

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA
FACULTAD DE INGENIERIA

"DETERMINACION EXPERIMENTAL DE INDICES DE CAVITACION"

TESINA SIN CRÉDITOS ACADÉMICOS
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERIA
(H I D R A U L I C A)
PRESENTA EL INGENIERO
JAIME HUMBERTO PALACINO A.

CD, UNIVERSITARIA, D.F.

JUNIO DE 1985



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

APROBADO POR EL JURADO:

Presidente:	DR. GABRIEL ECHAVEZ A.
Vocal:	DR. JOSE RAYNAL VILLASEÑOR
Secretario:	M. EN I. FELIPE I. ARREGUIN C.
Suplente:	M. EN I. RAMON DOMINGUEZ
Suplente:	M. EN I. GUSTAVO PAZ SOLDAN C.

I N D I C E

	PAGS.
I. INTRODUCCION	1
II. CONCEPTOS TEORICOS	
CAVITACION	2
APARIENCIA GENERAL DE LA ZONA DE CAVITACION.	5
DEFINICIONES, ETAPAS Y TIPOS DE CAVITACION.	5
EFECTOS E IMPORTANCIA DE LA CAVI TACION.	11
METODOS DE DETENCION Y LOCALIZA- CION.	15
LOS APARATOS DE CAVITACION.	16
III. PLANTEO DEL EXPERIMENTO Y DESARROLLO	20
IV. ANALISIS Y RESULTADOS	27
V. CONCLUSIONES	35
VI. FIGURAS	37
VII. REFERENCIAS	48

I. INTRODUCCION

El fenómeno de cavitación se presenta a menudo en flujos de alta velocidad ocasionando daños y perturbaciones. Por ello, es importante que las escuelas que imparten la materia de hidráulica cuenten con un dispositivo para presenciar dicho fenómeno.

En este trabajo se desarrolla un método experimental donde se puede determinar en forma fácil el inicio de cavitación, sus características y además hacer un análisis cualitativo para estimar el índice de cavitación incipiente.

El sistema para medir y presenciar la cavitación consiste en tres dispositivos de vidrio en forma de venturi, piezómetros y aforador de gastos. Para cada dispositivo se procedió de igual forma. Se anexan los datos obtenidos en el laboratorio para luego ser procesados y analizados.

II. CONCEPTOS TEORICOS

CAVITACION:

Es difícil dar una definición de cavitación, por tanto nos permitiremos describir el proceso. Cuando un cuerpo líquido es calentado bajo presión constante o cuando la presión se reduce a temperatura constante por medios estáticos o dinámicos, se alcanza finalmente un estado en el cual el vapor o gas y las burbujas llenas de vapor o cavidades, se hacen visibles y crecen. El crecimiento de la burbuja puede tener una velocidad nominal si es mediante la difusión de gases disueltos en la cavidad o meramente por la expansión del gas contenido, con un aumento de temperatura o una disminución de presión. El crecimiento de la burbuja será "explosivo" si es resultado principalmente de la vaporización dentro de la cavidad. Esta condición se conoce como "hervor" si es causada por un aumento de temperatura, y "cavitación" si es causada por la reducción de la presión dinámica a una temperatura esencialmente constante.

Cuando los líquidos fluyen a altas velocidades existe la posibilidad de que los efectos dinámicos puedan ser causa de que la presión estática caiga hasta la presión de vapor. Si esto ocurre las burbujas de vapor o cavidades se forman y como consecuencia sufrirán un colapso cuando llegan a regiones de presión estática más alta.

Las burbujas en colapso y las cavidades, son responsables de los ruidos característicos de cavitación. Estos van desde pequeños reventones o detonaciones al principio de la cavitación hasta un sonido como el de un freno neumático en funcionamiento y cuando ésta se hace más general o fuerte puede sonar como si estuviera pasando grava por el sistema.

Con base en lo anterior, se puede concluir:

1. La cavitación es un fenómeno de los líquidos y no ocurre, bajo condiciones normales, ni en sólidos y ni en gases.
2. La cavitación es el resultado de reducciones de presión en el líquido y por eso presumiblemente puede controlarse mediante el control de la magnitud de la reducción o, estrictamente hablando, la mínima presión absoluta. Si la presión se reduce y se mantiene durante un tiempo suficiente por debajo de la presión crítica, determinada por las propiedades físicas y condiciones del líquido, producirá cavitación. Si no, no ocurrirá cavitación.
3. La cavitación tiene que ver con la aparición y desaparición de cavidades en el líquido. Por lo tanto los efectos de cavitación observados deben estar relacionados con el comportamiento del líquido.
4. La cavitación es un fenómeno dinámico, ya que tiene relación con el crecimiento y colapso de las cavidades.

Algunas de las omisiones importantes que la información anterior no tiene en cuenta son:

1. No hay indicación si el líquido se está moviendo o en reposo. Entonces puede decirse que la cavitación puede ocurrir en cualquier caso.
2. No hay indicación de que la ocurrencia de la cavitación este restringida de, o excluida por las fronteras sólidas; por lo tanto, puede parecer que la cavitación puede ocurrir tanto en el cuerpo líquido como en la frontera sólida.
3. La descripción concierne al comportamiento dinámico de las cavidades; se implica una distinción entre el fenómeno hidrodinámico del comportamiento de la cavidad y sus efectos tales como la erosión por cavitación.

APARIENCIA GENERAL DE LA ZONA DE CAVITACION:

A pesar de que la cavitación se manifiesta de diferentes formas, todas ellas tienen casi la misma apariencia a simple vista, esto es como una confusa masa de espuma "Vapor de agua". Entonces sus efectos son más ampliamente reconocidos que su apariencia. La razón de que el área de cavitación aparezca confusa al ojo o parezca desenfocada en una fotografía normal se debe básicamente a que la cavitación es un fenómeno de alta velocidad y detallar el movimiento es difícil.

DEFINICIONES, ETAPAS Y TIPOS DE CAVITACION.

El término "Etapa Incipiente" ha sido muy usado para describir la cavitación que es casi indetectable. Las burbujas discernibles de la cavitación incipiente son pequeñas y la zona sobre la cual actúa es limitada. El establecimiento de la cavitación usualmente ocurre en forma intermitente sobre una área restringida. No hay ruido objetable y no hay daño excepto cuando una pequeña parte del flujo está involucrado, tal como sobre un pequeño paso o un elemento de rugosidad.

Las condiciones que marca la frontera entre cavitación y no cavitación no son siempre idénticas si se observan a medida que la cavitación aparece y una vez más cuando la cavitación desaparece o sea hay histéresis. El término de cavitación incipiente ha sido sugerido para esta última etapa, dejando el término incipiente, en un amplio sentido, destinado a identificar el tipo y etapa de la cavitación existente cerca

de la condición límite.

Los eventos exactos en la incépción y el desarrollo de la cavitación depende de la condición del líquido, incluyendo la presencia de contaminación, tanto sólida como gaseosa y del campo de presión en la zona de cavitación. Hay un gran número de formas de clasificar las diferentes apariencias. Por ejemplo: de acuerdo a las condiciones bajo las cuales tiene lugar la cavitación, esto es, la cavitación en una corriente de flujo, la cavitación en cuerpos inmersos en movimiento. Otro método posible es clasificarla de acuerdo a las principales características físicas. Si usamos una combinación de estos dos métodos, se tienen los siguientes grupos:

- Cavitación "Móvil"
- Cavitación "Fija"
- Cavitación "de Vórtice"
- Cavitación "Vibratoria"

Los nombres anteriores son arbitrarios, ya que no se cuenta todavía con términos fijos en la licenciatura acerca de cavitación.

La cavitación crítica, es una cavitación ligera continua que usualmente se adopta como el criterio de diseño. El ruido y las vibraciones son aceptables y se puede esperar solamente un daño menor después de largos períodos de operación (meses o años).

Tipos de Cavitación: Cuatro grandes categorías o tipos de cavitación ocurren en los conductos.

1. Cavitación Volumétrica: La cavitación volumétrica es una condición en la que la presión estática a lo largo del flujo se disminuye hasta la presión del vapor debido a la recuperación de la presión estática corriente abajo. Un ejemplo puede ser un canal de alta velocidad. Ver figura No. 1.

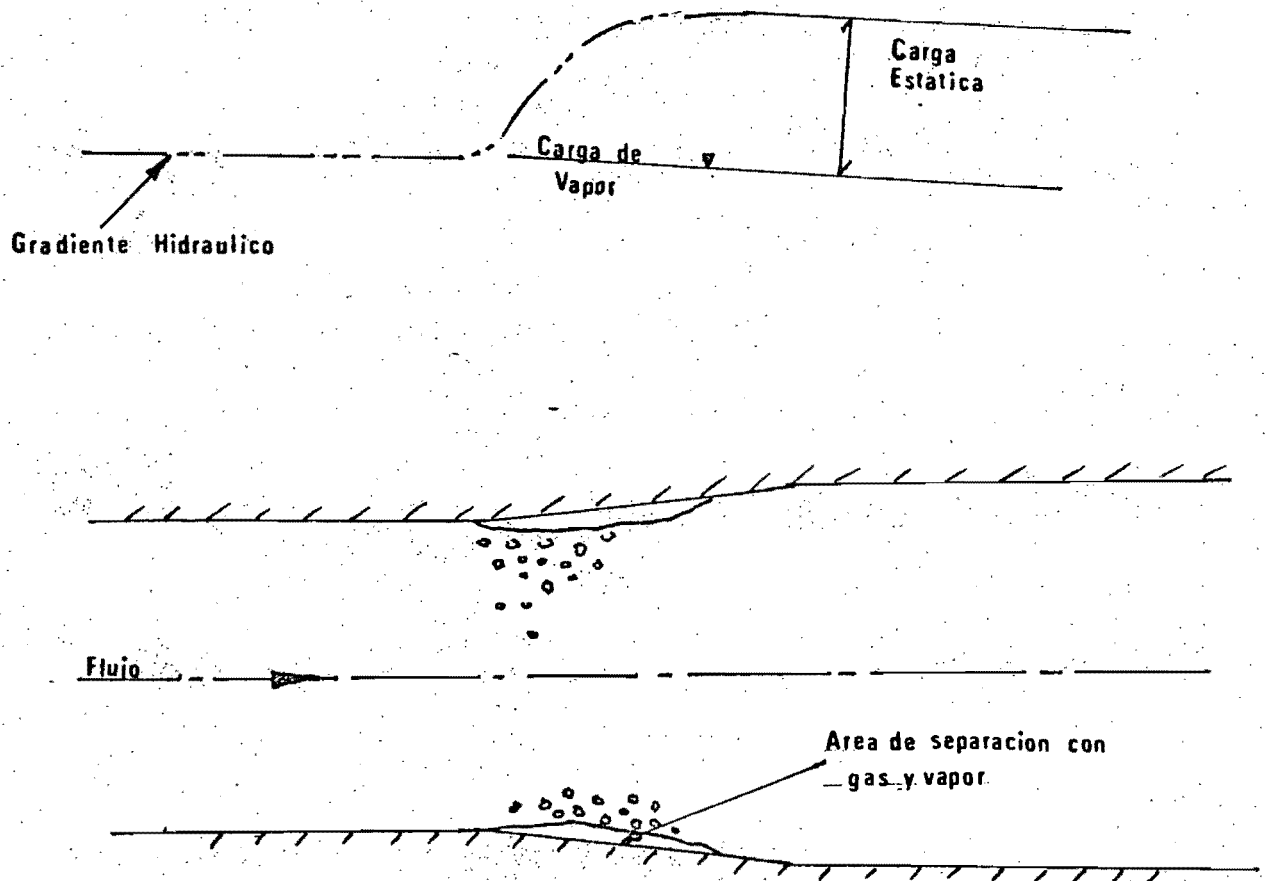


Fig. 1 Forma de Cavitación Volumétrica

La cavitación volumétrica es importante en relación con las

válvulas de mariposa, esféricas, compuertas, diagramas y tapones. Ver figura No. 2

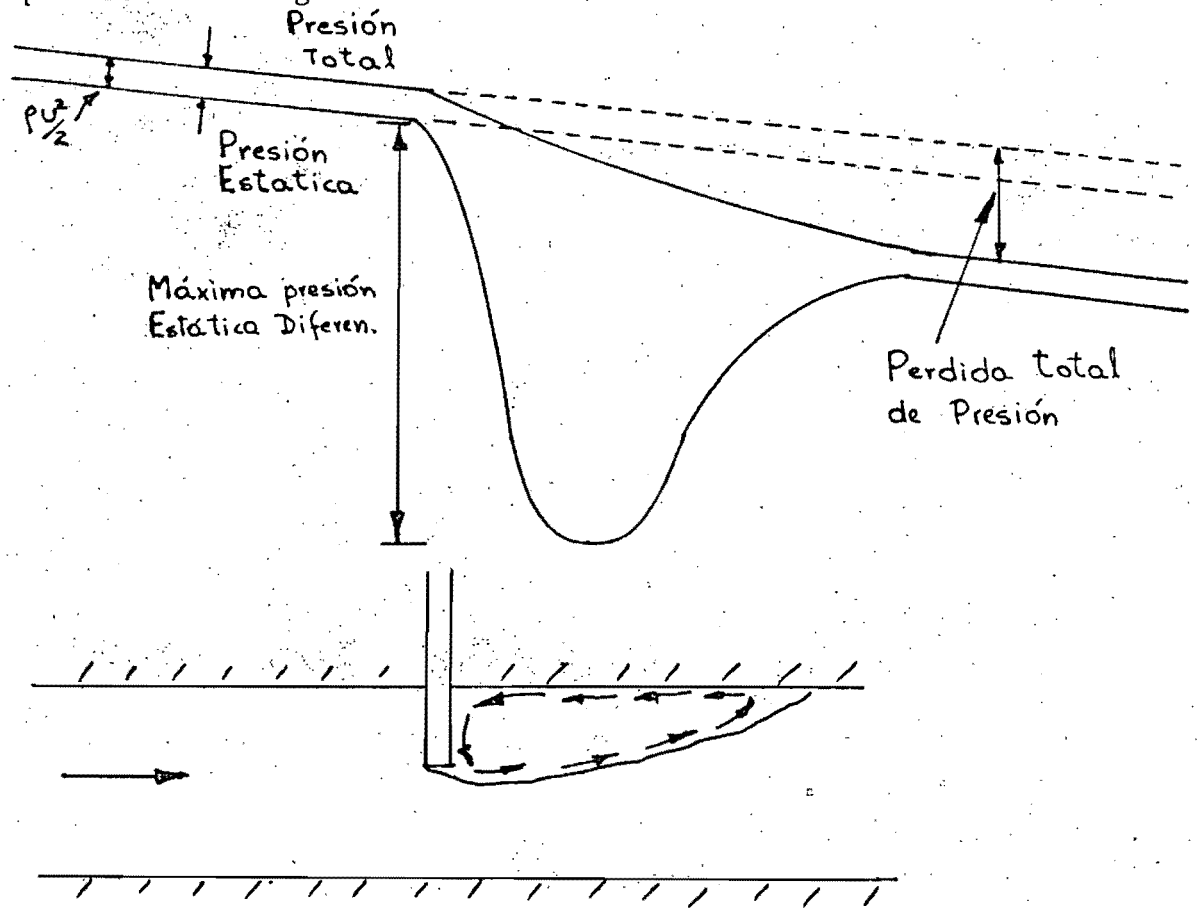


Fig. 2. Forma de Cavitación Volumétrica

2. Curvatura del flujo: Cuando se presentan una curvatura como la ilustrada en la figura No. 3, se produce una reducción local en la presión estática.
3. Cavitación por Rugosidad de la superficie: Las protuberancias de la superficie u obstrucciones son causantes de cavitación. La cavitación en superficies rugo-

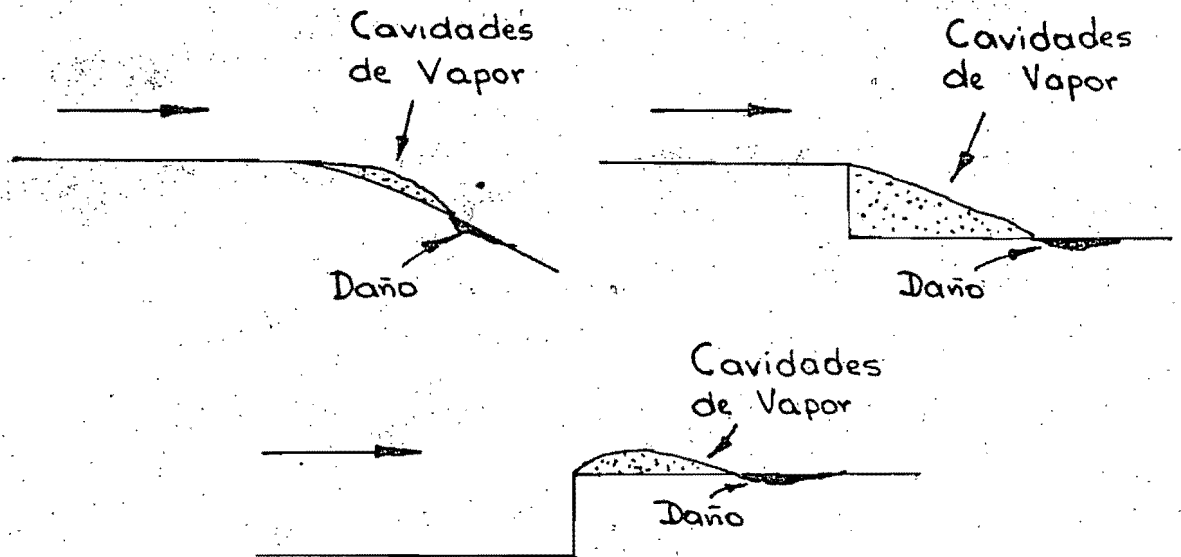


Fig. 3 Forma de Cavitación por Curvatura.

sas se presenta primero en las rugosidades que sobresalen más. La distribución de velocidades cerca a la pared afecta el establecimiento de la cavitación. Debido a las mayores velocidades cercanas a una pared suave en comparación con una pared rugosa, las protuberancias aisladas pueden causar la cavitación a una menor velocidad que con rugosidad continua a la altura máxima. Una vez que ocurre el daño se incrementa la rugosidad y se puede llegar a un mayor nivel de cavitación. Esta cavitación es particularmente problemática en boquillas de alta velocidad que descarguen en una región de presión estática baja o a la atmósfera. Para evitar la cavitación las boquillas deben diseñarse de tal forma que el chorro todavía se este acelerando cuando abandone la boquilla. Ver figura No. 4

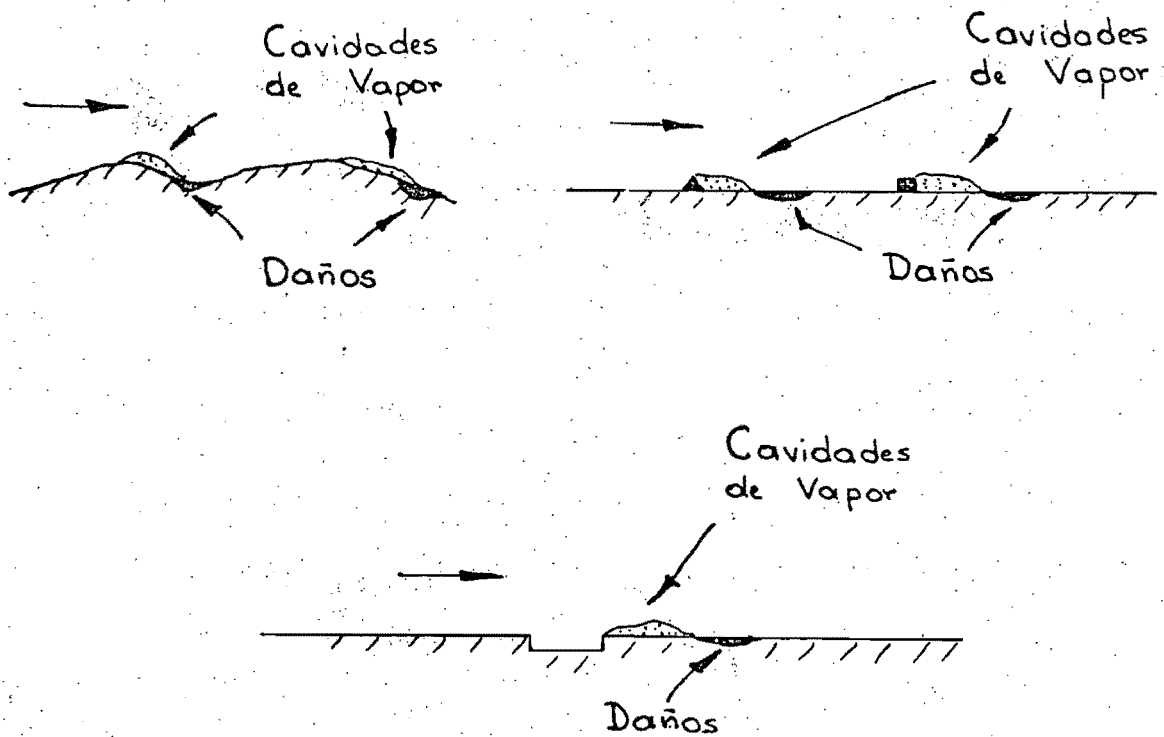


Fig. 4. Forma de Cavitación por Rugosidad de la Superficie.

4. Cavitación turbulenta: Se presenta este tipo de cavitación normalmente en orificios. Se puede apreciar en la figura No. 5

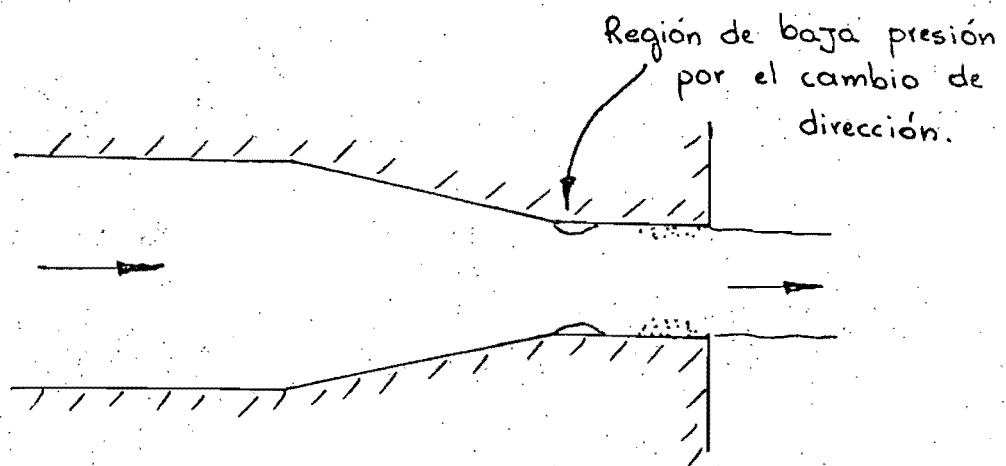


Fig. 5. Forma de Cavitación Turbulenta

EFFECTOS E IMPORTANCIA DE LA CAVITACION:

La cavitación es importante por sus efectos. Estos pueden ser clasificados en 3 categorías generales:

1. Efectos que modifican las características hidrodinámicas del flujo.
2. Efectos que producen daños sobre las superficies de las fronteras sólidas del flujo.
3. Efectos extraños que pueden, o no, estar acompañadas por modificaciones hidrodinámicas significativas en el flujo o daños a las fronteras sólidas.

La cavitación es importante porque puede restringir la capacidad de flujo de un sistema; puede generar ruido inaceptable, puede causar erosión, fallas y en casos extremos puede causar inestabilidades que ocasionan grandes daños al sistema. La cavitación descontrolada puede producir resultados serios y aún catastróficos. La necesidad de evitar o controlar la cavitación impone serias limitaciones en el diseño de muchos tipos de equipo hidráulico. Como En el campo de la maquinaria hidráulica en que se han hecho hallazgos de que todos los tipos de turbinas (Francis, Kaplan, etc) son susceptibles a la cavitación.

Aunque la cavitación puede agravarse debido a un diseño pobre, puede ocurrir aún en el equipo mejor diseñado cuando este es operado bajo condiciones desfavorables.

La cavitación también puede ocurrir en otros dispositivos que no involucran la entrada o salida de energía mecánica. La operación de válvulas y ajustes de todas clases que provocan un cambio en la velocidad del líquido que pasa a través de ellos puede ser afectado por la cavitación.

Los medidores de fluidos "Medidores Venturi, orificios y toberas" forman una clase de sistema de flujo en el cual el desarrollo de la cavitación puede disminuir grandemente su eficiencia o efectividad. En este tipo de medidores la velocidad del flujo se calcula a partir de la medición de la caída de presión requerida para acelerar el flujo que pasa a través de una sección transversal mayor o menor.

La cavitación se presenta continuamente en el campo de estructuras hidráulicas, como: las crestas de los cimacios, canales, compuertas, dados deflectores, conductos de entrada, conductos de descarga, codos en conductos, túneles y tuberías.

En unas pocas aplicaciones la cavitación es empleada con un propósito debido a que su efecto es útil, en la base de los aparatos para limpiar partes intrincadas, tales como las válvulas de precisión, agitación y mezcla en procesos especiales.

La cavitación en un venturi u orificio puede usarse como un mecanismo de control de flujo. En este caso la ocurrencia

de la cavitación proporciona un fenómeno de choque similar al encontrado con los mismos dispositivos operando con un gas compresible por encima de la relación de presión crítica.

El líquido más comunmente usado es el agua, ya que existen un gran número de dispositivos que la utilizan.

El hecho de que la cavitación puede y ocurre en todo tipo de líquidos es importante y debe tenerse siempre en mente. Aunque en este campo mucha de la información experimental se refiere al agua y la mayoría del equipo utiliza agua como líquido de operación.

Efectos Hidrodinámicos: Los efectos hidrodinámicos tienen su fuente en la interrupción de la continuidad de la fase líquida cuando aparecen cavidades. Como el volumen de la cavidad desplaza líquido, el patrón de flujo se modifica y la interacción dinámica entre el líquido y sus fronteras es alterado.

En la mayoría de los casos la presencia de la cavitación incrementa la resistencia total al flujo aunque, bajo algunas condiciones en el estado primario del desarrollo, debe haber un decrecimiento medible.

Daños por Cavitación: Para un gran número de Ingenieros, el daño por cavitación está tan estrechamente relacionado con el fenómeno de cavitación que dicho da

no se denomina a menudo "Cavitación".

La cavitación daña las fronteras sólidas del conducto mediante la remoción de material de la superficie, pudiendo ser ésta de cualquier material. Por tanto, todos los metales, duros o blandos, dúctiles o no dúctiles, químicamente activos o químicamente inertes, han sido dañados por cavitación. El caucho, el plástico, el vidrio, el cuarzo, el concreto y otros sólidos no metálicos son igualmente susceptibles al daño por cavitación.

Efectos Extraños: Dos de los efectos más comunes de la cavitación que pueden no involucrar mayor modificación en el fluido o daños en las fronteras sólidas es el ruido por cavitación y la vibración inducida por cavitación. Se ha encontrado experimentalmente que se produce ruido considerable debido al colapso de las cavidades. El tiempo entre la formación y el colapso puede no ser mayor a $1/100$ de segundo, pero la presión dinámica causada por el fenómeno puede ser muy severa, del orden de 10^4 Kg/cm².

La importancia del ruido de cavitación depende en gran parte de cada instalación en particular. Por ejemplo: en una casa de máquinas o una fábrica en la cual el nivel del ruido de otras fuentes ya es alto, la adición de ruido por cavitación es difícil de notar y puede no ofrecer problema.

El proceso de cavitación es completamente inestable y puede

involucrar grandes fuerzas fluctuantes. Si una de las componentes de frecuencia de estas fluctuaciones iguala la frecuencia natural de una porción del líquido o del conducto puede resultar vibraciones.

METODOS DE DETECCION Y LOCALIZACION

Existen varias formas para determinar la presencia de cavitación y son:

1. Observación indirecta mediante la determinación del efecto de la cavitación en el funcionamiento de un equipo.
2. Observación indirecta mediante la medición del efecto de cavitación sobre las distribuciones de presión en la frontera en la cual ocurre la cavitación.
3. Observación indirecta registrando el ruido emitido por la cavitación.
4. Observación indirecta permitiendo a la cavitación desviar el haz de luz de un laser en una foto
5. Observación directa mediante medios visuales y fotografías.

El primero de estos métodos tiene la limitación de que no da información acerca del carácter del fenómeno hidrodinámico en si mismo. El segundo método de información acerca de la localización de la zona de cavitación y los mecanismos de

transmisión de fuerza y momento entre el líquido y las fronteras.

Sin embargo, mientras que la cavitación no esté bien establecida y haya pasado definitivamente del período incipiente no hay efecto medible usualmente. El tercero, cuarto y quinto métodos ofrecen las mejores perspectivas para investigar las condiciones incipientes. Las mediciones sonoras son especialmente útiles ya que proporcionan una forma muy sensitiva para detectar las magnitudes de cavitación que pueden ser demasiado pequeñas para ser observadas aún con los medios ópticos más potentes. El Instituto de Ingeniería de la UNAM hizo un estudio comparativo de dos detectores y dos formas de tratamiento de señal para detectar la cavitación mediante métodos acústicos (Referencia No. 3)

El cuarto método es una forma muy sensitiva para indicar la presencia de cavidades extremadamente pequeñas. El quinto método, que usa medios fotográficos, ofrece la única posibilidad para realizar estudios detallados del fenómeno hidrodinámico tanto en el estado incipiente como para etapas avanzadas de desarrollo.

LOS APARATOS DE LA CAVITACION

Al discutir los problemas de la cavitación, es deseable tener índices que proporcionen medidas cuantitativas de las condiciones dinámicas del flujo desde dos puntos de vista. La nece

sidad se tiene por:

1. Un parámetro que puede asumir un valor único para cada conjunto de condiciones de la cavitación similares dinámicamente.
2. Un índice o parámetro para describir las condiciones de flujo relativas a aquellas condiciones en que la cavitación no está presente, es incipiente o está en alguna de sus etapas de desarrollo.

Un parámetro para la Similitud Dinámica: La geometría de las fronteras, las variables de flujo como la presión absoluta, velocidad y la presión crítica a la cual se puede formar una burbuja o mantener una cavidad, son las principales variables que la inepción y el desarrollo de la cavitación. Además de los efectos dinámicos, los gradientes de presión debidos a la gravedad son importantes para grandes cavidades tanto si son del tipo viajero o del tipo fijo. Finalmente, el tamaño físico de la frontera geométrica puede ser importante no solo porque afecta las dimensiones de la cavidad, sino también porque modifican los efectos de algunas de las propiedades del fluido y sus fronteras. No ha sido posible incluir todos estos efectos en el desarrollo de los parámetros. En cambio se ha hecho práctica común el uso de parámetros básicos, formados a partir de las condiciones elemen-

tales de similitud e indicar el efecto de otras variables como desviaciones de las predicciones del parámetro básico.

La posibilidad de cavitación puede evaluarse en términos del coeficiente σ de cavitación definido por:

$$a) \quad \sigma = \frac{P_o - P_v}{\rho \frac{V_o^2}{2}} \quad (1')$$

P_o : Presión absoluta en el pto de interes

P_v : Presión de vaporización del líquido

ρ : Densidad del líquido

V_o : Velocidad de referencia, comunmente en la zona sin disturbios

$$b) \quad \frac{P_2 + P_a - P_v}{P_1 - P_2} \quad (2')$$

P_1 : Presión aguas arriba de la obstrucción

P_2 : Presión aguas abajo de la obstrucción

P_a : Presión atmosférica absoluta

P_v : Presión de vapor del líquido (agua) a la temperatura de trabajo.

El coeficiente de cavitación es una forma del coeficiente de presión cuando se utiliza un origen de referencia para medirlo.

Puede ser que la presión de referencia sea la de vaporización o la de cavitación. El número de cavitación o coefi-

ciente de cavitación se emplea como parámetro adimensional para establecer la semejanza.

El parámetro σ puede usarse para relacionar las condiciones de flujo a la posibilidad de que ocurra la cavitación así como el grado de postinjección en las etapas siguientes a la cavitación. Para cualquier sistema en el que la presión existente es fija, el parámetro σ puede calcularse para todo el rango de valores de la velocidad de referencia V_0 y de la presión de referencia P_0 .

III. PLANTEO DEL EXPERIMENTO Y DESARROLLO

Como el propósito de este experimento es determinar el índice de cavitación incipiente en tres tubos venturi de sección circular, se procedió primero a visualizar el fenómeno en un aparato de cavitación con características muy similares. (Ver figura 6), el cual consiste en un venturi de sección

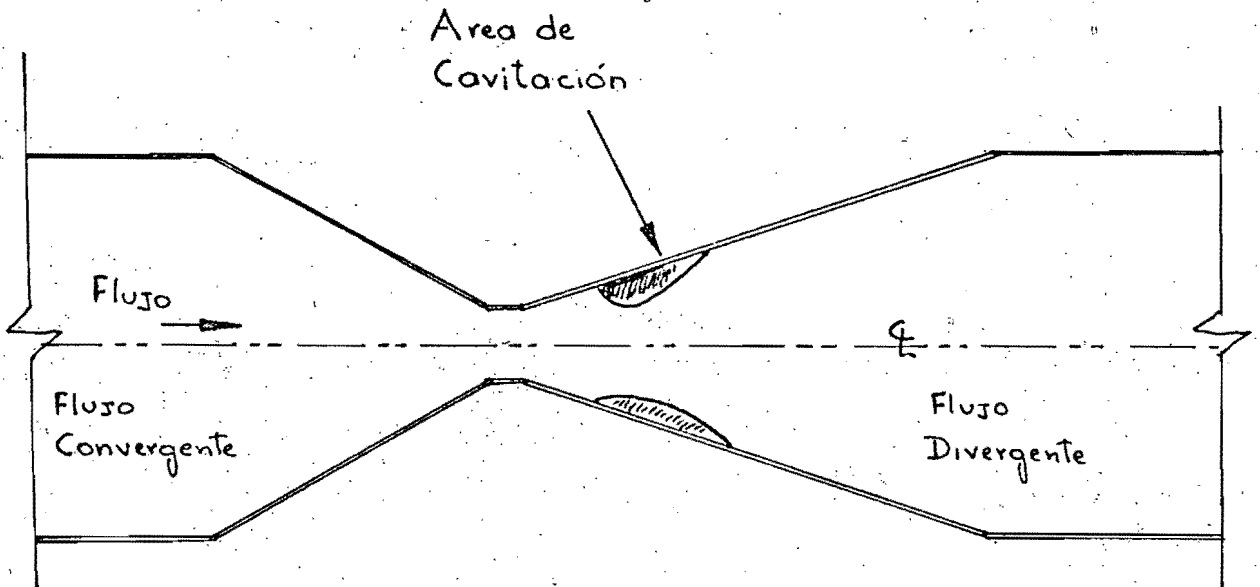
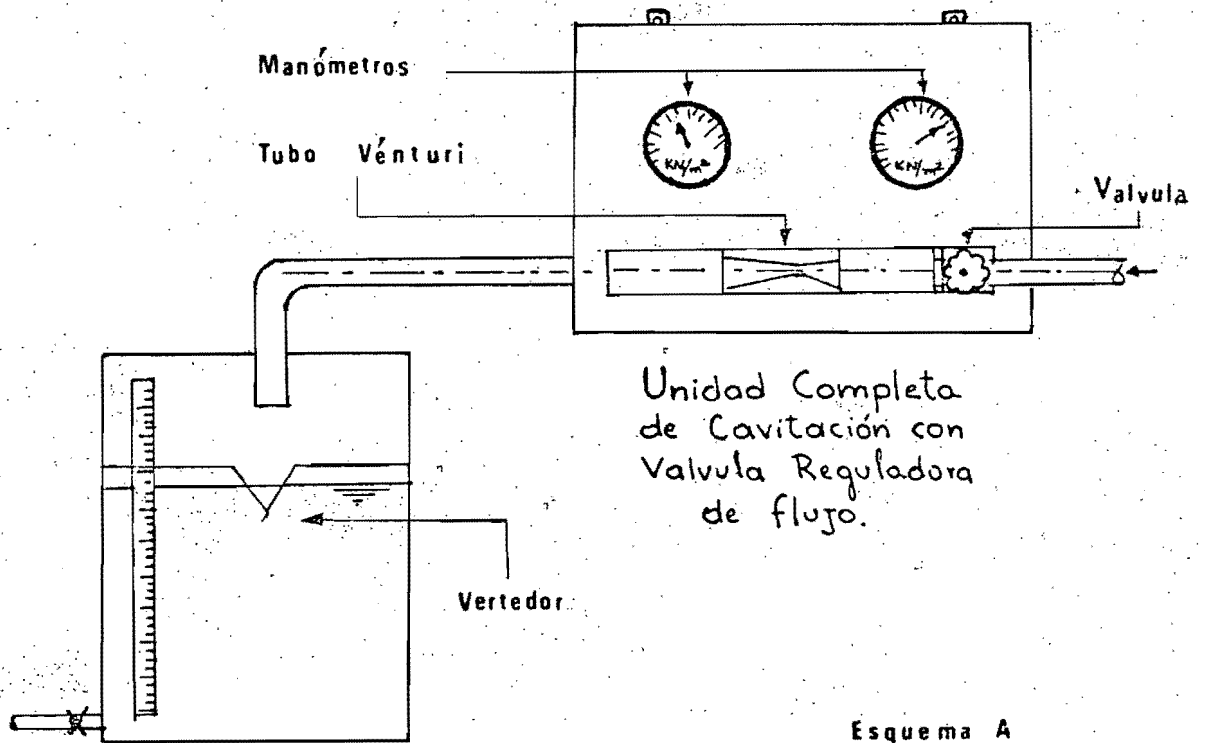


Fig. 6. Esquema del tubo Vénturi.

transversal rectangular, con manómetros colocados en la garganta del venturi y antes de ella, una válvula reguladora y un vertedor triangular para aforar el gasto. (Ver esquema A).



Después de hacer un análisis cualitativo (Ref. 1) y notar que se requería de una presión de 18 m. de agua para producir cavitación, era de esperarse que en el experimento se requeriría de una presión del mismo orden, por tanto, se procedió a instalar el equipo en el laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, donde se podría tener dicha carga.

Para evitar las fluctuaciones de carga debidas al consumo, se realizaron las mediciones en las horas de la mañana donde las fluctuaciones son menores y así tener unos datos más estables.

El sistema para determinar la cavitación (Ver esquema B) consiste en:

1. Tres tubos vénturi de sección circular con las siguientes características.

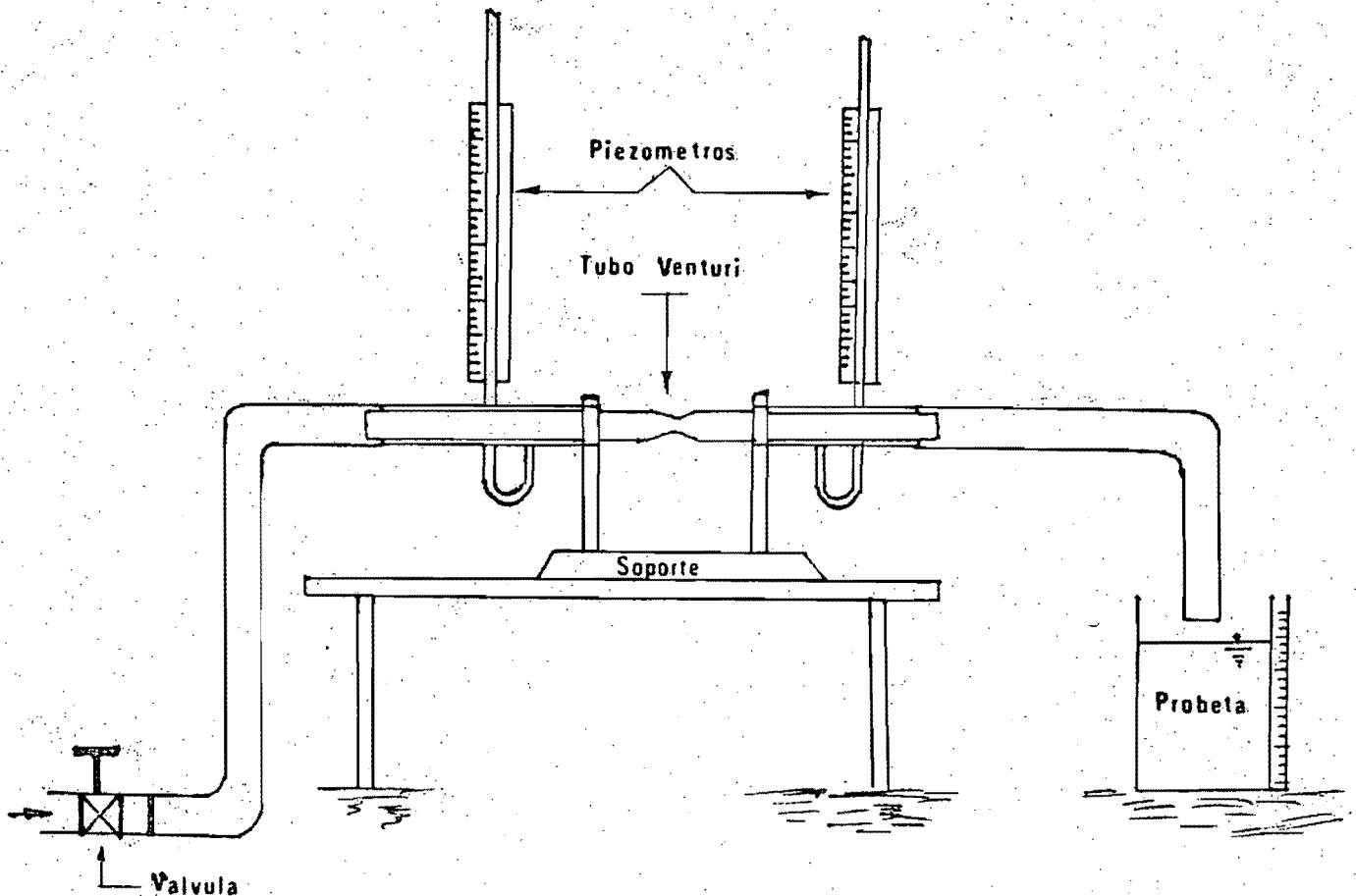
	D_1 (mm)	D_2 (mm)
Tubo No. 1	12.90	2.30
Tubo No. 2	14.30	3.40
Tubo No. 3	14.50	1.40

D_1 : Diámetro Interno mayor

D_2 : Diámetro Interno menor (garganta del Venturi)

2. Dos piezómetros (colocados a igual distancia del centro del Vénturi)
3. Cronómetro
4. Termómetro
5. Probeta graduada
6. Válvula
7. Manguera, soporte, escalímetro y vernier

Para cada vénturi se procedió de la misma forma, tomando de 9 a 10 mediciones de presión con gasto creciente (Ida) y 4 mediciones con gasto decreciente (Venida).



Esquema B

Las mediciones con gasto creciente se hicieron partiendo de no cavitación hasta una cavitación desarrollada (Presencia clara de vapor de agua) y las mediciones con gasto decreciente se hicieron desde una cavitación desarrollada hasta la presencia del ruido sin presencia de vapor de agua.

En la tabla No. 1 se registran los datos concernientes al experimento realizado en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería.

Tabla No. 1 Datos y observaciones requeridos.

Tubo Venturi No. 1							
Prueba	PIEZOMETRO 1		PIEZOMETRO 2		Volumen ml	tiempo s	OBSERVACIONES
	m. Hg	mH ₂ O	m Hg	m H ₂ O			
Ida							
1	0.390	5.301	0.02	0.272	715	16.3	No hay cavitación
2	0.542	7.370	0.019	0.265	790	15.49	No hay cavitación
3	0.770	10.466	0.019	0.258	770	12.47	No hay cavitación
4	0.869	11.807	0.021	0.285	660	10.0	No hay cavitación
5	1.116	15.169	0.021	0.285	740	9.73	No se aprecia vapor de agua, solamente se escucha ruido.
6	1.299	17.656	0.021	0.285	860	10.35	Se escucha ruido y aparece rayitos de vapor de agua
7	1.491	20.272	0.021	0.285	750	8.43	El fenómeno cavitante es claramente visible.
8	1.809	24.588	0.021	0.285	750	10.27	El fenómeno cavitante es claramente visible.
9	2.100	28.543	0.023	0.313	760	7.36"	El fenómeno cavitante es claramente visible.
VENIDA							
1	1.92	26.097	0.023	0.313	800	7.80	El fenómeno cavitante es claramente visible
2	1.645	22.359	0.022	0.299	805	8.53	El fenómeno cavitante es claramente visible.
3	1.362	18.510	0.021	0.285	830	9.76	Apenas se logra ver muestra de vapor de agua, se escucha ruido.
4	1.080	14.679	0.022	0.299	710	9.74	Solamente se escucha ruido.

TUBO VENTURI No. 2							
Prueba	PIEZOMETRO 1		PIEZOMETRO 2		VOLUMEN ml	TIEMPO s	OBSERVACIONES
	m Hg	m H ₂ O	m Hg	m H ₂ O			
IDA							
1	0.508	6.905	0.014	0.190	950	9.4	No hay cavitación
2	0.650	8.835	0.014	0.190	910	7.8	No hay cavitación
3	0.946	12.858	0.016	0.217	910	6.6	No hay cavitación
4	0.907	12.328	0.015	0.204	850	5.96	No hay cavitación
5	1.129	15.345	0.017	0.231	950	6.2	No se aprecia vapor de agua, solamente se escucha ruido.
6	1.108	15.060	0.018	0.245	895	5.6	El ruido se hace más intenso y no se presenta vapor de agua.
7	1.231	16.732	0.021	0.285	860	5.2	Se hace visible el fenómeno cavitante.
8	1.645	22.359	0.020	0.272	985	5.4	El fenómeno cavitante es claramente visible.
9	1.631	22.169	0.023	0.313	870	4.61	El fenómeno cavitante es claramente visible.
10	1.785	23.895	0.020	0.272	905	4.8	El fenómeno cavitante es claramente visible.
VENIDA							
1	1.684	22.889	0.028	0.381	620	3.32	El fenómeno cavitante es claramente visible.
2	1.469	19.967	0.023	0.313	990	5.78	El fenómeno cavitante es claramente visible.
3	1.105	15.019	0.022	0.299	770	5.13	Disminuye la visibilidad del fenómeno cavitante
4	1.016	13.809	0.020	0.272	780	5.48	El ruido sigue y aparece en forma intermitente de vapor de Agua.
5	0.698	9.487	0.016	0.217	840	7.12	Se escucha ruido muy tenue.

TUBO VENTURI No. 3							
PRUEBA	PIEZOMETRO 1		PIEZOMETRO 2		VOLUMEN ml	TIEMPO s	OBSERVACIONES
	m Hg	m H ₂ O	m H ₂	m H ₂ O			
IDA							
1	0.488	6.632	0.017	0.231	840	60.2	No hay cavitación
2	0.639	8.679	0.017	0.231	850	51.20	No hay cavitación
3	0.838	9.39	0.021	0.285	560	30.44	No hay cavitación
4	1.028	11.973	0.019	0.258	990	46.2	No hay cavitación
5	1.316	17.887	0.017	0.231	980	40.3	No se aprecia vapor de agua, solamente se escucha ruido.
6	1.374	18.676	0.021	0.285	730	30.45	Se hace el ruido más agudo aparece vapor de agua en forma intermitente.
7	1.457	19.804	0.017	0.231	1000	38.4	Se hace el ruido más agudo aparece vapor de agua en forma intermitente.
8	1.620	22.019	0.018	0.245	995	35.6	El fenómeno cavitante es claramente visible.
9	1.925	26.165	0.017	0.231	805	25.4	El fenómeno cavitante es claramente visible.
VENIDA							
1	1.916	26.042	0.017	0.231	910	30.0	El fenómeno cavitante es claramente visible.
2	1.758	23.895	0.016	0.217	850	30.0	El fenómeno cavitante es claramente visible.
3	1.565	21.268	0.017	0.231			Disminuye la nube cavitante (vapor de agua).
4	1.316	17.887	0.017	0.231	730	30.0	Solo se escucha ruido.

IV. ANALISIS Y RESULTADOS

1. Aplicando la ley de conservación de la energía entre la sección 1 y 2 (ver figura No. 7) y teniendo en cuenta que la cavitación ocurre cuando la presión en la sección dos es igual a la presión de vaporización del agua a la temperatura de trabajo, entonces:

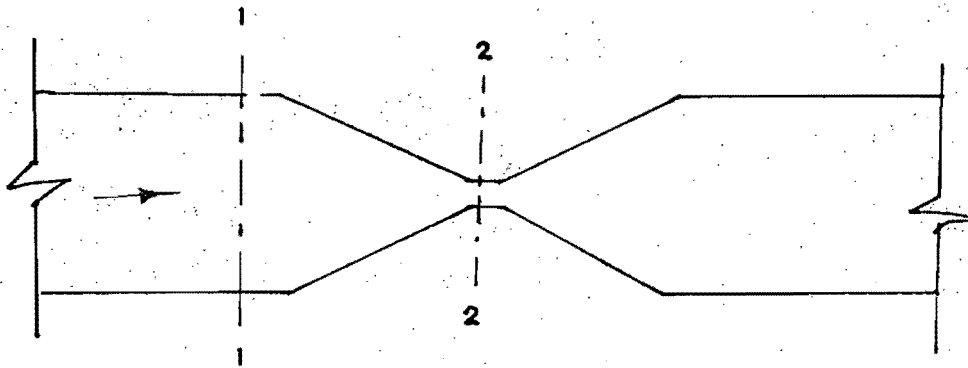


Figura N 7

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + h_L \quad (1)$$

$$Z_1 = Z_2 \quad \rightarrow$$

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + h_L \quad (2)$$

$$A_1 V_1 = A_2 V_2; \quad A_1 = \frac{\pi D_1^2}{4} \quad A_2 = \frac{\pi D_2^2}{4} \quad \rightarrow$$

$$\frac{\pi D_1^2}{4} V_1 = \frac{\pi D_2^2}{4} V_2 \quad \rightarrow$$

$$V_2 = \frac{D_1^2 V_1}{D_2^2} \quad (3)$$

Sustituyendo (3) en (2)

$$\frac{P_i}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + \left[\frac{D_1^2 V_1}{D_2^2} \right]^2 + h_L \quad \rightarrow$$

$$\frac{P_1 - P_2}{\gamma} = \left[\frac{D_1^2 V_1}{D_2^2} \right]^2 - \frac{V_1^2}{2g} + h_L$$

$$\frac{P_1 - P_2}{\gamma} = \frac{(D_1^4 - D_2^4)}{D_2^4} \frac{V_1^2}{2g} + h_L \quad (4)$$

$$S_i h_L = k \frac{V_1^2}{2g} \quad (5)$$

Sustituyendo (5) en (4)

$$\frac{P_1 - P_2}{\gamma} = \frac{(D_1^4 - D_2^4)}{D_2^4} \frac{V_1^2}{2g} + k \frac{V_1^2}{2g} \quad \rightarrow$$

$$\frac{P_1 - P_2}{\gamma} = \left[\frac{D_1^4 - D_2^4}{D_2^4} + k \right] \frac{V_1^2}{2g} \quad \rightarrow$$

$$\frac{P_1}{\gamma} = \left[\frac{D_1^4 - D_2^4}{D_2^4} + k \right] \frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} \quad (6)$$

$$\frac{P_2}{\gamma} = P_v \quad (7)$$

Sustituyendo (7) en (6)

$$\frac{P_1}{\gamma} = \left\{ \frac{D_1^4 - D_2^4}{D_2^4} + K \right\} \frac{V_1^2}{2g} + P_v \quad (8)$$

$$\text{Si } k_1 = \frac{D_1^4 - D_2^4}{D_2^4} + k$$

$$\boxed{\frac{P_1}{\gamma} = k_1 \frac{V_1^2}{2g} + P_v} \quad (9)$$

La ecuación (9) representa la ecuación de una recta, donde k_1 es el valor de la pendiente y P_v (Presión de vaporización) será la intercepción de la recta con el eje vertical.

En la Tabla No. 2 se presentan los valores de $\frac{P_1}{\gamma}$ y $\frac{V_1^2}{2g}$ y en las figuras 8, 9, 10, se representan dichos valores, para determinar así, la presión de vaporización del líquido (agua).

Tabla No. 2 Valores de $\frac{P_1}{\gamma}$ y $\frac{V_1^2}{2g}$ para los tres tubos venturís.

Tubo venturí No. 1		Tubo venturí No. 2		Tubo venturí No. 3	
$\frac{P_1}{\gamma}$	$\frac{V_1^2}{2g}$	$\frac{P_1}{\gamma}$	$\frac{V_1^2}{2g}$	$\frac{P_1}{\gamma}$	$\frac{V_1^2}{2g}$
5.301	0.0058	6.905	0.020	6.632	0.0004
7.370	0.0078	8.835	0.027	8.679	0.00052
10.466	0.0115	12.858	0.038	9.390	0.00060
11.807	0.0130	15.345	0.046	11.973	0.00086
15.169	0.0172	15.060	0.050	17.887	0.0011
17.656	0.0206	16.732	0.054	19.804	0.0013
20.272	0.0234	22.359	0.066		
24.588	0.0275	23.895	0.073		
28.543	0.0316				

Los datos experimentales se ajustaron a una recta, mediante el procedimiento de mínimos cuadrados, obteniéndose

Tubo Vénturi No. 1	Tubo Vénturi No. 2
$P_v = 0.20 \text{ m}$	$P_v = 0.23 \text{ m}$
$k = 879.625$	$k = 325.02$
$C.C = 0.998$	$C.C. = 0.996$

Tubo Vénturi No. 3

$P_v = 0.515 \text{ m}$
$k = 14910.67$
$C.C = 0.984$

Donde: P_v : Presión de vaporización del agua.
 k : Pendiente de la recta.
 $C.C$: Coeficiente de correlación.

2. La determinación del fenómeno cavitante se realiza mediante el parámetro σ , así:

$$a) \quad \sigma = \frac{P_2 + P_a - P_v}{P_1 - P_2} \quad (1')$$

P_2 : Presión aguas abajo de la garganta del venturi (Variable).

P_1 : Presión aguas arriba de la garganta del venturi (Variable)

P_a : Presión atmosférica absoluta = 7.80 m de Agua.

P_v : Presión de vapor del fluido (agua) a la temperatura de trabajo; Temperatura de trabajo = 20°C →

$P_v = 0.25 \text{ m de Agua}$

Sustituyendo los valores de P_a y P_v , en la ecuación No. 1, se tiene:

$$\sigma = \frac{P_1 + 7.55}{P_1 - P_2} \quad (2)$$

con la ecuación No. (2), podemos determinar el índice de cavitación para cualquier rango de presiones. En este experimento el rango de presión fué de 0.19 a 28.543 m de agua.

En la Tabla No. 3 se representan los valores de Índice de cavitación (σ) y número de Reynolds (Asociado al área de menor sección y en las figuras 11,12,13,14, se representan dichos valores.

TABLA No. 3. Valores del Índice de Cavitación (σ) y el número de Reynolds (R) para los 3 tubos vénturi.

PRUEBA	Tubo Vénturi No. 1		Tubo Vénturi No. 2		Tubo Vénturi No 3	
	σ	R x (10 ⁴)	σ	R x (10 ⁴)	σ	R x (10 ⁴)
IDA						
1	1.555	2.42	1.153	3.81	1.200	1.26
2	1.100	2.83	0.895	4.40	0.921	1.50
3	0.765	3.45	0.614	5.20	0.860	1.63
4	0.680	3.63	0.640	5.30	0.666	1.93
5	0.526	4.18	0.515	5.78	0.441	2.19
6	0.451	4.56	0.526	5.94	0.426	2.17
7	0.392	4.92	0.476	6.24	0.398	2.35
8	0.322	5.28	0.408	6.88	0.358	2.52
9	0.279	5.66	0.360	7.02	0.300	2.86
10	--	--	0.331	7.11	--	--
AVENIDA						
1	0.305	5.66	0.352	7.04	0.301	2.74
2	0.355	5.17	0.400	6.46	0.328	2.56
3	0.431	4.67	0.514	5.66	0.370	2.42
4	0.535	4.01	0.578	5.37	0.441	2.19
5	--	--	0.838	4.45	--	--

Se observa con claridad, la aparición de vapor de agua (flujo cavitante incipiente) para:

$$\sigma_{i_1} = 0.451 \quad \rightarrow \quad \text{Tubo Vénturi No. 1}$$

$$\sigma_{i_2} = 0.476 \quad \rightarrow \quad \text{Tubo Vénturi No. 2}$$

$$\sigma_{i_3} = 0.426 \quad \rightarrow \quad \text{Tubo Vénturi No. 3}$$

La cavitación incipiente se define como la condición de flujo en la que se observan intermitentemente pequeñas burbujas de vapor de agua a simple vista.

Para valores mayores al índice de cavitación incipiente (σ_i) aumenta notablemente la visibilidad del vapor de agua y el ruido se hace más intenso.

Las figuras 11, 12, 13, 14, representan los valores del índice de cavitación Vs número de Reynolds (R) siendo curvas de tipo exponencial; Al transformarlas a escala semilogarítmica, (figura 15 y ajustando los datos experimentales a una recta, mediante el método de mínimos cuadrados, se obtiene:

Tubo Vénturi No. 1

$$\sigma = 10.849 - 2.229 \log R$$

$$CC = 0.994$$

Tubo Vénturi No. 2

$$\sigma = 12.158 - 2.437 \log R$$

$$CC = 0.982$$

Tubo Vénturi No. 3

$$\sigma = 12.052 - 2.66 \log R$$

$$CC = 0.991$$

CC = Coeficiente de correlación.

El rango de validez de esta ecuación, será desde un número de Reynolds correspondiente al índice de cavitación incipiente hasta un número de Reynolds de un flujo cavitante claramente visible.

Las mediciones realizadas con gasto creciente y gasto decreciente, son representadas por puntos (.) y cruces (+) respectivamente, en las figuras 11, 12, 13.

En estas figuras se puede apreciar que el fenómeno de cavitación tiene la característica de no tener memoria, es decir, al desarrollar el experimento con gasto creciente obtenemos valores del índice de cavitación diferentes a los obtenidos con gasto decreciente.

En la Fig. I se muestra una fotografía del montaje requerido para realizar el experimento.

En las Figuras J, K, L, M, N se presentan algunas fotografías para diferentes índices de cavitación donde se puede percibir el chorro cavitante.

3. Otra forma que puede ser utilizada para determinar el índice de cavitación es:

$$\sigma = \frac{P_2 + P_a - P_v}{\frac{V^2}{2g}} \quad (2^1)$$

P_2 : Presión aguas abajo de la garganta del vénturi

P_a : Presión atmosférica

P_v : Presión de vapor del líquido (agua)

V : Velocidad media en el garganta del venturi

Por medio de este análisis se obtienen los siguientes índices de cavitación incipiente:

$$\sigma_{i_1} = 0.385$$

$$\sigma_{i_2} = 0.463$$

$$\sigma_{i_3} = 0.632$$

Existe una variación significativa en los valores del índice de cavitación calculados por medio de la ecuación (1¹) y (2¹).

V. CONCLUSIONES

1. Las diferencias entre los valores calculados de presión de vaporización con la obtenida en tabla, radicanen los posibles errores de medición del gasto y presión. Si se trata al máximo de corregir los errores, se podría conocer en forma precisa la presión de vaporización del agua.
2. Era de esperarse que los valores de índice de cavitación fueran muy similares, pero las variaciones que se presentan, se deben a las fluctuaciones de la columna de mercurio en el piezómetro colocado aguas arriba de la garganta del véntuni, debido a las variaciones del consumo.
3. La forma en que se determinó el estado incipiente del flujo cavitante puede mejorarse considerablemente haciendo uso de algún dispositivo acústico.
4. Como el fenómeno de cavitación presenta histéresis es recomendable evaluar el máximo valor del índice de cavitación al cual se produce daño, ya sea con gasto creciente o decreciente.
5. El rango de presión para producir cavitación en este experimento fué de [16.50 - 19.00]m, de agua.
6. Existen diferentes formas de hacer adimensional el ín-

dice de cavitación, en este trabajo y en dispositivos de similar comportamiento es recomendable hacer uso de la ecuación No. 1, ya que nos da mejores resultados de lo que puede ser el fenómeno, además dicha ecuación incluye solo parámetros de presión que pueden ser medidos de una forma más fácil.

7. En la figura 14, se representa los valores del índice de cavitación V_s número de Reynolds, donde se puede diferenciar dos zonas limitados por la cavitación incipiente (Se observa intermitentemente pequeñas burbujas de vapor de agua), la zona superior representa la condición de flujo en donde no hay cavitación y la zona inferior representa la condición de flujo en donde el vapor de agua y el ruido característicos de una cavitación definido.

En la figura 15, se representa los valores del índice de cavitación V_s logaritmo del número de Reynolds, donde se puede determinar fácilmente el valor de . Como se puede apreciar existe una leve diferencia en la pendiente de las rectas, esta se debe a error experimental.

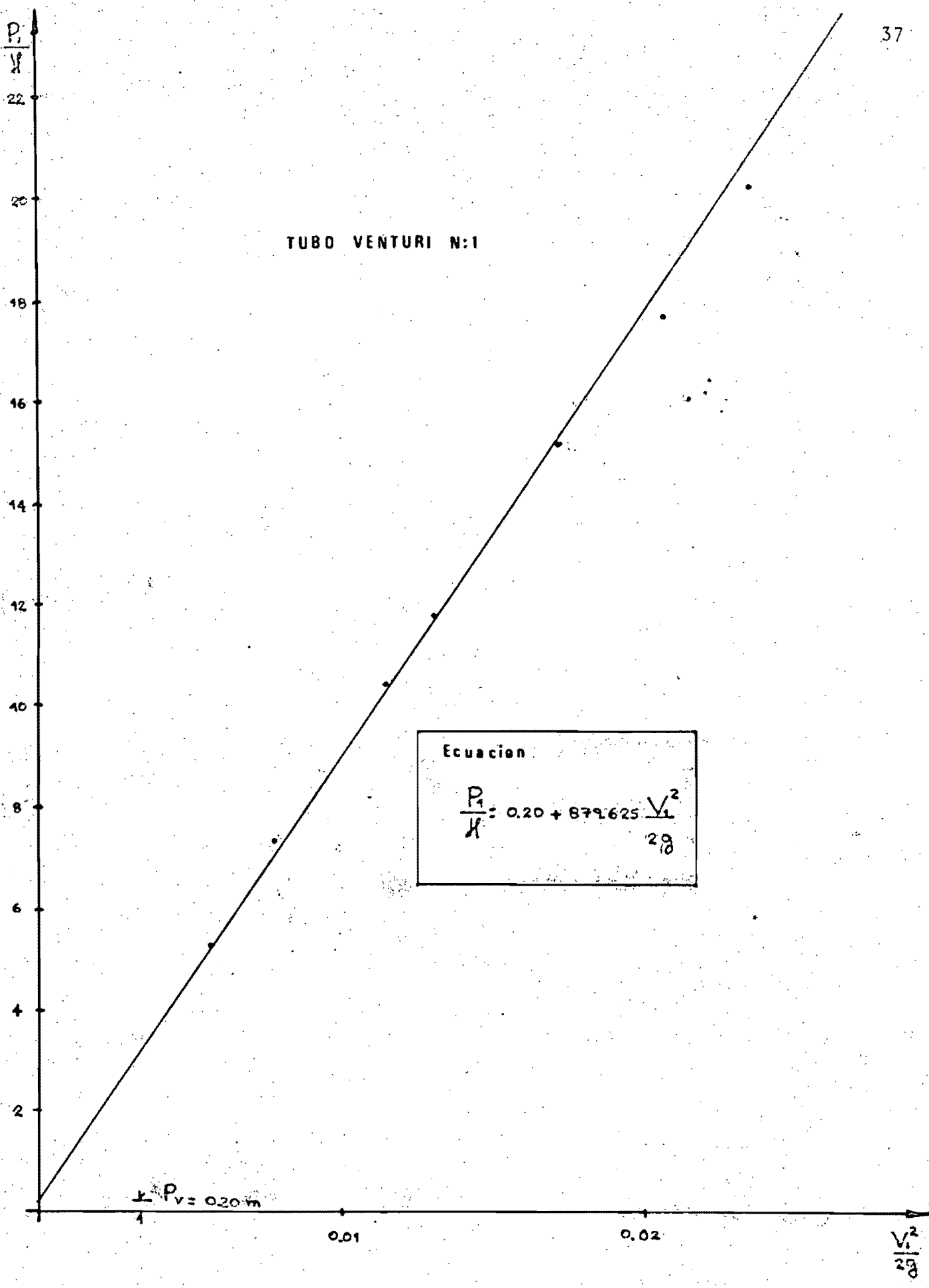


FIG. 8. Determinación de la presión de vaporización.

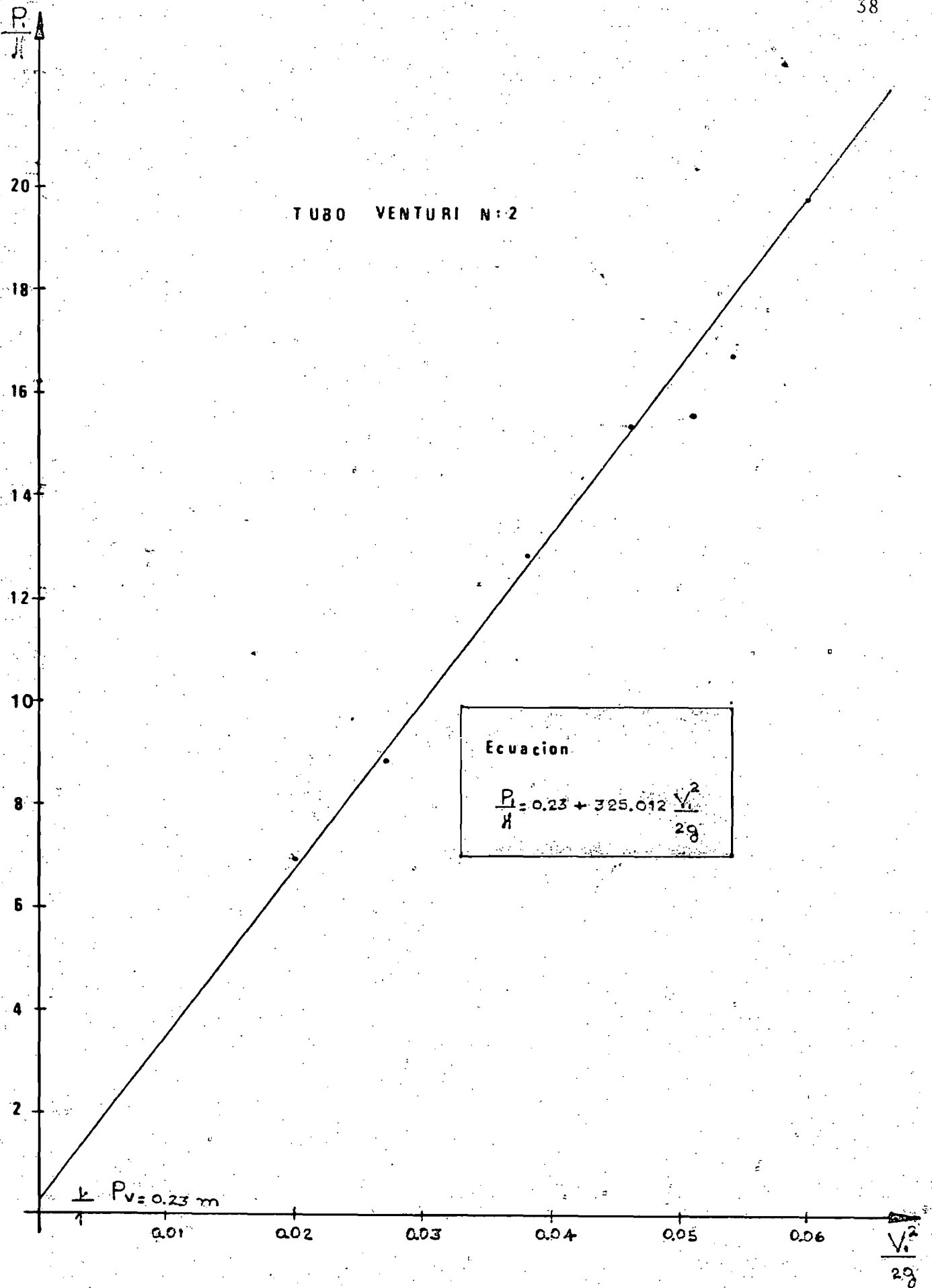


FIG. 9. Determinación de la presión de vaporización

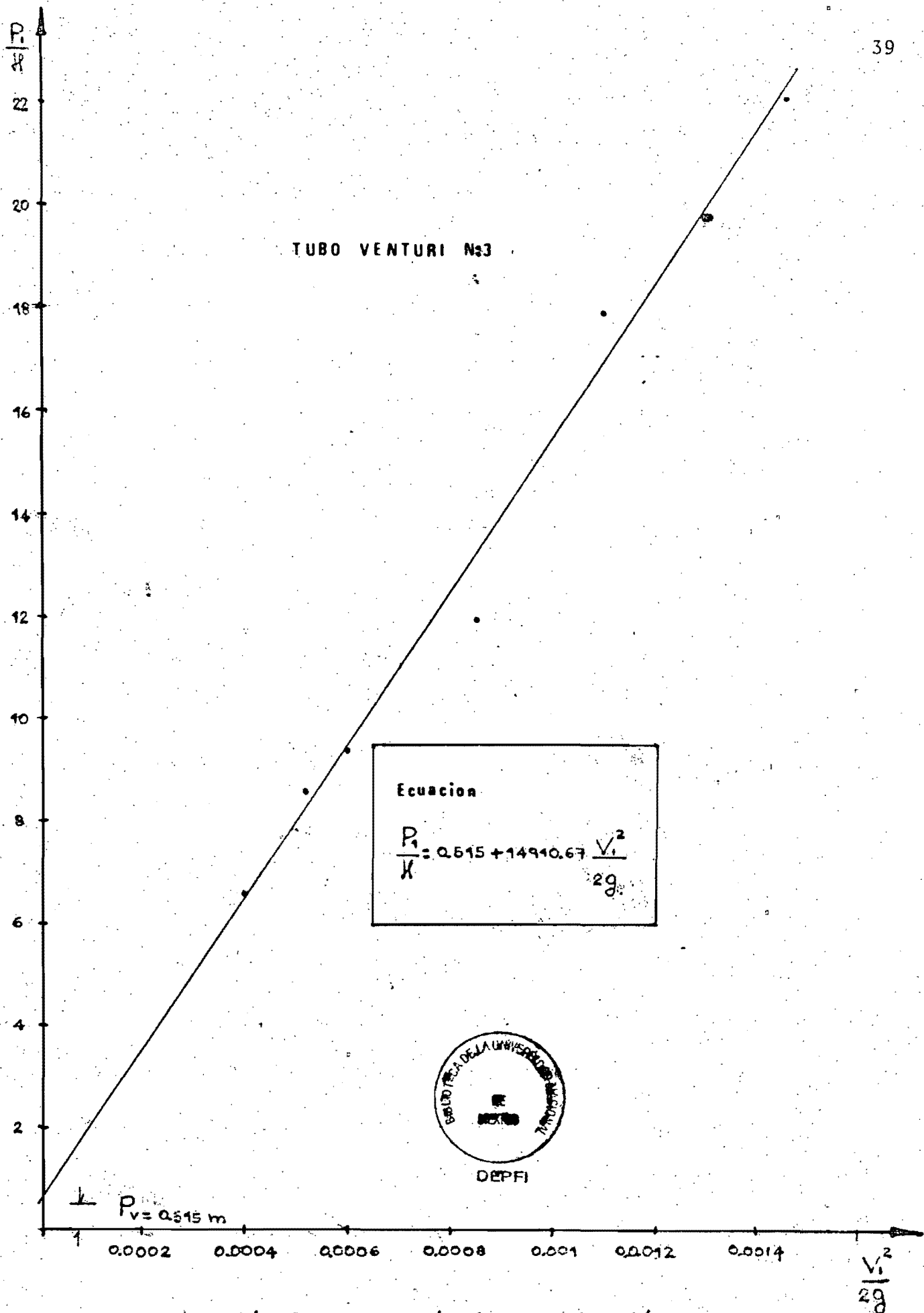


FIG. 10.—Determinación de la presión de vaporización.

FIG. 11. Evaluación gráfica del Índice de Cavitación para el Tubo Venturi No. 1.

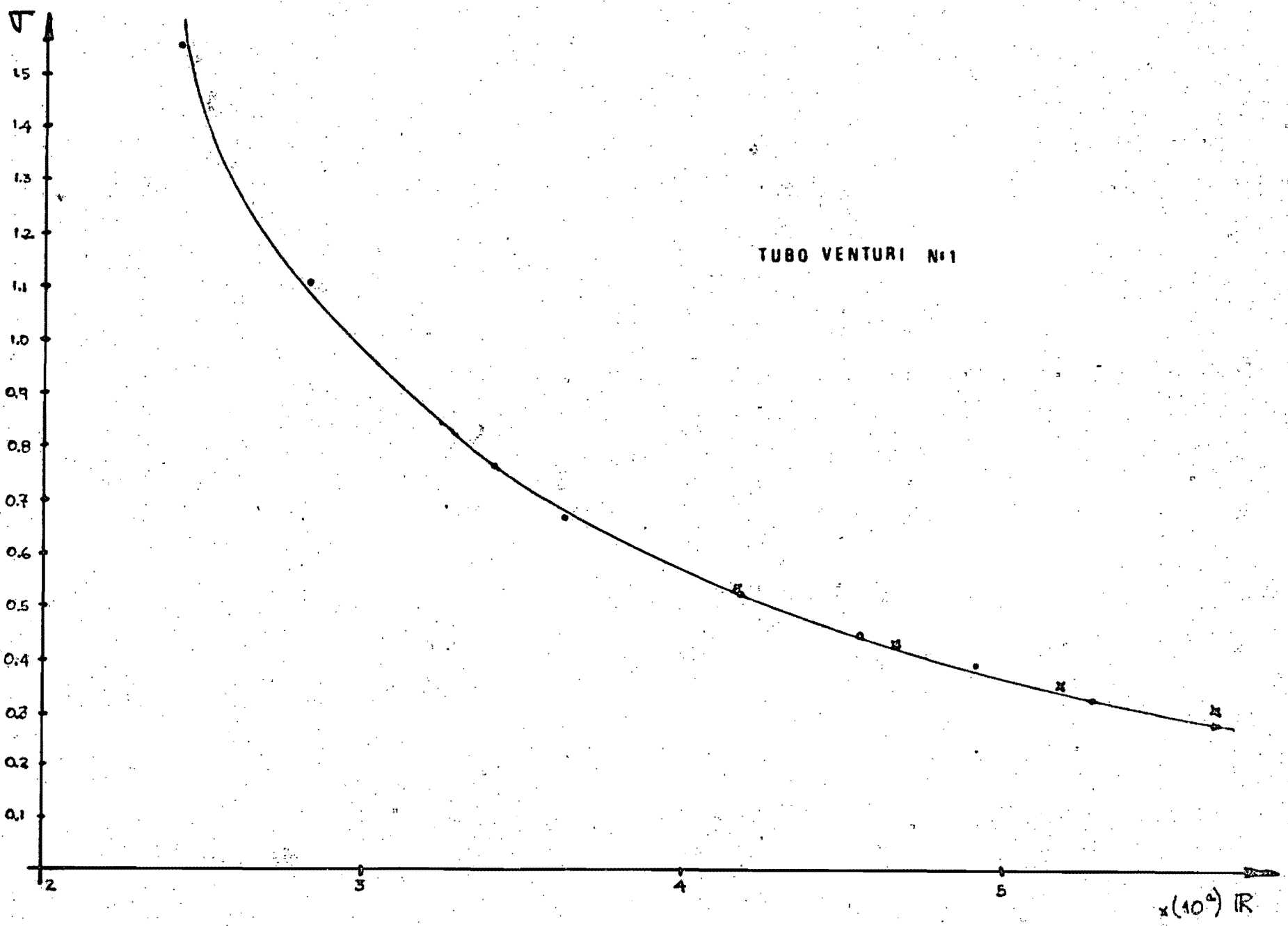


FIG. 12. Evaluación gráfica del Índice de Cavitación para el Tubo Venturi No. 2.

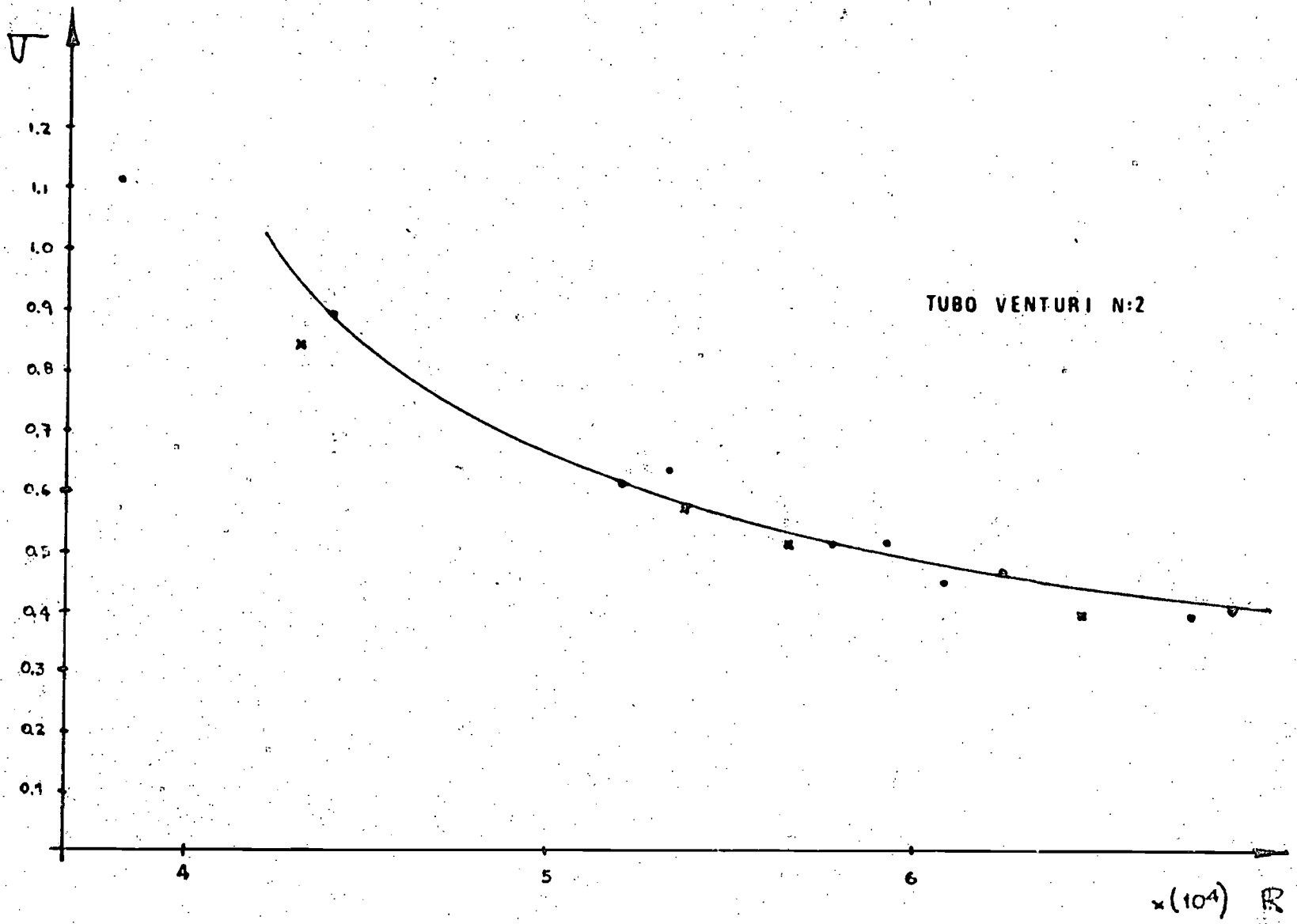


FIG. 13. Evaluación gráfica del Índice de Cavitación para el Tubo Venturi No. 3.

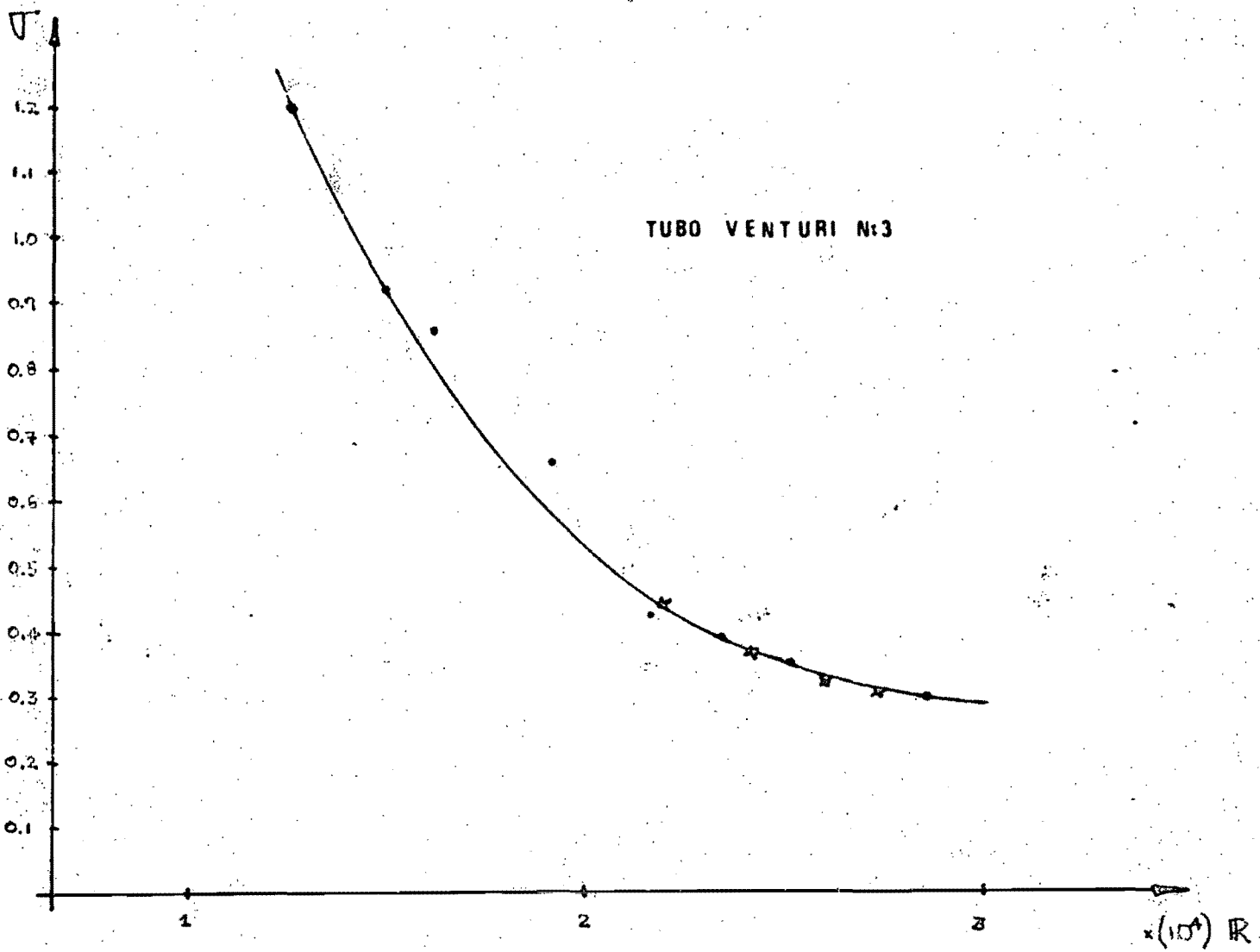


FIG. 14. Evaluación gráfica del Índice de Cavitación para los tres cubos Vénturi, así como sus etapas.

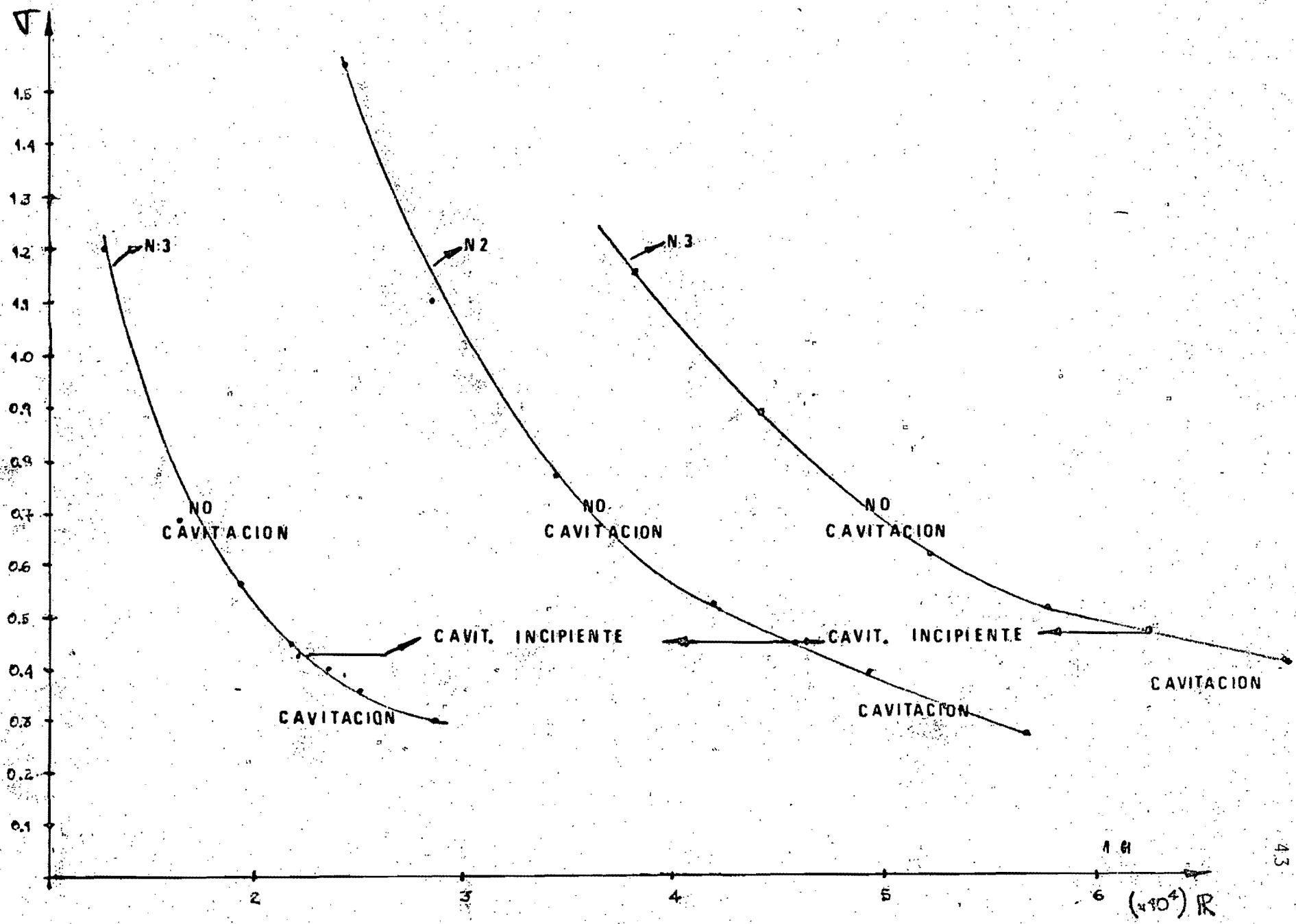
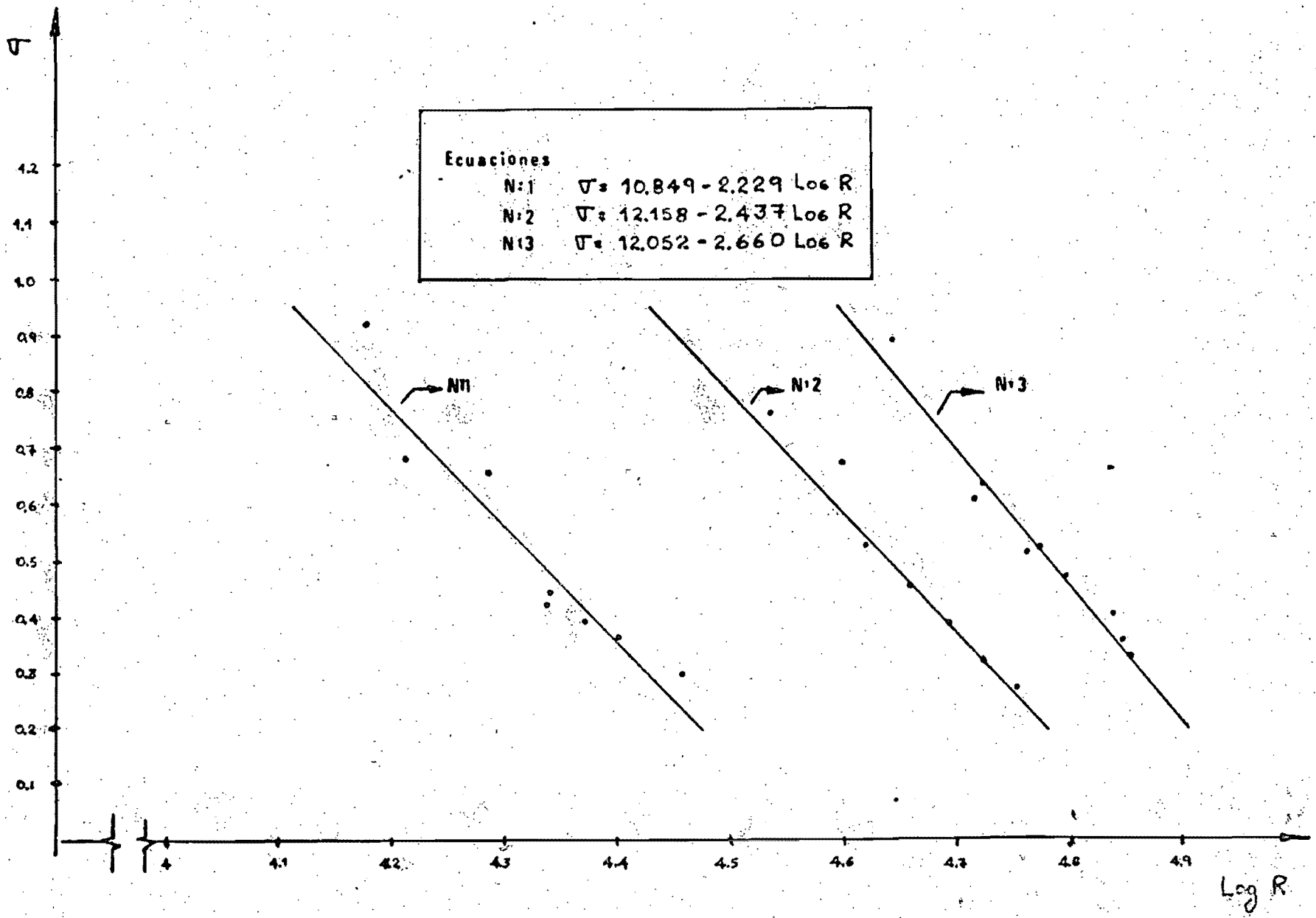


FIG. 15. Evaluación gráfica del Índice Cavitación para los tres Tubos Venturi.



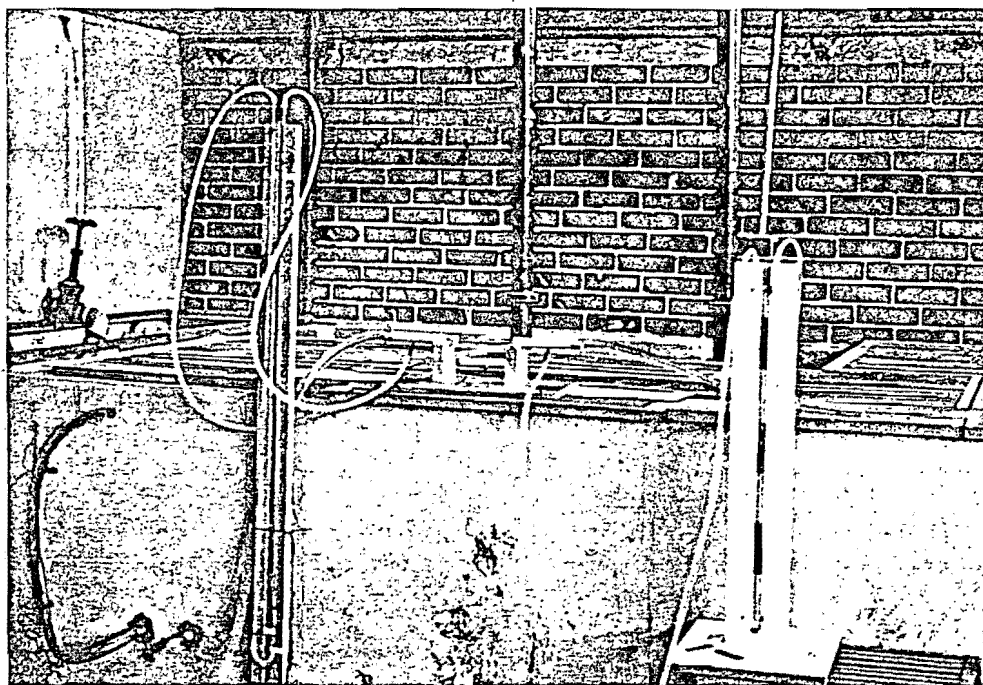


Fig. I

Fotografía del
vénturi por apa-
ratos de medida
y soporte

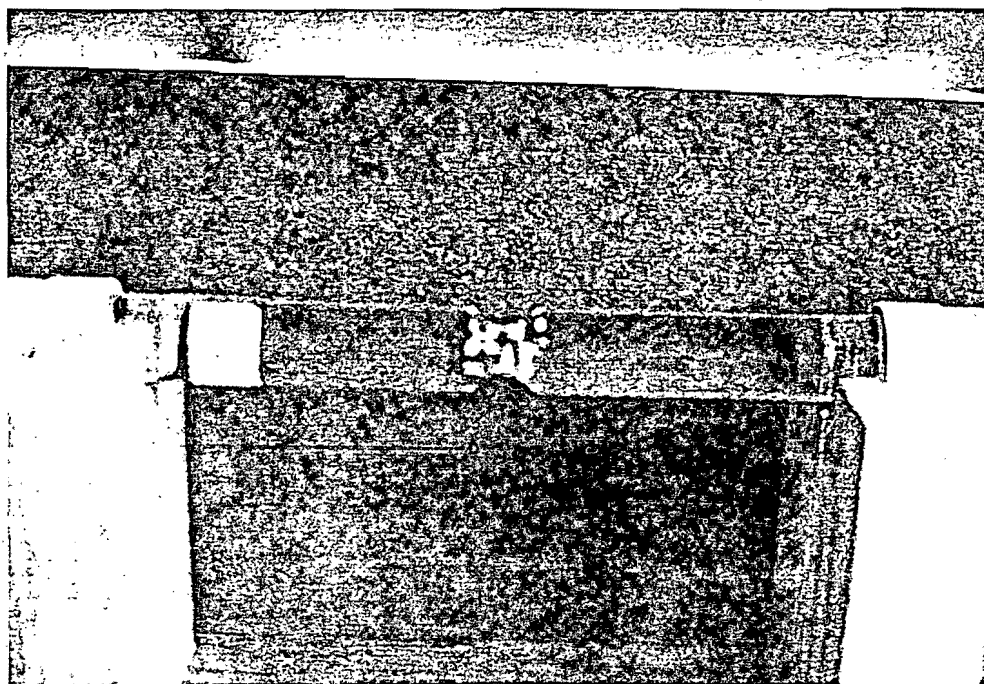


Fig. J

Fotografía del
chorro no cavi-
tante.

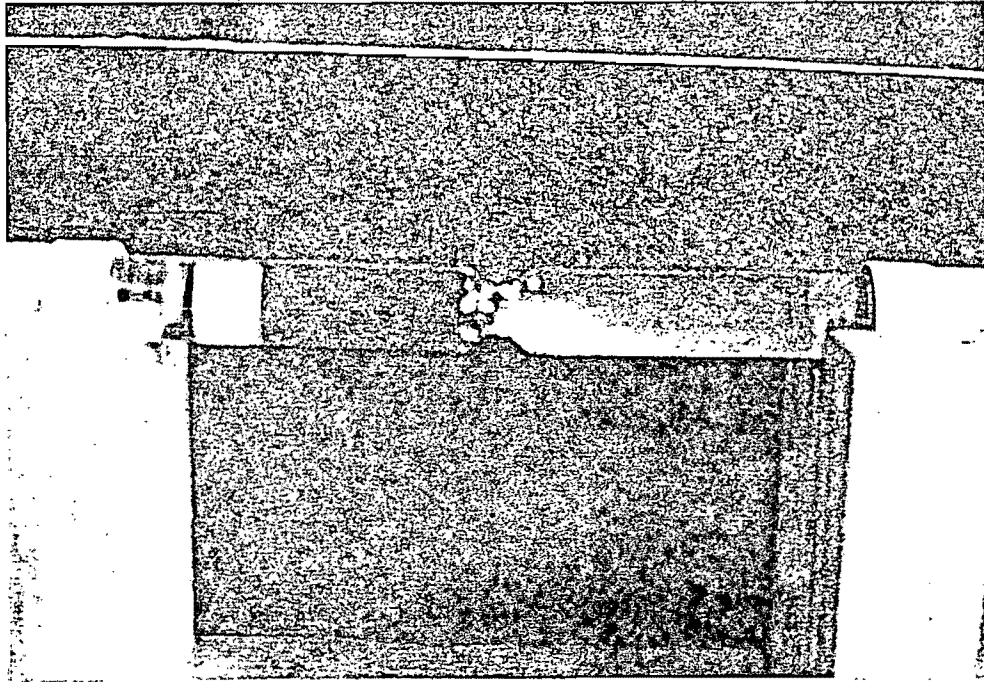


Fig. K
Fotografía del
chorro cavitan
te (Estado In-
cipiente)

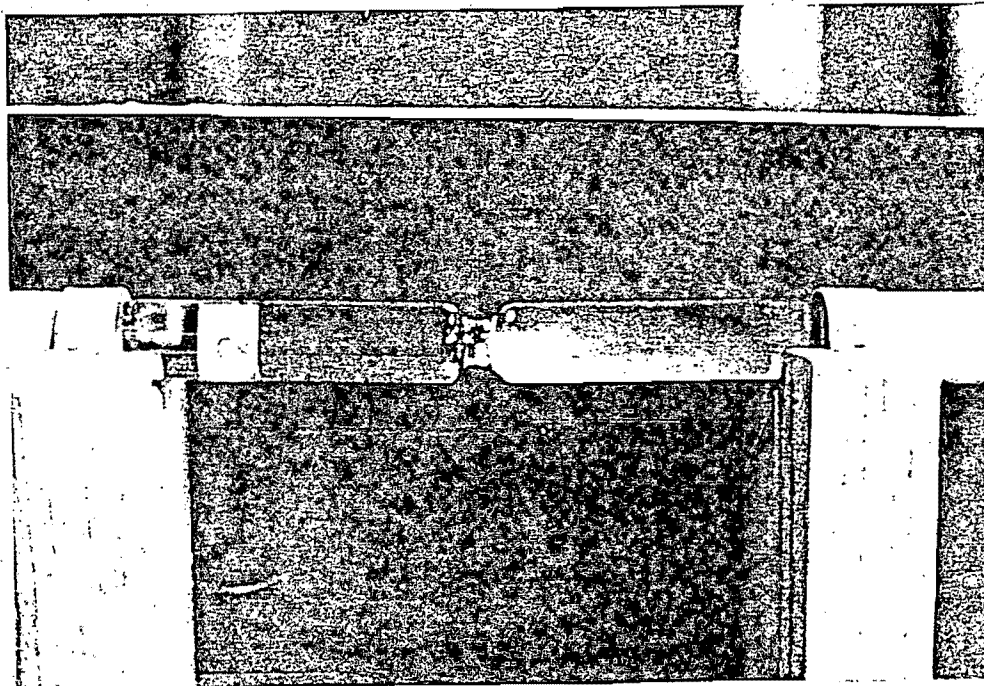


Fig. L
Fotografía del
chorro cavitan
te (Cavitación
desarrollada)

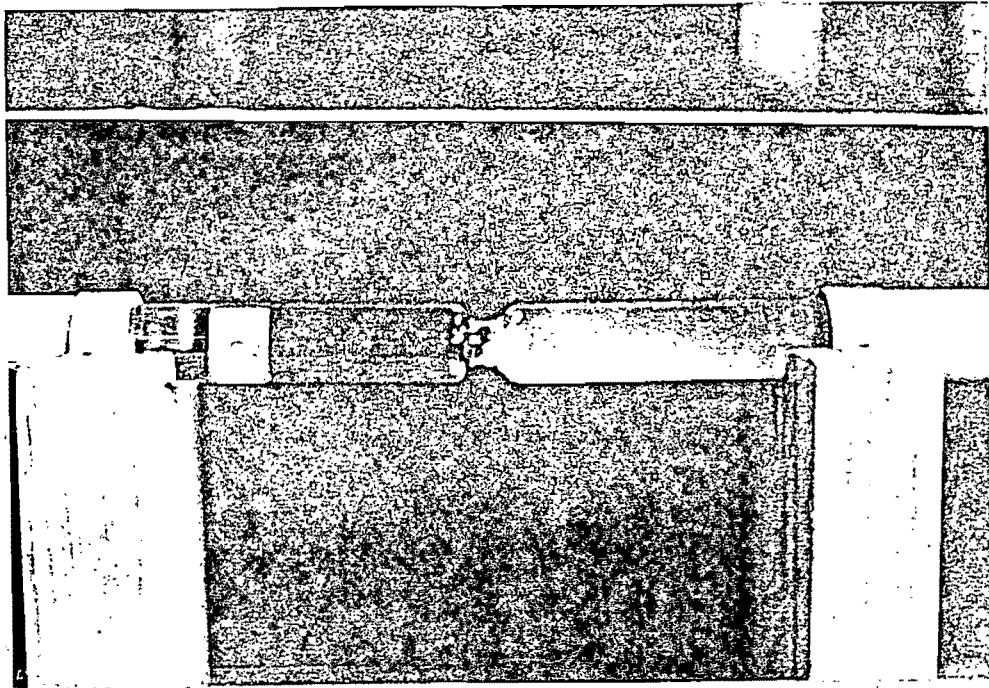


Fig. M
Fotografía del
chorro cavitan
te (Cavitación
desarrollada)

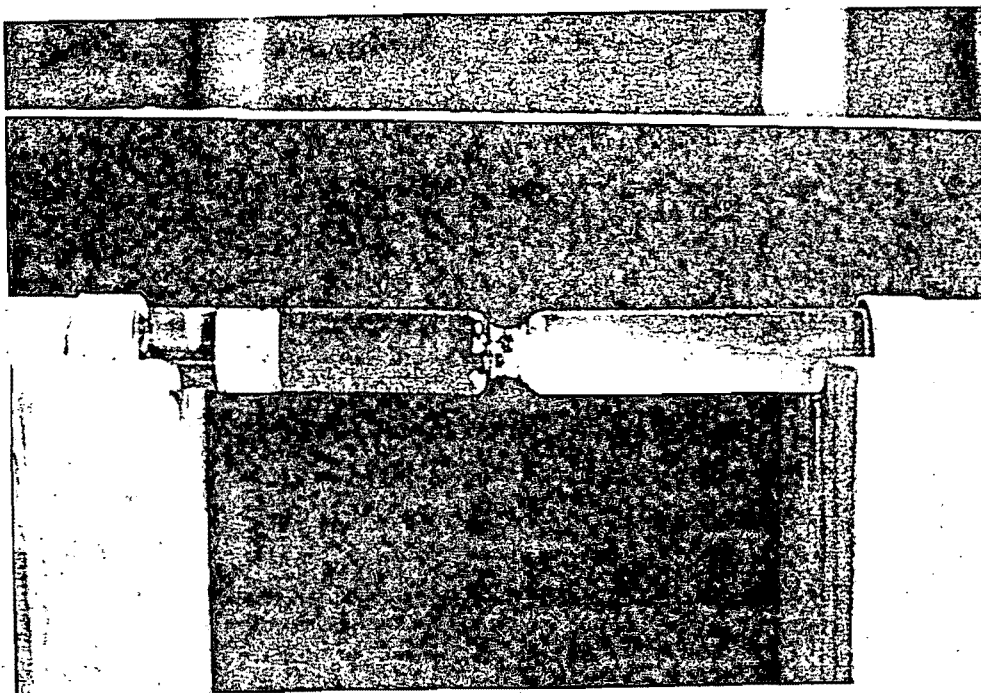


Fig. N
Fotografía del
chorro cavitan
te (Cavitación
desarrollada)

APARTADO DE EL LIBRO



DEPFI

T. UNAM

1 9 8 5

PAL

VII. R E F E R E N C I A S

1. Armfields. Instruction manual for cavitation demonstration apparatus. Education equipment division.
2. Echávez G., "Cavitación en vertedores", Instituto de Ingeniería, UNAM, 415 (febrero 1979).
3. Guarda R. Método acústico para detección de la cavitación. Estudio comparativo de dos detectores y dos formas de tratamiento de la señal. VIII Congreso Nacional de Hidráulica.
4. Knapp, R T , Daylym J W y Hammitt, FG, Cavitation, Mc Graw-Hill Book Co, Nueva York, (1970).
5. Tallis, J P, "Cavitation and size scale effects for orifices", Journal for the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, March, 1973, pp. 417-429. Volumen 99.
6. Sotelo G. Hidráulica, Volumen 1. Editorial Limusa, México (1982).