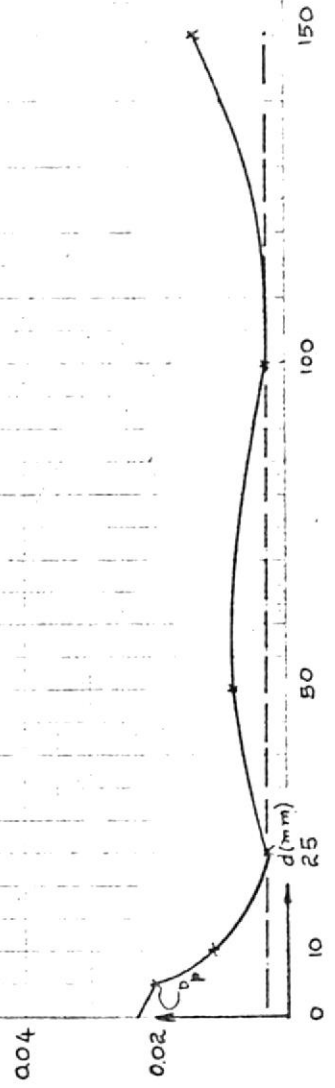
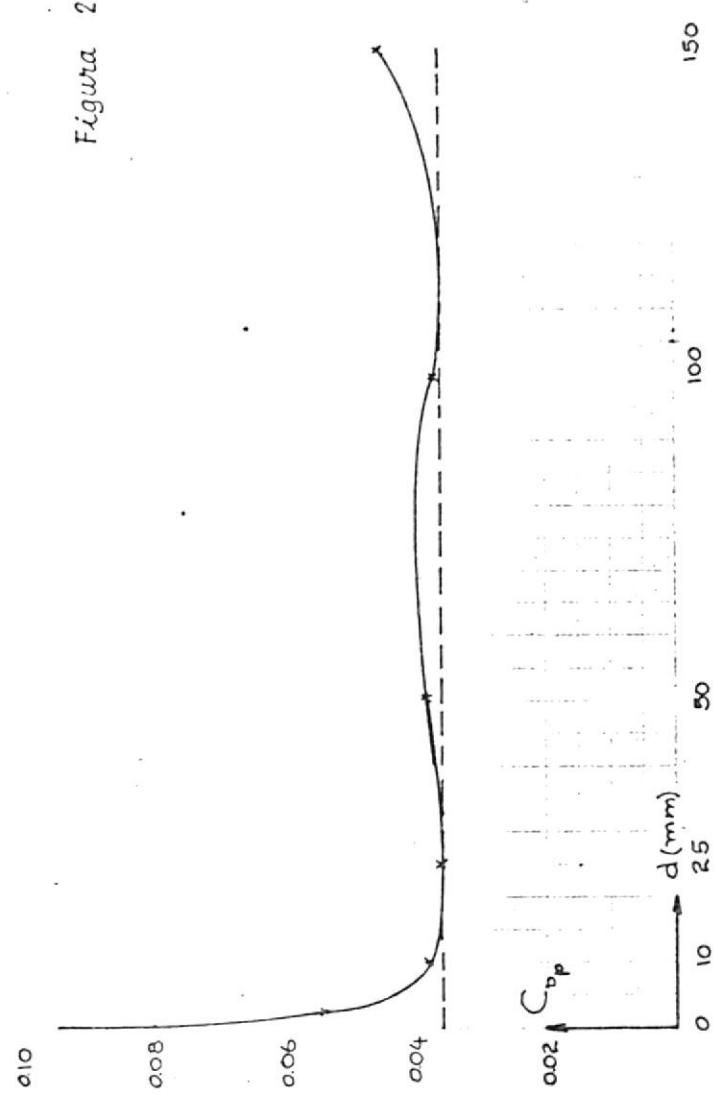


Figura 26 .- Coeficientes de resistencia de forma versus distancia, para 1 metro de papel lija y $\alpha = 2^\circ$.
Velocidad máxima



$\times \quad \alpha = +4$
 $+ \quad \alpha = +2$
 $\odot \quad \alpha = 0$
 $\square \quad \alpha = -2$

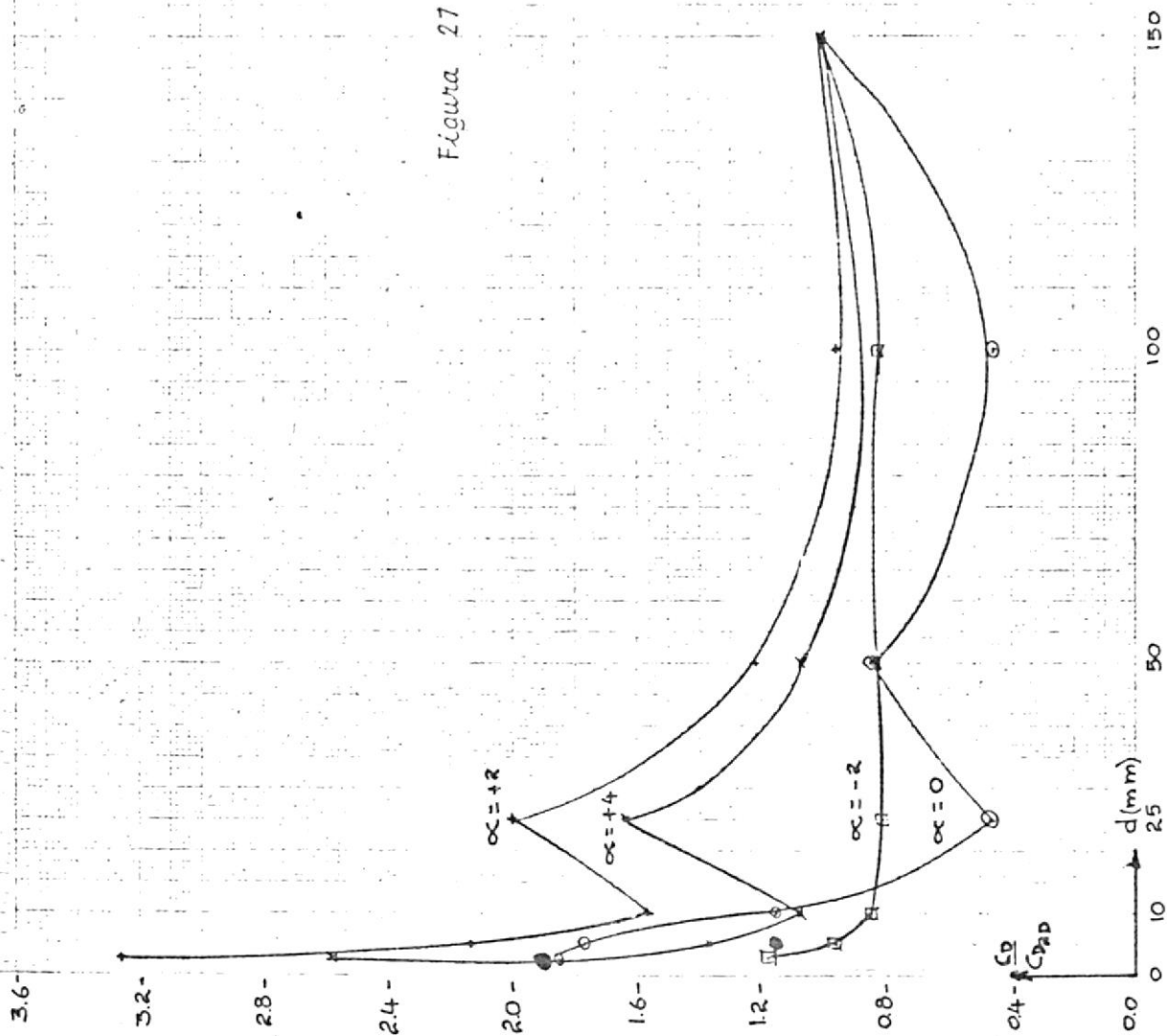
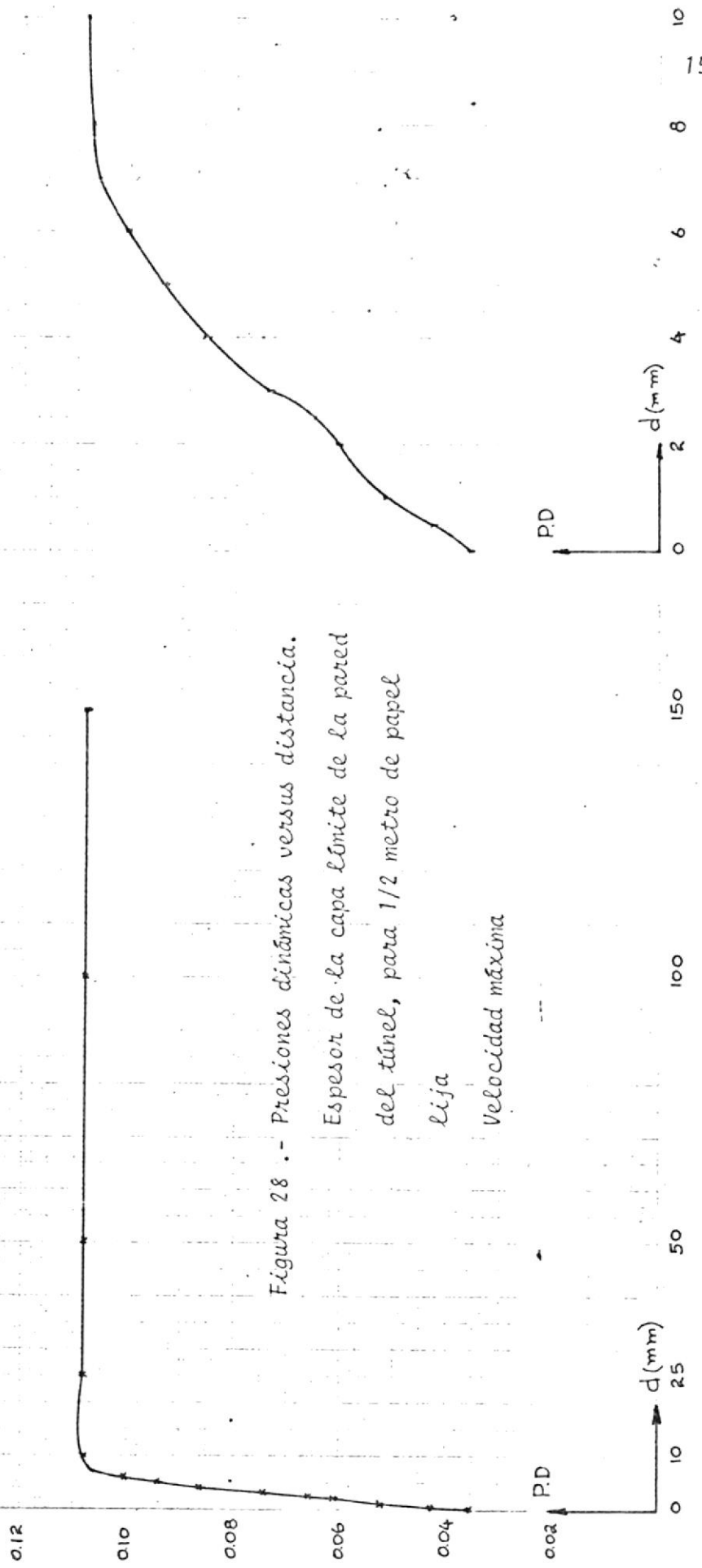


Figura 27. - Razones del coeficiente de resistencia de forma a su valor en la mitad del alabe (flujo bidimensional), para 1 metro de papel lija Velocidad máxima

2.9 → .071
 5.4 → .0965



*Figura 28 . - Presiones dinámicas versus distancia.
 Espesor de la capa límite de la pared
 del túnel, para 1/2 metro de papel
 lija
 Velocidad máxima*

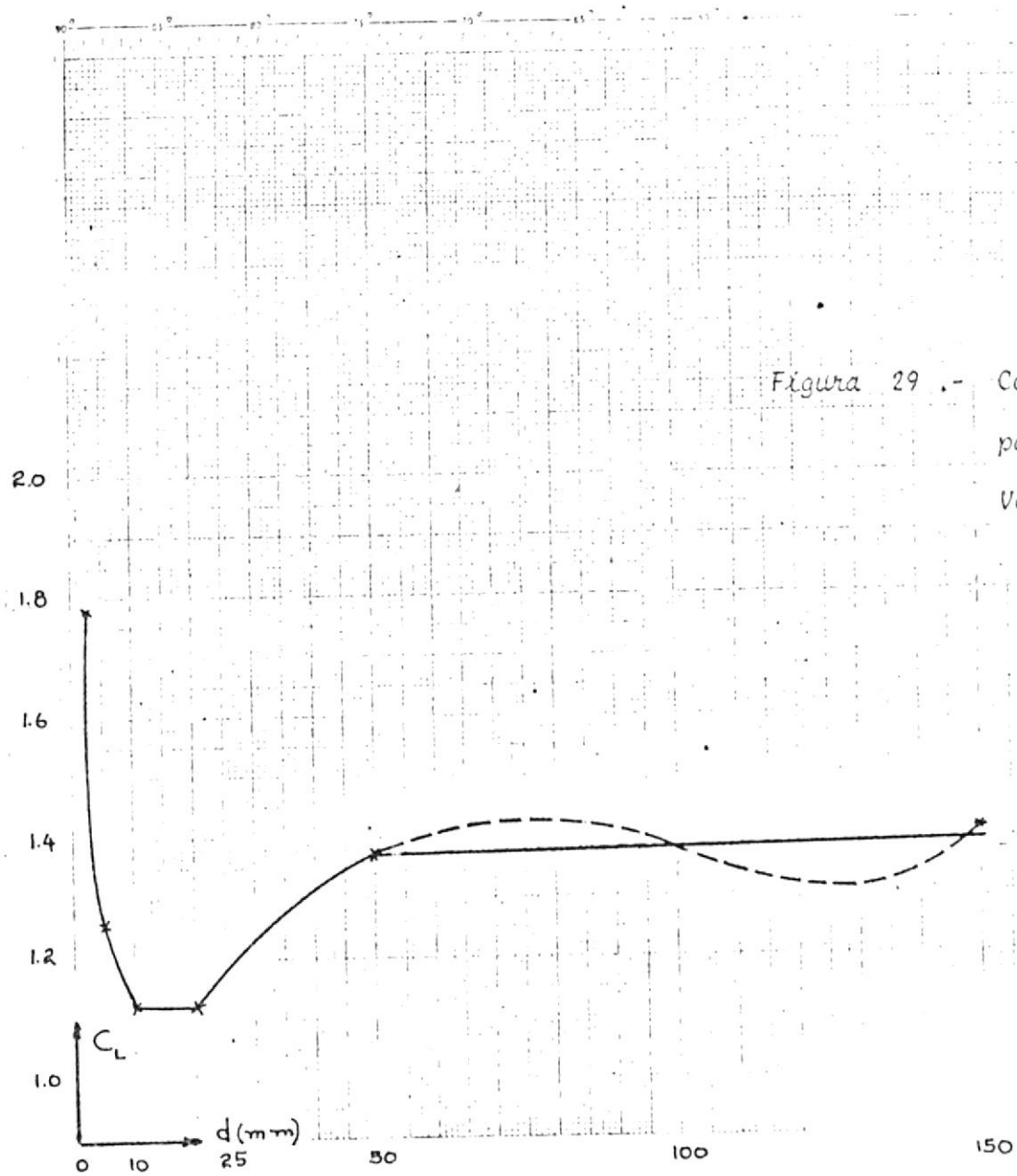
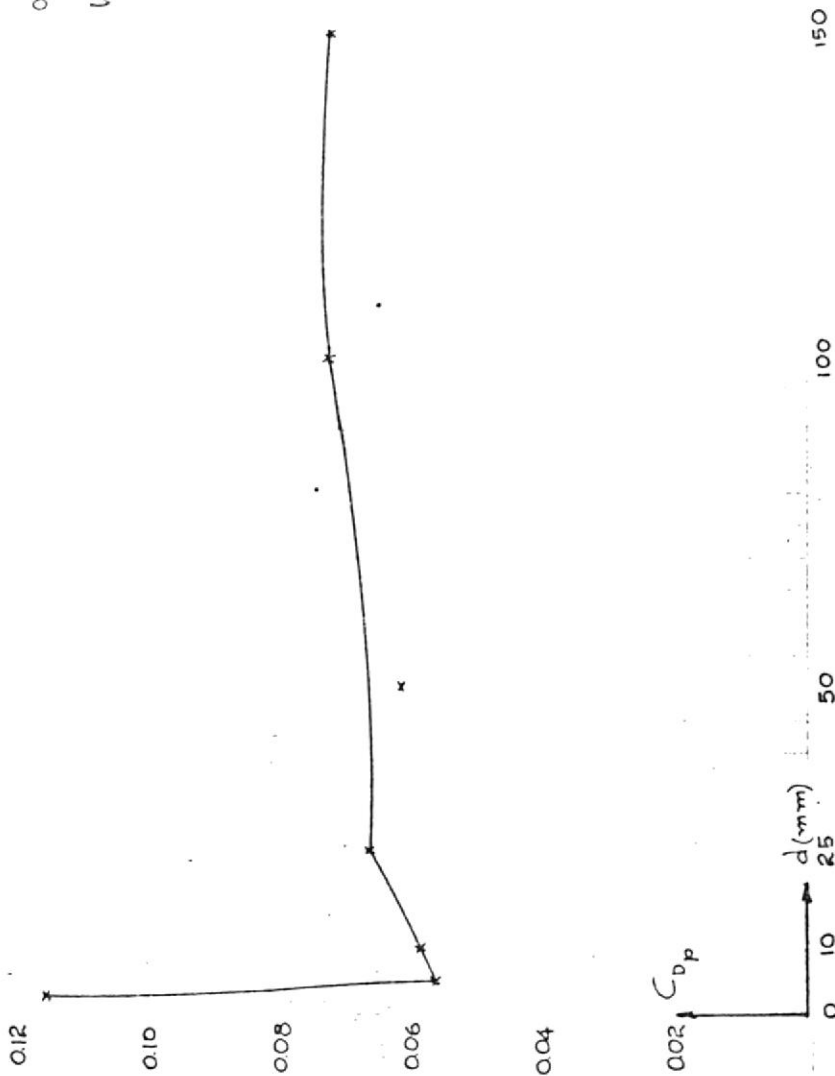


Figura 30 .- Coeficientes de resistencia de forma versus distancia, para 1/2 metro de papel lija y $\alpha = 4^\circ$

Velocidad máxima



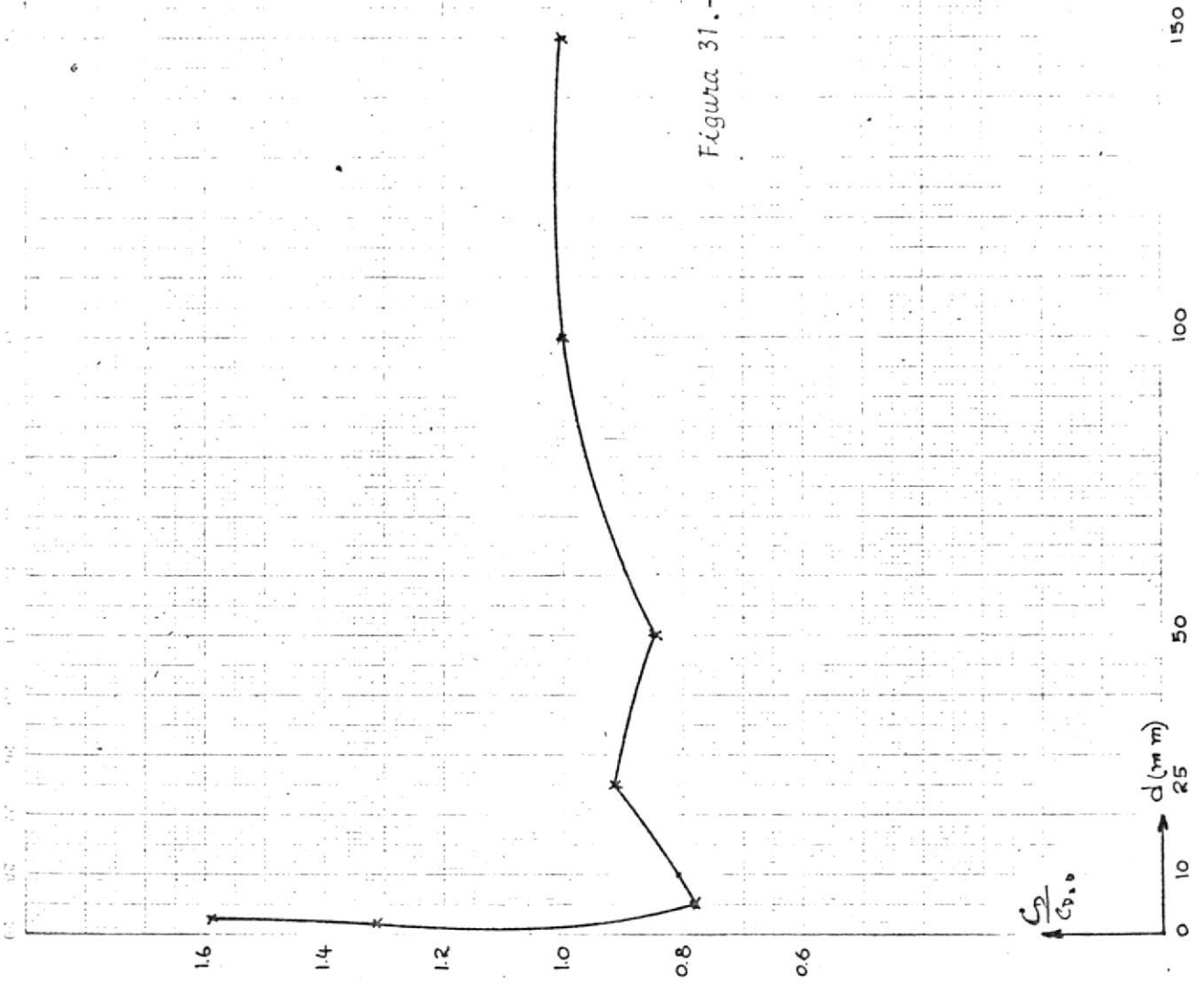


Figura 31.- Razones del coeficiente de resistencia de forma a su valor en la mitad del alabe (flujo bidimensional), para 1/2 metro de

línea y $\alpha = 4^\circ$
Velocidad máxima

$\alpha = +4^\circ$ V_{max} 1 mt lija
 $\alpha = +4^\circ$ V_{max} $\frac{1}{2}$ mt lija

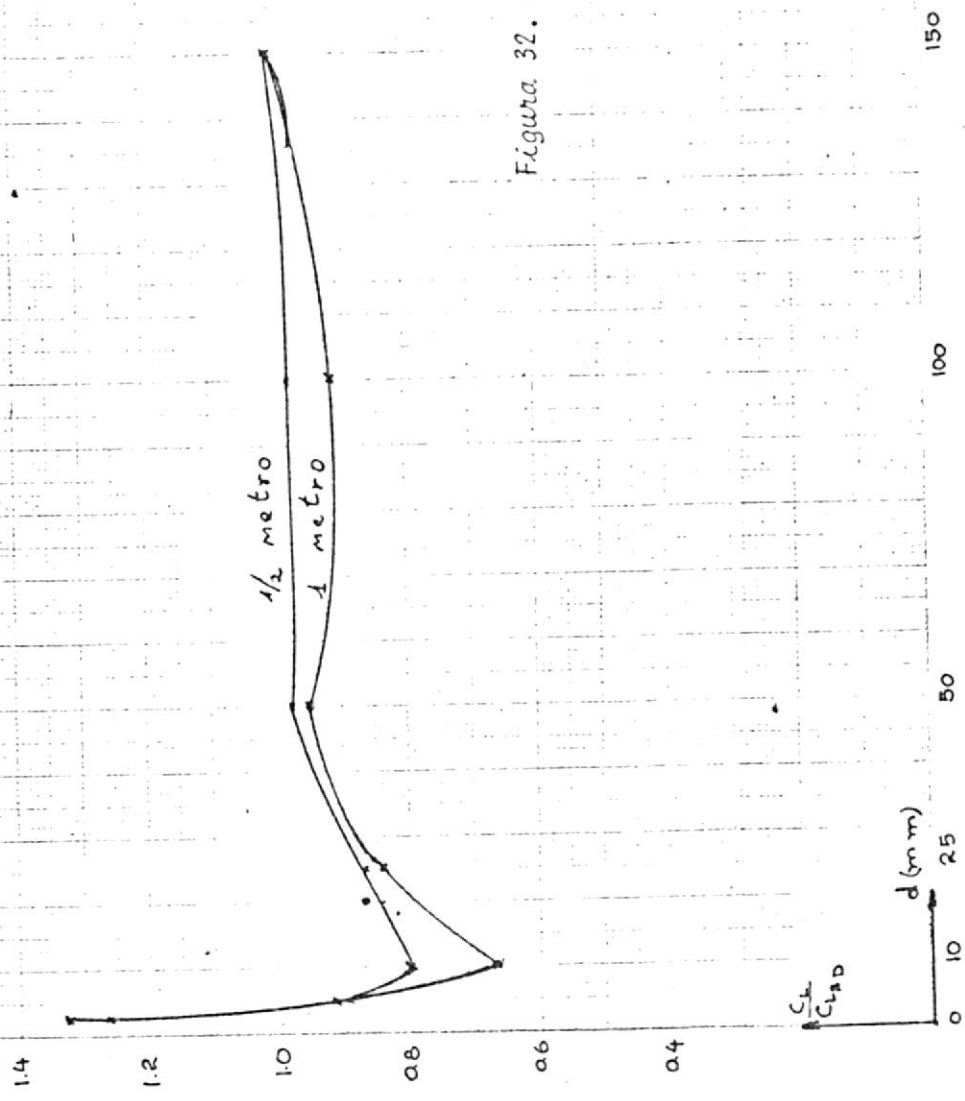


Figura 32. - Razones del coeficiente de sustentación a su valor en la mitad del alabe, para $\alpha = 4^\circ$
 Comparación para 1 metro y 1/2 metro de papel lija
 Velocidad máxima

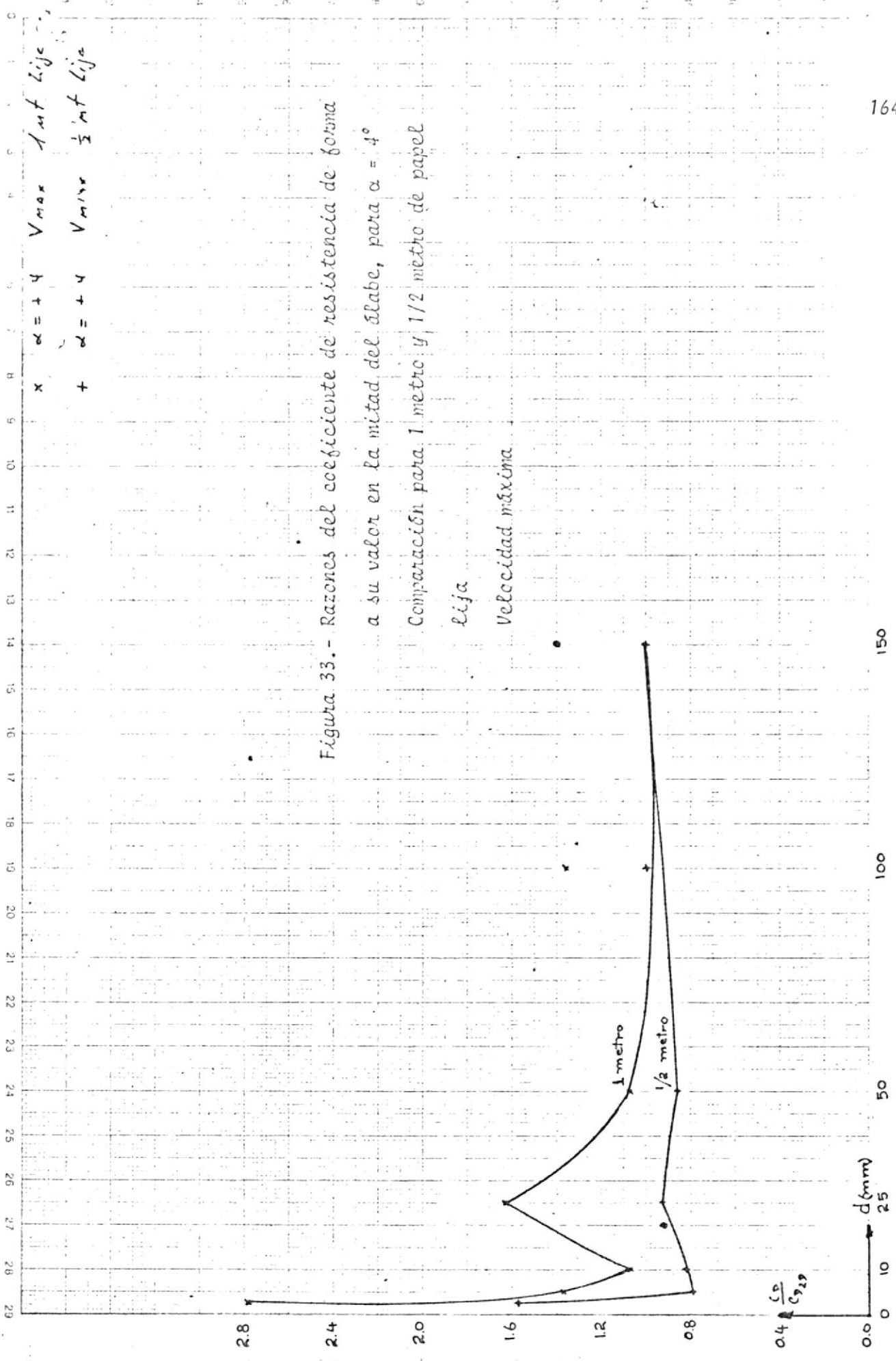


Figura 33.- Razones del coeficiente de resistencia de forma

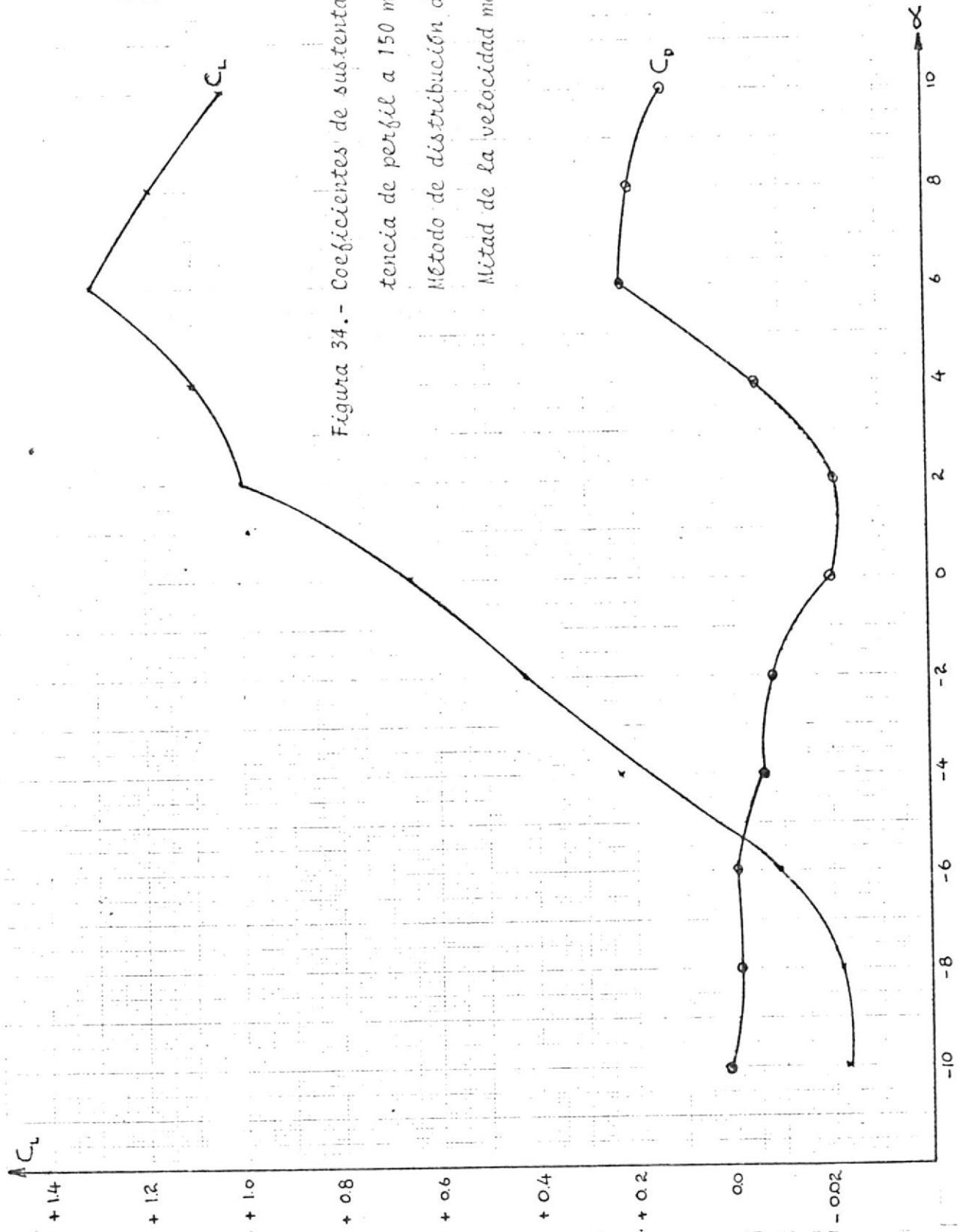
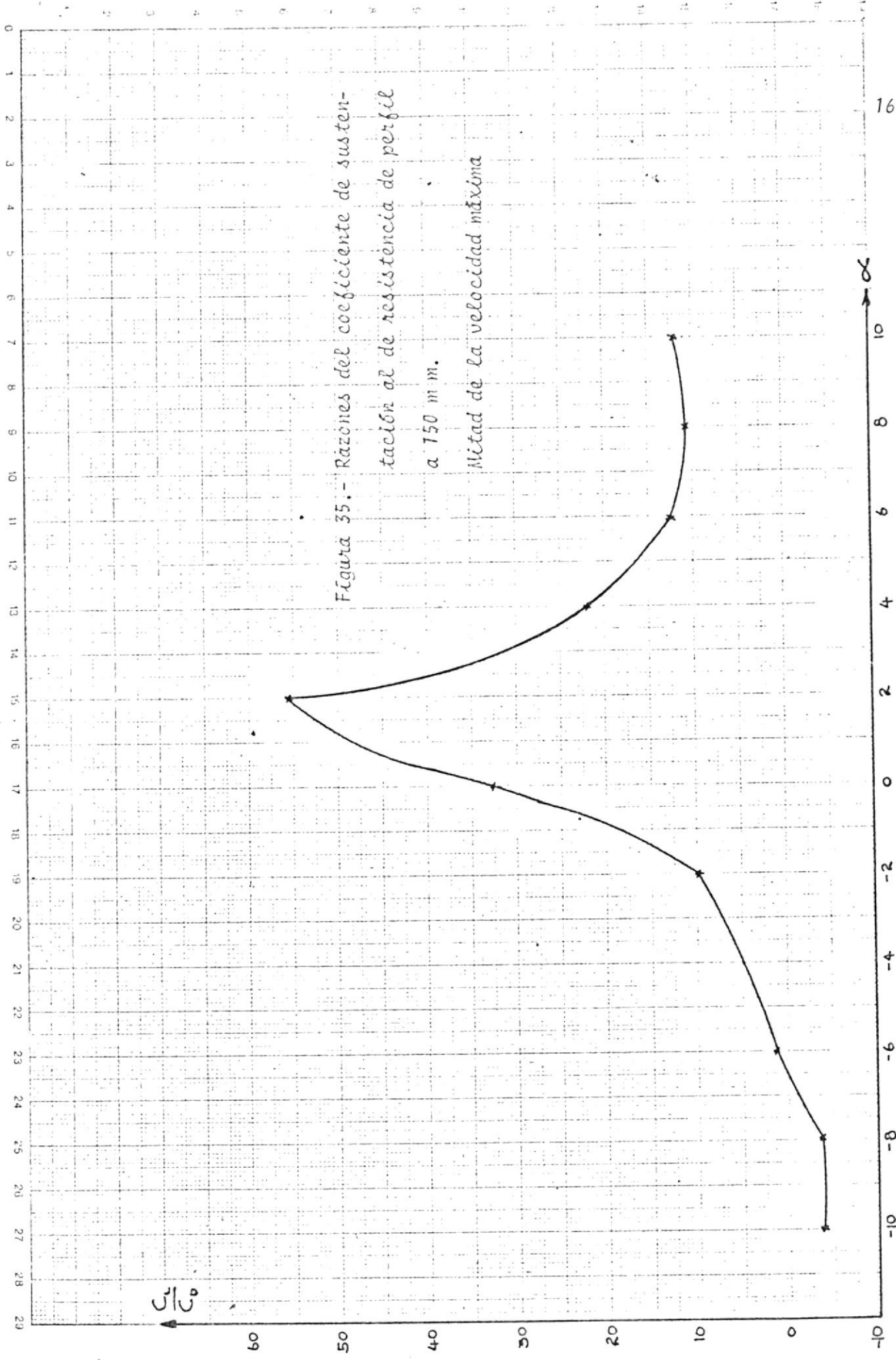


Figura 34.- Coeficientes de sustentación y de resistencia de perfil a 150 m m.
 Método de distribución de presiones
 Mitad de la velocidad máxima

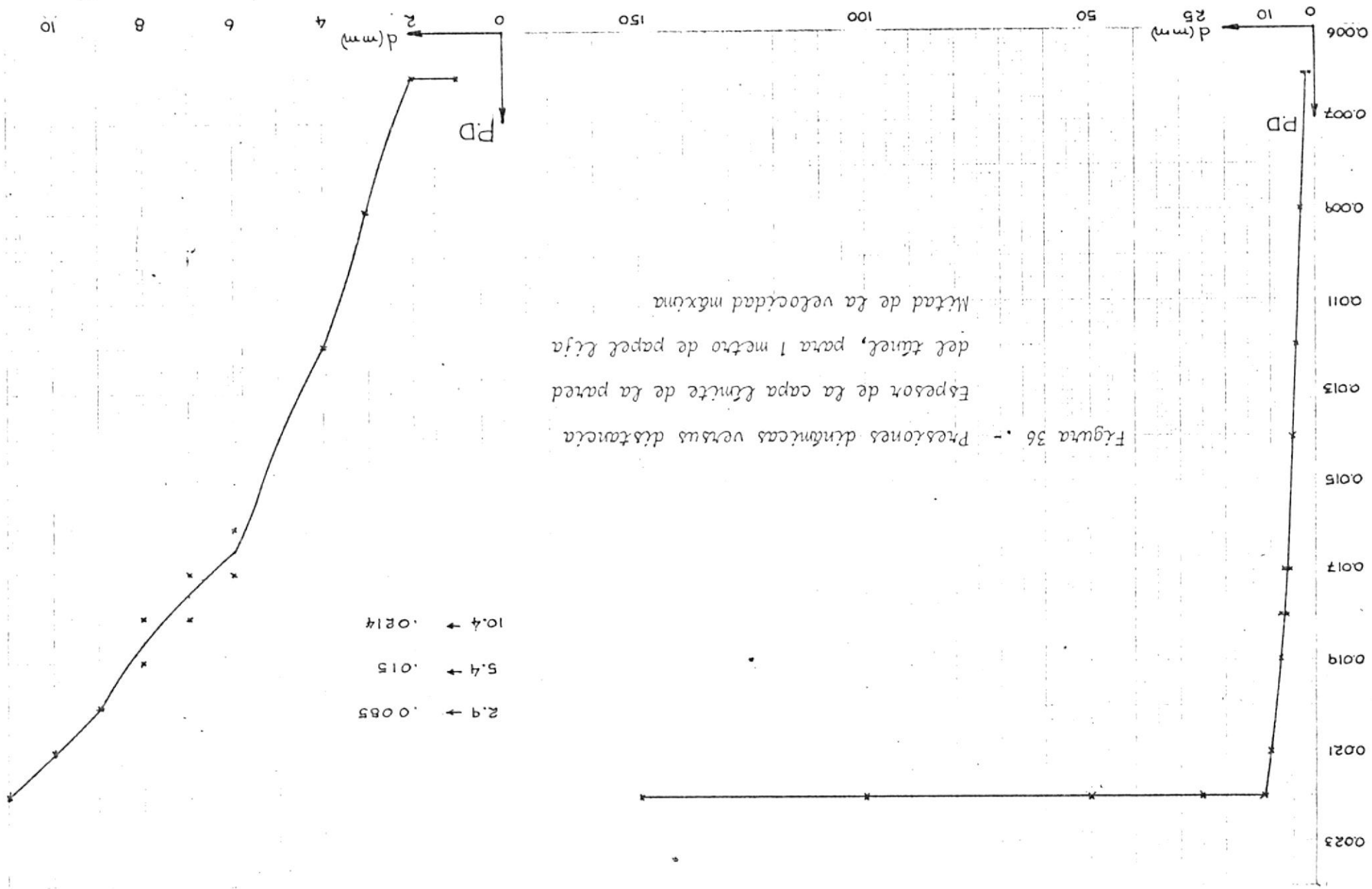
C_p 0.12
 0.08
 0.04
 0.0

Figura 35.- Razones del coeficiente de sustentación al de resistencia de perfil a 750 m m. Mitad de la velocidad máxima



C_L/C_D

α



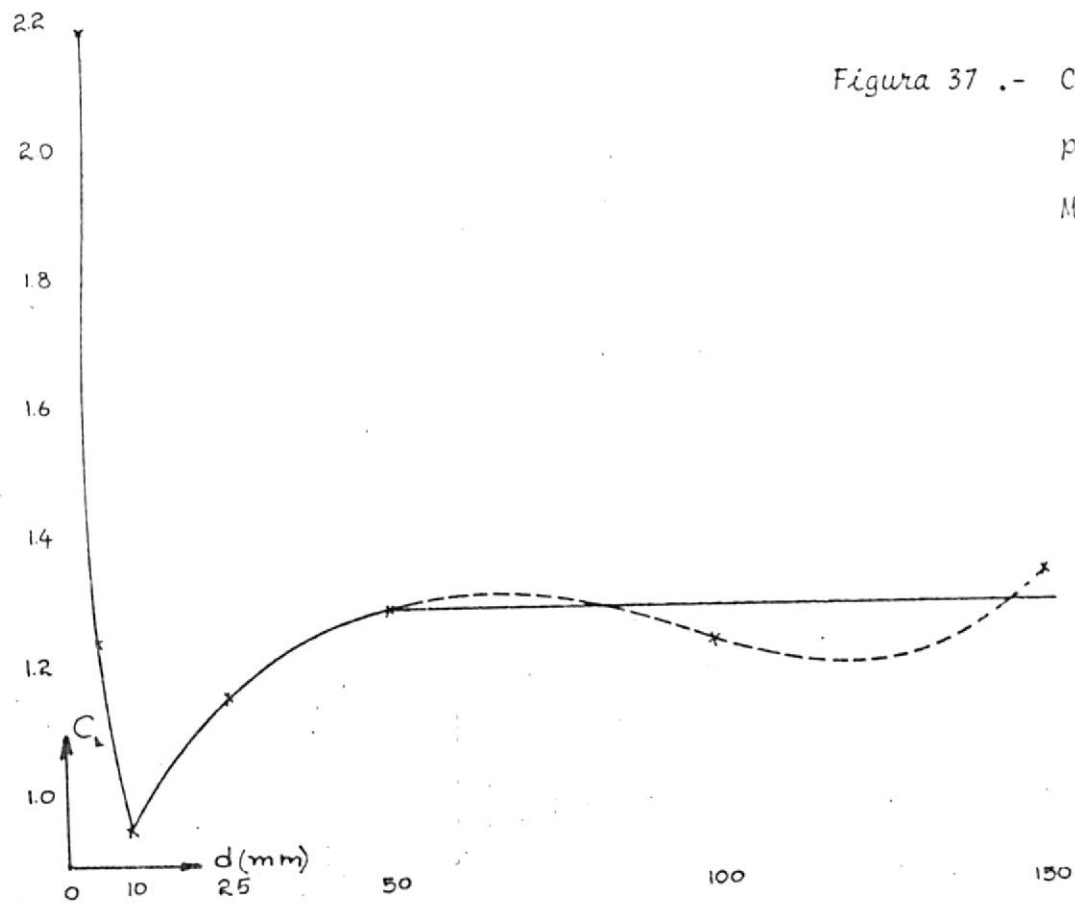


Figura 37 .- Coeficientes de sustentación versus distancia
para 1 metro de papel de lija y $\alpha = 4^\circ$
Mitad de la velocidad máxima

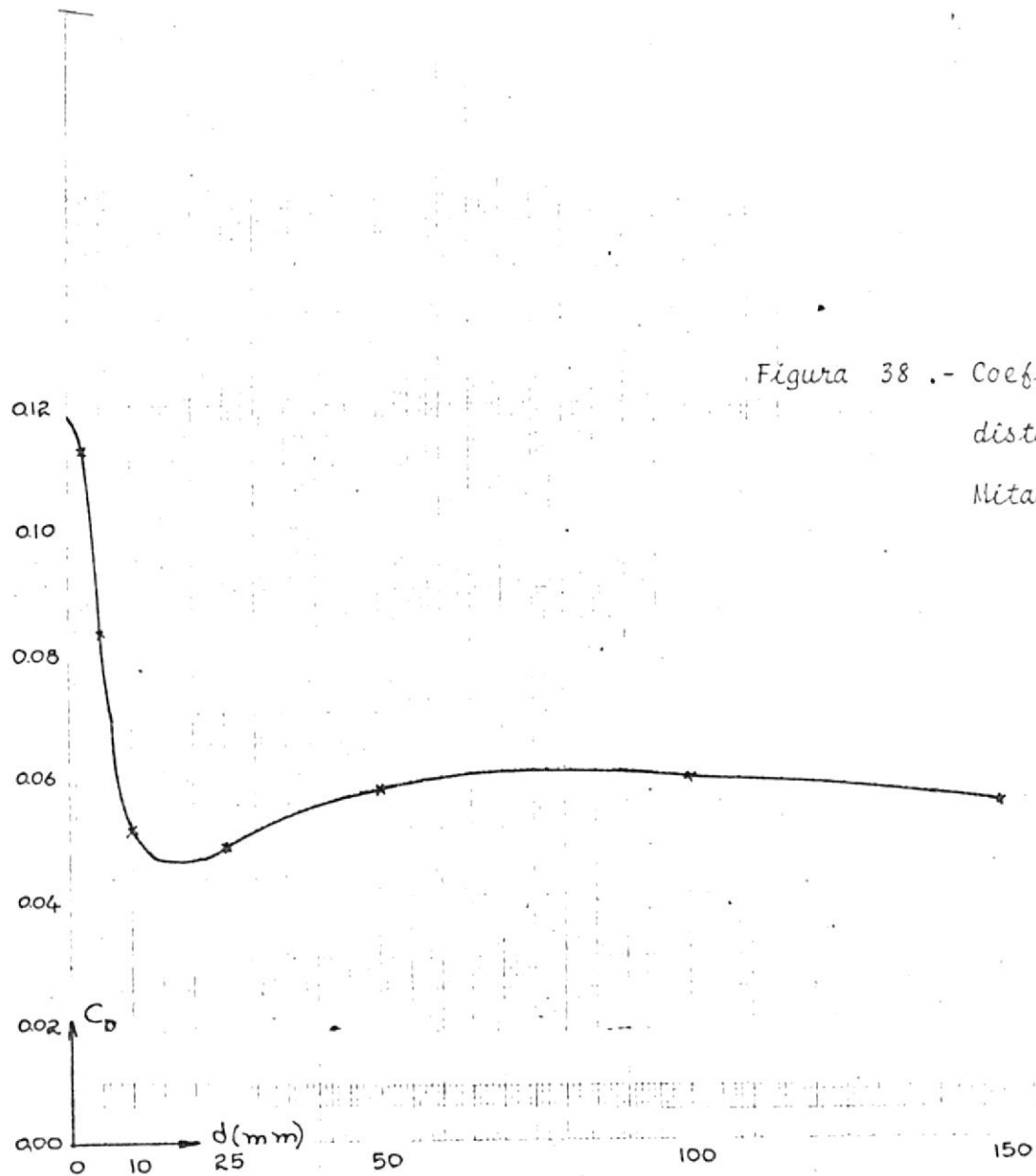
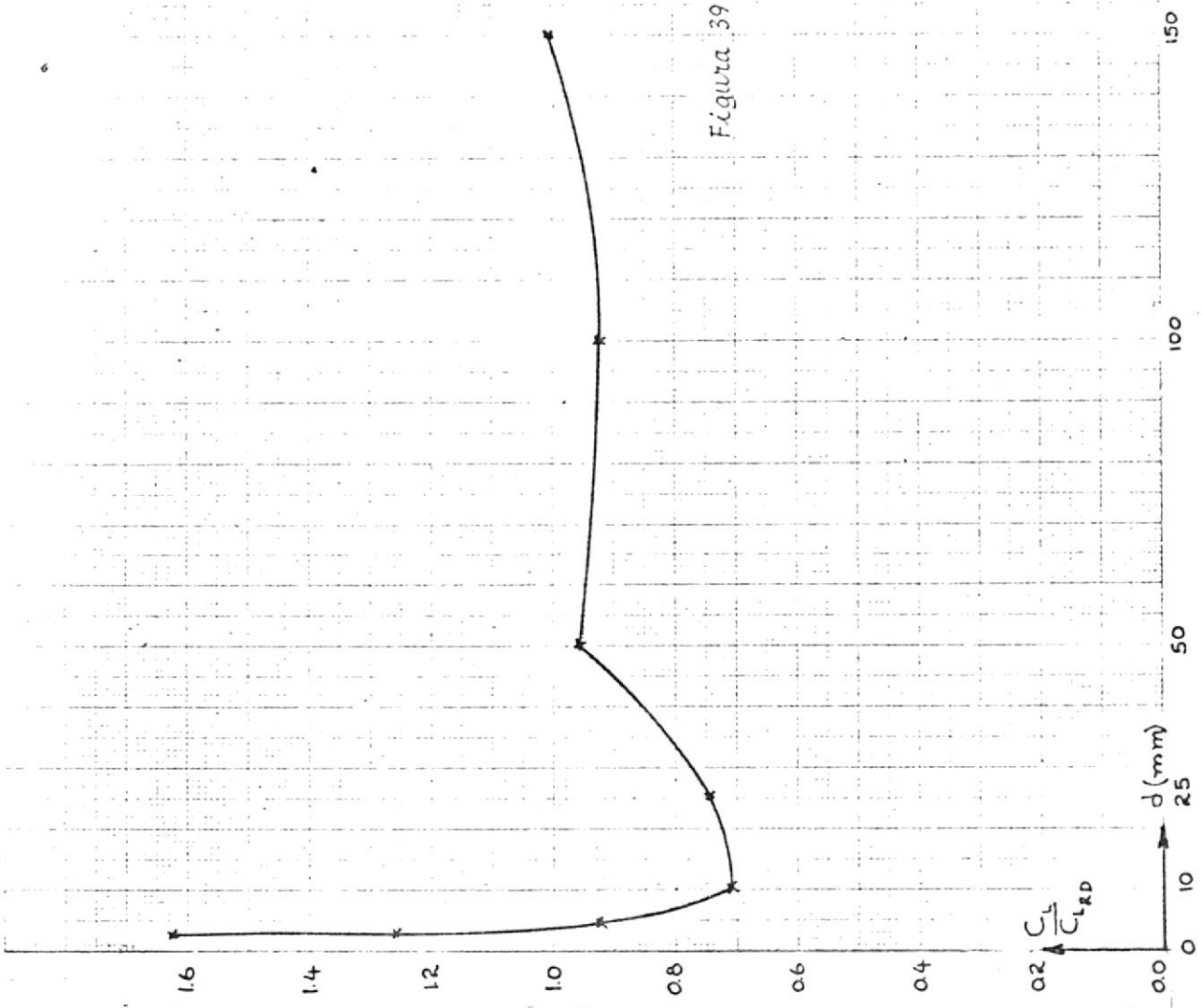


Figura 38 .- Coeficientes de resistencia de forma versus distancia para 1 metro de papel lija y $\alpha = 4^\circ$
Mitad de la velocidad máxima

Figura 39. - Razones del coeficiente de sustentación a su valor en la mitad del álabe, para 1 metro de papel lija y $\alpha = 4^\circ$
Mitad de la velocidad máxima



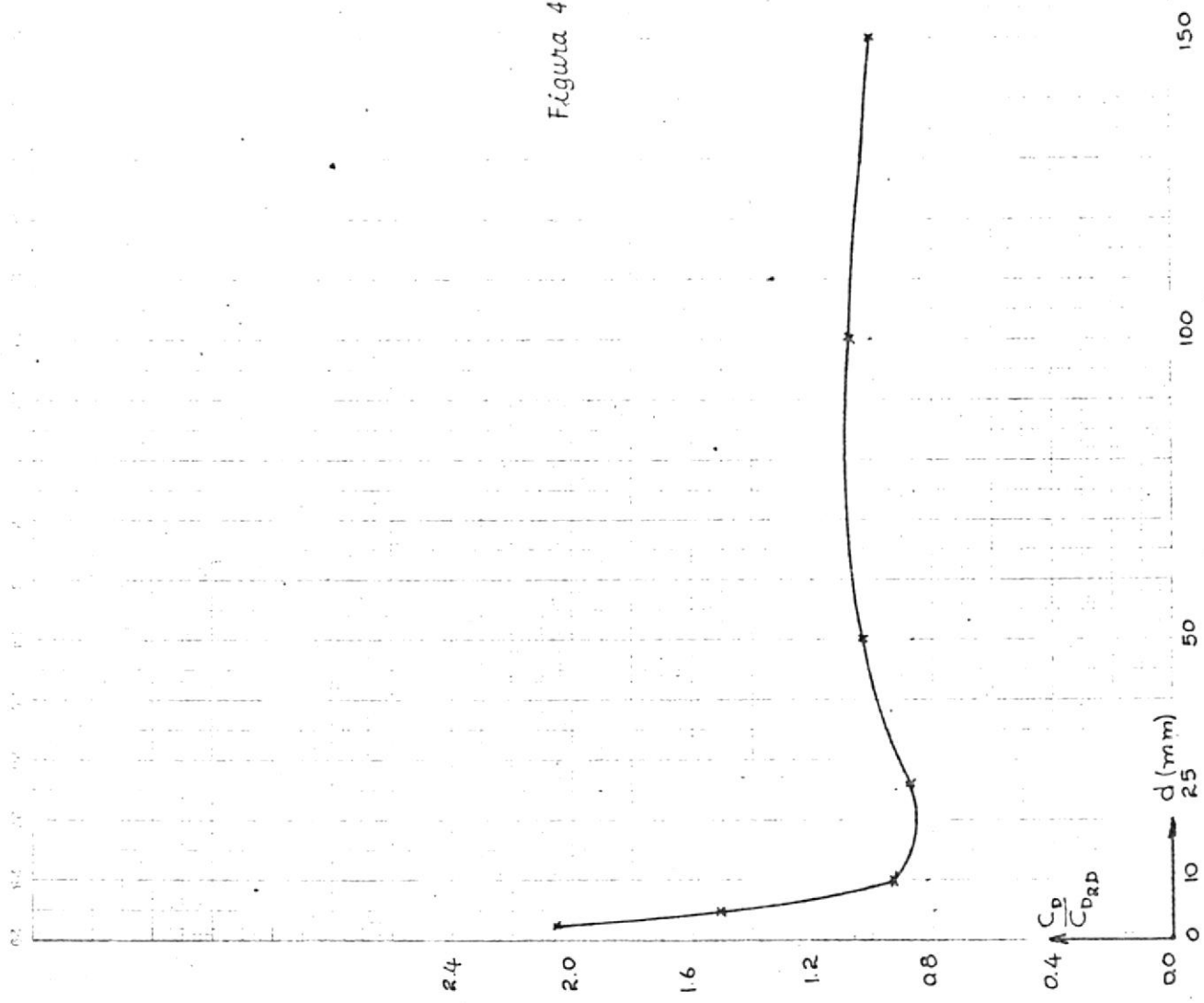


Figura 40 . - Razones del coeficiente de resistencia de forma a su valor en la mitad del álabe, para $\alpha = 4^\circ$ y 1 metro de papel lija. Mitad de la velocidad máxima

$\frac{1}{2}$ V MAX

$\frac{1}{2}$ mt

2.9 → 0.01976

5.4 → 0.0255

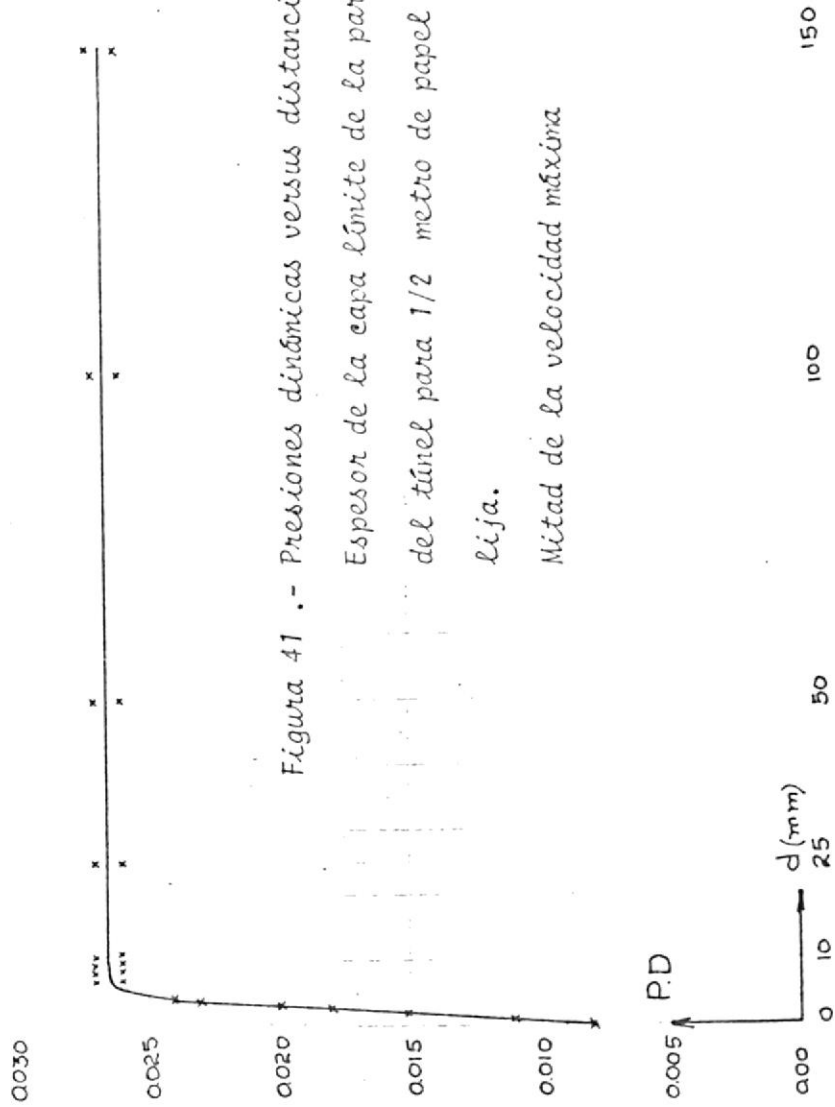


Figura 41 .- Presiones dinámicas versus distancia
Espesor de la capa límite de la pared
del túnel para 1/2 metro de papel
lija.

Mitad de la velocidad máxima

Figura 42 . Coeficientes de sustentación versus distancia,
para $\alpha = 4^\circ$ y 1/2 metro de papel lija
Mitad de la velocidad máxima

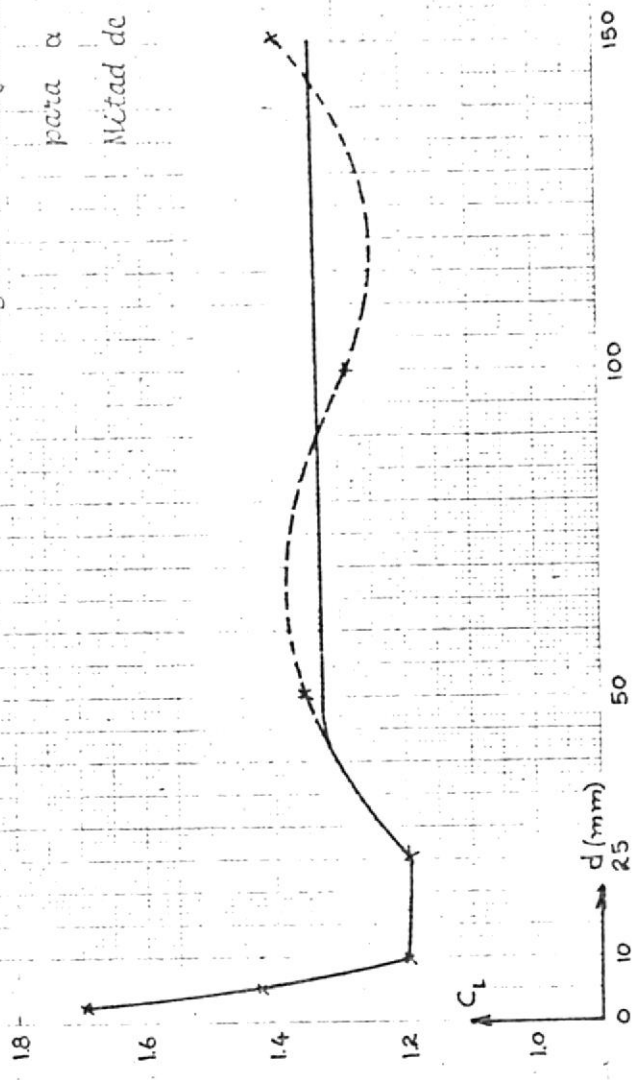


Figura 43.- Coeficientes de resistencia de forma versus distancia
Para $\alpha = 4^\circ$ y 1/2 metro de papel lija
Mitad de la velocidad máxima

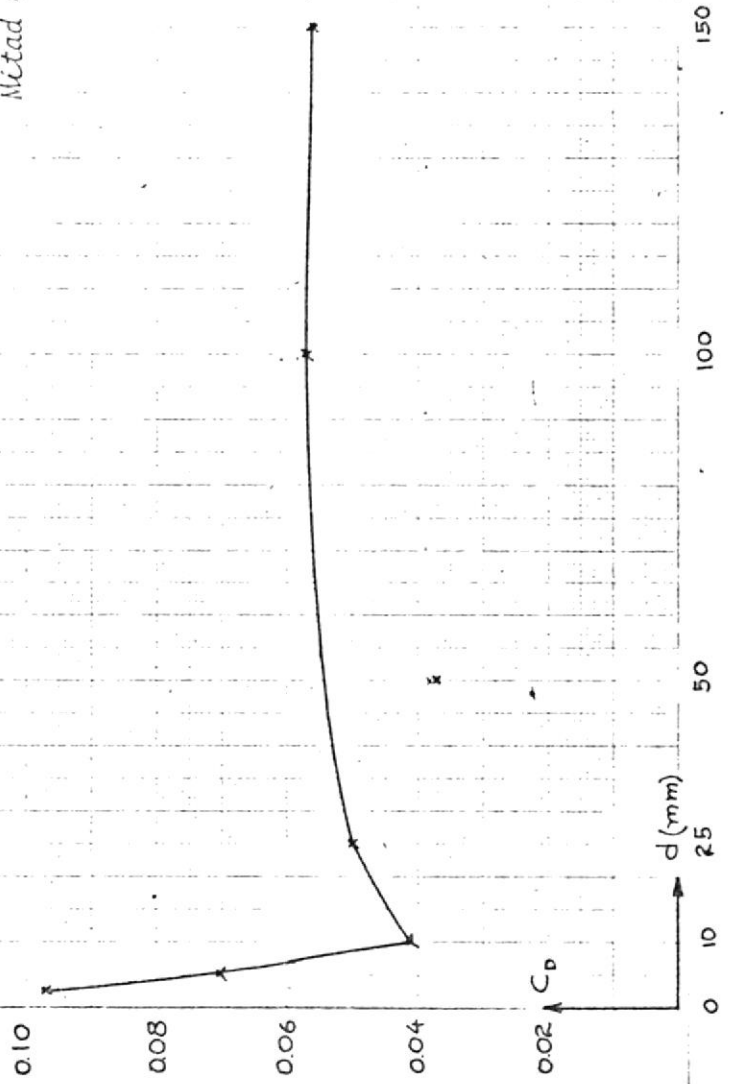


Figura 44.- Razones del coeficiente de sustentación a su valor en la mitad del álabe, para $\alpha = 4^\circ$ y

1/2 metro de papel lija

Mitad de la velocidad máxima

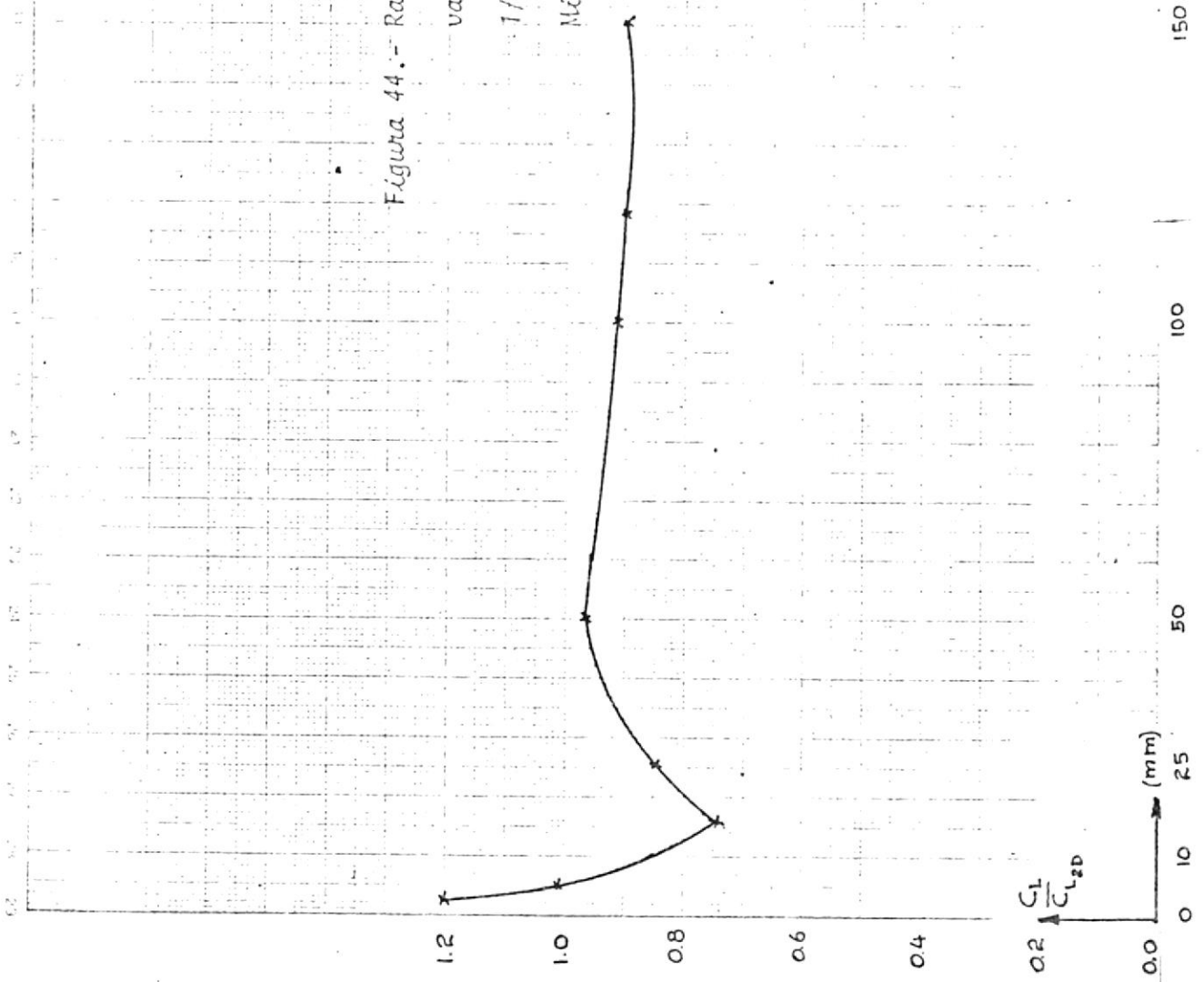
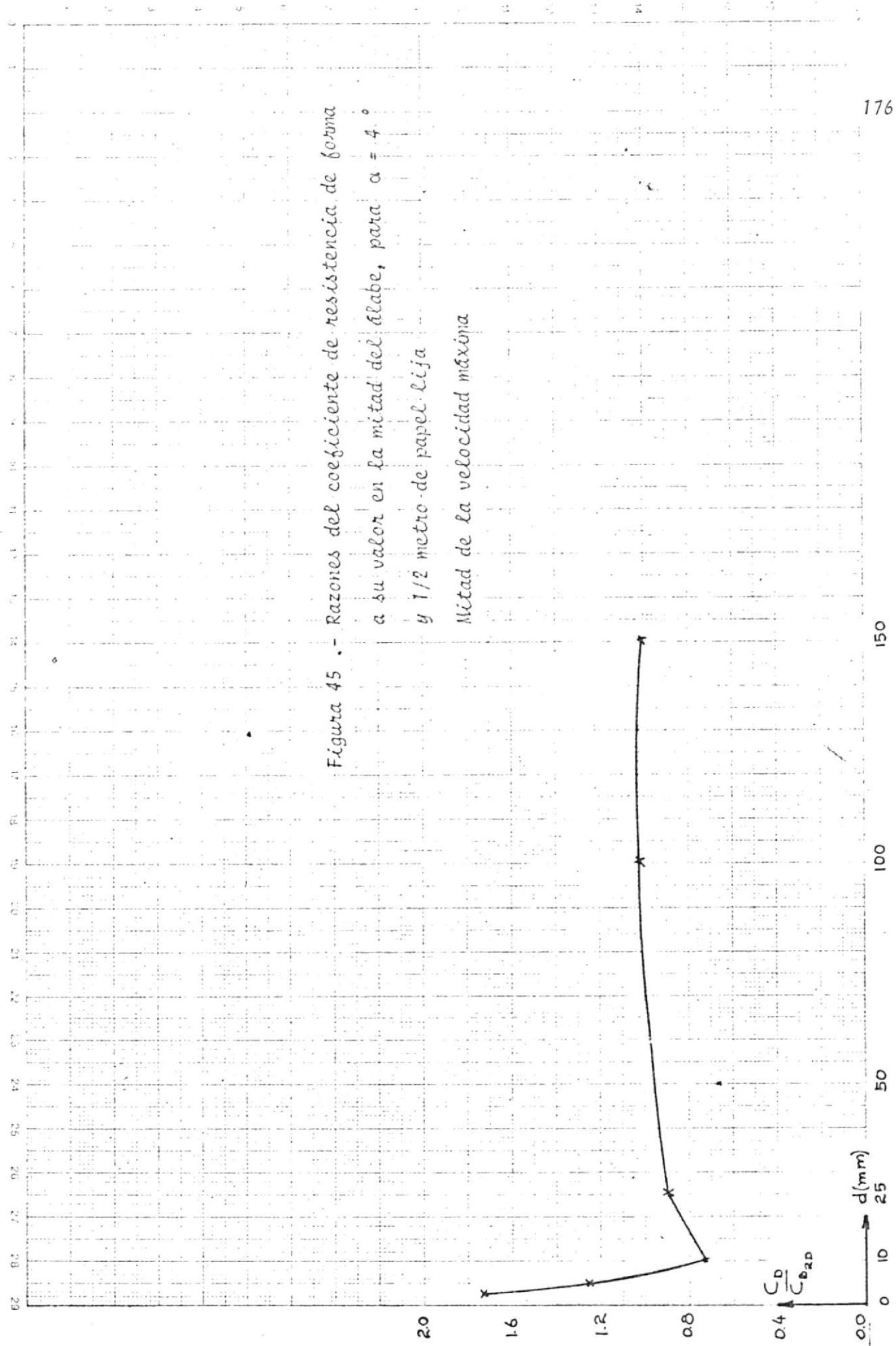


Figura 45 . - Razones del coeficiente de resistencia de forma a su valor en la mitad del alabe, para $\alpha = 4^\circ$ y 1/2 metro de papel lija Mitad de la velocidad máxima



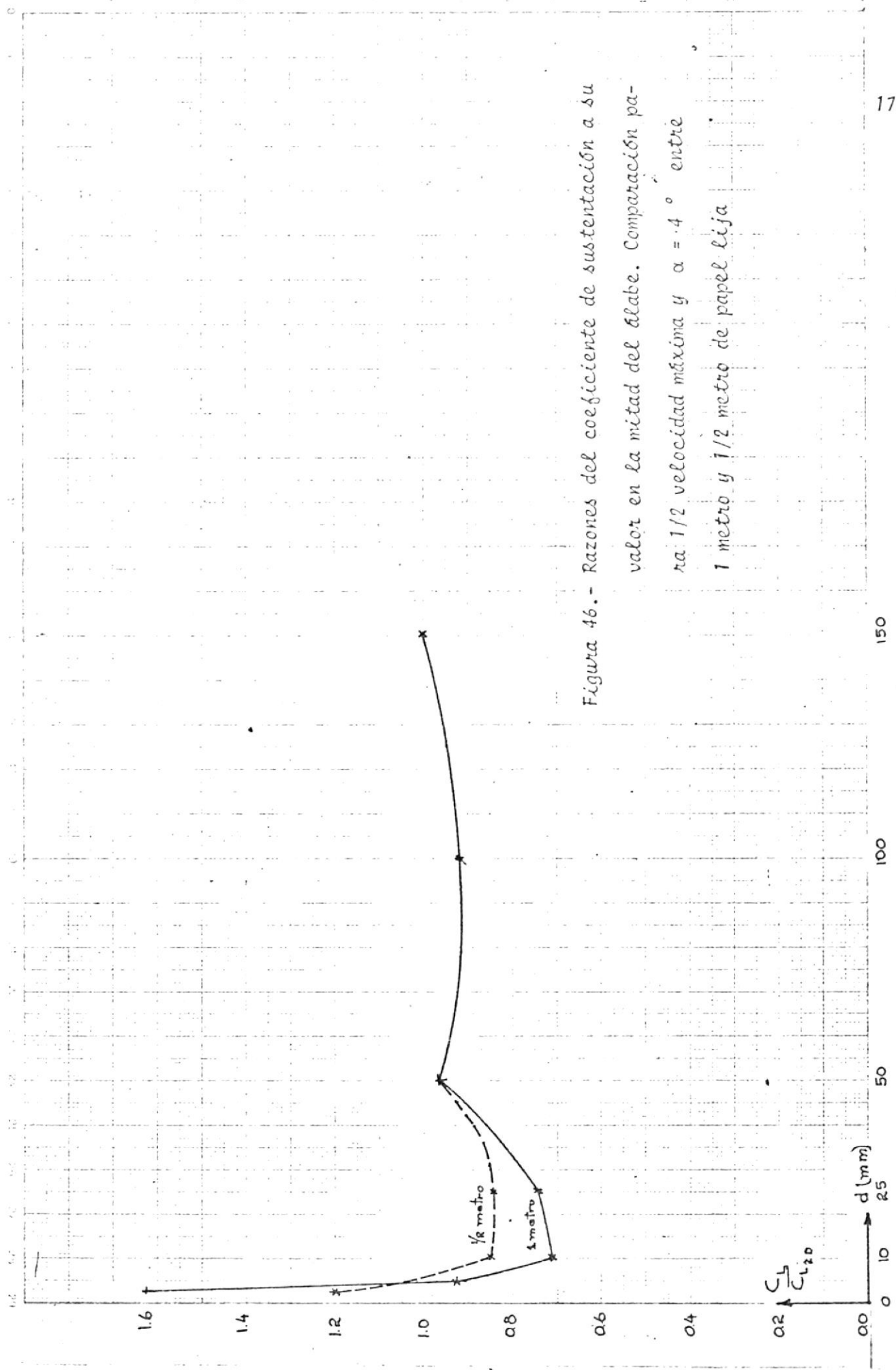


Figura 46. - Razones del coeficiente de sustentación a su valor en la mitad del alabe. Comparación para $1/2$ velocidad máxima y $\alpha = 4^\circ$ entre 1 metro y $1/2$ metro de papel lija

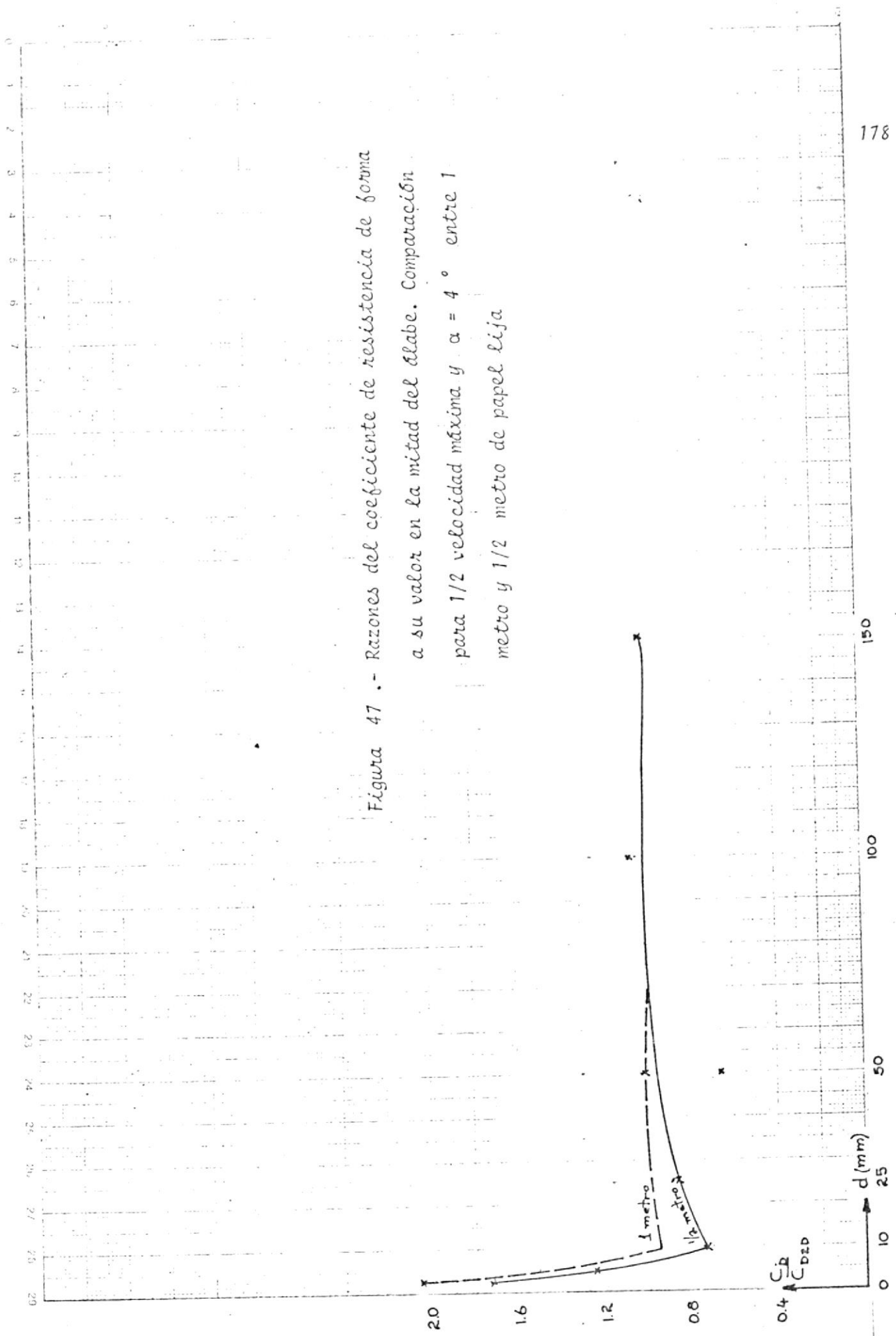
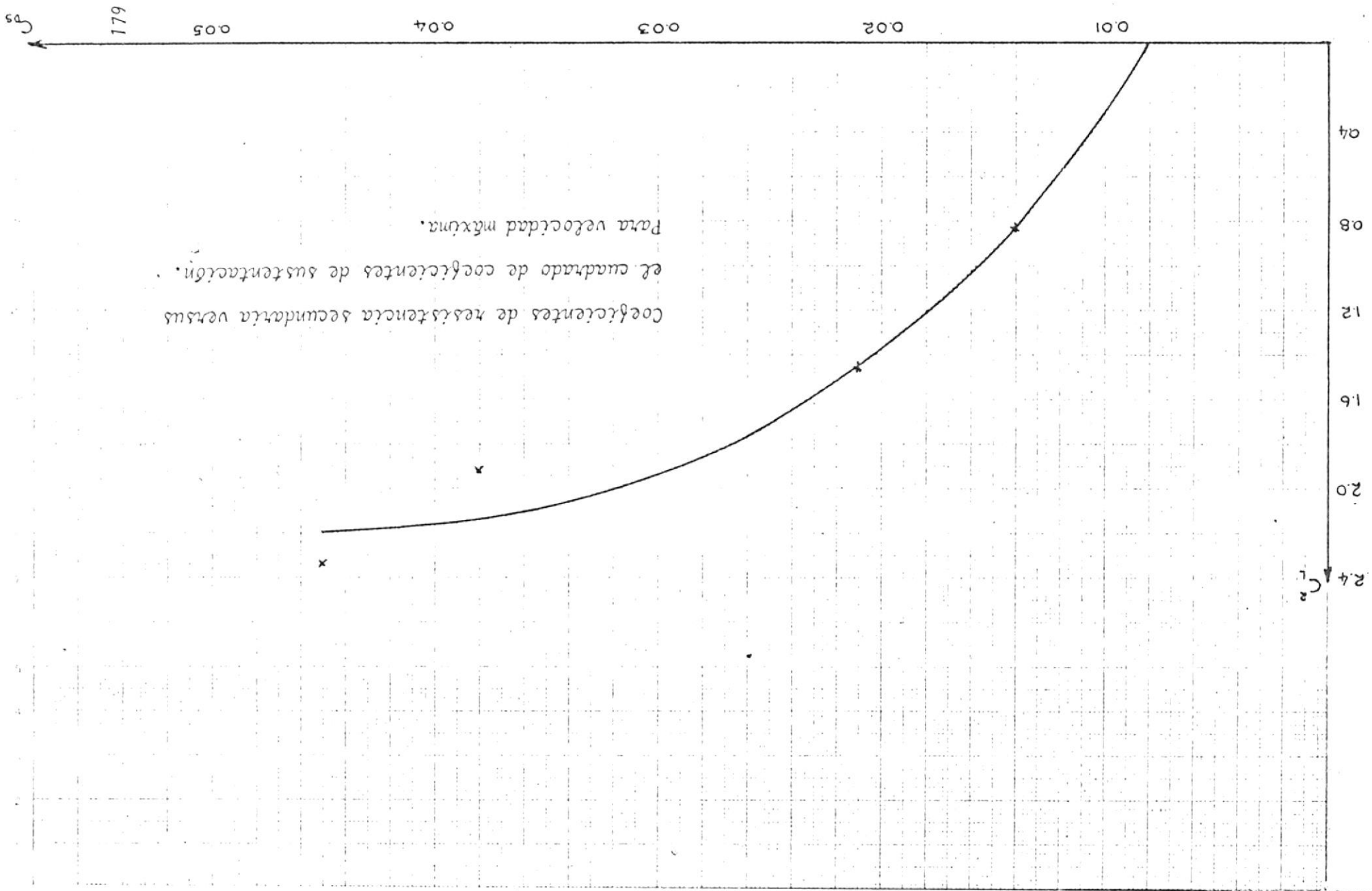


Figura 47 . - Razones del coeficiente de resistencia de forma a su valor en la mitad del alabe. Comparación para 1/2 velocidad máxima y $\alpha = 4^\circ$ entre 1 metro y 1/2 metro de papel lija



179

C_s

0.05 0.04 0.03 0.02 0.01

C_2

0.4 0.8 1.2 1.6 2.0 2.4

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1.- P. BRADSHAW, *Experimental Fluid Mechanics*. Pergamon Press, 1.970
- 2.- ENGINEERING LABORATORY DESIGN, INC., *Subsonic wind tunnel instructions*.
- 3.- S. L. DIXON, *Fluid Mechanics, Thermodynamics of Turbomachinery*. Pergamon Press, 1.975
- 4.- S. GOLSTEIN, *Modern Developments in Fluid Dynamics*. Colección Dover, 1.965
VOLUMEN I y II
- 5.- CLAUDIO MATTAIX, *Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas*. Ediciones del Castillo, 1.970
- 6.- L. M. MILNE - THOMSON, *Theoretical Aerodynamics*. Colección Dover, 1973
- 7.- PRANDTL y TIETJENS, *Applied Hydro and Aerodynamics*. Colección Dover, 1.957
- 8.- VICTOR STREETER, *Mecánica de los Fluidos*. McGraw - Hill, México, 1.971