



# Chorros y gotas en el seno de un líquido

POR EL

DR. FELIX RAMON ROMOJARO SANCHEZ

I

## OBJETO DEL TRABAJO

Una de las operaciones básicas que van tomando una importancia industrial cada día mayor es la extracción líquido-líquido, esto ha hecho que desde hace unos años los investigadores se dediquen a estudiar cuáles son las variables que influyen sobre el proceso al objeto de encontrar las condiciones óptimas del mismo.

Entre los aparatos industriales utilizados en esta operación, los más convenientes para realizar una investigación sobre la forma de realizarse el proceso, son las torres de pulverización, por su sencillez, lo que no quiere decir ni mucho menos, que dicho proceso sea sencillo, sino que, por el contrario y debido a los muchos factores que intervienen de una manera activa, resulta muy complicado como lo demuestra el gran número de investigaciones realizadas en estos últimos años.

Estas investigaciones han ido encaminadas:

1.º A la determinación del coeficiente global de transferencia y de la cantidad extraída de un soluto durante la formación de una gota, por un disolvente.

Como resumen de los resultados obtenidos, tenemos:

SERWOOD, EVANS y LONGCOR (26) estudiando el sistema (ácido acético-metil-isobutilcetona) - agua encontraron que el 40 % de la extracción total de la torre se verificaba durante la formación de la gota. De la comparación de los coeficientes globales de transmisión teóricos y experimentales dedujeron que en el interior de la gota había intensa circulación.



LIGHT y CONWAY (21), extraen ácido acético de una solución acuosa con éter isopropílico, metil isobutil-cetona y acetato de etilo, sucesivamente, hallando que las cantidades extraídas durante la formación de las gotas es 5 %, 8 % y 17 % respectivamente, de la total.

Esto, que está en desacuerdo con el trabajo de SERWOOD y colaboradores, lo explicaban por el cambio de dirección en la transferencia del ácido acético.

Indican, también, que la fracción extraída es independiente del tamaño de la gota; y que el coeficiente global de transferencia disminuye al aumentar dicho tamaño.

WEST, ROBINSON, MORGENTHALER, BERCK y MC. GREGOR (38), trabajaron con el sistema, (ácido acético-benceno)-agua, con la misma dirección de transferencia y el mismo aparato utilizado por SHERWOOD, obteniendo un resultado mucho más bajo que éste, solamente el 14 a 20 %.

WEST, HERRMAN, CHONG y THOMAS (37) investigando sobre el caso anterior dedujeron que las discrepancias que se encontraban con SHERWOOD eran debidas a haberse utilizado para el paso de la fase orgánica tubos de «tygon», que al impurificarla modificaban su tensión interfacial.

LIGHT y PANSING (22), por otro lado, consideran que la extracción, en esta etapa, es muy pequeña. La discrepancia con otros investigadores la achacan a que éstos determinan la fracción extraída durante la formación por extrapolación, a altura de torre cero, y esto lo consideran incorrecto pues al separarse las gotas de la boquilla se producen unas oscilaciones que dan lugar a un aumento en la extracción, oscilaciones que desaparecen en seguida.

COULSON y SKINER (5) dedujeron que la fracción extraída (E) aumentaba con el tiempo de formación, pero que la relación  $\Delta E/\Delta t$ , así como el coeficiente global de transferencia, disminuía al prolongarse dicho tiempo.

GARNER y SKELLAND (12) comprueban en el sistema, (nitro-benceno-ácido acético)-agua, que, para tiempos pequeños, la fracción extraída aumenta con el tiempo, así como con la circulación interior. Pasado un determinado tiempo se hace independiente de la circulación, y para tiempos muy elevados, tanto la fracción extraída como el coeficiente de transferencia tendían a hacerse constantes.

Demostraron la circulación interior comprobando que el coeficiente teórico de transferencia era mucho menor que el experimental.

GARNER (9) pudo observar que al formarse las gotas, además de la circulación del líquido por el interior de ellas, poseían pulsaciones que

producían un incremento en la extracción, y que estas pulsaciones se podían impedir por la adición de agentes tenso-activos.

2.º A la determinación del coeficiente global de transferencia y fracción extraída durante el movimiento de las gotas a través de la torre de pulverización.

De los trabajos publicados se deduce lo siguiente:

Si las gotas de la fase dispersa se mueven lentamente a través de la continua producirán un flujo laminar, interiormente funcionarán como esferas rígidas, no renovándose la película interior. La película exterior sí se renovará, dando lugar a lo que WEST (37), llamó «película transitoria», y el mecanismo de transmisión de materia estará determinado por la ecuación de HIGBIE (17), utilizando el factor  $f_c$ , igual a la relación entre el coeficiente global experimental y el teórico. En la fase dispersa la transferencia se realizará por dispersión molecular, debiendo utilizarse, para expresar el fenómeno, la ecuación de GEDDES (15).

Al aumentar el tamaño de las gotas y llegar a alcanzar un radio crítico, comenzará la circulación dentro de la fase dispersa. Según BOND y NEWTON (2), éste será

$$r = \sqrt{\frac{\sigma}{(\rho' - \rho) g}}$$

donde

$\sigma$  = tensión interfacial

$\rho'$  = densidad de la fase dispersa

$\rho$  = densidad de la fase continua.

GARNER y HAMMERTON (11) llegaron a la conclusión que este criterio no podía aplicarse a muchos de los sistemas, por ellos estudiados.

La circulación será lenta en su comienzo, y la difusión, en la fase dispersa, a través de un fluido en flujo laminar, debiendo aplicarse, por lo tanto, la ecuación de KRONIG y BRINK (19) por ser la que mejor se adaptará en este caso. La película interior se renovará muy lentamente, permitiendo al soluto atravesarla antes de que haya desaparecido.

Al aumentar la circulación interior llegará un momento en que el tiempo necesario para pasar el soluto a través de ella es mucho mayor que su existencia, pudiendo, en este caso, considerarse de espesor infinito con respecto a la difusión, y utilizar para ambas películas, interior y exterior, la ecuación de HIGBIE.

Si la película circulara desde el polo anterior al posterior, es decir, formándose en aquél y desapareciendo en éste, la máxima velocidad de circulación sería 1,5 veces la del movimiento de la gota, pero GARNER y SKELLAND (12), encontraron coeficientes de transferencia experimenta-

les, superiores a los calculados con la ecuación de HIGBIE, considerando el tiempo correspondiente a máxima circulación, lo que parece indicar que el tiempo de duración de la película es aún menor. BOND (1) consideró que las películas interior y exterior tienen una velocidad común, debe crecer desde cero, pasar por un máximo y volver a cero.

Según esto, la superficie está creándose y destruyéndose continuamente pero a una velocidad mayor que la supuesta en el mecanismo de las «películas transitorias», y el tiempo a considerar en la ecuación de HIGBIE deberá ser menor que el que hemos considerado para circulación máxima, con lo que se obtendrían mayores coeficientes de transferencia que los experimentales.

La teoría de BOND explica, también, el hecho de que los movimientos de oscilación, o pulsaciones, en las gotas incrementen el coeficiente de transferencia; ya que estos movimientos facilitarían la creación y desaparición de la superficie interfacial.

GARNER y SKELLAND (12) hicieron notar que, cuando la velocidad de las gotas adquiere un cierto valor, el flujo alrededor de las mismas no es laminar en toda su extensión; la película exterior circula junto a la superficie de la gota hasta un cierto punto (punto de separación) que se encuentra alrededor de  $110^\circ$  del polo anterior, en donde se separa de la superficie, juntándose todas las líneas de flujo a una cierta distancia del punto posterior de la gota, encerrando una zona (la estela) que se encuentra en movimiento turbulento dando lugar a vórtices. En la estela la película exterior circula en contracorriente con la interior, existiendo, en la proximidad del punto de separación, una zona en reposo. Este mecanismo fué estudiado por GARNER y GRAFTON (10) utilizando esferas de ácido benzoico en corriente de agua, usando partículas de aluminio para detectar las líneas de flujo.

La aparición de la estela, cuando se trata con dos líquidos con una apreciable diferencia en la concentración de soluto, se produce para números de Reynolds comprendidos entre 19 y 23, según GARNER y SKELLAND (13).

En las conclusiones obtenidas por diferentes investigadores, sobre la fracción extraída en relación con el tamaño de las gotas se observa alguna discrepancia ya que, según LICHT (22) esta fracción varía en sentido contrario que el tamaño de las gotas, achacándola al aumento de superficie al disminuir ésta.

GARNER (12) en cambio, encontró que la extracción era independiente de dicho tamaño.

Esta discrepancia se puede explicar considerando que cuando las go-

tas no tienen circulación interior, o ésta es pequeña, el factor controlante de la extracción será la superficie; mientras que si la circulación es más intensa, al aumentar el tamaño de la gota, el aumento del valor del coeficiente de transferencia puede compensar la disminución de superficie; e incluso para grandes gotas, en las que se producen oscilaciones, puede llegar a superarse dicho efecto.

Como norma general podemos considerar que la fracción extraída aumenta con la altura de la torre y con la concentración inicial (12).

Esta fracción extraída depende del tiempo de contacto (5). Para una altura de columna determinada este tiempo dependerá de la velocidad, que a su vez varía con el tamaño de la gota, y como el factor que parece de gran importancia es el producto de la superficie de la interfase por el tiempo de contacto, cuánto más pequeño sea el tamaño de las gotas mayor será este producto. Parece, pues, que cuanto más pequeñas sean las gotas mayor será la extracción, y así debería ser sino fuese porque las gotas pequeñas actúan como esferas rígidas, y la circulación interior aumenta considerablemente el valor del coeficiente de transmisión.

Este coeficiente tiene una variación, respecto al diámetro de las gotas, que depende, en un grado muy marcado, con el sistema utilizado.

Para el sistema (agua-ácido-acético)-metil isobutil-cetona, disminuye al aumentar el tamaño de las gotas (22).

Con el dicloroetileno-ácido acético-agua dicho coeficiente es independiente del tamaño (22).

En cambio, para el benceno-solución acuosa de ácido benzoico (5) y nitrobenzono-ácido acético-agua (12) el coeficiente varía en el mismo sentido que el diámetro de las gotas.

En el primer caso, las gotas de solución de ácido acético al caer tenían una oscilación visible, por lo que, su velocidad de caída disminuye al aumentar el tamaño; además, la resistencia se encuentra fundamentalmente en la cetona. Cuando las gotas son grandes caen más despacio, el espesor de la película exterior será más gruesa (siendo en ésta donde se encuentra la resistencia principal), disminuyendo el valor del coeficiente de película. Las oscilaciones de las gotas rebajarán el espesor de la película interior, pero en ésta la resistencia carece de importancia.

En el segundo caso, las gotas caían sin oscilación aparente, la circulación interior era reducida, encontrándose la resistencia en la fase dispersa, y los tamaños de gota observados no dieron lugar a una variación en la circulación interior suficiente para reflejarse en el coeficiente de transferencia.

En el tercer caso, se trata de sistemas en que la resistencia principal

se encuentra en la fase dispersa, existe una circulación interior intensa, y cuando las gotas pasan de un cierto tamaño se producen pulsaciones que favorecen, aún más, el aumento del coeficiente.

Otro factor que influye grandemente sobre la circulación interna de las gotas y el coeficiente de transferencia es la tensión interfacial.

WEST y colaboradores (37) encontraron que pequeñas cantidades de impurezas aumentaban la tensión interfacial y actuaban sobre el coeficiente de transferencia rebajándolo. También comprobó que la presencia de ciertos solutos (en su trabajo, alcoholes) destruía el efecto de las impurezas. La acción de éstas depende también de la constitución del disolvente.

La presencia de pequeñas cantidades de impurezas tensoactivas actúan, al acumularse éstas en la interfase, con un doble efecto, ya constituyendo una verdadera barrera al paso del soluto y también impidiendo la circulación interior en las gotas (37,12).

Cuando una gota con impurezas tensoactivas se desprende de una boquilla, está dotada de una cierta circulación interior, como puede comprobarse utilizando polvo de aluminio, para revelar el movimiento (12), que van perdiendo poco a poco, a pesar del efecto del rozamiento con la fase continua.

Las impurezas comienzan acumulándose en el polo posterior y se van extendiendo hacia adelante hasta que toda la gota queda sin circulación, funcionando como una esfera rígida. La presencia de un soluto que sea miscible con ambas fases puede destruir el efecto de estas impurezas.

No es necesario gran cantidad de impurezas tensoactivas para conseguir estos efectos, ya que con concentraciones muy por debajo de la de saturación, cae la extracción a valores correspondientes a las gotas sin circulación (14); las partículas absorbidas en la interfase, son llevadas al polo posterior por las corrientes circulatorias y van formando una película coherente que se extiende hacia adelante. Para que la película absorbida no desaparezca, ya que por ser su concentración, en la interfase, superior a la de equilibrio se producirá una desorción, será necesario que la velocidad de esta desorción sea menor que la de su acumulación.

Como podemos observar con este resumen el número de factores que intervienen en el proceso de la extracción, en torres de pulverización, es muy extenso a pesar de ser éstos los aparatos más sencillos utilizados. Pequeñas variaciones en alguna de las condiciones del proceso puede dar lugar a grandes alteraciones en los resultados.

Parece pues interesante el estudio exhaustivo de la influencia sobre el fenómeno de cada una de las variables aisladas. Entre éstas tiene una

gran importancia el tamaño de las gotas formadas, y creemos que es de primordial interés el estudio de las condiciones en que se produce el flujo de un líquido saliente por una boquilla y pasando a través de otro líquido inmiscible con él y de diferente densidad.

El objeto del presente trabajo tiene por finalidad iniciar este estudio, considerando de interés:

1.º Determinación de las velocidades lineales de flujo en función de la presión ejercida.

2.º Presión mínima necesaria para que el flujo se produzca a través de la boquilla.

3.º Tamaño medio de las gotas antes de la formación del chorro.

4.º Condiciones que han de realizarse para el comienzo del chorro.

5.º Estudio del chorro en sus diversas zonas.

6.º Variación del tamaño de las gotas en cada zona del chorro.

7.º Estudio estadístico del tamaño de las gotas al variar la velocidad de flujo.

8.º Coalescencia producida en el movimiento a través de la torre, y

9.º Siendo, el factor importante en la extracción, la superficie de la interfase, comparación de las áreas de las gotas que se forman y del chorro del que proceden.

El sistema elegido ha sido el benceno como fase dispersa y agua como fase continua. También se estudió el inverso.

## II

## APARATO UTILIZADO Y DETERMINACION DE CONSTANTES

## 1.—Descripción del aparato utilizado en las experiencias

El aparato utilizado es el diseñado en la figura 1, en donde se indican sus dimensiones. Hemos presentado la forma de acoplamiento en ambos sistemas benceno-agua y su inverso.

La constancia de la presión se conseguía mediante un frasco de Mariotte. Los empalmes fueron esmerilados al objeto de procurar que no se contaminara el benceno en contacto de tubos de goma o plástico, que pudieran modificar su tensión interfacial.

Entre las dos cámaras de vidrio se coloca una placa de cobre con un orificio, que constituía la boquilla, ésta era de un tipo y diámetro diferente en cada placa. Los tipos y diámetros utilizados se indican más adelante.

Las diferencias de presiones se midieron utilizando un manómetro diferencial, realizándose siempre las tomas en las láminas de agua, con lo que fué ésta el líquido manométrico.

Tanto en la cámara superior como en la inferior existe una capa de benceno, lo que pudiera dar origen a error en las lecturas del manómetro. La capa de benceno en la cámara superior influye igualmente en las dos ramas por lo que su efecto sobre las lecturas es nulo. La que se encuentra en cámara inferior, sí influye en la lectura pues actúa solamente sobre la rama derecha ocasionando un descenso en dicha rama que habrá que corregir al tomar la presión. En el sistema benceno-agua como la rama de mayor altura es la derecha, la corrección habrá que sumarla. En el sistema agua-benceno ocurre lo contrario.

En todas las experiencias hemos tenido una fase estática (fase continua) y otra fluyendo a través de aquella (fase dispersa); esta última se recogía en una bureta contrastada midiendo el tiempo invertido en recoger una cantidad determinada de líquido medido en dicha bureta.

Para controlar el flujo de la fase dispersa se dispusieron dos llaves a la entrada de la cámara correspondiente (según el sistema utilizado).

Las placas utilizadas eran de cobre, y las boquillas lo fueron de tres tipos A, las planas; B, las troncocónicas; y C, las semiesféricas. Se acompaña un dibujo de las mismas en donde se pueden apreciar todos los detalles. Los orificios de las boquillas fueron medidos con el microscopio, habiéndose utilizado diámetros entre 0,12 mm, a 0,52 mm.

El perfil A se ha escogido por ser el más sencillo que se puede utilizar; y los B y C, teniendo en cuenta que por ser el objetivo final de este trabajo su aplicación a la extracción líquido-líquido en torres de pulverización, es interesante un perfil de placa que permitiera la circulación de ambos líquidos, repitiendo la boquilla, dirigida en sentido contrario.

Se ha dibujado también, el detalle de la unión de las dos partes de la torre con la placa. El espesor de las pestañas y arandelas ha obligado a dar a las placas la forma de sombrero que se ve en los esquemas, al objeto de poder observar y fotografiar bien la salida del líquido por el orificio.

Para poder determinar las dimensiones del chorro y las gotas se hicieron fotografías, para lo cual se utilizó una máquina fotográfica de paso universal; para la iluminación empleamos un «flash» colocado en contraluz, e interponiendo entre éste y la torre un cristal esmerilado para difundir la luz. Al objetivo de la cámara fotográfica se le adoptó una lente de 8 dioptrías cuando las fotografías se tomaron a 12,5 cm; y otro de 4 dioptrías cuando se hicieron a 25 cm; se acompaña un croquis.

Para obtener la escala que nos permitiera determinar las dimensiones exactas y al mismo tiempo corregir la distorsión producida por la curvatura horizontal de la torre; se tomaron fotografías de una escala dentro de la torre utilizada, llenándola bien con agua o con benceno, cuando eran estos líquidos la fase continua.

Cuando se obtenían las positivas de varios carretes, se empezaba por ampliar la escala correspondiente y sin mover la ampliadora se sacaba el resto de las copias, con lo que obtuvimos los coeficientes por los que había que multiplicar las dimensiones horizontales y verticales, medidas sobre la fotografía, para obtener las verdaderas.

Al objeto de conseguir fotografías a una misma distancia, los sopor-

tes, tanto de la torre como de la máquina fotográfica, se atornillaron a un soporte fijo.

Después de determinar, mediante una serie de pruebas, la apertura de objetivo más conveniente se mantuvo constante para todas las experiencias.

La medida de las gotas y chorros en las fotografías se efectuaron con un microscopio de 20 aumentos con escalilla interior, que permitía obtener una precisión de 0,05 mm. Se pretendió utilizar microscopios de mayor aproximación, pero entonces los límites de las gotas se hacían tan imprecisas que no era posible la medida.

Para hallar el diámetro medio de cada gota, supusimos que ésta era un paraboloides de revolución con los dos ejes horizontales iguales, y calculamos el radio de la esfera de igual superficie.

## 2.—Productos utilizados

Se utilizó agua bidestilada y benceno puro rectificado, de los laboratorios *Busquets*. Se ensayó el benceno con la reacción de la indofenina, al objeto de comprobar la presencia de tiofeno, resultando la reacción positiva. La purificación se realizó destilando el benceno con 2 % de ácido sulfúrico concentrado. La reacción de la indofenina sobre el destilado resultó negativa.

## 3.—Determinación de las constantes de los productos utilizados

Las constantes a determinar en el agua y el benceno son: densidad, viscosidad y tensión interfacial.

La temperatura del laboratorio mientras se realizaron los trabajos osciló entre los 18 y 22°, por lo que la determinación de las constantes se efectuó a 20° C.

La densidad de agua a 20° C, según las tablas publicadas en Weissberger (33), es 0,998 gr/cm<sup>3</sup>. No tomamos más cifras decimales porque los errores de medida de las dimensiones de las gotas son más importantes que las que se producen al despreciar las cifras de cuarto orden en adelante en la densidad.

La densidad del benceno se determinó con el picnómetro, utilizando el «bicapilar» debido a la volatilidad del benceno. La temperatura del termostato se mantuvo a 20°. El resultado obtenido fué 0.878 gr/cm<sup>3</sup>.

La medida de la viscosidad del benceno se realizó utilizando un viscosímetro de OSTWALD y siguiendo la técnica que indica la ya citada

obra de WEISSBERGER (43). Se tomó como referencia el agua bidestilada usada en las experiencias. Como la medida se efectuó a 20°, tomamos como viscosidad del agua un centipoise. El resultado medio de varias determinaciones, dió para la viscosidad del benceno el valor: 0,65 centipoises.

La medida de la tensión interfacial entre el benceno y agua se ha determinado utilizando el aparato de ADINOFF y HARKINS y el método indicado en WEISSBERGER (36), utilizando para el término correctivo de Harkin la tabla publicada en la pág. 374 del mismo libro (35).

El valor medio hallado para la tensión interfacial es 35 dinas por centímetro.

#### **4.—Nomenclatura utilizada para la designación de las fotografías**

Por haberse obtenido, durante la parte experimental del trabajo, un gran número de fotografías, nos ha parecido conveniente normalizar la designación de las mismas.

Hemos tomado como parte central la letra correspondiente a cada tipo de placa, la A, para las planas; la B, para las troncocónicas; y la C, para las semiesféricas. A la izquierda de esta letra se ha puesto un número para diferenciar las placas de cada clase, empezando por el 1 para el sistema benceno-agua, y por el 11 para el inverso, ordenándoles en sentido decreciente del diámetro del orificio de las mismas; en algún caso que ha coincidido este diámetro el orden lo ha dado la fecha de empleo. Como para cada placa se ha hecho necesario utilizar varios carretes de fotografías, éstos se han ordenado consignando un número a la derecha de la letra.

Para representar una fotografía determinada, se indica el número que ocupa en el carrete poniéndolo a la derecha del correspondiente a éste.

Cuando se ha querido designar la placa, con independencia de las fotografías, se ha representado con la letra correspondiente seguida del número que indica el diámetro del orificio en centímetros.

## III

## TRABAJO EXPERIMENTAL

Este trabajo comprende los siguientes capítulos:

- 1.º Presión mínima necesaria para el paso de la fase dispersa a través del orificio de la placa.
- 2.º Estudio de la relación entre la velocidad de la fase dispersa a través del orificio y la diferencia de presiones que la ocasiona.
- 3.º Condiciones que deben cumplirse para que se forme el chorro.
- 4.º Estudio del chorro y de las gotas que se forman al romperse.

*Presión mínima necesaria para el flujo de la fase dispersa a través del orificio de la placa*

Al poner en marcha el aparato se procuró colocar las llaves de forma que se obtuviera la presión mínima para el paso del fluido disperso. Al abrir muy lentamente la llave de paso, el agua empezaba a subir en el manómetro y al llegar a una cierta altura empezaba a salir el líquido por el orificio de la placa produciéndose un descenso en el manómetro hasta llegar a un punto en que no salía más líquido por él. A partir de este momento volvía a subir hasta que en el punto anterior empezaba a salir y a descender.

Se tomaron los valores de ambas presiones, la correspondiente al comienzo del flujo de la fase dispersa, y la que daba lugar a una paralización de dicho flujo, para todas las placas utilizadas y para ambos temas benceno-agua y agua-benceno.



TABLA I

Sistema: benceno-agua

Carretes	Placas	Presión mínima cm H <sub>2</sub> O	Presión máxima cm H <sub>2</sub> O	Presión teórica cm H <sub>2</sub> O (1)
1A1	A-0,052	1,08	1,73	2,74
2A1-2	A-0,050	1,45	2,50	2,85
3A1	A-0,050	2,00	2,65	2,85
4A1	A-0,032	3,55	4,30	4,46
4A5	A-0,032	3,05	4,30	4,46
6A1-2	A-0,030	3,40	4,20	4,76
7A1	A-0,030	2,90	3,65	4,76
8A1-2	A-0,012	5,70	6,10	11,89
9A1	A-0,010	7,00	7,65	14,27
1B1-2	B-0,05	1,70	2,70	2,85
2B1-2	B-0,030	3,45	4,35	4,76
3B1-2	B-0,020	5,40	6,50	7,13
1C1-2	C-0,05	1,90	2,60	2,85
2C1-2	C-0,03	3,80	4,50	4,76
3C1	C-0,02	6,20	7,25	7,13

(1) Esta presión es la necesaria para vencer las fuerzas ocasionadas por la tensión interfacial. Su determinación se hace más adelante.

TABLA II

Sistema: agua-benceno

Carretes	Placa	Presión mínima cm H <sub>2</sub> O	Presión máxima H <sub>2</sub> O	Presión teórica H <sub>2</sub> O
11A1	A-0,052	1,30	1,70	2,74
12A1-2	A-0,05	2,10	2,30	2,85
15A6	A-0,03	2,90	3,15	4,76
16A1	A-0,03	2,95	3,10	4,76
17A1	A-0,02	5,25	5,55	7,13
11B1-2	B-0,05	1,40	1,70	2,74
12B1-2	B-0,03	4,00	4,40	4,76
13B1	B-0,02	4,65	4,75	7,13
11C1	C-0,05	2,00	2,50	2,74
12C1	C-0,03	3,85	4,20	4,76
13C1	C-0,02	5,20	5,20	7,13

Observando ambos cuadros se puede ver que al aumentar el diámetro del orificio de la placa disminuye la presión máxima necesaria para el paso del fluido, y que en ambos sistemas estas presiones son análogas. Hay algunos valores, los marcados con x, que dan valores que parecen algo bajos.

La analogía entre los valores de ambos cuadros demuestra que ha de haber una variable que sea común en ambos sistemas, ésta es la tensión interfacial, que es la que debe controlar este fenómeno.

Cuando se abre la llave de paso de forma que el caudal sea muy pequeño, el agua se eleva por la rama del manómetro conectada con la cámara inferior, cuando se trata del sistema benceno-agua (y será en la superior cuando el sistema sea el inverso), del aparato, ya que la resistencia que encuentra es menor que en el orificio de la placa; se produce entonces un desequilibrio de presión a ambos lados de ésta, medido por la diferencia de lectura de las dos ramas del manómetro, que empujará al fluido que actúa como fase dispersa, a pasar a través del orificio. Al verificarse este paso el líquido adquirirá una forma curvada, que para permanecer en equilibrio necesita que la diferencia de presiones entre la cara cóncava y la convexa sea dada por la fórmula.

$$\Delta p = \frac{4\sigma}{D} \quad [1]$$

que se deduce de la tan conocida ecuación fundamental de la capilaridad debida a LAPLACE

$$\Delta p = \sigma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

(donde  $R_1$  y  $R_2$  son los radios principales de curvatura de la superficie), suponiendo que ésta es esférica, serán iguales al radio de la misma y si utilizamos el diámetro en vez del radio obtenemos (1).

Al subir el agua por la rama del manómetro, aumenta su presión sobre el orificio, y el menisco se irá elevando, con lo que el radio de curvatura disminuye, cuando este menisco sea una semicircunferencia tenemos el radio de curvatura mínimo, es decir, la diferencia de presión máxima entre ambas caras del menisco, al seguir avanzando la gota en su formación, el radio de curvatura aumenta, la diferencia de presión necesaria para el equilibrio disminuye, y por lo tanto puede pasar el líquido por el orificio, que lo hará a una velocidad variable, la cual aumentará al hacerlo el diámetro de la gota, pues la presión que mueve el fluido en el orificio, igual a la que existe a ambos lados del mismo, será: Diferencia

de lecturas en las ramas del manómetro.—Diferencia de presiones para mantener el equilibrio a ambos lados de la superficie (supuesta esférica) de la gota.

El sustraendo de esta diferencia disminuye al aumentar el diámetro de la gota, por lo que la diferencia aumenta, y por lo tanto también lo hará la velocidad de paso a través del orificio, que depende de esta diferencia.

Es decir, que la diferencia de presiones necesaria para el paso del líquido, será igual a la diferencia de presiones correspondientes al equilibrio cuando la gota tiene como forma una semiesfera. Suponiendo que el líquido no moje la placa (lo cual no parece cumplirse), el diámetro de la semiesfera será igual al del orificio y la presión correspondiente nos indicará el límite máximo que puede alcanzar esta diferencia de presiones.

Como pérdida de presión adicional habremos de tener en cuenta la ocasionada por el orificio en sí, que dependerá de la velocidad de paso, y en el comienzo del mismo a muy pequeñas velocidades, debe ser muy pequeño su efecto comparado con el debido a la tensión interfacial.

En los cuadros que se acompañan se ha calculado esta presión teórica máxima aplicando la fórmula [1] y tomando como valores

$$\sigma = 35 \text{ dinas/cm.}$$

$$D = \text{diámetro del orificio en cms.}$$

y dividiendo el resultado por  $g$  para obtenerlo como cm de  $H_2O$

$$P = \frac{4 \times 35}{981 \times D} = \frac{0,1427}{D} \text{ cm de } H_2O$$

Los resultados obtenidos son del mismo orden de magnitud que los experimentales.

Los valores teóricos son todos por exceso, y las diferencias obtenidas pueden ser debidas a:

1.º Que el líquido moje a la placa y, por lo tanto, el diámetro de la semiesfera será mayor que el del orificio, y la diferencia de presión necesaria, menor.

2.º Que la forma de la gota, al formarse, no sea esférica, y los radios de curvatura serán diferentes a los considerados.

3.º Pérdida de presión producida por el paso a través del orificio, el cual aumentará al disminuir el diámetro del mismo; para diámetros

muy pequeños puede ser de cierta importancia, a pesar de ser pequeña la velocidad de paso.

4.º También puede influir la presencia de impurezas que den lugar a modificación en el valor de la tensión interfacial.

Volviendo al proceso experimental, cuando la presión es la suficiente para que pase líquido a través del orificio, aquel aumenta su velocidad al hacerlo, como ya hemos dicho antes, el diámetro de la gota, dándose lugar a un caudal medio; si este caudal es mayor que el que fluye por la llave de paso, descenderá el agua por la rama del manómetro; a pesar de disminuir la presión el líquido sigue pasando, lo cual es debido, a que, al separarse las gotas, queda una parte de líquido pegado al orificio y al ser mayor que el correspondiente a una semiesfera la presión necesaria de paso será menor; cuando la diferencia de presión, en el manómetro, sea menor que la correspondiente al resto de la gota que queda en el orificio, el líquido deja de pasar, sobre dicho resto de la gota actuará la tensión interfacial reduciendo la superficie libre, con lo que disminuye y se hace necesario alcanzar otra vez la diferencia de presiones primitivas.

Cuando, al abrir la llave de paso, el caudal que pasa por ella es igual al correspondiente a la diferencia de presiones necesaria para que pase líquido, entonces esta presión se conserva fija y ya no se producen fluctuaciones. A partir de este punto, al seguir abriendo la llave de paso, aumenta la diferencia de presión en el manómetro y consecuentemente la velocidad lineal del líquido y su caudal a través del orificio.

## IV

RELACION ENTRE LA DIFERENCIA DE PRESIONES  
Y LA VELOCIDAD LINEAL DEL FLUIDO DISPERSO

Hemos estudiado gráficamente (gráficos 1 y 2) la relación que une la diferencia de presión en el manómetro, a ambos lados de la placa, con la velocidad a través del orificio, representando dicha relación en coordenadas logarítmicas.

A continuación se indican los valores de las pendientes de cada una de las rectas obtenidas de los gráficos.

TABLA III

Sistema: benceno-agua

<i>Carrete</i>	<i>Placa</i>	<i>Pendiente</i>
1A1-5	A-0,052	1.91
2A1-2	A-0,050	1.84
4A1-8	A-0,032	1.78
6A1-2	A-0,030	1.68
7A1-5	A-0,030	1.60
8A1-2	A-0,012	1.43
1B1-2	B-0,05	1.71
2B1-2	B-0,03	1.76
3B1-2	B-0,02	1.84
1C1-2	C-0,05	1.78
2C1-2	C-0,03	1.71

TABLA IV

Sistema: Agua-benceno

<i>Carrete</i>	<i>Placa</i>	<i>Pendiente</i>
11A1-4	A-0,052	1.80
12A1-2	A-0,050	1.78
13A1-4	A-0,050	1.61
14A1-2	A-0,030	1.63
15A1-6	A-0,030	1.68
16A1-4	A-0,030	1.60
17A1-	A-0,020	1.97
11B1-2	B-0,050	1.82
12B1-2	B-0,030	1.72
11C1-2	C-0,050	1.89
12C1	C-0,030	1.60

La pendiente de la recta representativa para velocidades elevadas se encuentra entre 1,43 para la placa A-0,012 y 1,91 para la A-0,052 (carrete de la serie 1A).

Se han representado, también, todas las experiencias realizadas con el sistema benceno-agua, en un solo gráfico, y se puede observar, que todos los puntos caen en una estrecha faja, excepto para las placas C-0,030 y A-0,030 (carrete de la serie 7A). Trazando una recta media entre todos los valores obtenemos una recta, con pendiente de 1.65.

El valor de la pendiente parece más bajo de lo que era dado esperar de los individuales de cada placa.

El sistema inverso agua-benceno funciona de un modo análogo, las pendientes oscilan entre 1,60 y 1,89 en las placas C-0,030 y C-0,050.

En la representación conjunta de todas las experiencias en este sistema se encuentran todos los puntos en una faja, que es más ancha que la correspondiente al sistema benceno-agua, notándose que la placa A-0,030 (carrete de la serie 15A) se aparta dando valores de la velocidad mucho menores que los correspondientes a las otras placas (esta placa es la misma que la del carrete de la serie 7A, que también se apartaba del comportamiento común, pero en el sentido contrario, en el sistema benceno-agua).

Dibujando las rectas correspondientes a los valores medios, hallamos una pendiente media de 1,57. Este valor es también, menor que la que cabría esperar de los obtenidos en las representaciones individuales.

Los valores para ambos sistemas benceno-agua y agua-benceno, son muy semejantes.

Sistema	Pendiente recta
Benceno-agua	1,65
Agua-benceno	1,57

Una causa de error que habrá que tener en cuenta, en estas representaciones gráficas, es el hecho de que la medida que nos da el manómetro es la diferencia de presión entre las dos cámaras, mientras que la verdadera diferencia de presión que debemos tener en cuenta es la que hay en el fluido que constituye la fase dispersa a ambos lados del orificio. La presión que existe dentro del chorro será mayor que la correspondiente a la fase continua en la misma cámara debido a su curvatura según un plano normal a su eje, y al pequeño radio de la misma. Esta diferencia de presión entre el interior del chorro y el fluido de la fase continua habrá que restarlo de la lectura, corregida, del manómetro para hallar la verdadera diferencia de presiones a utilizar.

Para determinar la corrección a utilizar por este motivo hemos de emplear la ecuación de LAPLACE, teniendo en cuenta que uno de los radios de curvatura es infinito.

Adaptando la ecuación a las condiciones de la experiencia tenemos:

$$P = \frac{2\sigma}{Dxg} = \frac{0,071355}{D}$$

Los valores obtenidos son:

TABLA V

Sistema: Benceno-agua

Carretes	Placa	Diám. chorro	$\Delta p$ . cm $H_2O$
1A1-5	A-0,052	0,056	1,27
2A1-2	A-0,050	0,070	1,02
6A1	A-0,030	0,052	1,37 (*)
6A2	A-0,030	0,042	1,70 (*)
7A1-5	A-0,030	0,050	1,43
8A1-2	A-0,012	0,022	3,24
1B1-2	B-0,050	0,056	1,27
2B1-2	B-0,030	0,043	1,66
3B1-2	B-0,020	0,033	2,16
1C1-2	C-0,050	0,054	1,32
2C1-2	C-0,032	0,045	1,58
2C1-2	C-0,032	0,033	2,16

(\*) A mitad de la experiencia se ha observado un cambio en el diámetro del chorro.

TABLA VI

Sistema: Agua-benceno

<i>Carretes</i>	<i>Placa</i>	<i>Diám. chorro</i>	$\Delta p. \text{ cm H}_2\text{O}$
11A1-4	A-0,052	0,052	1.37
12A1-2	A-0,050	0,075	0.95
13A1-4	A-0,050	0,058	1.23
14A1-2	A-0,030	0,034	2.10
15A1-6	A-0,030	0,040	1.78
16A1-4	A-0,030	0,037	1.93
17A1	A-0,020	0,035	2.04
11B1-2	B-0,050	0,055	1.30
12B1-2	B-0,030	0,032	2.23
11C1-2	C-0,050	0,055	1.30
12C1	C-0,030	0,043	1.66

Una vez corregidas las presiones hemos vuelto a representar en los gráficos 3 y 4 todas las experiencias realizadas; como puede verse han cambiado las pendientes de las rectas correspondientes, los resultados obtenidos ahora son:

TABLA VII

Sistema: Benceno-agua

<i>Carrete</i>	<i>Tipo de Placa</i>	<i>Pendiente</i>
1A1-4	A-0,052	2.23
2A1-2	A-0,05	1.89
6A1-2	A-0,03	1.76
7A1-5	A-0,03	1.85
1B1-2	B-0,05	1.89
2B1-2	B-0,03	1.82
3B1-2	B-0,02	1.88
1C1-2	C-0,05	1.93
2C1-2	C-0,03	1.79

Esta corrección de la presión se puede hacer cuando el chorro ya está formado. Cuando la experiencia se encuentra en la formación de gota sin llegar a la del chorro, el radio de curvatura va aumentando según lo hace el tamaño de la gota, y la presión interior disminuye, parece lógico pensar que la velocidad de paso del líquido a través del orificio de la placa variará, debiendo ser más lenta al comienzo de formación de la

gota y aumentando al hacerlo el tamaño de la misma. Esto dará lugar a que tanto la diferencia de presiones como la velocidad del fluido a través del orificio sean variables.

TABLA VIII

Sistema: Agua-benceno

<i>Carrete</i>	<i>Tipo de placa</i>	<i>Pendiente a altas velocidades</i>
11A1-4	A-0,052	2.03
12A1-2	A-0,05	1.85
13A1-4	A-0,05	2.04
14A1-2	A-0,03	1.89
15A1-6	A-0,03	1.96
16A1-4	A-0,03	1,78
17A1	A-0,02	2,15
11B1-2	B-0,05	1.70
12B1-2	B-0,03	1.76
11C1-2	C-0,05	2.03
11C1	C-0,03	1.59

En la representación correspondiente a estas tablas se ha prescindido de los puntos en que no estaba formado el chorro, ya que durante la formación de la gota la corrección depende del diámetro de ésta y varía durante su crecimiento hasta su separación. Esto ha hecho que en la parte de bajas velocidades nos hayan desaparecido algunos puntos. La pendiente ha aumentado al introducir la corrección y se aproxima mucho a 2, es decir, que la diferencia de presiones es proporcional a la velocidad elevada a una potencia muy próxima a 2.

Se han representado en gráfico todos los datos de cada uno de los sistemas estudiados y se puede ver que, prescindiendo de algunas excepciones que se apartan mucho de los valores más frecuentes, como son las placas B y C-0,030, del sistema benceno-agua y la A-0,02, del de agua-benceno, todos los puntos coinciden en una zona muy estrecha indicando que la variable controlante es la velocidad.

Un balance de energía nos lleva a la ecuación.

$$\Delta p = \frac{\gamma v_2^2}{2g} + \gamma h_f$$

en donde  $h_f$  es la pérdida de energía al pasar la unidad de peso del fluido, pérdida de carga tanto debida al orificio como por la resistencia que opone el líquido de la fase continua.

Se ha representado la función.

$$p = \frac{\gamma v_1^2}{2g}$$

la recta representativa de esta función se encuentra por debajo de la anteriores, casi paralela a ellas, y la diferencia de ordenadas debe indicarnos el valor de

$$\gamma h_f$$

que nos representa la pérdida de carga de paso del fluido, como pérdida de presión, que en el caso que nos ocupa vendrá medida en cm. de agua.

La pendiente de la recta media en el sistema benceno-agua es de 1,89 y para el de agua-benceno es de 1,76.

En el sistema benceno-agua los puntos quedan en una faja más estrecha que en el sistema inverso.

El flujo de un fluido a través de otro no miscible con él, tiene que ser diferente al de un un fluido a través de un tubo.

En este último caso la lámina de fluido junto a la superficie del sólido tiene una velocidad cero y esto ocasiona un gradiente de velocidad que determina la distribución de la misma en los diferentes puntos de una misma sección del fluido, siempre que se considere esta sección a una suficiente distancia de la entrada del tubo para poder considerar que las capas límites de PRANDTL han llegado al centro. Por otro lado, dado los diámetros empleados en las tuberías, las energías superficiales carecen de importancia en relación con las correspondientes a las otras formas de energía en consideración.

En el caso que nos ocupa, por el contrario, la capa del fluido en movimiento en contacto con la fase continua no se encuentra en reposo, ya que debido al frotamiento lo que hace es arrastrar a dicha fase continua, dando lugar a una circulación en la misma de modo que el líquido, en ella, se mueve en el mismo sentido que el chorro en contacto con él y en sentido contrario en la zona próxima a la pared del aparato, esto origina que la velocidad relativa entre fases, que es la que controla las fuerzas de fricción, sea mucho menor en nuestro caso, por lo que el término  $h_f$  alcanzará un valor muy inferior al que tendría si se tratara de un líquido moviéndose en un tubo del mismo diámetro que el chorro y a su velocidad.

Por otra parte, dada la pequeñez del radio del chorro la energía superficial adquiere una gran importancia en el proceso, hasta el extremo de que la tensión interfacial se convierte en un factor de primera magnitud en el fenómeno.

## V

CONDICIONES QUE SE HAN DE CUMPLIR PARA QUE  
SE PRODUZCA EL CHORRO

Cuando el fluido pasa por el orificio posee una energía cinética, está sometido a una fuerza que le aleja del orificio (ascensional en el caso de benceno-agua, o de caída en el caso agua-benceno) y por otra parte consume energía por la formación de nuevas superficies. Cuanto más pequeño sea el diámetro de las gotas que se formen mayor será la energía necesaria para su formación; y para que se forme chorro será necesario que la energía, por segundo, cinética sumada a la de la fuerza ascensional iguale o supere a la necesaria para formar la superficie lateral del chorro. Para hacer el balance de energía consideramos:

$Q$  = caudal del fluido  $\text{cm}^3/\text{s}$ .

$v_o$  = velocidad en el orificio  $\text{cm}/\text{s}$ .

$v_c$  = velocidad en el chorro  $\text{cm}/\text{s}$ .

$d_o$  = diámetro del orificio  $\text{cm}$ .

$d_c$  = diámetro del chorro  $\text{cm}$ .

$S_o$  = superficie del orificio  $\text{cm}^2$ .

$S_c$  = superficie de la sección recta del chorro  $\text{cm}^2$ .

$\rho_a$  = densidad del agua  $\text{gr}/\text{cm}^3$ .

$\rho_b$  = densidad del benceno  $\text{gr}/\text{cm}^3$ .

$\sigma$  = tensión interfacial, dinas./cm.

La energía cinética a la salida del orificio será

$$\Sigma_{\text{cin}} = \frac{M v_o^2}{2}$$

tomando un segundo para base del balance

$$M = Q \rho_b$$

(circunscribiéndonos al caso de benceno a través de agua; el inverso se razona exactamente igual) y quedará:

$$\Sigma_{\text{cin}} = \frac{Q \rho_b}{2} v_o^2$$

y sustituyendo,  $v_o = Q_o/S_o$

$$\Sigma_{\text{cin}} = \frac{\rho_b}{2 S_o^3} Q^3$$

La energía correspondiente a la fuerza ascensional será igual al producto de la masa por la aceleración y por la altura recorrida en un segundo

$$\Sigma_{\text{as}} = M a h$$

$$M = Q \rho_b$$

$$a = [(\rho_a - \rho_b)/\rho_b] g$$

$h$  = altura recorrida en un segundo, será la altura media correspondiente al fluido que sale por el orificio en un segundo, esta altura es  $vc/2$

$$\Sigma_{\text{as}} = \frac{Q (\rho_a - \rho_b) g v_c}{2}$$

y sustituyendo  $v_c$  por  $Q/S_c$

$$\Sigma_{\text{as}} = \frac{(\rho_a - \rho_b) g}{2 S_c} Q^2$$

La energía necesaria para la formación de superficie en un segundo será

$$\Sigma_{\text{sup}} = \pi d_c v_c$$

y sustituyendo  $v_c$

$$\Sigma_{\text{sup}} = \frac{\pi d_c Q}{S_c}$$

Por lo que el balance será  $\Sigma_{\text{cin}} + \Sigma_{\text{as}} - \Sigma_{\text{sup}} = 0$

$$\frac{\rho_b}{2S_o^2} Q^2 + \frac{(\rho_a - \rho_b)g}{2Sc} Q^2 - \frac{\pi d_c}{Sc} Q = 0$$

y simplificando

$$\frac{\rho_b}{2S_o^2} Q^2 + \frac{(\rho_a - \rho_b)g}{2Sc} Q^2 - \frac{\pi d_c}{Sc} Q = 0$$

En este balance no se han tenido en cuenta las pérdidas debidas al frotamiento entre los líquidos, por lo que los resultados que se obtengan por la ecuación [2] deben ser un poco bajos.

La ecuación [2] nos da el valor del caudal mínimo que da lugar a la formación del chorro.

Los resultados obtenidos se han tabulado y se presentan en la tabla adjunta, junto con los valores obtenidos experimentalmente. Sobre estos últimos hemos de hacer constar que, como las fotografías no se pueden obtener para una variación continua de velocidad, sino que ha habido que tomarles a intervalos de la misma, no se puede precisar con exactitud el momento exacto de la aparición del chorro, pero sí con suficiente aproximación para justificar los razonamientos anteriores.

La ecuación del balance de energía aplicada al sistema benceno-agua, será:

$$0,439 \frac{1}{S_o^2} Q^2 + 59,841 \frac{1}{Sc} Q - \frac{109,95 d_c}{Sc} = 0$$

y para el sistema agua-benceno

$$0,5 \frac{1}{S_o^2} Q^2 + 59,841 \frac{1}{Sc} Q - \frac{109,95 d_c}{Sc} = 0$$

Se han calculado los caudales necesarios para que se forme el chorro y se han comparado con los datos experimentales. Los resultados se han consignado en la tabla adjunta. Para los datos experimentales se han anotado los valores para los cuales aun no se observa en la fotografía la formación del chorro y después, aquellos en que ya se precisa el chorro, correspondientes a la fotografía siguiente.

TABLA IX

Placa	Carrete	Chorro sin formar			Chorro formado			Caudal teórico mm <sup>3</sup> /s.
		foto	velocidad cm/s.	caudal mm <sup>3</sup> /s.	foto	velocidad cm/s.	caudal mm <sup>3</sup> /s.	
A-0.012	8A1	11	125,23	14.16	10	117.89	13.33	11.75
B-0.02	2B1 <sub>1</sub>				3-4	82.03	25.77	24.16
A-0.03	6A1 <sub>1</sub>				6	64.89	45.87	41.81
A-0.03	7A2				1-9	91.81	64.9	41.71
B-0.03	2B1				8	51.50	43.48	41.19
C-0.032	2C1	14	39,62	28.01	15	42.22	29.85	45.56
A-0.05	2A1				3	52.40	102.88	62.57
A-0.05	3A1-2	{ 21 30	(3) 21,83	62.50	17 26	(4) 62,11	121.95	68.25
B-0.05	1B1	{ 7	44,28	86.96	9	61.36	120,48	74.21
C-0.05	1C1	13	32,81	64,43	14	46,46	91,24	75,87
A-0.052	1A1	{ 18 27	44,4	94,4	{ 28 36	50,10	106,4	78,29
A-0.032	4A1				{ 24 30	50,96	40,98	38,83

(1) En la fotografía da la impresión que acaba de formarse.

(2) Parece que en esta fotografía acaba de formarse.

(3) Corresponde al carrete 3A1.

(4) Corresponde al carrete 3A2.

(5) Parece que se forma en ésta.

TABLA X

Sistema: Agua-benceno

Placa	Carrete	Chorro sin formar			Chorro formado			Caudal teórico mm <sup>3</sup> /s.
		foto	velocidad cm/s.	caudal mm <sup>3</sup> /s.	foto	velocidad cm/s.	caudal mm <sup>3</sup> /s.	
A-0.02	17A1	14	50.69	15,92	17	52.44	16.47	16.04
A-0.03	14A1	13	68.02	48.06	14	74.46	52.63	39.87
A-0.03	15A3-2	19	62.78	44.38	18 26	90.29	63.83	39.94
A-0.03	16A3	28 36	70.02	49.5	21 27	98.17	69.4	38.21
B-0.03	12B1				18	80.83	57.14	39.17
C-0.03	12C1	11	40.19	28.41	12	51.07	36.10	39.88
A-0.05	12A1	8-9	41.75	81.97	10 11	54.18	106.38	85.38
A-0.05	13A4	27	44.05	86.5	10 18	56.58	111.1	74.63
B-0.05	11B1	17	37.17	72.99	18	42.44	83.33	70.62
C-0.05	11C1	28	34.41	67.57	30	38.29	75.19	73.79
A-0.052	11A4	28 32	31.60	67.11	19 26	43.44	92.25	73.96

(1) Parece, según la fotografía, que se inicia para este valor.

Donde no se han puesto los datos correspondientes al chorro sin formar ha sido porque al comienzo de la experiencia ya se formaba, y por lo tanto el caudal al cual comienza debe ser menor que el calculado para dicha experiencia.

Los valores calculados coinciden sensiblemente con los experimentales, conservándose, en general, un poco inferiores. Como excepción tenemos la experiencia C-0,032, carrete 2C1, que según el cálculo el caudal a la formación del chorro debía ser  $45,56 \text{ mm}^3/\text{s}$ , mientras que según puede observarse en la fotografía 201-15 para un caudal de  $29,85 \text{ mm}^3/\text{s}$ , ya se encontraba formado.

## VI

ESTUDIO DEL CHORRO Y DE LAS GOTAS QUE SE FORMAN  
AL ROMPERSE

Antes de consignar los resultados obtenidos en nuestras experiencias nos parece de interés pasar revista a los trabajos más importantes que conocemos sobre el tema.

**1) Longitud del chorro y causas de su ruptura**

SMITH y Moss (27), estudiando la longitud de chorros de mercurio saliendo por una boquilla dentro de soluciones acuosas, encontraron que al representar la longitud en función de la velocidad del líquido en el interior del chorro, la línea correspondiente constaba de tres zonas.

Una central constituida por una línea recta, y que llamaron zona laminar o varicosa, por la aparición de nódulos en el chorro y también por ser laminar el movimiento del líquido dentro de él. Consideraron que las viscosidades de ambas fases, dispersas y continua, no tenían influencia en esta zona, y que las únicas variables a considerar eran el empuje estático de la fase dispersa y la tensión interfacial.

Prolongando esta recta hacia la izquierda pasaba por el origen de coordenadas. En ambos extremos de la recta existen dos puntos de discontinuidad; la velocidad correspondiente al punto de discontinuidad de la izquierda, es la velocidad crítica inferior y la del punto de la derecha, la velocidad crítica superior.

Por debajo de la velocidad crítica inferior, las longitudes de los chorros son inferiores a las que se obtendrían si se cumpliera en esta parte las condiciones de la zona anterior.

Por último y por encima de la velocidad crítica superior se produce una disminución de la longitud del chorro al aumentar la velocidad. Esta zona se ha llamado «sinuosa» debido a que aquel se deforma dando lugar a sinuosidades.

En la figura 4 se indican las tres zonas, así como las velocidades críticas, superior e inferior.

De todas las etapas del chorro la más importante y mejor conocida es la central, o sea, la varicosa.

LORD RAYLEIGH (25), estudió la ruptura de chorros, considerándolo como un cilindro motivada por una perturbación producida al pasar el líquido por el orificio.

Las hipótesis que hizo fueron que las únicas fuerzas que intervenían en el proceso eran las del empuje estático de la fase dispersa y la tensión interfacial, así como que la amplitud del movimiento ondulatorio, producido por la perturbación en el origen, era muy pequeña comparada con el radio del chorro; despreciaba la viscosidad tanto del líquido del chorro como del exterior.

Estas hipótesis se aplican bien a la zona varicosa, siempre que las viscosidades de los líquidos no sean muy elevadas.

Teniendo en cuenta estas hipótesis y suponiendo en el chorro simetría axial, LORD RAYLEIGH determinó la velocidad de fase o pulsación del movimiento ondulatorio correspondiente a la perturbación producida en el origen, ésta es:

$$q^2 = \frac{ka I_0'(ka)}{I_0(ka)} \frac{\sigma}{\rho a^3} (k^2 a^2 - 1) \quad [3]$$

en donde

$q$  = es la velocidad de fase o pulsación.

$K$  = período de oscilación.

$a$  = radio del chorro.

$\sigma$  = tensión interfacial.

$\rho$  = densidad del líquido que forma el chorro.

$I_0$  = función modificada de BESSEL de 1.ª clase y orden cero.

Para  $ka < 1$ , el valor de  $(K^2 a^2 - 1)$  es negativo y  $q$  se hace imaginario, nos dará un valor que sustituido en la ecuación que expresa el valor del desplazamiento, resulta:

$$\zeta = -B \frac{ka I_0'(ka)}{I_0 ka} \cos k z \sinh (|q| t + \Sigma)$$

$\zeta$  = desplazamiento de los puntos de la superficie del chorro en dirección normal al eje, motivado por el movimiento ondulatorio.

$z$  = es la altura del punto considerado sobre el orificio.

Este movimiento se divide en dos, uno cuya amplitud disminuye con el tiempo, y otro que crece exponencialmente con el tiempo. Este último es el que producirá la ruptura del chorro; y vale

$$\zeta = -B \frac{ka I'_0(ka)}{2 I_0 a} \cos kz e^{-(|q| t + \Sigma)} \quad [4]$$

Dado un punto sobre la superficie del chorro,  $z$  estará determinado y  $t$ , será el tiempo necesario para que un punto se desplace desde el orificio hasta la coordenada  $z$ , si  $u$  es la velocidad lineal del líquido en el chorro

$$z = u \cdot t$$

al fijar  $z$ , queda pues fijado  $t$ .

Por la ecuación [4] vemos que el movimiento ondulatorio es periódico respecto a  $z$ , y su amplitud crece exponencialmente siendo su valor en el origen

$$\zeta_0 = -B \frac{ka I'_0(ka)}{I_0 I_0 a} e^{-\Sigma}$$

y en instante  $t$ :

$$\zeta = \zeta_0 e^{-|q|t} \quad [4']$$

el crecimiento más rápido, que será el que ocasionará la inestabilidad del chorro, será aquel que dé el mayor valor de  $|q|$  que cumpla con la ecuación:

$$|q|^2 = \frac{ka I'_0(ka)}{I_0(ka)} (1 - k^2 a^2) \frac{\sigma}{\rho a^3}$$

el valor de  $ka$  resulta ser

$$ka = 0,696 \quad [5]$$

que corresponde a una longitud de onda

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} = \frac{2\pi a}{ka} = 4,51 \pi a$$

que será la longitud de onda de la máxima inestabilidad.

El cálculo detallado se encuentra en la obra de LAMB (20).  
Para  $Ka = 0,696$ .

$$\frac{I'_0(ka)}{I_0(ka)} = 0,3288$$

$$|q| = 0,696 \times 0,3288 \times (1 - 0,696^2) \frac{\sigma}{\rho a^2} = 0,11799238 \frac{\sigma}{\rho a^2}$$

$$|q| = 0,3435 \sqrt{\frac{\sigma}{\rho a^2}} \quad [6]$$

de la ecuación [4'] deducimos

$$|q| t = \ln \frac{\xi}{\xi_0} = 2,303 \log \frac{\xi}{\xi_0}$$

despejando t, y sustituyendo el radio, a, por el diámetro, d.

$$t = 2,37 \sqrt{\frac{\rho d^3}{\sigma}} \log \frac{\xi}{\xi_0}$$

Esta ecuación nos dará el tiempo necesario para obtener una amplitud  $\xi$  para un sistema determinado, en el que la densidad del líquido del chorro es  $\rho$  y su tensión interfacial con el fluido exterior sea  $\sigma$ .

En un cierto punto del chorro, en el tiempo transcurrido entre dos estrechamientos máximos del mismo, el chorro avanzará una longitud, igual a una longitud de onda.

El chorro debe romperse cuando las fuerzas que actúan en sentido opuesto al orificio equilibran a la tensión interfacial correspondiente al cuello que se forma en la máxima amplitud.

En estas condiciones y para un sistema de fluidos determinado y para un diámetro fijo del chorro el tiempo t, en que la perturbación producida en el orificio adquiere el valor necesario para que se obtenga la amplitud que dé lugar a la ruptura del chorro, será constante y como la longitud de éste vale

$$L = u \cdot t$$

$$L = 2,37 u \sqrt{\frac{\rho d^3}{\sigma}} \log \frac{\xi}{\xi_0} \quad [7]$$

Para un mismo sistema formado por dos fluidos y una boquilla, la longitud debe ser proporcional a la velocidad, y la línea que represente L, en función de u, será una recta.

La ecuación [7] la podemos poner en la forma:

$$\frac{L}{d} = 2.37 u \sqrt{\frac{\rho d}{\sigma}} \frac{\xi}{\xi_0} \quad [8]$$

y si se cumplen todas las hipótesis que hemos supuesto en el cálculo, para cualquier sistema de flúidos y boquilla la relación  $L/d$  será proporcional a  $u \sqrt{\frac{\rho d}{\sigma}}$  (número de WEBER) y la representación gráfica que ligue ambas variables resultará ser una línea recta.

TYLER y RICHARDSON (30) utilizando el análisis dimensional llegan a la fórmula

$$\frac{L}{d} = \text{constante} \times u \sqrt{\frac{\rho d}{\sigma}} \quad [8']$$

que coincide con la [8], representan varios sistemas y no obtienen exacta coincidencia en líneas.

Suponen que la viscosidad del líquido del chorro debe tener influencia en el fenómeno y utilizando el análisis dimensional llegan a la ecuación

$$U_{cs} \sqrt{\frac{\rho d}{\sigma}} = A_1 + B_1 \frac{\mu}{\sqrt{\rho \sigma d}}$$

en donde

$A_1$ ,  $B_1$  son constantes.

$U_{cs}$ : velocidad crítica superior.

Deducen que la velocidad crítica superior depende de la viscosidad del flúido del chorro y de la tensión interfacial. Cuanto mayor sea la viscosidad, a igualdad de las otras condiciones, mayor será a su vez la velocidad crítica superior y la longitud del chorro correspondiente.

Consideran que en la velocidad crítica superior, se igualan las longitudes correspondientes a las dos formas de producirse la rutura, en la parte positiva o varicosa, como ya hemos dicho, y en la negativa o sinuosa, debido al frotamiento, donde la variable principal será la viscosidad.

Posteriormente TYLER y WATKIN (31) estudian la formación de chorros, en aire, con varios líquidos, y al representar  $L/d$  en función de  $u \sqrt{\frac{\rho d}{\sigma}}$  obtienen (en la parte positiva), rectas que coinciden bastante bien cuando las viscosidades son semejantes, cumpliéndose la relación ya conocida

$$\frac{L}{d} = \text{const.} \cdot u \sqrt{\frac{\rho d}{\sigma}}$$

excepto para el mercurio en aire, que el resultado que encuentran es

$$\frac{L}{d} = \text{const.} \left( u \sqrt{\frac{\rho d}{\sigma}} \right) \sqrt[2]{2}$$

y esta discrepancia la atribuyen a gran densidad de mercurio.

Cuando las viscosidades de los líquidos utilizados para formar los chorros varían mucho, no se obtiene, la coincidencia en las rectas respectivas, esto hizo a los autores, introducir la viscosidad en la ecuación que da el valor de  $L/d$ , para lo cual utilizan el análisis dimensional llegando a la fórmula

$$\frac{L}{d} = u \sqrt{\frac{\rho d}{\sigma}} \left[ 1 + \frac{1}{4095} \left( \frac{V \sigma \rho d}{\mu} \right)^{3/2} \right] \frac{1}{y} \ln \frac{\xi}{\xi_0}$$

y, depende de las funciones de BESSEL.

El término correctivo que hay que introducir debido a la viscosidad del chorro es:

$$1 + \frac{1}{4095} \left( \frac{V \sigma \rho d}{\mu} \right)^{3/2}$$

Después forman chorros líquidos dentro de otros líquidos inmiscibles con aquellos. Al aumentar la viscosidad del medio exterior se reducirá la velocidad de crecimiento de la perturbación, aumentándose por tanto el tiempo necesario para la desintegración del chorro, y aumentando, a su vez, la longitud de éste.

Comparan chorros líquidos formados en aire con los formados a través de otros líquidos, obteniendo las siguientes consecuencias:

Para una misma velocidad los chorros formados en un medio exterior líquido, son mayores que los formados en aire.

Para una misma longitud, la velocidad en el aire es mucho mayor.

Las velocidades críticas en el aire son muy superiores, así como la longitud correspondiente.

Esto es natural, ya que la velocidad crítica superior, está controlada por el tipo de ruptura en la zona negativa, y como la fricción en un líquido es muy superior que en el aire, esta zona negativa se tendrá que anticipar mucho cuando el chorro se forma en un líquido a cuando lo hace en el aire.

También observaron que en los chorros formados en otros líquidos, desaparecía la velocidad crítica inferior, quedando absorbida esta zona por la formación de la gota.

Al aumentar la viscosidad del medio exterior aumenta la longitud del chorro, pero disminuye la velocidad crítica.

Al disminuir la tensión interfacial, también lo hace la velocidad crítica. Esto se ve muy bien en la figura 5. En la zona positiva la longitud del chorro está dada por: (despreciando el efecto de la viscosidad)

$$L = \text{Const.} \sqrt{\frac{\rho d^3}{\sigma}}$$

y en la zona negativa la variable que controlan el fenómeno son las fuerzas de fricción que dependen de la viscosidad. Si en varios sistemas, se mantienen estas últimas constantes, la curva de la zona negativa será común a todos ellos, en la figura M. N. La intersección de esta curva con la recta de la zona positiva nos determinará la velocidad crítica superior, cuanto mayor sea la pendiente de la recta menor será la velocidad crítica, pero esta pendiente vale

$$\frac{L}{u} = \text{const.} \sqrt{\frac{\rho d^3}{\sigma}}$$

es decir, que dicha pendiente aumentará, al disminuir la tensión interfacial. Según esto si tuviésemos dos líquidos con tensión interfacial cero, debería desaparecer la zona positiva, y quedar solamente la negativa, es decir que la longitud del chorro disminuiría en todo momento, al aumentar la velocidad. TYLER, para comprobar esto, hizo caer un chorro de agua coloreado a través de agua pura, a diferentes velocidades, confirmando lo dicho anteriormente.

Los autores, también dicen, en su trabajo, que las gotas formadas en un medio exterior líquido son mayores que cuando se forman en el aire, debido a que en aquel la tensión interfacial es más pequeña. Sin embargo al disminuir la tensión interfacial la fuerza de ascensión (o caída) necesaria para separar la gota será más pequeña y como dicha fuerza es proporcional al volumen de la gota, éste deberá ser más pequeño. La causa de que las gotas en medios líquidos sean superiores a las que se forman en el aire debe de ser debido a que la diferencia de densidades en aquel caso es mucho menor que en aire, y precisamente esta diferencia de densidades es proporcional a la fuerza que separa la gota.

CHRISTIANSEN (7), estudiando el mecanismo de la ruptura del chorro de acuerdo con la teoría de LORD RAYLEIGH consideró el caso más gene-

ral de que influían sobre el fenómeno las densidades de ambas fases, sin restricción de simetría axial. Para la velocidad de fase encontró la fórmula

$$q^2 = \frac{\sigma ka (k^2 a^2 + s^2 - 1)}{a^3 \left[ \rho \frac{I_s(ka)}{I'_s(ka)} - \rho' \frac{K_s(ka)}{K'_s(ka)} \right]}$$

$\rho$ ,  $\rho'$  son, respectivamente, las densidades de la fase interior y exterior.

$s$ , es el orden de simetría, cuando hay simetría alrededor del eje:

$$s = 0.$$

$K_s$ , función modificada de BESSEL de 2.<sup>a</sup> clase y órdenes.

El significado de los demás signos ya ha sido dado anteriormente.

Si en esta ecuación se suponen  $s=0$ ,  $\rho'=0$  obtenemos la [3].

Utilizando la ecuación [9] determinaron el valor crítico de  $(Ka)$  que resultó ser 0,667, y la longitud de onda de máxima inestabilidad

$$\lambda_m = 4,71 \times 2a$$

WEBER (32) y TOMOTIKA (28) consideran las fuerzas de inercia y de viscosidad conjuntamente, pero no llegan a obtener resultados aplicables a los sistemas líquido-líquido.

MIESSE (24) después de hacer una revisión de todos los trabajos realizados hasta el momento, considera que el fenómeno es sumamente complicado y que el conocimiento actual sobre el mecanismo del mismo es muy insuficiente para poder dar resultados generales.

Por debajo de la velocidad crítica inferior, la longitud del chorro es menor que la que le correspondería si se pudiera prolongar la recta representativa de la zona positiva. El motivo de esto, según TYLER y RICHARDSON (30), es que, cuando se forma el chorro, la velocidad del líquido dentro de él es pequeña, y las ondas producidas al desprenderse las gotas viajan hacia el orificio a una velocidad mayor que la del líquido dándoles tiempo de llegar al orificio con lo que incrementan la amplitud de la perturbación en el origen  $\xi_0$ ; y disminuye el tiempo necesario para alcanzar la amplitud crítica y, por lo tanto, también disminuye la longitud del chorro.

La parte negativa aparece cuando al pasar el flujo, dentro del chorro, de laminar a turbulento se producen corrientes normales al eje que dan lugar a fuerzas de rozamiento debidas a la viscosidad, y en definitiva rompen el chorro.

La variable fundamental en esta zona es la viscosidad, y la rotura se producirá para

$$\frac{L u \rho}{\mu} = \text{const.} \quad [10]$$

y de aquí

$$L u = \text{const.}$$

cuando el diámetro y el sistema empleado son iguales.

De [10] se deduce que la línea que represente la longitud del chorro en función de la velocidad será una hipérbola.

## 2) Dimensiones de las gotas

TYLER (29), apoyándose en la teoría de LORD RAYLEIGH, considera la formación de gota como la separación de una longitud de chorro igual a una longitud de onda.

Si  $V$  es la velocidad del chorro y  $N$  la frecuencia de formación de gotas.

$$V = N \lambda$$

Siendo  $d$ , el diámetro del chorro y  $D$ , el de la gota, el volumen de las gotas formadas en un segundo, será igual al del chorro de que proceda,

$$\frac{\pi}{6} D^3 N = \frac{\pi}{4} d^2 V$$

llegándose a

$$\frac{\lambda}{d} = \frac{V}{Nd} = \frac{2}{3} \left( \frac{D}{d} \right)^3$$

Teniendo en cuenta que para la máxima inestabilidad

$$\lambda = 4,51 \cdot 2a$$

$$\frac{2}{3} \left( \frac{D}{d} \right)^3 = 4,51$$

$$\frac{D}{d} = 1,89$$

Según esto cuando se separa una sola longitud de onda el diámetro de la gota deberá ser 1,89 veces el del chorro.

MERRINGTON y RICHARDSON (23), estudian el tamaño de las gotas formadas a partir de chorros para velocidades superiores a la crítica superior.

El factor controlante del fenómeno es la viscosidad y la fórmula propuesta es

$$\frac{Vd}{\nu} = 500$$

$V$ , es la velocidad relativa entre el chorro y el medio ambiente.

$d$ , diámetro medio de la gota.

$\nu$ , viscosidad cinemática del líquido.

Todas las experiencias las realizaron con chorros de diversos líquidos formados en el aire.

HAYWORTH y TREYBAL (16), hacen un estudio del tamaño de las gotas formadas en la ruptura de un chorro, a partir de un balance de fuerzas, considerando que las que intervienen son:

El empuje estático, debido a la diferencia de densidades entre las dos fases.

La tensión interfacial entre los líquidos.

La debida a la energía cinética que lleva el líquido, fase dispersa, a causa de su velocidad en el chorro.

Prescinde por completo de la influencia de las ondas producidas por perturbación en el orificio.

Llegan a una fórmula, bastante complicada, que comprueban sólo es válida para velocidades inferiores a 30 cm/s.

En todos los casos estudiados por nosotros las velocidades obtenidas eran superiores a aquella, por lo que los resultados obtenidos por estos autores no nos pueden ser de aplicación.

KEITH y HIXSON (18) en un trabajo muy interesante estudian el diámetro medio de las gotas en función de la velocidad del fluido en el chorro. El diámetro mínimo coincidirá con el área máxima para transferencia de materia.

Dibujando, superficie específica de transferencia en función de la velocidad de flujo, encontraron que para un determinado valor de ésta, aquella daba un máximo muy agudo. A ambos lados de este máximo la superficie específica disminuía apreciablemente. Comprobaron también que para la velocidad correspondiente a superficie específica máxima se obtenía una mayor uniformidad en el tamaño de las gotas; a esta velocidad la llamaron velocidad óptima y resulta ser la más conveniente para

el trabajo en torres de pulverización. Se encuentra por debajo de la velocidad crítica superior.

Comprobaron, así mismo, que por debajo del comienzo del chorro, las gotas son muy uniformes. En la zona varicosa esta uniformidad se mantiene bastante bien, siendo máxima en las condiciones que llaman óptimas. En la zona de la velocidad crítica notaron una disminución de esta uniformidad; y en la sinuosa el tamaño de las gotas variaba ampliamente.

Consideraron que la operación en una torre de pulverización debería realizarse tomando como límite inferior el punto en que comienza a formarse el chorro y el superior aquel en el que comienza a notarse una apreciable no uniformidad.

CHRISTIANSSEN y HIXSON (8) consideran que en la zona varicosa la causa de la ruptura del chorro y formación de gotas es, precisamente, el crecimiento exponencial correspondiente a la amplitud de la onda de perturbación para la máxima inestabilidad. Para la velocidad que da lugar a la superficie específica máxima, aquella es tal que los nodos que dan lugar a la ruptura del chorro se producen a una misma distancia del orificio, con lo que el chorro permanece constante y el tamaño de las gotas formadas uniforme.

El modelo que consideran para la ruptura del chorro, es que ésta es debida a un equilibrio entre el empuje estático y la tensión interfacial.

A mayores velocidades, las diferencias entre las amplitudes, para secciones próximas, disminuye y por lo tanto se forman una serie de estrechamientos todos ellos inestables y que al romperse dan lugar a gotas de diferente tamaño.

Para velocidades pequeñas, la longitud del chorro también lo es; se producen ondas que al alcanzar el orificio aumentan la amplitud, y ocasionan una serie de estrechamientos cuya amplitud no es constante con el tiempo con lo que la ruptura se producirá cada vez en puntos distintos produciéndose por tanto, gotas de diferente tamaño.

Consideran también que siendo la ecuación de la amplitud

$$\zeta = -B \frac{ka \cdot I_0(ka)}{2[q]a} \cos kz e^{([q]t + \epsilon)}$$

La velocidad que ha de producir la superficie específica máxima será aquella que sea doble de la celeridad de fase, siendo ésta

$$c = \frac{q}{2\pi} \lambda = q/k$$

Al comprobar esta afirmación con los varios sistemas que estudiaron, entre los que se encontraba el de benceno-agua, hallaron que la relación entre la velocidad del fluido en el chorro y la celeridad de onda vale

$$2,33$$

achacando la diferencia con el valor teórico, 2 a dificultades en la medida de la longitud de onda de la onda estacionaria.

Podemos observar que, en todos los trabajos que se han reseñado, se ha prescindido de un factor de gran importancia en el proceso, se trata de la circulación de la fase continua, esta circulación queda demostrada en un capítulo posterior de esta misma tesis; su influencia se hace máxima en la zona sinuosa, o sea, cuando la ruptura del chorro se produce por las fuerzas de fricción, las cuales son función de la velocidad, pero no de la absoluta del líquido en el chorro, sino de la relativa entre fases, que será la diferencia entre las que tienen ambos líquidos.

La circulación del fluido exterior vendrá influenciada por las dimensiones y forma del aparato que se utilice, por lo que se obtendrán resultados diferentes cuando también lo sean los aparatos empleados; esto pudiera explicar las discrepancias obtenidas por diferentes investigadores.

### **3) Consideraciones que se desprende de la observación de las fotografías realizadas**

Seguidamente y con anterioridad al estudio de las relaciones que pueden tener entre sí las variables que intervienen en el fenómeno nos parece de interés pasar revista a las fotografías tomadas, que creemos son, más interesantes.

Hemos escogido en primer lugar una serie correspondiente al sistema benceno-agua, utilizando la placa A con orificio de 0,3 mm. de diámetro; carretes 7A1-5.

La velocidad crítica superior para estas experiencias es 88 cm/s.

Fotografías 1 a 9 del carrete 7A2 (figura 6)

Para una velocidad de 33,05 cm/s que equivale a 0,39 de la velocidad crítica, el chorro ya está formado.

Se notan vientres y nodos de ondas estacionarias, que deben corresponder a las que obtuvo BRINKWORTH, colocando un obstáculo sólido en el camino de un chorro de agua con movimiento lento.

El extremo del chorro se ve completamente ensanchado, dando lugar a una gota en formación unida por un estrechamiento al resto de aquel.

Al separar las gotas darán lugar a una pulsación, que originará una onda que se mueve en sentido contrario a la procedente del orificio y por interferencia produce ondas estacionarias.

Al separarse una gota, como puede verse en la fotografía adjunta, queda ya iniciada la formación de la siguiente.

A estas bajas velocidades las fuerzas de fricción son pequeñas, y la influencia más importante será la tensión interfacial.

El diámetro de la gota que acaba de desprenderse es de 1,49 mm. mientras que el del chorro es solamente de 0,50. La relación entre ambos tamaños es de 2,98, muy superior a la correspondiente a una longitud de onda que es 1,92.

En la fotografía también se observan gotas de tamaño más pequeño. Los diámetros de las gotas A, B y C son:

Gota A	1,15 mm.
» B	1,02 »
» C	1,49 »

La relación del diámetro de la gota B, al del chorro es de 2,04, muy próximo al teórico, y teniendo en cuenta los errores de medida, podemos considerar que esta gota corresponde a una longitud de onda.

Por otro lado la gota C, tiene un volumen 3,11 veces la B, y aunque supusiéramos que debido a errores experimentales, la verdadera relación fuese 3, es muy raro que la separación viniese tan lejos del extremo. sobre todo teniendo en cuenta la pequeñez del chorro. La máxima longitud del chorro, en estas fotografías, incluida la gota en formación, es de 4 mm.

La sección recta del chorro (diámetro igual a 0,05 mm) es: 0,1963 mm<sup>2</sup>.

El volumen de la gota C (diámetro 1,49 mm) es: 1,732 mm<sup>3</sup>.

La longitud de chorro necesaria para la formación de la gota C será:

$$\frac{1.7320}{0.1963} = 8,8 \text{ mm}$$

que es más de dos veces la longitud disponible.

Es difícil poder explicar mediante la teoría de LORD RAYLEIGH la formación de gotas tan grandes.

Podría pensarse en un principio en que una gota de tal tamaño se pudiera haber formado por coalescencia de otras más pequeñas, pero en el caso que nos ocupa, eso no parece probable ya que la gota C, que aca-

ba de separarse del chorro, se encuentra junto a éste y a la gota superior, y de haberse producido coalescencia, parecería natural que se notara un vacío entre ellas.

Es necesario, después de lo expuesto, buscar otra explicación.

Cuando se forma el chorro, las fuerzas cinéticas y las derivadas de la tensión interfacial se encuentran prácticamente en equilibrio, pues las de fricción y las debidas al empuje estático parecen menos importantes.

Si la energía cinética es ligeramente superior a la de tensión interfacial, comenzará por formarse un chorro, pero al ir apareciendo nuevas superficies ocasionarán la disminución de la energía cinética, y llegará un momento en que ésta sea incapaz de formar superficies cilíndricas que tengan el diámetro del chorro, sino que para un mismo volumen de fluido darán lugar a interfases más pequeñas, para lo cual es necesario se acumulen en una forma con un diámetro mayor, ocasionando el engruesamiento del extremo y la paralización del movimiento; este engruesamiento dará lugar a la gota.

Según aumenta el tamaño de la gota van adquiriendo más importancia las fuerzas debidas al empuje estático, y llegará un momento que venciendo la tensión interfacial, aquella se separe.

Este proceso es completamente análogo a la formación de gotas cuando aún no ha aparecido el chorro. Sin embargo no hay duda que cuando el chorro existe se producirá una onda a lo largo del mismo producida por la perturbación en el orificio; el valor de la amplitud correspondiente a la máxima inestabilidad viene dado por la ecuación

$$\xi = \xi_0 e^{|\alpha| t}$$

Siendo  $\xi_0$  la amplitud en el orificio, y  $t$ , el tiempo necesario para alcanzar el valor  $\xi$

Cuando el valor de  $\xi$  se hace del mismo orden de magnitud que el radio del chorro, el empuje estático romperá el chorro y formará una gota. El chorro entonces, adquirirá una longitud (si no existiera más mecanismo de rotura que éste) igual al producto de su velocidad lineal por el tiempo necesario para que se alcance la amplitud que ocasiona la ruptura.

En la realidad ambos mecanismos de ruptura se superponen, y romperá el chorro aquel para el cual su longitud, si actuase independiente, fuese más pequeña. Cuando la energía cinética es ligeramente superior a la debida a la tensión interfacial, en longitudes muy pequeñas del chorro, se habrá perdido este exceso de energía cinética y se empezará a for-

mar la gota en un tiempo muy inferior al necesario para romperlo según la teoría de LORD RAYLEIGH.

El proceso se complica por el hecho de que las ondas formadas en el orificio al llegar a la gota en formación chocarán contra ella, dando lugar a que se reflejen y formen ondas estacionarias, semejantes a las obtenidas por BRINKWORTH (31), poniendo un obstáculo en el camino de un chorro en movimiento lento. Las ondas reflejadas, dada la pequeñez del chorro, alcanzarán con facilidad el orificio, incrementando la perturbación en éste, es decir, con lo que el tiempo necesario para alcanzar el valor crítico de  $\zeta$  disminuiría. Por otro lado, cuando una gota se separe, se producirá una perturbación en el extremo, tanto mayor cuanto más grande sea la gota que se separa, que ocasionará la formación de ondas, que, a su vez, al llegar al orificio aumentarán aún  $\zeta_0$  y por tanto,  $\zeta$  en el extremo del chorro, con lo que será necesario menos volumen de gota para su separación; y podrá llegar un momento que esta amplitud sea suficiente para romper el chorro. A partir de aquí, se iniciará otra vez el ciclo.

Tendremos, según esto, una primera gota mayor, después otras cuyo tamaño irá disminuyendo, y a continuación de una última más pequeña, volverá a aparecer otra grande y así sucesivamente, realizándose el hecho de una forma periódica.

En las fotografías 7A2-6 y 7A2-8 (figura 7) puede comprobarse esto que decimos, aunque la periodicidad no se realiza a base de una repetición exacta de diámetros.

Las gotas que se forman serán de dos clases, las mayores, formadas en el extremo del chorro y que se separan por el empuje estático, tendrán la velocidad de movimiento a través de la fase continua que le proporcione dicho empuje estático, mientras que las gotas más pequeñas obtenidas cuando la amplitud del movimiento ondulatorio es capaz de romper el chorro, se moverán a la misma velocidad que éste, y darán alcance a aquellas. Este fenómeno es del mismo tipo que el que CHRISTIANSEN y HIXSON (8) llamaron «twinning».

El hecho de que el chorro se rompa antes del tiempo necesario para que la amplitud de la onda pueda realizarlo ocasionará que dichos chorros serán más cortos que si dicha onda fuese la sola causante, esto explica el porqué los chorros a bajas velocidades son más cortos que lo que cabría esperar.

Los datos experimentales tomados no son lo suficientemente completos para poder determinar la presencia de esta velocidad crítica inferior, aunque para la placa que tratamos se puede ver en la representación grá-

fica que relaciona la longitud del chorro con la velocidad en el mismo, que el punto correspondiente a las fotografías que comentamos se encuentra por debajo de lo que cabría esperar de la posición de los otros puntos.

Al crecer la energía cinética puede llegar un momento que la longitud posible por ambos mecanismos de ruptura fueran iguales, y a partir de este momento predominaría el efecto de la onda de perturbación. La velocidad en el punto en que se igualan las longitudes constituiría la crítica inferior.

Cuando el chorro se encuentra en esta zona primera, su longitud varía; será máxima cuando se forman las gotas mayores y luego irá disminuyendo para volver a tomar otra vez aquella longitud.

Puede explicarse utilizando cualquiera de estos dos mecanismos, el experimento de TYLER (30) que consiste en hacer caer un chorro de agua coloreado a través de agua pura a diferentes velocidades. Se forma un chorro continuo, desapareciendo la zona positiva y quedando solamente la negativa, es decir, que el chorro se rompe solamente por efecto de fricción.

Para explicar esto tengamos en cuenta que la tensión interfacial entre ambas fases es nula.

Si consideramos una velocidad inferior a la crítica superior, el mecanismo de ruptura del chorro habrá de ser uno de los dos considerados anteriormente. Ahora bien, la formación de nuevas superficies no gastará ninguna energía por ser nula la tensión interfacial, no disminuyendo la energía cinética más que por efecto del rozamiento, que por debajo de dicha velocidad no será de gran importancia.

Por otro lado la propagación de la onda debida a la perturbación en el orificio es debido también a la tensión interfacial. Si un líquido sale a través de un orificio que no es exactamente circular la superficie del cilindro que se forma fluctuará alrededor a la correspondiente a un cilindro de directriz circular, por ser éste el de menor superficie y el de energía mínima, siempre que exista una energía de superficie. Si la tensión interfacial es nula todas las superficies se encuentran en equilibrio indiferente, y por lo tanto, no existirá fluctuaciones en la misma, por lo que no se propagará onda alguna, y el chorro no se romperá, desapareciendo la zona positiva, quedando como única causa de ruptura las fuerzas de frotamiento.

En estas fotografías las gotas que se encuentran encima del chorro están en una vertical, y las un poco más alejadas, se han dispersado como si existiera una fuerza que tiende a separarlas. Sin embargo a estas bajas

velocidades esta dispersión no es muy grande, la cual puede ser debida al movimiento de circulación del líquido exterior, en este caso agua. El benceno al moverse en el chorro arrastraría hacia arriba el agua, en la vecindad del chorro, lo que dará lugar a un movimiento en sentido contrario en la proximidad de las paredes, el torbellino se cerrará por arriba en un punto donde el efecto de la velocidad ascendente del benceno haya desaparecido, es decir, un poco por encima del final del chorro. Cuando haya pasado dicho efecto la circulación en el agua dispersará las gotas de benceno.

En las fotografías 7A2 - 10 a 18, la velocidad del benceno en el chorro es 47.16 cm/s, o sea, 0,536 de la velocidad crítica superior.

El chorro, según se puede observar en la fotografía adjunta, 7A2-18 (figura 8) consta de dos partes, la más baja que es completamente uniforme, y después otra, ya cerca del extremo del chorro en donde aparecen los ensanchamientos y estrechamientos propios de las ondas estacionarias.

El tamaño medio de las gotas disminuye, con respecto a las fotografías anteriores, existiendo mucho más numerosas las gotas correspondientes al diámetro teórico.

La dispersión de las gotas de benceno se producen en mayor grado aún, lo cual es natural dada la mayor velocidad de circulación del agua.

Se ha medido el diámetro del chorro a varias alturas, en la zona en que aún es uniforme y se conserva constante. Claro está que la distancia es muy pequeña para dar lugar a una variación apreciable.

A una mayor velocidad 71,91 cm/s que corresponde a 0,816 de la crítica superior en las fotografías 7A2 - 34 y 7A2 - 35 (figura 9), se observa ya una ligera deformación sinusoidal que indica que las fuerzas de fricción van adquiriendo más importancia.

Hemos calculado la velocidad de las gotas al desprenderse del chorro, y cuando se encuentran alejados de él.

Tomemos la fotografía 7A2 - 34:

Distancia entre R - S		6.23 mm.
Caudal		141,2 mm <sup>3</sup> /s
	<i>Diámetro</i>	<i>Volumen</i>
Gota A	1,06 mm.	0,6245 mm <sup>3</sup>
» B	1,10 »	0,6340 »
» C	1,14 »	0,7755 »
» D	1,13 »	0,7550 »
Suma. . . . .		2,7890 »

Tiempo necesario para que pase este volumen

$$\frac{2,789}{141,2} = 0,01976 \text{ seg}$$

$$\text{Velocidad} = \frac{6,24}{0,01976} = 315,5 \text{ mm/s.} = 31,55 \text{ cm/s.}$$

Para el caso de esfera rígida moviéndose en un medio en reposo. la velocidad final, para la esfera de diámetro 1,09 (correspondiente al volumen medio de las cuatro gotas) es 3,04 cm/s; esto indica la fuerte circulación que existe en el extremo del chorro, en la fase continua. Hemos determinado también la velocidad entre las secciones M y N.

	Distancia entre M - N		5,32 mm.
	Caudal		141,2 mm <sup>3</sup> /s.
Gota	1	1,18 mm.	0,860 mm <sup>3</sup>
»	2	1,40 »	1,437 »
»	3	1,57 »	2,023 »
»	4	1,22 »	0,950 »
»	5	1,16 »	0,816 »
»	6	1,21 »	0,927 »
»	7	1,24 »	0,996 »
»	8	1,31 »	1,176 »
»	9	1,51 »	1,803 »
»	10	1,79 »	3,000 »
			13,988 mm <sup>3</sup>

Tiempo necesario para el paso de este volumen:

$$\frac{13\ 988}{141\ 2} = 0,0998$$

$$\text{Velocidad} = \frac{5,32}{0,0998} = 53,2 \text{ mm/s} = 5,32 \text{ cm/s}$$

Como vemos la velocidad ha disminuído grandemente.

La velocidad final de una esfera rígida en un flúido en reposo y con el diámetro medio de las diez gotas medidas (que es 1,39 mm), es 3,8 cm/s, valor bastante próximo al calculado lo que demuestra que prácticamente entre las secciones M-N el agua se encuentra casi en reposo.

Esto constituye una prueba más de la intensa circulación existente en la fase continua que tiene una gran influencia en el fenómeno.

En la fotografía 7A2-28 (en X) puede verse que se ha producido la coalescencia de dos gotas. En la 7A2-2 (en  $\ominus$ ) se observan dos gotas que van a cualescer (figura 10).

Para una velocidad muy próxima a la crítica superior la ruptura del chorro puede producirse unas veces por el mismo mecanismo que en las anteriores, fotografía 7A3-7, o bien, a causa de la fuerza de fricción, fotografía 7A3-3, y con toda seguridad, en mayor o menor grado, han de influir ambos mecanismos (figura 11).

La fotografía 7A3-7 es del mismo tipo que la de 7A2-34 y por lo tanto no merece ser comentada.

En la fotografía 7A3-3, el chorro se encuentra muy deformado en forma sinuosa, lo que indica que las fuerzas de rozamiento, debidas a la viscosidad, van adquiriendo una importancia mayor. La velocidad del benceno en estas fotografías es de 81,08 cm/s que supone el 0,93 de la crítica superior. En estas fotografías, como en las anteriores existe una fuerte circulación en el agua, que aumenta al hacerlo la velocidad del benceno en el chorro, que es la que la motiva. El movimiento ascendente del agua en la parte central del aparato llega uno o dos centímetros por encima del chorro (depende de la velocidad de éste), después se abre en dirección a las paredes, que es cuando dispersa a las gotas de benceno dando la impresión de una palmera. En las fotografías se observa perfectamente donde cambia de dirección el movimiento del agua, pues al disminuir grandemente la velocidad en dirección vertical se produce una acumulación de las gotas de benceno. Esta circulación del agua se cierra por la parte baja, a una cierta distancia de la placa, más pequeña cuanto mayor es la velocidad, siendo la dirección de este cierre normal al movimiento del chorro, el cual producirá una gran turbulencia alrededor del mismo, deformándolo y contribuyendo a su ruptura. Siendo precisamente esta turbulencia producida en el fluido exterior, más que la originada en el propio chorro, la que motiva la ruptura del mismo.

En las fotografías 7A3-21 y 7A3-23 (figura 12) la velocidad del benceno es 91,62 cm/s, superior a la crítica y como se puede ver el mecanismo de ruptura ha cambiado.

En la 7A3-23, el chorro se ha roto por un punto muy bajo y se ha aislado un trozo del mismo, el cual se dividirá en gotas más pequeñas, si el diámetro equivalente sobrepasa al crítico dado por el número de Bond (2). La ruptura del chorro se produce ya en lo sucesivo por la turbulencia creada, principalmente, en el fluido exterior.

En la fotografía 7A3-21, el extremo del chorro se encuentra deformado pero sin embargo tanto en ésta como en 7A3-22, aun se conserva bas-

tante uniforme. La longitud del chorro es muy diferente en ambas fotografías a pesar de corresponder a experiencias en las mismas condiciones.

En las fotografías adjuntas 7A4-23 y 7A4-24 (figura 13), ya se ha sobrepasado en mucho la velocidad crítica superior. El chorro puede considerarse dividido en dos zonas, la inferior en la que no se nota deformación alguna; da la impresión que el cierre de la circulación del líquido exterior se verifica por encima de ella. Después hay una segunda zona, hasta el extremo del chorro, que está muy deformada.

La existencia de estas dos zonas nos prueba que es la turbulencia exterior, y no la interior la que motiva la deformación del chorro. A la salida del líquido por el orificio tiene una cierta velocidad, que después debido al rozamiento, formación de nuevas superficies, etc. esta velocidad disminuye, y aunque esta disminución da lugar a un aumento del diámetro, cosa que se ha visto confirmada por la experiencia, el número de Reynolds disminuye, en efecto, para caudal constante.

$$Re = \frac{D \cdot \rho \cdot u}{\mu}$$

La velocidad  $u$ , será igual al cociente del caudal por la sección recta, es decir

$$u = \frac{Q}{S} ; \quad S = \frac{\pi D^2}{4}$$

y entonces

$$Re = \frac{4 \cdot D \rho Q}{\pi D^2 \mu} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\rho Q}{D \mu}$$

Para un mismo sistema,  $\rho = \text{const}$ ,  $\mu = \text{const}$ .

$$Re = K \frac{Q}{D}$$

Por la fórmula (12) tenemos que, a caudal constante, el número de Reynolds es inversamente proporcional al diámetro, por lo tanto, según se aleja el benceno del orificio disminuye el número de Reynolds, y lo mismo debe pasar con la turbulencia y a su vez con la deformación del chorro. Como lo que ocurre es todo lo contrario, esto indica que la deformación del chorro se produce por otras causas, y éstas no pueden ser más



UNIVERSIDAD DE MURCIA  
FACULTAD DE VETERINARIA  
BIBLIOTECA



que la circulación del líquido exterior que da lugar a vórtices que al cerrarse producen una componente de la velocidad normal del chorro.

A partir de la velocidad crítica, y según nos alejamos de ella se observa en las fotografías que el tamaño de las gotas es más disperso.

Esto ha sido confirmado por un análisis estadístico el cual se presenta en otro lugar de este trabajo.

Las fotografías que se acompañan 7A5-10 y 7A5-15 (figura 14), son ambas de una misma experiencia realizada a una velocidad en el chorro de 146,32 cm/s, ya muy lejos de la crítica superior (88 cm/s). La circulación ha aumentado apreciablemente, y se ve como choca con la interfase agua-benceno dando la impresión de que esta interfase está hirviendo. En las proximidades de las paredes se ven muchísimas gotitas que son arrastradas hacia abajo por el agua. La longitud del chorro ha disminuído mucho, la zona uniforme se ha hecho también más corta, estando muy deformado el extremo. Como característica de estas velocidades es que la longitud del chorro varía mucho en la misma experiencia.

Por último se acompaña la fotografía 7A5-19 (figura 15), con una velocidad en el chorro de 163,23 cm/s. El chorro ha disminuído mucho, la parte uniforme se ha reducido considerablemente, la circulación del fluido exterior es tan intensa que en la interfase se produce un borboteo continuo, y el líquido se ha transformado en una verdadera emulsión de benceno en agua, con una diversidad de tamaño en las gotas mucho mayor que en la zona varicosa.

Para el sistema agua-benceno presentamos fotografías correspondientes a la placa plana (A) con orificio de 0,52 mm. Carretes 11A1-11A4. Velocidad crítica superior = 99 cm/s.

Adjuntamos las fotografías 11A4-19, 11A4-20 y 11A4-24 (figura 16), todas ellas en las mismas condiciones de experimentación.

En estas fotografías los datos son:

Caudal: 92,25 mm<sup>3</sup>/s.

Velocidad en el chorro: 43,44 cm/s, que corresponde a 0,439 de la velocidad crítica.

Diámetro del chorro 0,52 mm, en este caso coincide con el del orificio de la placa.

Para esta velocidad ya se ha formado el chorro, el cual, como puede verse perfectamente, posee ensanchamientos y estrechamientos que indican la presencia de una onda estacionaria. Aquí se vuelve a repetir todo igual que en el sistema benceno-agua.

Las gotas difieren de tamaño, pero su variación es relativamente re-

gular, como indicando una repetición periódica del mecanismo de ruptura del chorro.

A continuación hemos hallado los volúmenes de varias gotas.

En la fotografía 11A-4 la gota A' tiene un diámetro de 0,95 mm, su relación con el del chorro es

$$\frac{0,95}{0,52} = 1,83$$

que concuerda bastante bien con la teoría de LORD REYLEIGH, su volumen es 0,449 mm<sup>3</sup>.

La gota B de la 804-24 tiene un diámetro de 2,36 mm, su volumen es de 6.882 mm<sup>3</sup> que equivale a 15 gotas de las anteriores.

La gota l de la fotografía 11A4-20 tiene un tamaño intermedio entre los dos anteriores, su diámetro es 1,41 mm y el volumen 1,468 mm<sup>3</sup>, o sea, 3,3 veces la A'.

Esta última (A') resulta formada por la separación de una longitud de chorro igual a la de la onda de máxima inestabilidad.

No parece probable que el gran tamaño de las gotas medidas sea debido a coalescencia.

La gota l (11A4-20) se encuentra aprisionada entre otras dos, sin que existan espacios vacíos que indiquen una posible coalescencia, su tamaño, como ya hemos indicado es 3,3 veces el teórico correspondiente a una longitud de onda.

La longitud máxima del chorro en estas condiciones de experiencia es 4,40 mm y la que tendría la onda de máxima inestabilidad.

$$4,51 \times d = 2,34 \text{ mm}$$

no pudiendo formarse una gota de 3,3 veces la teórica por separación de una longitud suficiente del chorro.

Aun más, la gota C (11A4-24), aun no desprendida, tiene un diámetro de 1,48 mm y un volumen de 1,697 mm<sup>3</sup>, o sea, 3,78 veces mayor que la A' (11A4-19).

Esto no es sino la repetición de lo ocurrido en el sistema inverso, y viene a confirmar lo que allí decíamos de tener que considerar otras causas de ruptura del chorro que la onda estacionaria, y ésta, parece ser, la pérdida de energía cinética por la formación de nuevas superficies.

La relativa periodicidad en el tamaño de las gotas, también apoya lo que decimos.

Se puede observar, también, sobre todo en la fotografía 11A4-19, que

las gotas parecen agrupadas quedando claros muy grandes entre ellas. Esto puede ser debido al movimiento turbulento que se produce en el fluido exterior al paso del chorro a su través. La longitud del chorro es muy variable, como era de esperar del mecanismo de ruptura que postulamos.

En estas fotografías, fotografías 11A2-19 a 27 (figura 17), que corresponden a una relación de velocidad con respecto a la crítica superior de 0,478, se puede observar que ha aumentado la longitud del chorro. Es mayor el número de gotas pequeñas; la diversidad de tamaños sigue siendo grande pero no tanto como en las anteriores.

En el chorro se siguen observando ensanchamientos y estrechamientos; su longitud es variable.

La gota 2 (11A2-23) tiene un diámetro de 1,01 mm y su relación con el del chorro es de 1,77, que coincide bien con el teórico; el volumen de esta gota es de 0,524 mm<sup>3</sup>.

En esta fotografía se puede observar que en el extremo del chorro existe un gran ensanchamiento para formar una gota, que aun no se ha desprendido, próximo a ella no hay ninguna otra, el volumen de la misma (al desprenderse será todavía mayor) es de 1,950 mm<sup>3</sup> y su diámetro 1,55 mm, su volumen es 3,72 veces el de la gota teórica.

Se ha utilizado la fotografía 11A2 para determinar la velocidad de las gotas A-B-C, habiendo resultado

$$13,39 \text{ cm/s}$$

muy inferior, como siempre ha ocurrido, a la que tiene el agua en el chorro

$$39,36 \text{ cm/s}$$

Si el mecanismo de la ruptura del chorro fuera solamente el debido a la onda de la perturbación producida en el orificio, en un principio las gotas deberían viajar a la misma velocidad que tiene el fluido dentro del mismo. Parece como si se produjera una retención de la gota por el chorro y que aquella aumenta de tamaño hasta que se desprende. En este caso la velocidad inicial deberá ser la debida al empuje estático más la correspondiente a la energía cinética, confirmando una vez más lo dicho anteriormente.

Carrete 11A2.—Fotografías 10 - 18 (figura 18).

La velocidad es ya muy próxima a la crítica superior, su relación con ésta es de

$$0,837$$

el chorro se observa con ensanchamientos y estrechamientos en toda su longitud, siendo mínima su zona uniforme. En general en el sistema agua - benceno el chorro se encuentra mucho más deformado que para el inverso benceno - agua.

A esta velocidad y en la fotografía 11A2-17 ya se notan las deformaciones sinusoidales producidas por las fuerzas de fricción.

La longitud del chorro es muy variable, y éste da la impresión de una columna salomónica.

En la fotografía 11A2-16, la gota 1 parece que se está formando por coalescencia de la gota no separada aun del chorro con la que se encontraba inmediatamente superior a ella, la gota 1-A tiene un diámetro de 1,09 mm, el de la 2 es de 1,14 (ambas en la fotografía 11A2-16) y el de la 3, es 1,18 (11A2-17), los tres próximamente iguales.

La relación de estos diámetros de gota al del chorro es, dentro de los límites de error, el teórico correspondiente a una longitud de onda.

La gota 1B (11A2-16) tiene su diámetro de 1,37 mm y un volumen 1,346 mm<sup>3</sup> doble del de la 1A.

Puede verse en la fotografía 11A2-16, que se ha formado un cuello largo, al separarse las gotas unidas 1A y 1B, este cuello tiene 0,27 mm de diámetro, y nos ha parecido de interés calcular las fuerzas debidas a la inercia y a la tensión interfacial que actúan sobre él.

Fuerzas de inercia:

Volumen gota 1A	-	0,678	mm <sup>3</sup>
»	»	1B	- 1,346 »
Suma . . .		2,024	»

Fuerza que actúa sobre ella.

$$V(\rho_a - \rho_b)g = 2,024 \times 0,122 \times 981 \times 10^{-3} = 0,242 \text{ dinas}$$

Fuerzas interfaciales:

$$\pi d \sigma = 3,14 \times 0,027 \times 35 = 0,252 \text{ dinas}$$

Valores que son bastante próximos.

Carrete 11A1.—Fotografías 24 y 25 (figura 19).

En estas fotografías se ha pasado la velocidad crítica superior, el extremo del chorro se encuentra muy deformado, pudiendo considerar, igual que pasaba en el sistema benceno - agua, dos zonas en el chorro, la

primera muy uniforme, en este caso de agua-benceno esta parte está mucho menos deformada que en la zona varicosa; y una segunda zona muy deformada. Han desaparecido los nodos y vientres y se observa una deformación sinusoidal, debiendo ser la causa de la ruptura del chorro las fuerzas de turbulencia del fluido continuo.

Como caso curioso observamos la presencia de las gotas 1 (11A1-24) y 2 (11A1-25) que son mucho más pequeñas que corresponde a una longitud de onda.

Gota 1	-	diámetro	0,74 mm
» 2	»	»	0,58 »

Esto puede ser una prueba de que la onda de perturbación ya no es el mecanismo que controla la ruptura del chorro. Las gotas son muy desiguales.

Carrete 11A1.—Fotografía, 1-4 (figura 20).

En estas fotografías nos encontramos en la zona negativa, ya muy pasada la velocidad crítica superior, se acentúa la deformación del chorro en el extremo; apreciándose perfectamente las dos zonas de que hablábamos en las fotografías anteriores.

En estas como en las demás fotografías obtenidas al aumentar la velocidad el comportamiento en el sistema agua-benceno es análogo al de su inverso.

El número de gotas muy pequeñas así como el de las mayores, aumentan dando lugar a una mayor dispersión del tamaño de las gotas.

Carrete 11A3.—Fotografía, 28 (figura 21).

Esta fotografía está tomada a una velocidad muy superior a la crítica superior (99 cm/s), el chorro se ha reducido grandemente y el extremo del mismo es una masa informe.

En el líquido se ha formado una verdadera emulsión de agua en benceno.

Las gotas de agua chocan a gran velocidad con la interfase superior, y se nota a simple vista una corriente descendente de gotas centrales y otra ascendente en la periferia, junto a las paredes.

Dentro de las experiencias realizadas con otras placas nos ha parecido de interés seleccionar unas cuantas fotografías que acompañamos.

La fotografía 4A3-6 (figura 22), es una de las diez que nos han servido para hacer uno de los histogramas, que se usan en otro lugar de este trabajo. Esta fotografía corresponde al sistema benceno-agua, con placa plana A-0,032, el diámetro del chorro es 0,037 cm. La velocidad por el mismo 60,54 cm/s, que se encuentra en una relación con la velo-

cidad de crítica superior de 0,498. A esta fotografía le corresponde la máxima uniformidad de gota, la desviación típica en el histograma es de 0,0435. Como puede verse, exceptuando la gota 10, todas las demás son iguales. Esta uniformidad nos indica que nos encontramos en las condiciones en que se cumple más exactamente la teoría de LORD RAYLEIGH, de que hay una causa uniforme que da lugar a la desintegración del chorro.

La dispersión de las gotas producida por la circulación exterior es mínima y comienza a manifestarse a distancias bastante grandes del chorro.

Se ha determinado el diámetro de la gota, resultando ser 0,966 mm.

La relación, del diámetro de la gota al del chorro vale

$$2,61$$

valor muy alto respecto al teórico, 1,92.

El diámetro que resulta experimentalmente corresponde a una longitud de chorro de dos longitudes de onda, es decir, doble del tamaño teórico.

Este diámetro es el más pequeño de todas las experiencias con esta placa, lo que indica que para esta velocidad se obtiene la superficie de transferencia máxima.

Para comparar estos resultados con los obtenidos por CHRISTIANSEN y HIXSON (8) hemos hallado la relación de velocidad en el chorro, a celeridad de onda, habiendo obtenido un valor de 2,64 en vez de 2,32 que preconizan allí.

Me parece también de interés presentar las dos fotografías 4A2-34 y 4A3-15 (figura 23): la primera corresponde a una velocidad en el chorro de 57,50 cm/s. es decir, inmediatamente por debajo de la fotografía anterior (60,54 cm/s) y en la segunda la velocidad en el chorro es 66,5 cm/s o sea, un poco por encima de ella para darnos cuenta que en éstas existe una mayor dispersión de tamaño, sobre todo en la 4A2-34 en donde se ve el rosario de gotas con unos claros que pudiera parecer como si se hubieran hecho al coalescer varias gotitas pequeñas para ocasionar las de mayor tamaño que se ven en la fotografía. Construyendo los histogramas y calculando la desviación típica (cada una de estas fotografías forma parte de una serie de 10 tomadas en las mismas condiciones) se ha encontrado como diámetros medios de las gotas, para la 4A2-34, 1,25 mm. una desviación de 0,229, y para la 4A3-15, diámetro, 1,13 mm. y desviación de 0,1405; ambos diámetros y desviación, sobre todo esta última, son bastantes mayores que para la la 4A3-6; parece como si la

velocidad de ésta fuera crítica, ya que las experiencias se realizaron en el mismo día, y sin cambiar más variable que la presión entre las cámaras para variar la velocidad de paso, habiéndose tomado las experiencias seguidas.

La velocidad de ascensión de las gotas en la fotografía 4A3-6, tomando las 10 que están por debajo de la número 10 es:

Distancia a recorrer	10,15 mm.
Caudal	65,10 mm <sup>3</sup> /s
Volumen de las diez gotas = 4,648 mm <sup>3</sup>	
Tiempo necesario para recorrer la distancia	

$$\frac{4,648}{65,10} = 0,0714 \text{ s.}$$

$$\text{Velocidad} = \frac{10,15}{0,0714} = 142 \text{ mm/s} = 14,2 \text{ cm/s.}$$

Para esferas rígidas de benceno ascendiendo en agua en reposo la velocidad final es 2,7 cm/s muy inferior a la calculada. Esto demuestra una gran circulación en el medio exterior.

Acompañamos también la fotografía 4A5-11 (figura 24) que coincide con la velocidad crítica superior, en ella se observa el chorro sin más deformación que unos ensanchamientos y estrechamientos cerca del extremo, y después se encuentra completamente cortado próximamente por la mitad, y en la mitad inferior se ha vuelto a formar otra cabeza. El motivo de esta rotura parece extraño, ya que las fuerzas de fricción no han producido deformaciones de tipo sinuoso en el chorro.

En la 4A6-9 (figura 24), con velocidad un poco superior a la crítica, se observa perfectamente la formación de un cuello por donde se romperá el chorro y aislará una gran parte del mismo, por la forma como se encuentra más bien parece debido a un movimiento ondulatorio que a un efecto de fricción, aunque quizá pueda influir la turbulencia ocasionada en la fase continua por la recirculación.

#### 4) Velocidad de las gotas a diferentes alturas y circulación de la fase continua.

Un factor que tiene gran influencia sobre la ruptura del chorro, y del que hemos hablado, es el movimiento de recirculación del fluido exte-

rior. A grandes velocidades se puede observar a simple vista, pero es conveniente poderlo manifestar para cualquier velocidad. Esta recirculación del fluido exterior, dá lugar a fuerzas normales a la dirección del chorro en la zona negativa, donde la velocidad ya tiene importancia, ocasionando su deformación e incluso su ruptura. Para poder demostrar el movimiento de la fase continua, podemos utilizar la medición de la velocidad lineal de las gotas. Sea cual sea la velocidad que tengan las gotas al separarse del chorro, al cabo de unos milímetros (el cálculo de ésta longitud la presentamos más abajo) habrán alcanzado la velocidad final, que también hemos determinado, dentro de una amplia variación de diámetros para que queden comprendidos todos los que tienen las gotas en las experiencias, por lo tanto, la velocidad relativa, pasada esta longitud de velocidad variable, será la final, y si la medida para las gotas es superior a ésta, nos indicará el movimiento e incluso la velocidad del mismo. Si determinamos las velocidades de las gotas a varias alturas, se podrá seguir la variación de la velocidad de la fase continua con la altura.

Para calcular la longitud de velocidad variable, utilizamos las fórmulas publicadas en la obra de CREMER (6).

En la zona de STOKES

$$s = V_0 \tau \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad [13]$$

en donde:

S: camino recorrido en el tiempo  $t$ .

$V_0$ : velocidad inicial de la gota.

$$\tau = \frac{m}{3 \pi d \mu} = \frac{d^2 \rho_0}{18 \mu}$$

$\rho$  : densidad del fluido de la gota.

$\mu$  : viscosidad de la fase continua.

$d$ : diámetro de la gota.

La velocidad alcanzada con el tiempo  $t$ , será:

$$V = V_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

dándole a  $V$  el valor de la velocidad final y sustituyendo en [13] tendremos la longitud necesaria para obtener esta velocidad:

$$s = v_0 \tau \left( 1 - \frac{V}{v_0} \right) \quad [13']$$

En la zona de NEWTON

$$s = \frac{2m}{\rho f A} \ln \left( 1 + \frac{\rho f A}{2m} v_0 t \right) \quad [14]$$

$$m: \text{ masa de la gota} = \frac{\pi}{6} d^3 \rho_0$$

$f$ : coeficiente de fricción = 0,4.

$\rho$ : densidad de la fase continua.

$$A: \text{ sección aparente de la gota} = \frac{\pi}{4} d^2$$

La velocidad después del tiempo  $t$ , vendrá dada por:

$$\frac{1}{V} - \frac{1}{v_0} = \frac{\rho f A}{2m} t$$

haciendo igual que antes, es decir, considerando  $V$ , como velocidad final y sustituyendo en [14] obtendremos la ecuación que nos dá la longitud necesaria para alcanzar esta velocidad.

$$s = \frac{10 d \rho_0}{3 \rho} \ln \left( 1 + \frac{v_0 - V}{V} \right) \quad [15]$$

Hemos determinado las velocidades finales de caída, considerando esferas rígidas, de benceno en agua y viceversa. Se ha utilizado el gráfico publicado por COULSON y RICHARDSON (4) que relaciona  $fRe^2$  con el número de REYNOLDS.

Los resultados obtenidos son:

TABLA XI

Sistema: Benceno-agua

Diámetro cm	$D^3$ $\text{cm}^3$	(1) $f \times Re^2$ $797,980 \times D^3$	Re	$\frac{\mu}{D\rho}$	" cm/s
0,04	$64 \times 10^{-6}$	51,064	1,18	0,250	0,795
0,06	$216 \times 10^{-6}$	172,342	8,70	0,167	1,453
0,08	$512 \times 10^{-6}$	408,515	16,60	0,125	2,075
0,10	0,001000	797,880	27,30	0,100	2,730
0,12	0,001728	1.378,737	40,20	0,0833	3.349
0,14	0,002744	2.189,383	52,95	0,0714	3,781
0,16	0,004096	3.288,116	73,65	0,0625	4,603
0,18	0,005832	4.653,236	93,50	0,0556	5,199
0,20	0,008000	6.383,040	114,00	0,0500	5,700

$$(1): f \times Re^2 = \frac{2}{3} g \left( \frac{\rho_0 - \rho}{\rho} \right) \frac{D^3 \rho_0^2}{\mu^2}$$

**TABLA XII**

Sistema: Agua - benceno

Diámetro	$D^3$ cm <sup>3</sup>	$f \times Re^2$ $1,673,492 \times D^3$	Re	$\frac{\mu}{D\rho}$	u cm/s
0,04	0,000064	107,103	5,9	0,1842	1,087
0,06	0,000216	361,474	15,3	0,1228	1,879
0,08	0,000512	856,828	28,8	0,0921	2,652
0,10	0,001000	1.673,492	46,8	0,0737	3,449
0,12	0,001728	2.891,794	67,9	0,0614	4,169
0,14	0,002744	4.592,062	93,0	0,0526	4.892
0,16	0,004096	6.854,623	118,0	0,0461	5,440
0,18	0,005832	9.759,805	151,0	0,0410	6,191
0,20	0,008000	13.387,936	186,0	0,0368	6,845

Para la determinación de las velocidades de las gotas a diferentes alturas, hemos escogido la fotografía 26 del carrete 4A8, que adjuntamos, correspondiente al sistema benceno - agua, utilizando la placa plana (A) con orificio de 0,32 mm. de diámetro.

Vot: volumen total de todas las gotas.	Alturas (en cms)	
Dm: diámetro medio.	Parciales	Totales
L : altura de la zona.	Zona 1	0,792
T : tiempo invertido.	» 2	0,829
Vm: velocidad media de las gotas.	» 3	0,784
	» 4	0,673
	» 5	0,777
	» 6	0,895
	» 7	1,006
	» 8	1,058
	» 9	0,636
		8,450

**Zona 1**

Gotas	Diámetro mm	Volumen	
1	0,99	0,508	Vot = 4,002 mm <sup>3</sup>
2	0,93	0,421	
3	0,89	0,369	Dm = 0,095 cm.
4	0,89	0,369	
5	0,93	0,421	L = 0,792 cm.
6	0,95	0,449	
7	0,97	0,478	T = 0,0719
8	0,96	0,463	
9	1,00	0,524	Vm = 11,02 cm/s.



## Zona 2

Gotas	Diámetro mm	Volumen	
10	0,99	0,508	Vot = 5,691 mm <sup>3</sup>
11	0,95	0,449	
12	1,00	0,524	Dm = 0,100 cm.
13	0,96	0,463	
14	0,96	0,463	L = 0,829 cm.
15	0,98	0,493	
16	1,02	0,556	T = 0,102 S
16'	0,98	0,493	
16''	0,98	0,493	Vm = 8,13 cm/s.
17	1,04	0,589	
18	1,08	0,660	

## Zona 3

19	1,08	0,660	Vot = 5,599 mm <sup>3</sup>
19'	0,95	0,449	
20	0,95	0,449	Dm = 0,099 cm.
21	0,96	0,463	
22	0,99	0,508	L = 0,784 cm.
23	0,91	0,395	
5 x	0,95	0,449	T = 0,101 S.
24	1,05	0,606	
25	1,12	0,736	Vm = 7,76 cm/s.
x	0,95	0,449	
x	0,94	0,435	

## Zona 4

x	0,93	0,421	Vot = 5,617
26	1,05	0,606	
27	1,04	0,589	Dm = 0,096 cm.
x	0,93	0,421	
28	0,94	0,435	L = 0,673 cm.
29	0,99	0,508	
x	0,93	0,421	T = 0,101 S.
30	0,88	0,357	
31	0,93	0,421	Vm = 6,66 cm/s.
32	1,01	0,539	
33	0,93	0,421	
34	0,97	0,478	

## Zona 5

Gotas	Diámetro mm	Volumen	
35	0,88	0,357	
36	0,95	0,449	
37	0,95	0,449	Vot = 8,159 mm <sup>3</sup>
38	0,94	0,435	
39	0,94	0,435	Dm = 0,092 cm.
40	0,94	0,435	
41	0,92	0,408	L = 0,777 cm.
42	0,92	0,408	
43	0,96	0,463	T = 0,147 S.
44	0,88	0,357	
45	0,92	0,408	Vm = 5,28 cm/s.
9	× 0,91	9 × 0,395	

## Zona 6

62	0,97	0,478	
46	0,96	0,463	Vot = 13,753 mm <sup>3</sup>
47	0,95	0,449	
48	0,84	0,310	Dm = 0,096 cm.
49	0,89	0,369	
50	0,82	0,289	L = 0,895 cm.
51	0,91	0,395	
52	0,92	0,408	T = 0,247 S.
53	0,94	0,435	
54	0,92	0,408	Vm = 3,62 cm/s.
55	0,98	0,493	
56	0,91	0,395	
57	0,95	0,449	
58	0,89	0,369	
59	1,12	0,736	
60	0,98	0,493	
61	1,18	0,860	
13 de	0,096		
13 ×	0,458		

## Zona 7

63	0,98	0,493	
64	1,04	0,589	Vot = 14,606 mm <sup>3</sup>
65	0,95	0,449	
66	1,05	0,606	Dm = 0,101 cm.
67	1,13	0,755	
68	1,00	0,524	L = 1,006 cm.
69	0,98	0,493	
70	1,01	0,539	T = 0,262 S
71	0,94	0,435	
72	0,94	0,435	Vm = 3,84 cm/s.
73	1,15	0,796	

Gotas		Diámetro mm	Volumen
74		1,04	0,589
75		1,01	0,539
76		1,02	0,556
77		0,94	0,435
78		0,94	0,435
79		0,93	0,421
80		0,99	0,508
81		1,01	0,539
82		0,99	0,508
88		1,01	0,539
89		0,96	0,463
90		1,15	0,796
4	×	1,01	0,541

## Zona 8

83		0,98	0,492	Vot = 17,762 mm <sup>3</sup>
84		0,99	0,508	
85		0,99	0,508	Dm = 0,103 cm.
86		0,95	0,449	
87		0,91	0,395	L = 1,058 cm.
91		1,01	0,539	
92		1,09	0,678	T = 0,319 S
93		1,03	0,572	
94		0,96	0,463	Vm = 3,32 cm/s.
95		0,95	0,449	
96		1,06	0,624	
97		0,97	0,478	
98		1,02	0,556	
99		1,07	0,641	
100		1,07	0,641	
101		1,04	0,589	
102		0,95	0,449	
103		1,09	0,678	
104		1,31	0,177	
12	×	1,03	0,573	

## Zona 9

105		0,94	0,435	Vot = 10,924 mm <sup>3</sup>
106		0,96	0,463	
107		0,95	0,449	Dm = 0,103 cm.
108		0,98	0,493	
109		1,08	0,660	L = 0,636 cm.
110		1,03	0,572	
111		1,16	0,817	T = 0,196 S.
112		1,21	0,928	
113		0,88	0,357	Vm = 3,24 cm/s.
10	×	1,03	0,575	

Como resumen podemos poner :

TABLA XIII

Zona	Alturas de parciales mm	Zona totales mm	Diám. medio de gota cm	Velocidad experimental cm/s	Velocidad teórica cm/s	Dif. de Velocidades cm/s
1	0,792	0,792	0,095	11,02	2,57	8,45
2	0,829	1,621	0,100	8,13	2,73	5,40
3	0,784	2,405	0,099	7,76	2,70	5,06
4	0,673	3,078	0,096	6,66	2,60	4,06
5	0,777	3,855	0,092	5,28	2,47	2,81
6	0,895	4,750	0,096	3,62	2,60	1,02
7	1,006	5,756	0,101	3,84	2,76	1,08
8	1,058	7,814	0,103	3,32	2,82	0,50
9	0,636	8,450	0,103	3,24	2,82	0,42

El valor medio del número de REYNOLDS (tomado para diámetro 0,1 cm) es 27,3, encontrándose en la zona intermedia entre la de STOKES y la de NEWTON.

Como no es posible determinar la velocidad que tienen las gotas que se desprenden del chorro, hemos calculado la longitud necesaria para llegar a la velocidad final, partiendo de la velocidad 11,02 cm/s.

Considerando el proceso en el intervalo donde se cumple la ley de STOKES, y aplicando la ecuación [13']

$$S = 0,40 \text{ cm.}$$

Si estuviera en el intervalo de la ley de NEWTON, por la ecuación [15]

$$S = 0,33 \text{ cm.}$$

Prácticamente a partir de la segunda zona de alturas deberían tener las gotas la velocidad terminal, esta velocidad será la relativa entre fases, por lo que la de circulación de la fase continua será la diferencia entre la experimental y la terminal correspondiente.

Estas velocidades se han consignado en la tabla XIII. Como puede verse la circulación de la fase continua es de importancia, y como es natural, su velocidad disminuye con la altura, para las zonas 8 y 9 se encuentra prácticamente en reposo.

El efecto de esta disminución de la velocidad de circulación de la fase continua, se manifiesta en la fotografía por una mayor dispersión horizontal de las gotas, según nos alejamos del orificio.

Esta circulación del fluido exterior en sentido contrario a la placa

por el centro de la torre, se continúa, junto a las paredes de la misma, en sentido inverso de forma que se cierra el ciclo. El punto de cambio de sentido de velocidad, es aquel en el que se igualan las velocidades teóricas y experimental de la fase dispersa; y es donde, arrastradas por la fase continua, se produce una mayor dispersión de las gotas en sentido horizontal.

### 5) Longitud del chorro

Al objeto de poder comprobar experimentalmente los resultados de los trabajos relacionados en la bibliografía hemos representado en un gráfico la relación entre la longitud del chorro y la velocidad del fluido en el interior del mismo para todas las placas del sistema benceno-agua. Otros gráficos representan la misma relación para el de agua-benceno (Gráficos 5 a 10).

Destaca inmediatamente la presencia de dos zonas, la primera a velocidades menores, en la que el aumento de velocidad lleva consigo el de la longitud del chorro, «zona positiva»; y el segundo en que ocurre lo contrario, en que al aumentar la velocidad disminuye la longitud de aquel, «zona negativa». Esto está de acuerdo con los trabajos reseñados.

En el gráfico obtenido no nos es posible (quizá por falta de datos suficientes) precisar la existencia de una zona, aún a menores velocidades que en la anterior, en la que las longitudes del chorro sean menores que las correspondientes a la misma velocidad en la zona positiva. Esta zona es en la que hemos considerado que la rotura del chorro se produce al ser insuficiente la energía cinética de la fase dispersa para formar la superficie lateral del mismo. Naturalmente tampoco se manifiesta la llamada «velocidad crítica inferior».

#### *Zona positiva*

Para determinar la influencia que pueda tener en la «zona positiva» la viscosidad de la fase dispersa hemos calculado el término correctivo de TYLER

$$1 + \frac{1}{4095} \left( \frac{V \sqrt{\sigma \rho d}}{\mu} \right)^{3/2}$$

Para el caso más desfavorable que corresponde al sistema benceno-agua, y para diámetro de orificio de 0,5 mm el término correctivo valdrá 1,00407, por debajo, con mucho, de los errores experimentales posibles.

En el cuadro adjunto se han representado todos los datos obtenidos con los diagramas, correspondientes a la «zona positiva».

TABLA XIV

Sistema: Benceno-agua

Placa	Carrete	Long. chorro máxima mm	Veloc. crítica superior cm/s	Pendiente (convencional)	Ancho chorro
A-0,052	1A-1,5	26,50	91	1,757	0,056
A-0,050	2A-1,2	44,20	144	1,720	0,07
A-0,030	7A-1,5	29,—	88	1,611	0,05
A-0,030	6A-1,2	32,—	81	2,192	0,042
B-0,050	1B-1,2	27,40	89	1,915	0,054
B-0,030	2B-1,2	24,80	84	1,966	0,040
B-0,020	3B-1,2	17,50	86	1,023	0,033
C-0,050	1C-1,2	27,50	85	2,000	0,053
C-0,032	2C-1,2	30,00	113	1,145	0,033

TABLA XV

Sistema: Agua-benceno

A-0,052	11A-1,4	20	99	1,200	0,052
A-0,050	12A-1,2	32	64	2,791	0,057
A-0,030	14A-1,2	26	153	0,892	0,034
A-0,030	15A-1,6	21	130	0,924	0,040
B-0,050	11B-1,2	24	110	1,151	0,055
B-0,030	12B-1,2	—	—	0,595	0,032
C-0,050	11C-1,2	22,5	109	0,898	0,053
C-0,032	12C-1	—	—	0,794	0,043

Comparando, en general, ambos sistemas se observa que en el de benceno-agua, las pendientes de las rectas son superiores a las del sistema agua-benceno, de acuerdo con los trabajos anteriores y con la teoría ya que al ser mayor la viscosidad del medio exterior, en el primer caso (viscosidad del agua mayor que la del benceno), influirá disminuyendo ambas, la amplitud de la perturbación en el origen, y la velocidad de crecimiento de dicha amplitud.

Podemos hacer notar, también, sobre las pendientes que, como caso general, para un mismo tipo de placa, varían en el mismo sentido que el diámetro del orificio, son excepciones: Placa A-0,030, carretes 6A-1,2, y B-0,030, carretes 2B-1,2 en el sistema benceno-agua y la A-0,050, carretes 12A-1,2 del agua-benceno. Si comparamos dichas pendientes entre

placas del mismo tipo para ambos sistemas, vemos que su relación oscila entre 1,5 y 2, mayor, como ya hemos dicho en el benceno-agua.

La disminución de la pendiente con el diámetro del chorro parece natural pues, según la teoría de LORD RAYLEIGH, se deberá cumplir, teniendo en cuenta que  $\rho$  y  $\sigma$  son constante para cada sistema:

$$\frac{L}{u} = \text{const. } d^{2/3}$$

Esta ecuación se cumple cualitativamente (con sus excepciones) pero no cuantitativamente.

Las tablas 14 y 15 nos dice que, para placas semejantes, la longitud máxima del chorro, correspondiente a la velocidad crítica superior, es mayor en el sistema benceno-agua, que en el inverso. Lo contrario ocurre con el valor de dicha velocidad crítica superior.

La longitud máxima del chorro, que coincide con la velocidad crítica superior, se encuentra, como ya hemos dicho, en el punto en que coincide la longitud al considerar como motivo de desintegración de aquel, bien la onda producida por la perturbación ocasionada en el orificio, o fuerzas de fricción con la fase continua.

En ambos casos la longitud debe variar en el mismo sentido que el diámetro. En la zona positiva, la pendiente de la recta  $L \div V$  disminuye al hacerlo el diámetro, ecuación [8']. En la zona negativa, para una misma velocidad, la facilidad de romperse el chorro será tanto mayor cuanto más pequeño sea el diámetro por dos razones principales: 1.º Porque cuanto menor sea el diámetro menor será la fuerza necesaria para romper el chorro, y 2.º porque la fuerza de fricción depende de la superficie, y la superficie específica es tanto mayor cuanto más pequeño es el diámetro. La curva representativa de la zona negativa, deberá encontrarse más baja al disminuir el diámetro del chorro. (Siempre que se conserven las demás variables constantes).

En la figura 26, hemos indicado lo que debe ocurrir. Las líneas AC y AB que representan al chorro de diámetro mayor, se cortan en un punto A, con una longitud de chorro  $L'$ , superior al  $L''$ , que resulta del cruce de la A'C' y A'B', representativas del diámetro menor.

A pesar de esto, en los datos experimentales de las tablas 14 y 15 podemos ver que no se cumplen estas deducciones, y la única causa quizá sea la influencia de la placa utilizada.

Para poder comprobar la influencia de la placa, de una manera cualitativa, hemos realizado una serie de experiencias para determinar la pérdida de carga que se produce cuando pasa agua a través del orificio

de cada una de ellas. Con los resultados obtenidos se ha construido el gráfico 11. Todas las rectas se encuentran en una zona relativamente estrecha, sin embargo, su posición, en el gráfico es independiente del diámetro del orificio y del tipo de la placa.

Las pendientes de las rectas se indican en la Tabla XVI.

TABLA XVI

Placa y diám. del orificio en cm .	Pendiente
A-0,025	1,74
A-0,030	1,68
A-0,050	1,72
A-0,050	1,90
B-0,050	1,90
C-0,050	1,94

Como puede apreciarse en las placas A, no varía de una manera uniforme, e incluso, para un mismo diámetro de orificio se obtienen bastante diferentes.

Las placas B -0,05 y C -0,05 dan pendientes bastante próximas entre sí y con una de las A -0,05, pero no así con las otras.

Una causa de estas discrepancias puede ser la irregularidad de la forma de los orificios de las placas. Observados éstos con microscopio, se puede comprobar que su forma no es perfectamente circular, sino que se encuentra más o menos deformada, lo que influirá sobre los resultados obtenidos.

Esto hace que no puedan ser comparados cuantitativamente dichos resultados cuando se utilizan placas diferentes, pudiendo derivarse consecuencias cualitativas solamente.

En el transcurso de estas experiencias, es decir, al pasar agua a través del orificio descargando, a su vez, en agua, pudimos notar que el flujo se produce a diferencias de presiones del orden de 0,1 mm, y al mismo tiempo que desaparecía la fluctuación en el manómetro para presiones mínimas, que siempre se han producido al emplear los sistemas benceno-agua y su inverso; lo que nos confirma que la causa de la presión mínima necesaria para el flujo de la fase dispersa, así como la fluctuación en el manómetro es la curvatura de la gota que se forma, motivada por la tensión interfacial.

Para tratar de hallar alguna relación entre el diámetro de los chorros y la velocidad crítica superior hemos representado, para los dos sistemas,

el valor de  $\frac{L}{d}$  en función del número de WEBER;

$$u \sqrt{\frac{\rho d}{\sigma}}$$

dando lugar a los gráficos 12 a 17; en las tablas 17 y 18 se han tabulado todos los datos para poder compararlos más fácilmente.

TABLA XVII

Sistema: Benceno-agua

Placa	Carrete	$\frac{L}{d}$ máx.	$u \sqrt{\frac{\rho d}{\sigma}}$	Pendiente	d. chorro
A-0,052	1A-1,5	50	3,05	2,952	0,056
A-0,050	2A-1,2	63	2,80	3,542	0,070
A-0,030	7A-1,5	58	3,12	2,37	0,050
A-0,030	6A-1,2	75	2,80	3,910	0,047
A-0,012	8A-1,2			3,63	0,022
B-0,050	1B-1,2	50	3,20	2,45	0,054
B-0,030	2B-1,2	62	2,70	3,63	0,040
B-0,020	3B-1,2			2,47	0,033
C-0,050	1C-1,2	52	3,05	2,70	0,053
C-0,030	2C-1,2	86	3,10	3,128	0,045

TABLA XVIII

Sistema: Agua-benceno

A-0,052	11A-1,4	38	3,75	1,602	0,052
A-0,050	12A-1,2	47	3,00	2,178	0,057
A-0,030	15A-1,6	51	4,50	1,530	0,040
A-0,030	15A-1,2	76	4,55	2,162	0,032
B-0,050	11B-1,2	44	4,50	1,192	0,055
B-0,030	12B-1,2	55	4,50	1,467	0,034
C-0,050	11C-1,2	42	4,45		0,053
C-0,030	12C-1			1,183	0,043

En el sistema benceno-agua se conserva bastante constante el valor crítico de

$$u \sqrt{\frac{\rho d}{\sigma}}$$

que en este caso, su valor medio, es 3,00.

El valor de  $\frac{L}{d}$  máximo, aumenta al disminuir el diámetro, lo cual es natural teniendo en cuenta que en ordenadas se encuentran como divisor elevado a la potencia 1, mientras que, aunque aparece como factor en

las abscisas, está elevado solamente a  $\frac{1}{2}$ . El comportamiento del sistema agua - benceno, en lo que se refiere a este extremo, es semejante.

En el sistema agua - benceno, también se conserva constante el valor de

$$u \sqrt{\frac{\rho d}{\sigma}} \text{ crítico}$$

que para este sistema es 4,50; se exceptúan las placas A-0,052 y A-0,05 (carretes 11A1-4 y 12A1-2 respectivamente) que dan valores excesivamente bajos.

Comparados entre sí ambos sistemas se observa inmediatamente que dicho valor crítico es superior para el sistema agua - benceno, mientras que los de  $L/d$  máximos son más pequeños en este sistema, pero, así como para el número de WEBER, la relación es prácticamente constante.

$$\frac{u \sqrt{\frac{\rho d}{\sigma}} \text{ Crítico (sistema agua-benceno)}}{u \sqrt{\frac{\rho d}{\sigma}} \text{ Crítico (sistema benceno-agua)}} = 1,5$$

la de  $L/d$  máximo entre ambos sistemas no lo es:

La relación entre los números de WEBER críticos coincide con la relación de las viscosidades de ambos líquidos, a las temperaturas que se han realizado las experiencias que siempre ha sido próximo a 20°.

$$\frac{\text{Viscosidad del agua a } 20^{\circ} \text{ C}}{\text{Viscosidad del benceno a } 20^{\circ}} = \frac{1,00}{0,65} = 1,56$$

Parece que la viscosidad que tiene una marcada importancia es la del medio exterior, ya que hemos visto que el término correctivo de TYLER correspondiente a la viscosidad del líquido del chorro, no la tiene.

El efecto de la viscosidad de la fase continua no solamente es, como dice TYLER (31), el de disminuir la amplitud de la onda de perturbación, sino que, teniendo en cuenta, que el efecto de fricción entre las fases es ocasionar un movimiento circulatorio en la exterior, como hemos demostrado al hablar de velocidad de las gotas, la viscosidad en esta fase reducirá la circulación y dificultará la rotura del chorro por esta causa.

De todos los datos obtenidos se desprende que no se cumplen cuantitativamente todas las predicciones de la teoría de LORD RAYLEIGH, pero

esto parece natural ya que en ella solamente se considera el efecto de la onda de perturbación, unida al empuje estático, ignorándose el resto de las fuerzas que actúan en el proceso.

Algunas de estas fuerzas, como es la debida a la diferencia de densidades actúa incrementando la velocidad dentro del chorro. La variación de la presión estática exterior a lo largo del chorro, también dará lugar a una modificación de la velocidad, aumentándola si es descendente. Por otro lado, el chorro al avanzar va formando nuevas superficies, y dado la pequeñez del diámetro del mismo la energía necesaria para la formación de esta nueva superficie puede ser de importancia; y además la viscosidad de ambos líquidos dará lugar a una fuerza de fricción que se opondrá al movimiento del chorro; igual que ocurre con la formación de nuevas superficies.

El balance entre todas estas fuerzas es muy complicado, debido a que el intercambio de energía no queda limitado al líquido del chorro, sino que se extiende al medio exterior que se encuentra también en movimiento, por efecto del rozamiento.

En el balance total habría de incluir, por lo tanto, al sistema completo y conocer la circulación dentro del fluido exterior, y aún así, resultaría un problema excesivamente complicado.

Parece natural considerar que las fuerzas que disminuyen la velocidad del líquido dentro del chorro, fricción y formación de nuevas superficies, prevalecerán en dicho balance, y por lo tanto dicha velocidad se hará más pequeña, y el chorro a su vez, aumentará de diámetro según se aleja del orificio. Esto se ve confirmado por la experiencia pues en las fotografías tomadas se puede observar. Este hecho viene a ocasionar otra causa de error pues en todos los cálculos se han supuesto constantes el diámetro del chorro y la velocidad del mismo.

El líquido exterior que se encuentra junto al chorro, es arrastrado por éste, e irá aumentando de velocidad según se aleja del orificio. Cuando el chorro se rompe en gotas, la fuerza de fricción queda muy disminuída, la velocidad del líquido exterior en la misma dirección que el chorro va disminuyendo.

Esta misma complejidad del proceso, hace que nos debamos contentar con obtener una buena concordancia cualitativa.

Otra causa de alteraciones en el comportamiento del chorro es la acumulación de impurezas en la superficie del mismo dando lugar a una variación de la tensión interfacial. Si se produce una disminución de dicha tensión la pendiente de  $L/d$  respecto al número de WEBER aumentará, y ocurrirá lo contrario si disminuye.

La influencia de la variación de tensión interfacial por adsorción de impurezas en la superficie, sobre la circulación interior en gotas y su repercusión sobre los coeficientes de transferencia de materia, ha sido citada y estudiada, entre otros, por WEST, HERRMAN, CHONG y THOMAS (36); GARNER y SKELLAND (13); KEITH y HIXSON (18), etc.

CHRISTIANSEN y HIXON (8) estudiaron los efectos anómalos de ciertos solutos en la rotura de chorros, debido a que en el tiempo de su ruptura, el efecto deprimente sobre la tensión interfacial, a causa de la acumulación de impurezas en la superficie del mismo se conseguía sólo parcialmente.

### *Zona negativa*

En esta zona las fuerzas que ocasionan la ruptura del chorro son las debidas a la viscosidad, el movimiento del líquido en el chorro se hace turbulento, se desarrollan movimientos normales al eje del chorro que ocasionan la ruptura del mismo.

La representación que se hizo para la zona positiva abarcaba también esta zona, lo mismo al representar la longitud del chorro en función de la velocidad, que la relación  $L/d$  en función del número de WEBER.

De todos estos gráficos no se puede obtener consecuencias, ya que al compararlos no se observa ningún punto de coincidencia, excepto que al aumentar la velocidad se acorta la longitud del chorro.

En el desarrollo de movimientos normales al eje del chorro y en la ruptura ha de tener una gran influencia el movimiento circulatorio del líquido exterior. Este efecto se nota perfectamente; se observa en las fotografías que de esta zona se han presentado anteriormente la existencia de dos partes completamente diferentes en el chorro, la más baja en que se encuentra sin deformar, que demuestra que no actúan sobre él fuerzas normales, por no estar sometido a circulación el líquido exterior por su proximidad a la placa. La parte superior del chorro se encuentra muy deformada, por encontrarse bajo el efecto de la circulación exterior.

Al aumentar la velocidad la influencia de la circulación llegará más cerca de la placa con la que la parte uniforme del chorro se reducirá cada vez más, así como la longitud del mismo.

Hemos querido estudiar las fluctuaciones, para una misma velocidad, de la longitud del chorro, para lo que hemos hecho diez fotografías de cada experiencia con una placa A de 0,052 en el sistema benceno-agua y con otra A de 0,030 en el agua benceno.

Se ha determinado la desviación del valor medio y los resultados son los que indican a continuación:

TABLA XIX

Placa A-0,052		Sistema: Benceno-agua			Carretes 1A-1,5
Carretes	Fotografías	Velocidad cm/s	Desviación	Long. media del chorro mm	
1A1	28 a 38	43,20	2,45	14,99	
1A2	1 a 9	51,81	1,08	26,91	
»	10 a 18	59,72	2,42	31,88	
»	19 a 27	66,34	3,30	37,09	
»	28 a 38	81,20	3,63	72,07	
1A3	1 a 9	86,03	3,95	61,42	
»	10 a 18	101,02	5,97	59,84	
»	19 a 27	115,35	5,96	54,07	
»	28 a 36	128,50	4,60	53,09	
1A4	1 a 9	139,99	3,76	44,21	
»	10 a 18	156,15	3,54	35,03	
»	19 a 27	169,18	3,01	31,46	
»	28 a 36	181,24	3,28	26,76	

TABLA XX

Placa A-0,03		Sistema: Agua-benceno			Carretes 15A-1,6
Carretes	Fotografías	Velocidad cm/s	Desviación	Long. media del chorro mm	
15A2	19 a 27	50,80	0,67	10,78	
15A2	10 a 18	59,99	1,16	12,14	
15A4	1 a 9	71,82	0,58	13,84	
15A2	1 a 9	73,68	0,83	15,45	
15A1	28 a 36	78,33	3,91	18,64	
»	19 a 26	91,68	4,48	36,21	
»	2 a 9	102,03	2,33	36,58	
»	10 a 18	113,69	2,46	35,58	
15A4	10 a 18	122,81	6,47	48,16	
»	19 a 27	146,28	4,49	47,40	
»	28 a 36	144,69	5,84	44,77	
15A5	1 a 9	159,16	2,70	39,61	
»	10 a 18	169,32	1,72	38,90	
»	19 a 27	176,06	2,75	37,00	
»	28 a 36	190,38	4,72	32,42	
15A6	1 a 9	191,29	3,80	31,93	
»	10 a 18	201,98	4,92	30,74	
»	19 a 27	210,53	3,49	38,18	

Hemos representado estos datos en los gráficos 18 y 19 expresando la desviación en función de la velocidad. Se han marcado en dichos gráficos los puntos correspondientes a la velocidad crítica superior y a la velocidad correspondiente a la superficie de interfase máxima que corresponde al tamaño de gota mínimo. Se deduce que la desviación mínima coincide con esta última velocidad y después aumenta rápidamente hasta alcanzar un máximo para la crítica superior, quizá debido a que en este punto se superponen los dos mecanismos de ruptura del chorro. Pasado este punto, difieren ambas placas, en el sistema benceno-agua la desviación disminuye continuamente, mientras que en el agua-benceno, también lo hace pero de una forma más irregular.

### **6) Formación y tamaño de las gotas al romperse el chorro**

Al estudiar el tamaño de las gotas que se forman al pasar benceno a través de agua o viceversa, hemos de considerar tres zonas diferentes a las que corresponde un mecanismo de formación de las gotas completamente distinto.

La primera zona está constituida por las gotas formadas cuando aún no se ha formado chorro.

La segunda comprende desde la aparición del chorro hasta la velocidad crítica superior, y

La tercera la correspondiente a velocidades superiores a la crítica superior.

#### *Gotas formadas antes de la aparición del chorro*

Presentamos, adjunto, dos cuadros, uno para cada uno de los sistemas estudiados en donde se indica el diámetro medio de las gotas formadas, y las velocidades a través del orificio de la placa.

TABLA XXI

Sistema: Agua - Benceno

Placa	Fotografía	D. orificio cm.	D. cuello cm.	Vel. orificio cm/s	D. gota cm
A	17A1-(9-10)	0,02	0,046	39,7	0,306
A	14A1-(5-6-7)	0,03	0,080	55,3	0,425
A	» (8-9-10)	»	0,075	64,2	0,377
A	» (11-12-13)	»	0,064	68,0	0,275
C	12C1-(8-9)	0,03	0,067	37,0	0,339
C	» (10-11)	»	0,066	40,2	0,244
A	15A3-(19 a 27)	0,03	0,047	56,36	0,288
A	» (10 a 18)	»	0,049	60,71	0,227
A	» (1 a 9)	»	0,044	62,78	0,176
A	16A4-(25 a 30)	0,03	0,051	57,01	0,268
A	» (31 a 36)	»	0,047	62,53	0,201
A	» (1 a 9)	»	0,048	64,8	0,175
A	12A1-(8-9)	0,05	0,125	41,75	0,256
B	11B1-(12-13)	0,05	0,067	36,9	0,260
B	» (14-15)	»	0,070	33,7	0,234
B	» (16-17)	»	0,067	37,2	0,221
C	11C1-(28-29)	0,05	0,062	34,4	0,213
A	13A4-(28 a 36)	0,05	0,066	42,4	0,224
A	» (19 a 27)	»	0,058	44,05	0,217
A	11A4-(28 a 32)	0,05	0,061	31,60	0,275

TABLA XXII

Sistema: benceno-agua

Placa	Fotografía	D. orificio cm	D. cuello cm	Vel. orificio cm/s	D. gota cm
A	8A1-(19)	0,012	0,087	73,2	0,333
A	» (16)	»	0,052	100,5	0,312
A	7A5-(31-32)	0,03	»	»	0,194
A	7A5-(30)	»	»	»	0,154
C	2C1-(11-12)	0,03	0,066	39,0	0,246
C	» (13-14)	»	0,061	39,6	0,178
A	4A1-(13 a 23)	0,032	0,062	41,8	0,166
A	4A1-(24-23)	»	0,062	51,0	0,157
A	3A1-(21-30)	0,05	0,104	31,8	0,262
A	» (31 a 34)	»	0,085	38,9	0,163
C	1C1-(12)	0,05	0,061	29,7	0,291
C	» (13)	»	0,061	35,2	0,228
A	1A1-(10 a 18)	0,052	0,056	38,7	0,190
A	1A5-(10 a 18)	»	»	40,6	0,180
A	» (19-27)	»	»	45,3	0,174

Como norma general vemos que en todos los casos estudiados al aumentar la velocidad disminuye el diámetro de las gotas.

Esto parece natural si consideramos que en el momento de separarse la gota deberá haber equilibrio entre el empuje estático (debido a la diferencia de densidades de los líquidos), las fuerzas debidas a la tensión interfacial y a la energía cinética correspondiente a la velocidad; el aumento de la primera y tercera tenderán a disminuir el diámetro de las gotas, mientras que el de la segunda lo aumentará. En los sistemas estudiados la diferencia de densidades permanece constante, y si suponemos que la tensión interfacial se mantiene constante (cosa que será cierta si no se modifica por la adsorción de impurezas), quedando como variables el diámetro del cuello al formarse la gota, sobre el que actuará la tensión interfacial, y la fuerza debida a la energía cinética; en una misma placa la única variable deberá ser la última.

Teniendo en cuenta ésto la representación del diámetro de las gotas en función de la velocidad, en coordenadas logarítmicas, deberían dar la misma pendiente, cosa que no se ha cumplido.

Dos son las causas que pueden existir que den motivo de error.

La primera, que la fase dispersa absorba impurezas que modifiquen la tensión interfacial, y

La segunda, que por la forma de las placas es muy difícil poder determinar la superficie de la misma que moja dicha fase dispersa, debiendo tener gran influencia sobre el tamaño de la gota la superficie mojada.

Mediante un balance de energía, aplicando el teorema de BERNOULLI, se intentó hallar una fórmula que nos diera el tamaño de las gotas, no habiendo conseguido los resultados que se esperaban; quizá debido a las causas que se indican más arriba.

Lo que no hay duda, porque se ha confirmado en todas las experiencias, es que el aumento de velocidad lleva consigo una disminución en el tamaño de las gotas que se forman.

Para darnos cuenta del proceso de formación de una gota hemos tomado nueve fotografías en diversas fases de su desarrollo, y las hemos dibujado haciendo la correspondiente rectificación de escalas. También hemos dibujado la gota que se encuentra inmediata a la que se está formando (figura 27).

Estas fotografías son las 10 al 18 del carrito 1A5 y sus características son:

Orificio de la placa . . . . .	-	0,052 cm.
Velocidad en el orificio . . . . .	-	40,59 cm/s.

En la fotografía 1, se acaba de separar una gota, y pegada a la placa ha quedado un residuo, que tiene un volumen que relacionado con el de la gota desprendida es:

$$\frac{0,331275}{3,48927} = 0,0949$$

y la placa queda mojada en un diámetro de 0,076 cm. En las fotografías 2 y sucesivas, se observa como la gota va creciendo, siendo digno de notar:

1.º Que la gota que se está formando tiene una forma apuntada, debido a la presión que ejerce el fluido interior a causa de su energía cinética. Para su comparación hemos dibujado, también, el perfil teórico de una gota, cuando se han eliminado los efectos de esta energía (tomado de WEISBERGER, *Physical Méthode of Organic Chemistry*», tomo I, páginas 165-6) en donde se puede ver su forma redondeada.

2.º Que la gota ya formada va variando en su forma desde muy alargada, en el momento de su desprendimiento, a casi esférica posteriormente, y

3.º Que la parte de placa mojada por la fase dispersa, va disminuyendo a medida que aumenta el tamaño de la gota, lo cual tiene que ser debido a la fuerza ascensional que aumenta con el volumen de las gotas.

Durante el trabajo experimental se pudo observar que las placas que resultaron muy mojadas por la fase dispersa daban lugar, a pequeñas velocidades, a gotas muy grandes, mientras a mayores velocidades se conseguía la formación de chorro normal.

Para profundizar en este estudio sería conveniente utilizar boquillas cuya zona mojada fuese constante y nos permitiera poder fijar esta variable (en un próximo trabajo así lo haremos).

Por ver si llegábamos a resultados prácticos hemos intentado utilizar el análisis dimensional.

Las variables a considerar son:

Diámetro de la gota a determinar . . . . .	D
Diámetro del cuello . . . . .	d
Diferencia de presiones . . . . .	$\Delta p$
Tensión interfacial . . . . .	$\sigma$
Diferencia de densidades de las dos fases . . . . .	$\Delta \rho$
Velocidad del fluido . . . . .	u

El resultado a que se llega es:

$$\frac{D}{d} = K \left( \frac{\Delta p \cdot d}{\sigma} \right)^m \left( u \sqrt{\frac{d \Delta \rho}{\sigma}} \right)^n$$

Al representar  $\frac{D}{d}$  en función de  $\frac{\Delta p d}{\sigma}$  y de  $u \sqrt{\frac{d \Delta \rho}{\sigma}}$  en coordenadas logarítmicas, no se han conseguido resultados satisfactorios.

Como comprobación de lo que decimos anteriormente acompañamos cuatro fotografías, sacadas cada una de un grupo de nueve hechas en las mismas condiciones. En la correspondiente al grupo 28-36, no se pone la velocidad porque el manómetro se encontraba en las condiciones mínimas y la presión fluctuaba (figura 28).

En estas fotografías se aprecia perfectamente como al aumentar la velocidad disminuye el tamaño de la gota. Al mismo tiempo el aumento de velocidad da lugar a una diversidad de tamaños, las variaciones máximas del mismo, en estas experiencias fueron:

15A3 - 19 a 27	De 0,280 cm. a 0,305 cm.
15A3 - 10 a 18	De 0,200 cm. a 0,258 cm.
15A3 - 1 a 9	De 0,078 cm. a 0,202 cm.

Otro detalle observable es que al aumentar la velocidad aumenta la forma apuntada de la gota en formación.

#### *Gotas formadas cuando ya existe el chorro.*

El mecanismo de ruptura del chorro, como hemos visto, depende de la velocidad de la fase dispersa. A pequeñas velocidades predominará el correspondiente al equilibrio entre las fuerzas cinéticas, de tensión interfacial, y empuje estático; a velocidades medias será más importante el derivado de la onda de perturbación en el orificio; y por último a mayores velocidades se impondrá el que resulta de los efectos de fricción. Como es natural, no existen unas velocidades que separen totalmente estos mecanismos, sino que se solapan contribuyendo dos de ellos en la formación de gotas; esto motiva que en estas zonas, el tamaño de las gotas sea muy variable; solamente cuando el chorro se rompe debido a una sola causa y en condiciones que ésta no sea perturbada, se podrá conseguir uniformidad en el tamaño de las gotas que se obtengan. Este es el caso de la formación de gotas antes de formarse el chorro, y sobre todo si la energía cinética se hace despreciable, el tamaño de gota es constante. También se obtiene un tamaño muy uniforme para la velocidad a que corresponde la superficie de interfase máxima, en la que el único mecanismo de ruptura es el correspondiente a la onda de perturbación, sin que intervenga, apreciablemente, ningún otro.

A velocidades por encima de la crítica superior las gotas formadas,

debido a las fuerzas de fricción tienen una gran dispersión en tamaño, a causa de que las variables que intervienen en este mecanismo, circulación del fluido exterior, no pueden controlarse.

### *Variación del tamaño de las gotas con la velocidad en el chorro*

Hemos representado el diámetro de las gotas en función de la velocidad en el chorro, en todas las curvas se pueden observar tres partes, que comprenden las zonas de que ya hemos hablado (gráficos 20 a 36).

- 1.º Formación de gotas antes de la aparición del chorro.
- 2.º Zona que abarca hasta la velocidad crítica superior.
- 3.º Velocidades por encima de la crítica superior.

En la primera zona- el diámetro disminuye muy rápidamente, y depende mucho de si la fase dispersa moja más o menos la placa; en todas las curvas el funcionamiento es uniforme.

En la 2.ª zona, es decir, desde el comienzo del chorro hasta la velocidad crítica superior, el diámetro comienza por descender en longitud, pasa por un mínimo muy agudo, que da lugar a un punto de retroceso, y vuelve a aumentar.

Este mínimo fué hallado por KEITH y HIXSON (18) y posteriormente CHRISTIANSEN y HIXSON (8) dieron una explicación del porqué de este mínimo, que daba lugar a la superficie de interfase máxima. Se produce a diferentes velocidades y con relación de velocidad, a velocidad crítica superior, también variable.

A continuación damos los resultados que se han obtenido en las experiencias.

TABLA XXIII

Sistema: Benceno-agua

Carretes	Velocidad crítica superior cm/s	Velocidad diámetro mínimo cm/s	Relación de velocidades	Clase de placa
3A-1-6	76	52	0,684	A-0,05
4A-1-8	121	61	0,498	A-0,032
8A-1-2		48		A-0,012
1B-1-2	89	53	0,483	B-0,05
2B-1-2	84	42	0,500	B-0,03
3B-1-4	86	36	0,407	B-0,02
1C-1-2	85	60	0,705	C-0,05
2C-1-2	113	28	0,248	C-0,03

## TABLA XXIV

Sistema: Agua-benceno

Carretes	Velocidad crítica superior cm/s	Velocidad diámetro mínimo cm/s	Relación de velocidades	Clase de placa
13A-1-4	99	64	0,646	A-0,05
12A-1-2	64	38	0,561	A-0,05
16A-1-4	130	82	0,631	A-0,03
14A-1-2	153	83	0,536	A-0,03
11B-1-2	110	60	0,545	B-0,05
12B-1-2	155	83	0,535	B-0,03
11C-1-2	109	52	0,477	C-0,05

Como puede observarse la placa que se utilice tiene una marcada influencia sobre los resultados, ya que utilizando placas diferentes pero con el mismo diámetro de orificio, se obtienen valores distintos tanto para la velocidad de superficie máxima, como para la relación entre velocidades; carretes 13A1-4 y 12A1-2 y con placas A-0,05. En los carretes 16A1-4 y 14A1-2, con placas A-0,03, aunque la velocidad correspondiente a la superficie máxima coincide, no así la relación de velocidades.

El punto de diámetro mínimo coincide con el de máxima uniformidad; es curioso ver las fotografías tomadas en estos puntos mínimos y compararlas con otras tomadas a una velocidad menor o mayor que aquella. Fotografías 4A3-6 (figura 22), velocidad 60,54 cm/s y las 4A2-34, velocidad; 57,50 cm/s; y 4A3-15 (ambas en figura 23), velocidad: 66,50 cm/s; todas del sistema benceno-agua y con placa A-0,03 cm. Presentamos las fotografías 16A3-1, velocidad en el chorro, 82,04 cm/s en el punto del diámetro mínimo; la 16A3-10, velocidad 68,74 cm; y la 16A2-28 velocidad: 94,51 cm/s (figura 29).

A simple vista se puede ver que las fotografías tomadas en los puntos de diámetro mínimo, además de tener las gotas más pequeñas, son de una uniformidad casi completa, mientras que en las otras, se observan junto con las gotas pequeñas otras mayores, que dan lugar a un mayor diámetro medio.

Para poder determinar ésto de una manera más exacta, procedimos a hacer un estudio estadístico, para lo cual obtuvimos nueve fotografías por experiencia al objeto de obtener el suficiente número de gotas que nos permitieran dibujar los correspondientes histogramas.

### 7) Histogramas correspondientes al tamaño de las gotas

Los histogramas pueden, también, referirse a tres zonas, la primera es aquella en que aún no se ha formado el chorro en que se nota una serie de crestas y valles sin que tengan relación alguna entre sí.

Para las velocidades próximas a las que produce el área máxima interfacial, los histogramas indican un máximo muy marcado, sin que haya más que una cresta, resultando una curva característica, y dando lugar a una desviación típica mínima como corresponde a la máxima uniformidad en el tamaño de las gotas.

Para el sistema benceno - agua, con la placa A,0,32 mm, en las fotografías 4A3-1 al 9, las gotas de un mismo tamaño llegaron a ser el 69 % y para el sistema inverso con placa A-0,03, en la 16A3 1 al 9, el 44 %.

Esta uniformidad indica precisamente, que, en esta zona, la ruptura del chorro es debida a una causa determinada que se repite de una forma periódica; que ha de ser originada por la onda producida en el orificio

CHRISTIANSEN y HIXSON, en su trabajo experimental, encontraron que la relación de velocidad a celeridad de onda era 2,32.

La celeridad de onda tiene como valor:

$$c = q/k$$

$q$  está dado por la ecuación [6] de la parte correspondiente a la longitud del chorro

$$q = 0,3435 \sqrt{\frac{8 \sigma}{\rho d^3}}$$

y el de  $k$  por la fórmula [5] de la misma parte

$$K \frac{d}{2} = 0,696$$

$$k = \frac{1,392}{d}$$

resultando para el sistema benceno - agua

$$c = \frac{4,40}{\sqrt{d}}$$

y para el agua - benceno

$$c = \frac{4,13}{\sqrt{d}}$$

Los valores encontrados para las experiencias que nos han dado las condiciones óptimas son:

*Sistema: benceno - agua*

Carrete	Fotografías	Velocidad	Celeridad	Relación	D d	Placa
3A3	2 al 10	52,48	17,87	2,97	2,29	A-0,05
4A3	1 al 9	60,54	22,92	2,64	2,61	A-0,032

*Sistema: agua - benceno*

13A3	19 al 27	64,38	17,15	3,75	2,05	A-0,05
16A3	1 al 9	82,04	21,51	3,81	2,05	A-0,03

Se observa que en el sistema benceno-agua, ambas relaciones son muy altas; mientras que en el de agua - benceno, la relación entre velocidad y celeridad es aún mayor, casi el doble de la teórica, y que la que existe entre los diámetros es muy levemente superior a la teórica, pudiendo achacarse esta diferencia a dificultades de medida.

De las observaciones tomadas con las placas A-0,032 en el sistema benceno - agua, carretes 4A1-8, y con la A-0,03 en el de agua - benceno, carretes 16A1-4, se deduce que en el punto de superficie de interfase máxima, la desviación típica sufre un descenso muy grande, y que basta una pequeña variación en la velocidad para que la desviación típica aumente considerablemente, y que, en la misma medida, disminuya la uniformidad.

Para la placa A-0,032 del sistema benceno - agua, tenemos:

Carrete	Fotografía	Vel.chorro cm/s	Desviación	Diámetro medio mm
4A2	31 al 35	57,55	0,229	1,25
4A3	2 al 10	60,55	0,0435	0,966
4A3	11 al 20	66,62	0,1405	1,13

y para la A-0,03 del sistema agua - benceno:

16A3	10 al 18	68,74	0,126	0,93
16A3	1 al 9	82,04	0,063	0,76
16A2	18 al 26	111,81	0,143	1,00

En los carretes 4A1-8, donde se tomaron las experiencias más próximas, se observa muy bien que para una pequeña variación de velocidad,

la disminución de la desviación es muy grande. Por otro lado la diferencia de velocidades entre las experiencias 4A2-31 a 35 y 4A3-11 a 20 es de 9,07 cm/s, y el punto de diámetro mínimo se encuentra en este intervalo; se ve, pues, la necesidad de tomar muchas experiencias en esta zona para poder determinar, con precisión, el punto óptimo.

Para las placas A-0,05, en ambos sistemas, en que no se ha encontrado este punto óptimo, tan marcado, debe haber sido a causa, de que el número de experiencias realizadas ha sido más escasa que en las anteriores, y dicho punto se encuentra entre dos experiencias.

Acompañamos los histogramas representativos del punto óptimo para los sistemas y placas indicadas (gráficas 37 y 40).

Adjuntamos varios histogramas de cada una de las zonas características para las placas y sistemas utilizados (gráficos 37 a 40).

Se puede observar, como norma general, que antes de formarse el chorro el histograma, aunque se manifieste un tamaño predominante, es bastante irregular.

Cuando ya se ha formado el chorro se va regularizando el histograma, algunas veces aparecen dos crestas con reacción 1 : 2 en volumen.

En el punto de superficie de interfase máxima, ya hemos dicho que existe una gran uniformidad de tamaño de gota, por lo que en el histograma aparece una cresta muy marcada y la desviación típica se hace mínima.

Entre el punto óptimo y la velocidad crítica superior, la diversidad de tamaño se acentúa, y aumenta la desviación típica. En general se observa la presencia de dos crestas, que determinan gotas más abundantes que tienen un volumen doble unos de otros.

Si se cumpliera fielmente la teoría de LORD RAYLEIGH, cada gota formada debería tener el diámetro que correspondiera a una longitud de chorro igual a una longitud de onda, o al doble. El hecho que aparezcan gotas de muchos tamaños y que sus volúmenes no están en relación de números enteros, indica un proceso más complicado; quizá ocurra que el movimiento ondulatorio sea el compuesto entre el producido por la perturbación en el orificio, el que se origina al desprenderse las gotas, y las reflexiones a que dan lugar en los extremos del chorro, por esto la amplitud que de lugar a la ruptura variará de emplazamiento y las gotas que se formen tendrán diámetros diferentes. Solamente en condiciones especiales se obtendrá una gran uniformidad, es el caso del punto óptimo. Cuando se está próximo a la velocidad crítica influirán también las fuerzas de rozamiento.

En el histograma correspondiente a la velocidad crítica superior, se

hace mayor aún la dispersión de tamaños y pasada esta velocidad aumenta mucho la desviación típica, se observan varias crestas sin relación entre sus volúmenes y la forma de los histogramas es muy irregular. Se exceptúa los de la placa A-0,032 del sistema benceno - agua en los que aparecen dos crestas muy determinadas con relación de volúmenes, 1 : 2.

## VII

## COALESCENCIA DE LAS GOTAS

Durante el trabajo experimental, se pudo observar que en el sistema benceno-agua se producía coalescencia cuando las gotas se juntaban; mientras que en el sistema inverso agua-benceno no se apreciaba este fenómeno. Por otro lado, en las fotografías tomadas también se nota un aumento de tamaño al alejarse del orificio, en el primer sistema, y es constante en el inverso. Para poder comprobarlo dividimos las fotografías en varias zonas y determinamos los diámetros medios de las gotas en cada una de ellas. Esto lo hicimos con las correspondientes a las placas A-0,05, 0,03 y 0,012 del sistema benceno-agua y para las A-0,05 y 0,03 del agua-benceno. Adjuntamos una fotografía de cada placa (figuras 30 y 31).

Los resultados, para las fotografías que se adjuntan son:

Sistema: Benceno - agua

Diámetro de gota

Placa	Fotografía	1.ª Sección	2.ª Sección	3.ª Sección	4.ª Sección	5.ª Sección
A-0,05	2A1-11	1,44	1,53	1,64	1,68	
A-0,03	6A1-15	1,15	1,36	1,56	2,08	
A-0,012	8A1-5	0,71	0,75	0,82	0,82	1,04

Sistema: agua-benceno

A-0,05	12A1-20	1,28	1,29		
A-0,03	14A2-5	0,96	0,95	0,88	

Vemos que para el sistema benceno - agua, se produce una coalescencia entre las gotas, que ocasionará un aumento de tamaño en éstas, y, al mismo tiempo, se introduce una variable más en el proceso, que habrá que tenerla en cuenta al tratar de considerar el tamaño de las gotas, que regula la superficie de interfase.

En el sistema inverso no se nota esta coalescencia, pues aunque el diámetro medio de las gotas varía de unas zonas a otras, lo hace sin dirección determinada.

El hecho de esta diferencia de comportamiento de ambos sistemas parece un poco raro, porque lo natural es que la coalescencia esté regida por la tensión interfacial, y ésta es la misma en ambos sistemas. Quizá la explicación sea, que el benceno disuelve ciertas impurezas que modifiquen dicha tensión interfacial, aumentándola y facilitando la coalescencia.

Acompañamos, en la figura 32, la fotografía 5 del carrete 8A1, que nos ha parecido muy apropiada para poder seguir, sobre ella, la forma como se va produciendo la coalescencia.

Inmediatamente encima del chorro se observa que las gotas se pueden considerar del mismo tamaño, su diámetro, una vez hechas las correcciones convenientes, es 0,64 mm; después viene una zona donde el volumen de las gotas es variable, junto a algunas del tamaño de las anteriores existen otras con diámetro medio de 0,82 mm.; en las zonas 3.<sup>a</sup> y 4.<sup>a</sup>, las más interesantes de la fotografía, las gotas tienen un volumen bastante uniforme, el diámetro medio es en ambas zonas, 0,82 mm. En la parte baja de la zona 3.<sup>a</sup> se ven dos gotas, las 21 y 22, que se encuentran completamente separadas; más arriba, las 27 y 28 están más juntas; las 33 y 34 ya están pegadas, y las 37 y 38 parece como si tuvieran una parte común; por encima de éstas las gotas ya son mayores, también con tamaño uniforme, su diámetro medio es 1,04 mm., la distancia entre ellas es prácticamente constante.

Los volúmenes correspondientes a los tres tipos de gotas son:

Las de 0,64 mm. de diámetro . . . . .	0,137288 mm <sup>3</sup>
» » 0,82 » » » . . . . .	0,288695 »
» » 1,04 » » » . . . . .	0,588977 »

Como puede verse, los volúmenes se encuentran en la relación 1 : 2 : : 4, indicando que las gotas de 0,82 mm. de diámetro se han formado de la coalescencia de dos de 0,64 y las de 1,04 mm., a su vez, de la de dos de 0,82.

## VIII

## RELACION DE LA SUPERFICIE DE LAS GOTAS CON LA LATERAL DEL CHORRO DE QUE PROCEDEN

Al determinar la relación entre el diámetro de las gotas y el del chorro de que proceden, hemos encontrado que oscila en 1,89 y 4,72. Incluso considerando el caso de que no se produjera ninguna coalescencia y de que se separara cada vez una fracción del chorro correspondiente a una longitud de onda, esta relación sería de 1,89.

Para que la superficie de una gota que se desprende de un chorro sea igual a la lateral de la fracción del mismo de que se forma, es necesario que la relación de diámetro sea la siguiente:

Igualdad de volúmenes:

$$\frac{\pi d^2}{4} l = \frac{D^3 \pi}{6}$$

En donde:

d: diámetro del chorro.

l: longitud del chorro necesaria para formar una gota.

D: diámetro de la gota formada.

Igualdad de superficies

$$\pi d l = \pi D^2$$

Dividiendo la 1.ª por la 2.ª

$$\frac{d}{4} = \frac{D}{6}$$

o sea

$$D/d = 1,5$$

Cuando esta relación es mayor de 1,5 la superficie lateral del chorro es superior a la que tienen las gotas.

Dicha relación es la mínima para que la energía superficial del chorro pueda suplir la de las gotas. Para que se formen las gotas, lógicamente deberá ser  $D/d > 1,5$  dado que el sistema más estable será el de energía mínima.

Como hemos visto, la relación entre los diámetros oscila entre 1,89 y 4,72, muchos mayores, sobre todo este último, de 1,5.

Por esto y teniendo en cuenta la gran importancia que tienen en la transferencia de materia el área de la superficie a través de la cual se realiza, parece interesante estudiar la extracción a través de una columna de pisos en la que la distancia entre placas fuera la precisa para que los chorros no se llegaran a romper.

Además la velocidad del fluido dentro del chorro es muy superior a la de circulación en el interior de la gota y posiblemente el coeficiente de transferencia será mayor para aquel.

## CONCLUSIONES

1.º Para el paso de un fluido a través de un orificio, en una placa, descargando en otro fluido, inmiscible con el primero, es necesaria una diferencia de presiones mínima, a ambos lados de la placa, por debajo de la cual, no se produce flujo.

2.º En el caso de caudal mínimo, a través del orificio, la diferencia de presiones, a ambos lados de la placa, fluctúa entre dos límites extremos. La diferencia entre estos límites es función del diámetro del orificio, y aún mejor del diámetro de la zona de placa mojada por la fase dispersa. La causa de esta fluctuación, así como la de la diferencia mínima de presiones para el establecimiento del flujo es la tensión interfacial entre ambos fluidos.

3.º Se ha determinado, para todas las placas estudiadas y para los sistemas benceno-agua y agua-benceno, la presión mínima necesaria para el paso de fluido a través del orificio de la placa y se ha comparado con la calculada considerando, como caso límite, que la fase dispersa no moja a la placa.

4.º Hemos dibujado las gráficas que representan, la diferencia de presiones, en ambas cámaras del aparato, en función de la velocidad del fluido a través del orificio de la placa. Esta determinación es necesaria para el cálculo de una columna de extracción líquido-líquido, que funcione pasando una gota o chorro de un líquido a través de otro inmiscible con él.

5.º Antes de formarse chorro continuo, el tamaño de las gotas disminuye al aumentar la velocidad de paso por el orificio. Las variables que influyen sobre este tamaño, deben ser, de fuerza ascensional, la energía cinética y la tensión interfacial.

6.º El comienzo del chorro se produce al equilibrarse las variables

antes mencionadas, tomando como superficie correspondiente al chorro, la del cilindro cuya directriz es el perímetro de la superficie mojada en la placa.

7.º Una vez formado el chorro y para velocidades pequeñas, la ruptura del mismo se produce, principalmente, al perder energía cinética por el efecto de la formación de nuevas superficies.

8.º Para velocidades intermedias la ruptura del chorro es debido a una onda originada durante el fenómeno.

9.º Pasada la velocidad crítica superior, las fuerzas de fricción dan lugar a un movimiento de circulación en el fluido exterior, el que, a su vez, ocasiona la ruptura del chorro.

10.º Se ha comprobado el movimiento del fluido exterior determinando la velocidad de las gotas y comparándola con la final que tendrían si funcionasen como esferas rígidas. La diferencia entre ambas velocidades nos dará la circulación de la fase continua.

11. El tamaño de las gotas que se forman, al romperse el chorro, disminuye, en un principio, al aumentar la velocidad; pasa por un mínimo muy agudo, que se encuentra en la zona donde la ruptura es ocasionada por una onda originada durante el proceso; después, al aumentar la velocidad también aumenta el tamaño de las gotas.

12. Para todas las placas que se indican en el texto, se han hecho fotografías del chorro y de las gotas que se forman cuando se rompe, variando la diferencia de presiones entre ambas cámaras del aparato. Se presentan las correspondientes a una placa de cada sistema, para seguir las variaciones, tanto del chorro como de las gotas, al hacerlo la velocidad de la fase dispersa.

13. Acompañamos fotografías que indican que, en la zona de la velocidad crítica superior, es posible la ruptura del chorro en forma tal que queden aislados grandes trozos de él, que luego se subdividen en gotas.

14. Se ha comprobado, utilizando el método estadístico, que, en el punto de tamaño de gota mínima, la desviación típica correspondiente a este tamaño es, también, mínima, lo que indica la máxima uniformidad, y que el mecanismo que origina la ruptura es debido a una sola causa.

15. Se ha determinado la desviación típica de la longitud del chorro, para diferentes velocidades, hallándose que la mínima corresponde al punto de superficie interfacial máxima. La desviación típica máxima coincide con la velocidad crítica superior.

16. Se adjuntan fotografías que revelan que, en el sistema benceno-agua, se produce una coalescencia de las gotas, que no se observa, con la

misma intensidad, en el inverso. Se comprueba este hecho mediante el cálculo de tamaños de las gotas a varias alturas.

17. Se ha determinado que la relación entre el diámetro de las gotas y el del chorro de que proceden para que las superficies de ambos sean iguales, tiene que ser 1,5. Para mayores valores de la relación, la de aquellas es inferior a la de éste; como teóricamente la relación mínima de diámetros es 1,89 (en todos los casos es mayor), siempre la superficie lateral del chorro será superior a la de las gotas en que se divide.

## BIBLIOGRAFIA

- (1) BOND, *Phil. Mag. S. 7*, 4, 889 (1927).
- (2) BOND y NEWTON, *Phil. Mag. S 7*, 5, 794 (1928).
- (3) BRINKWORTH, *Proc. Roy. Soc. XLIV*, pl. 2 (marzo, 1932).
- (4) COULSON y RICHARDSON, *Chemical Engineering*. Vol. 2, pág. 146.
- (5) COULSON y SKINNER, *Chem. Eng. Sci.*, 1, 5 (1952).
- (6) CREMER, *Chemical Engineering Practice*. Vol. 3, págs. 168-9.
- (7) CHRISTIANSEN (R. M. Doctoral disertation Univ. Pennsylvania, 1955).
- (8) CHRISTIANSEN y HIXSON, *Ind. Eng. Chem.*, 49, 1017 (1957).
- (9) GARNER, *Nature*, 175, 603 (2 abril 1955).
- (10) GARNER y GRAFTON, *Proc. Roy. Soc. A.*, 224, 64 (1954).
- (11) GARNER y HAMMERTON, *Chem. Eng. Sci.*, 3, 1 (1954).
- (12) GARNER y SKELLAND, *Ind. Eng. Chem.*, 46, 1255 (1954).
- (13) GARNER y SKELLAND, *Chem. Eng. Sci.*, 4, 149 (1955).
- (14) GARNER y SKELLAND, *Ind. Eng. Chem.*, 48, 51 (1956).
- (15) GEDDES, *Trans. Am. Inst. Chem. Engrs.*, 42, 79 (1946).
- (16) HAYWORTH y TRYBAL, *Ind. Eng. Chem.*, 42, 1174 (1950).
- (17) HIGBIE, *Trans. Am. Inst. Chem. Engrs.*, 31, 365 (1935).
- (18) KEITH y HIXSON, *Ind. Eng. Chem.*, 47, 258 (1958).
- (19) KRONIG y BRINK, *Appl. Sci. Research*, 42, 1942 (1950).
- (20) LAMB, *Hydrodynamics*. Dover, N. Y. 1945.
- (21) LICHT y CONWAY, *Ind. Eng. Chem.*, 42, 1151 (1950).
- (22) LICHT y PANSING, *Ind. Eng. Chem.*, 45, 1885 (1953).
- (23) MERRINGTON y RICHARDSON, *Proc. Phys. Soc.*, 59, 33 (1947).
- (24) MIESSE, *Ind. Eng. Chem.*, 47, 1690 (1955).
- (25) RAYLEIGH, LORD, *Proc. Lond. Math. Soc.*, 10, 4 (1879).
- (26) SERWOOD, EVANS y LONGCOR, *Trans. Am. Inst. Chem. Engrs.*, 35, 597 (1939).
- (27) SMITH y MOSS, *Proc. Roy. Soc., A* 93, 373 (1917).
- (28) TOMOTIKA, *Proc. Roy. Soc., A* 150, 322 (1935).
- (29) TYLER, *Phil. Mag*, 16, 504 (1933).
- (30) TYLER y RICHARDSON, *Proc. Phys. Soc.*, 37, 297 (1925).
- (31) TYLER y WATKIN, *Phil. Mag.*, S 7, 14, 849 (1932).
- (32) WEBER, *C. z. angew. Math. u. Mech.*, 11, 136 (1931).
- (33) WEISSBERGER, *Physical Method of Organic Chemistry*. Parte 1.<sup>a</sup>, 2.<sup>a</sup> edición, pág. 255.
- (34) Id. id. id. id., pág. 332.
- (35) Id. id. id. id., pág. 371.
- (36) Id. id. id. id., pág. 378.
- (37) WEST, HERRMAN, CHONG y THOMAS, *Ind. Eng. Chem.*, 44, 625 (1952).
- (38) WEST, ROBINSON, MORGENTHAUER, BEEK y Mc. GREGOR, *Ind. Eng. Chem.*, 43 234 (1951).



the user's information needs. The user's information needs are the starting point for the information search process.

The user's information needs are the starting point for the information search process.

The user's information needs are the starting point for the information search process.

The user's information needs are the starting point for the information search process.

The user's information needs are the starting point for the information search process.

The user's information needs are the starting point for the information search process.

The user's information needs are the starting point for the information search process.

The user's information needs are the starting point for the information search process.

The user's information needs are the starting point for the information search process.

The user's information needs are the starting point for the information search process.

The user's information needs are the starting point for the information search process.

The user's information needs are the starting point for the information search process.

The user's information needs are the starting point for the information search process.

The user's information needs are the starting point for the information search process.

The user's information needs are the starting point for the information search process.

The user's information needs are the starting point for the information search process.

The user's information needs are the starting point for the information search process.

The user's information needs are the starting point for the information search process.

The user's information needs are the starting point for the information search process.

The user's information needs are the starting point for the information search process.

The user's information needs are the starting point for the information search process.

The user's information needs are the starting point for the information search process.

The user's information needs are the starting point for the information search process.

The user's information needs are the starting point for the information search process.

The user's information needs are the starting point for the information search process.

The user's information needs are the starting point for the information search process.

The user's information needs are the starting point for the information search process.

The user's information needs are the starting point for the information search process.

# SISTEMA: Benceno-Agua

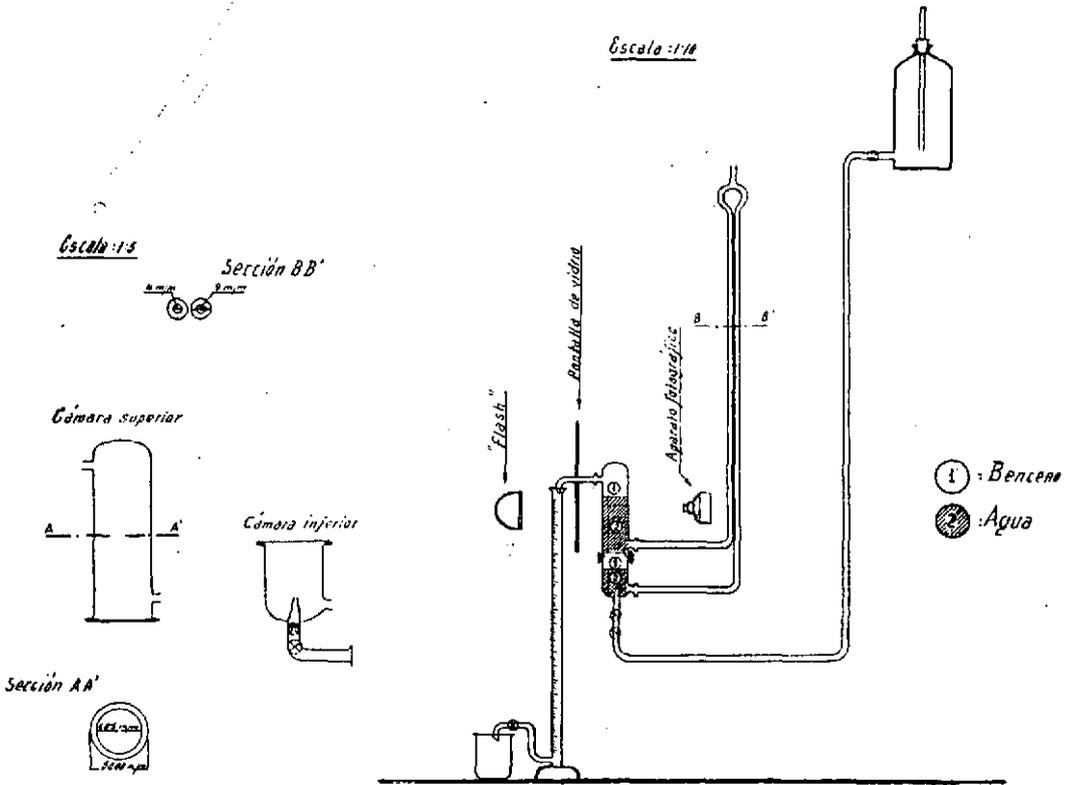
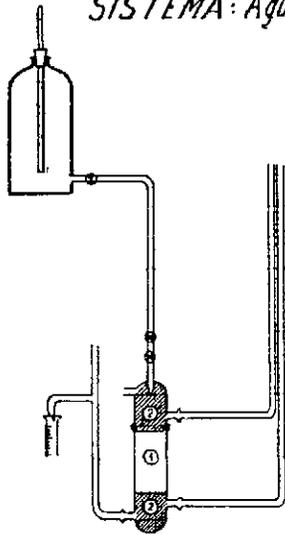


FIGURA 1

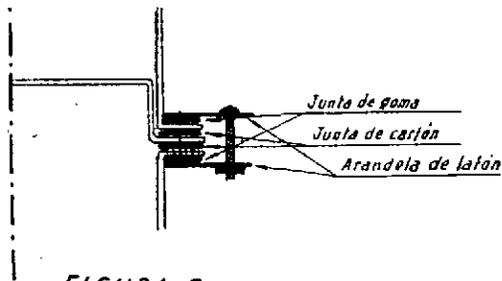


*SISTEMA: Agua-Benceno*



- ① Benceno
- Agua

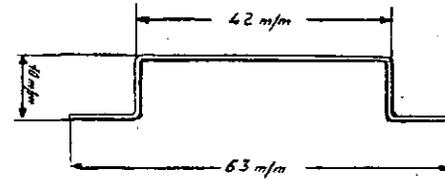
*Sección de la junta*



*FIGURA 2*

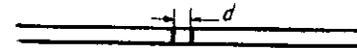
*SECCIÓN DE LA PLACA*

*Escala = 1:1*

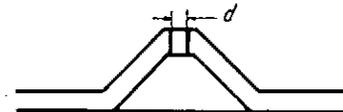


*TIPO DE BOQUILLA*

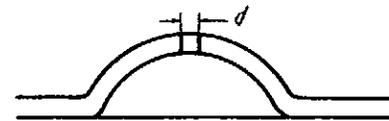
*Placa plana A*



*Placa troncónica B*



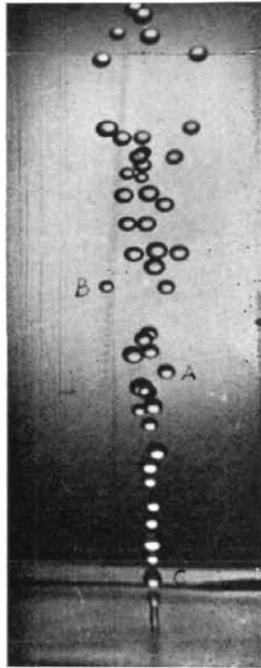
*Placa semiesférica C*



*FIGURA 3*

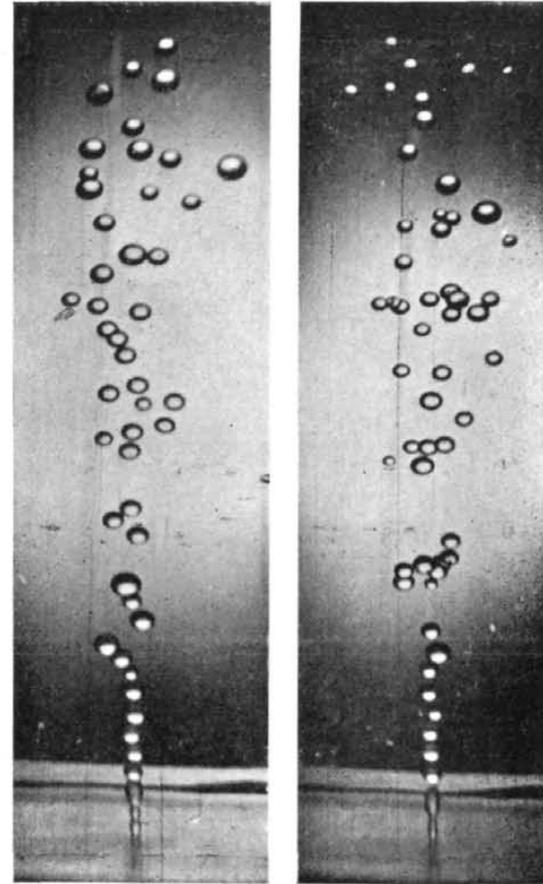


Placa plana (A) de 0,03 cm.  
Velocidad: 33,05 cm/s



Carrete 7 A 2. Fotografía 1  
*Figura 6*

Sistema: BENCENO - AGUA  
Placa plana (A) de 0,03 cm  
Velocidad en el chorro, 33,05 cm/s



7 A 2-6

*Figura 7*

7 A 2-8

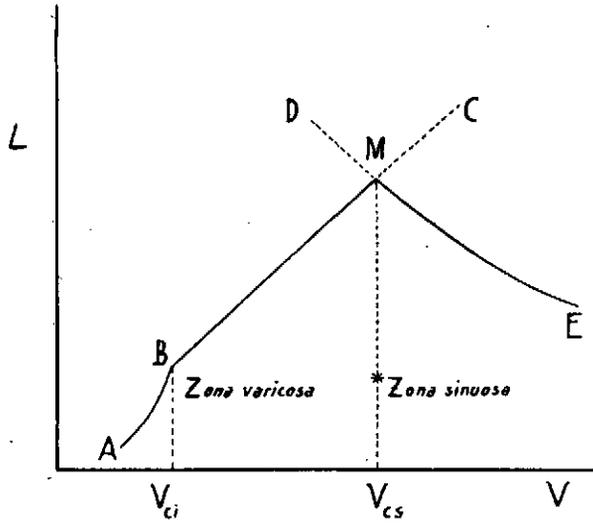


FIGURA 4

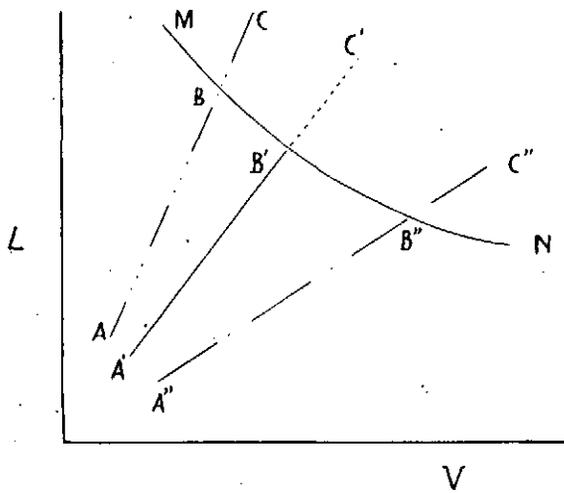
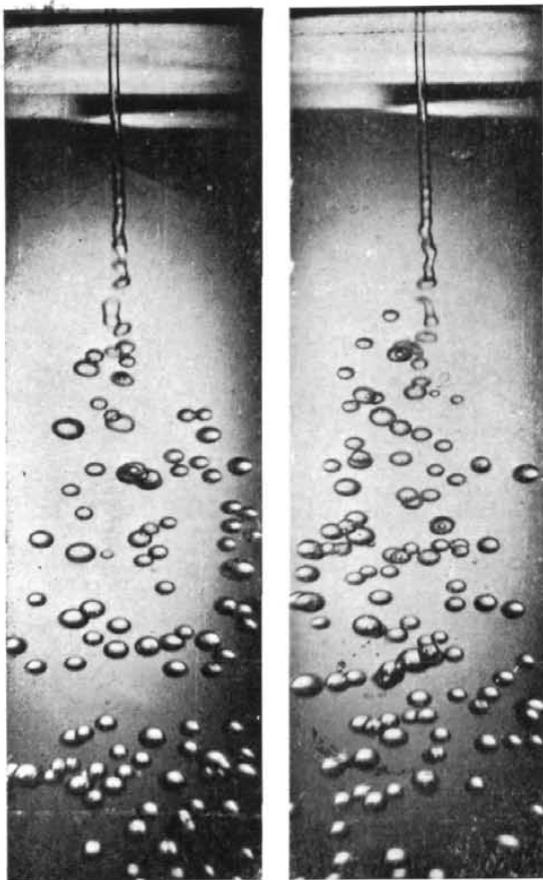


FIGURA 5

Sistema: AGUA - BENCENO  
Placa plana (A) de 0,052 cm  
Velocidad en el chorro, 117,14 cm/s

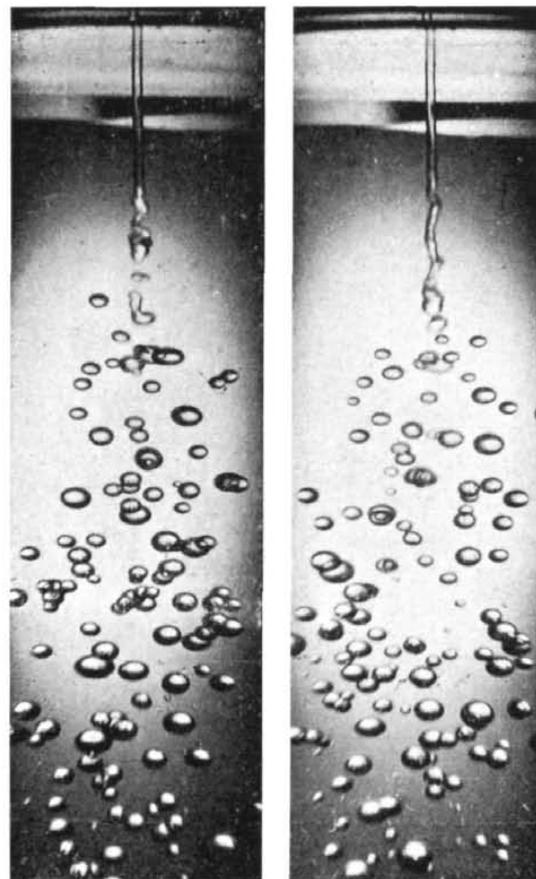


11 A 2-24

Figura 19

11 A 1-25

Sistema: AGUA - BENCENO  
Placa plana (A) de 0,052 cm  
Velocidad en el chorro, 140,98 cm/s



11 A 1-1

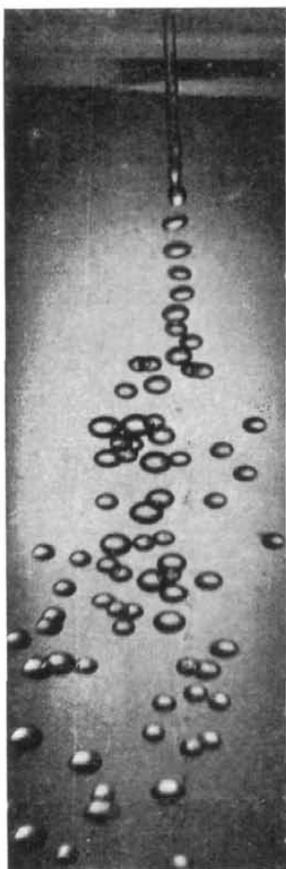
Figura 20

11 A 1-4

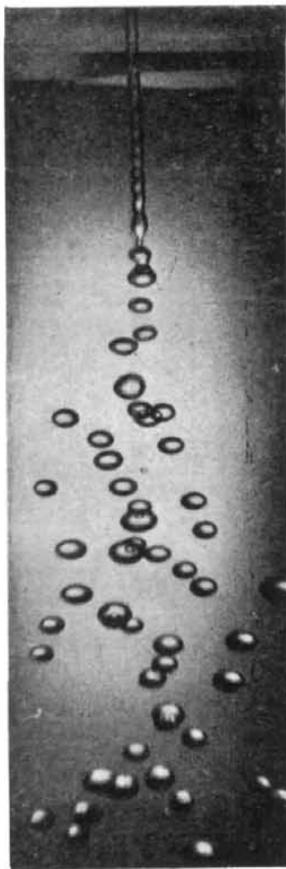
Sistema: AGUA - BENCENO

Placa plana (A) de 0,052 cm

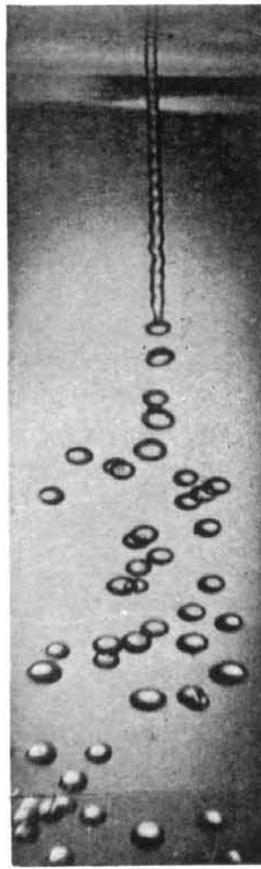
Velocidad en el chorro, 82,90 cm/s



11 A 2 - 10



11 A 2 - 16



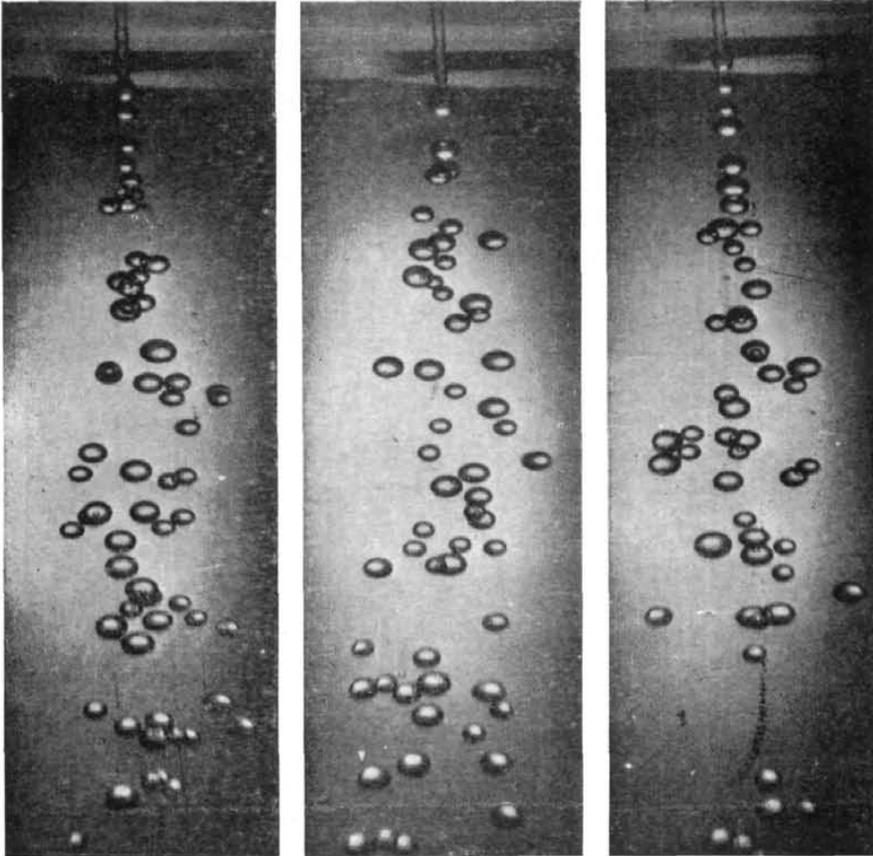
11 A 2 - 17

*Figura 18*

Sistema: AGUA - BENCENO

Placa plana (A) de 0,052 cm

Velocidad en el chorro, 47,28 cm/s



11 A 2 - 19

11 A 2 - 23

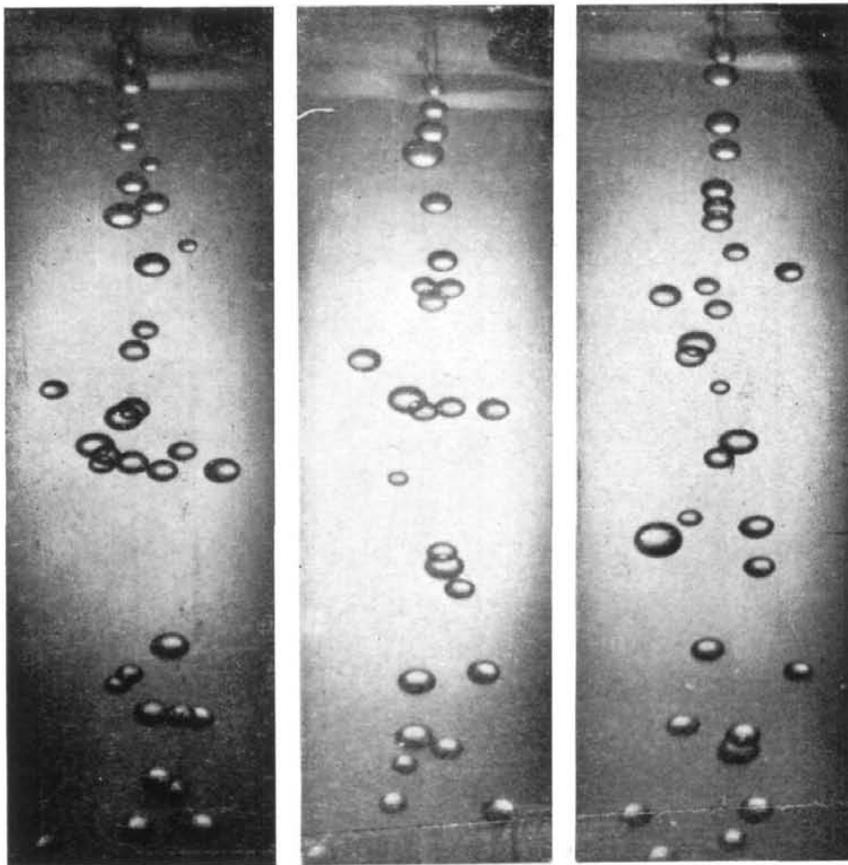
11 A 2 - 25

*Figura 17*

Sistema: AGUA - BENCENO

Placa plana (A) de 0,052 cm

Velocidad en el chorro, 43,44 cm/s



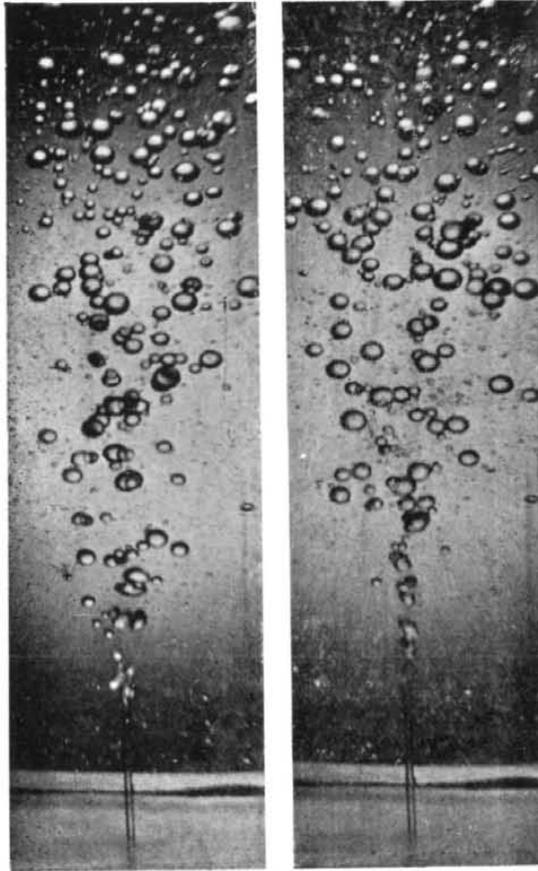
11 A4 - 19

11 A4 - 20

11 A4 - 24

*Figura 16*

Sistema: BENCENO - AGUA  
Placa plana (A) de 0,03 cm  
Velocidad en el chorro, 146,32 cm/s

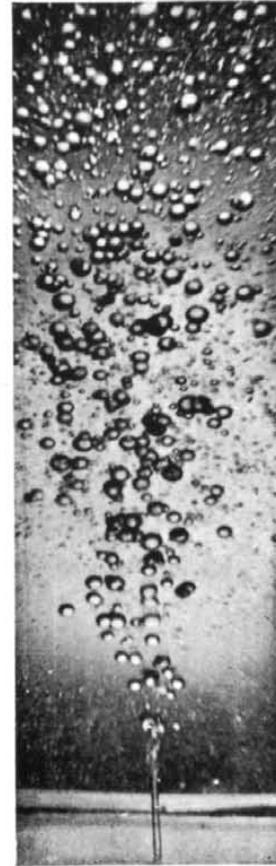


7 A 5-10

*Figura 14*

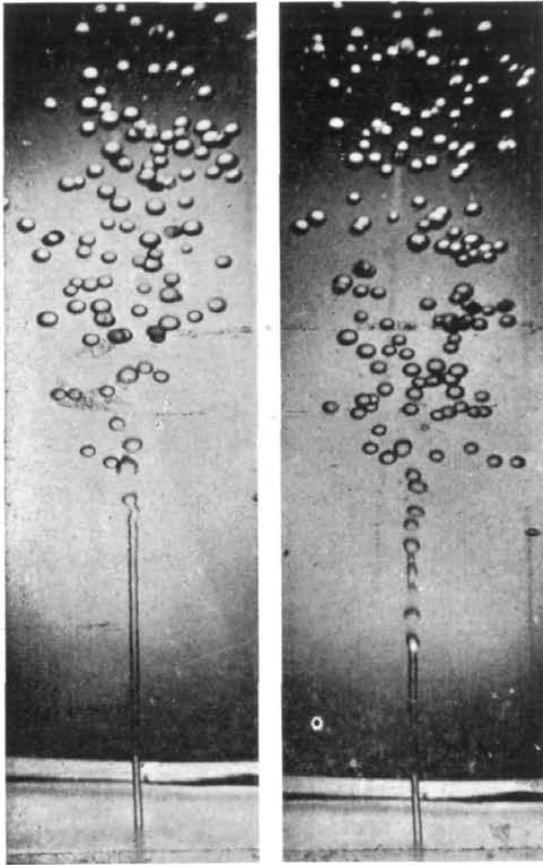
7 A 5-15

Sistema: BENCENO - AGUA  
Placa plana (A) de 0,03 cm  
Velocidad en el chorro, 163,23 cm/s



7 A 5-19  
*Figura 15*

Sistema: BENCENO - AGUA  
Placa plana (A) de 0,03 cm  
Velocidad en el chorro, 91,62 cm/s

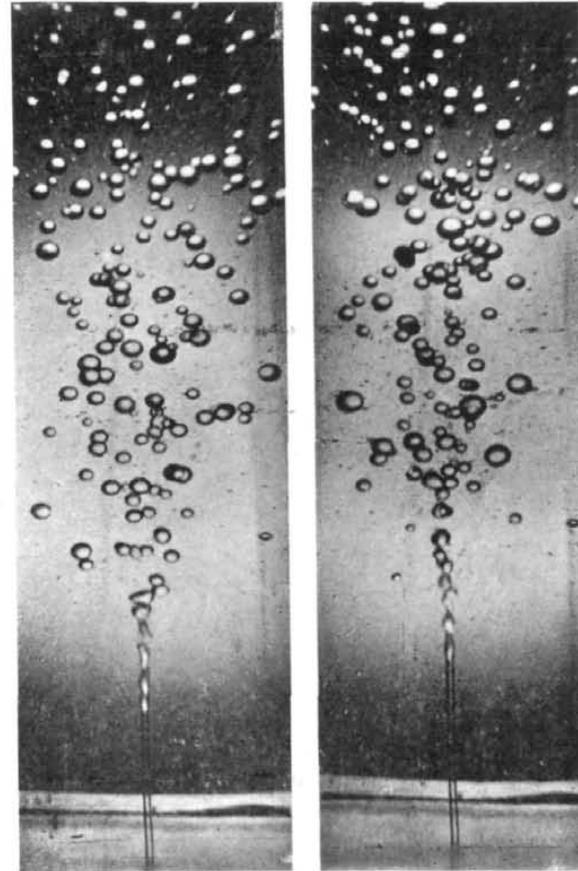


7 A 3 - 21

*Figura 12*

7 A 3 - 23

Sistema: BENCENO - AGUA  
Placa plana (A) de 0,03 cm  
Velocidad en el chorro, 120,70 cm/s

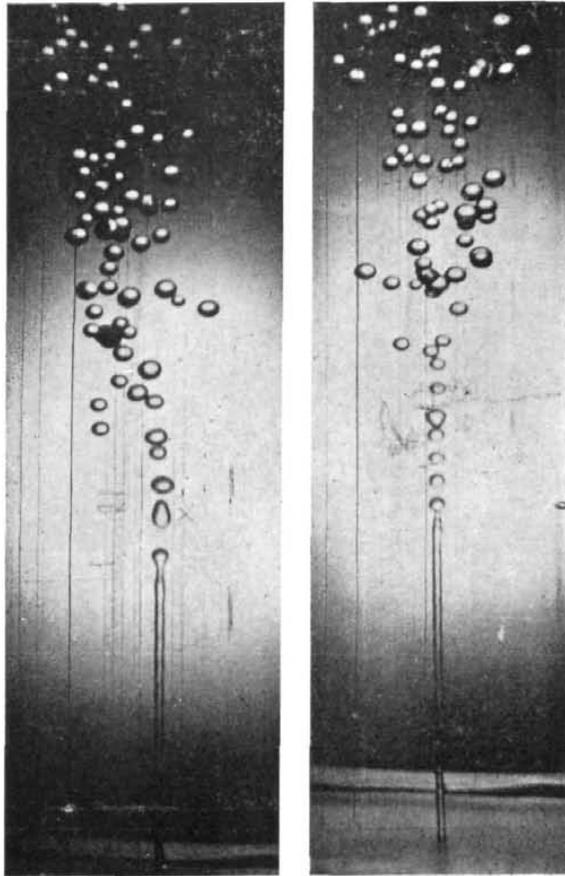


7 A 4 - 24

*Figura 13*

7 A - 4 23

Sistema: BENCENO - AGUA  
Placa plana (A) de 0,03 cm  
Velocidad en el chorro 71,91 cm/s

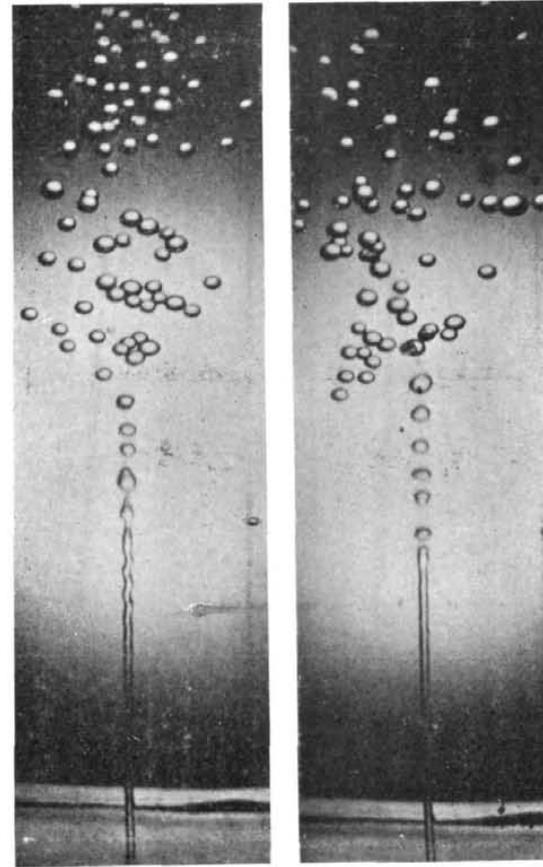


7 A 2-28

7 A 2-29

*Figura 10*

Sistema: BENCENO - AGUA  
Placa plana (A) de 0,05 cm  
Velocidad en el chorro, 81,08 cm/s

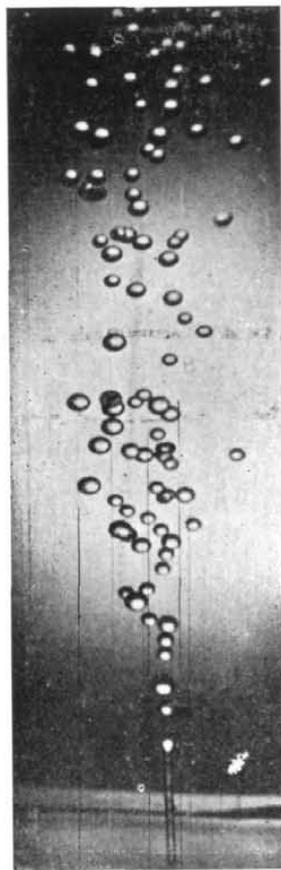


7 A 3-3

7 A 3-7

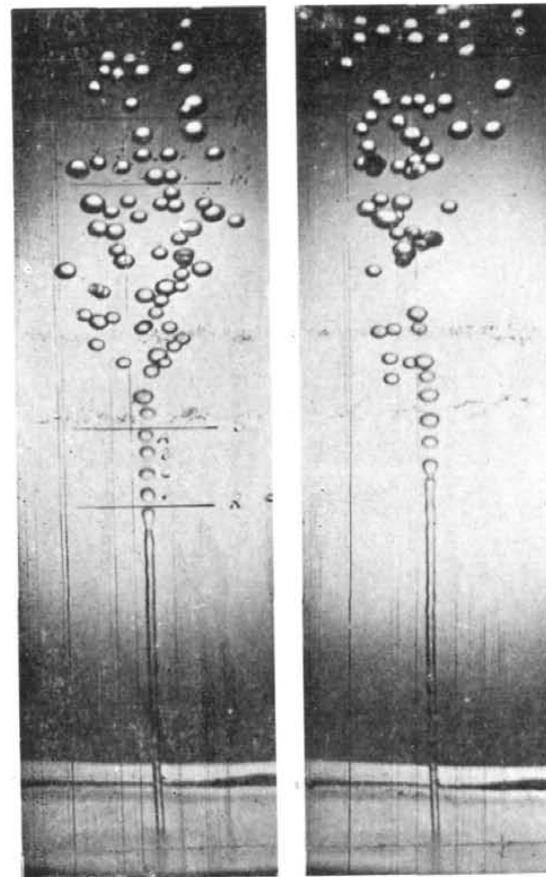
*Figura 11*

Sistema: BENCENO - AGUA  
Placa plana (A) de 0,03 cm  
Velocidad en el chorro, 47,16 cm/s



7 A 2-18  
Figura 8

Sistema: BENCENO - AGUA  
Placa plana (A) de 0,03 cm  
Velocidad en el chorro, 71,97 cm/s

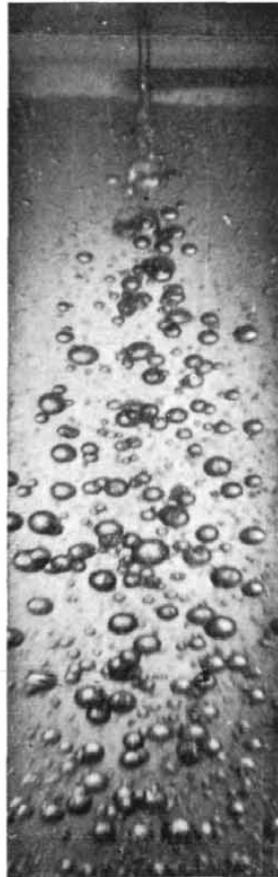


7 A 2-34

7 A 2-35

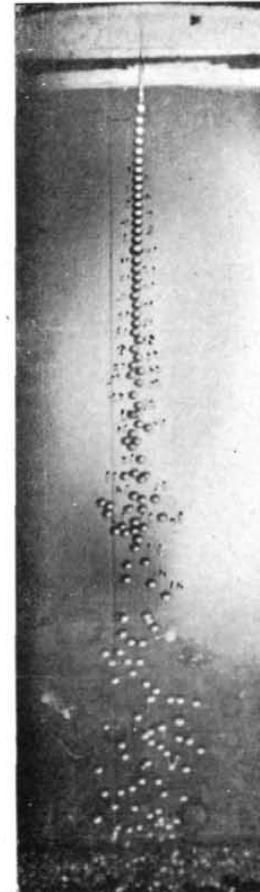
Figura 9

Sistema: AGUA - BENCENO  
Placa plana (A) de 0,052 cm  
Velocidad en el chorro, 192,99 cm/s



11 A3 - 28  
*Figura 21*

Sistema: BENCENO - AGUA  
Placa plana (A) de 0,032 cm  
Velocidad en el chorro 60,54 cm/s

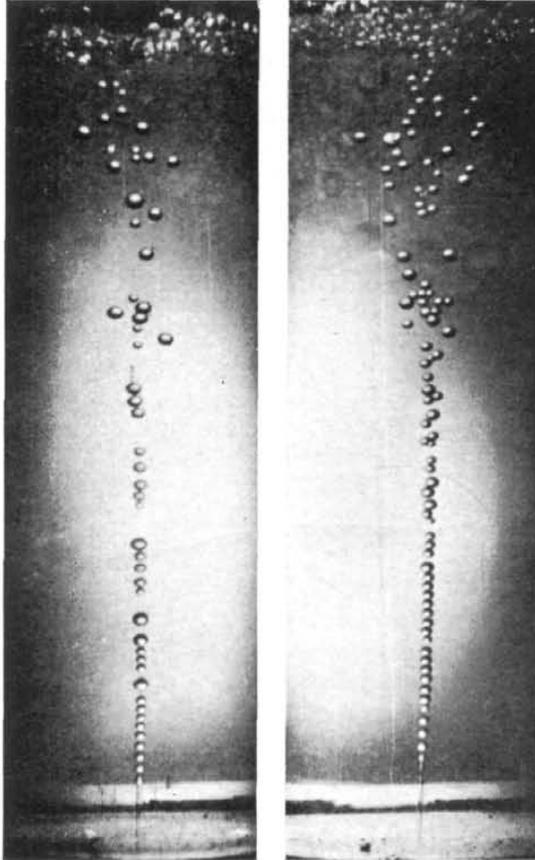


4 A 3 - 6  
*Figura 22*

Sistema: BENCENO - AGUA

Placa plana (A) de 0,032 cm

Velocidad en el chorro, 57,50 cm/s      Velocidad en el chorro, 66,50 cm/s



4 A 2 - 34

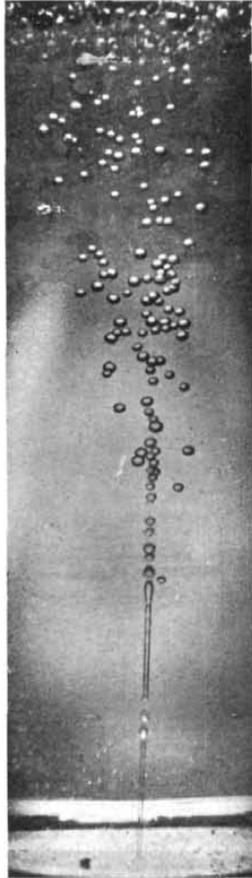
4 A 3 - 15

*Figura 23*

Sistema: BENCENO - AGUA

Placa plana (A) de 0,032 cm

Velocidad en el chorro, 119,85 cm/s      Velocidad en el chorro, 131,35 cm/s



4 A 5 - 11

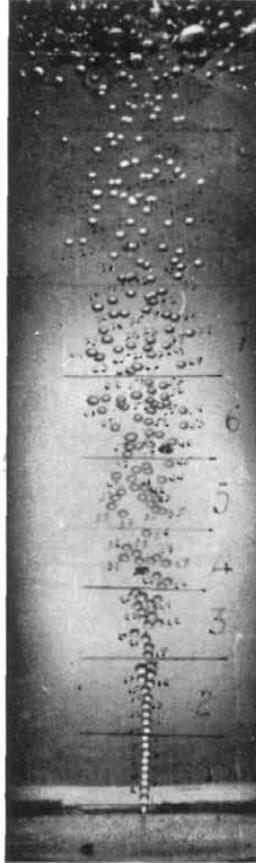


4 A 6 - 9

*Figura 24*

Sistema: BENCENO - AGUA

Placa plana (A) de 0,32 mm  
Caudal:  $55,68 \text{ mm}^3 \cdot 1/c = 0,01796$   
Velocidad orificio: 69,23 cm/s  
Diámetro chorro: 0,40 mm.  
sup. transc. chorro: 0,1257  
Velocidad » 44,30 cm/s



Fotografía 4 A 8 - 26

*Figura 25*

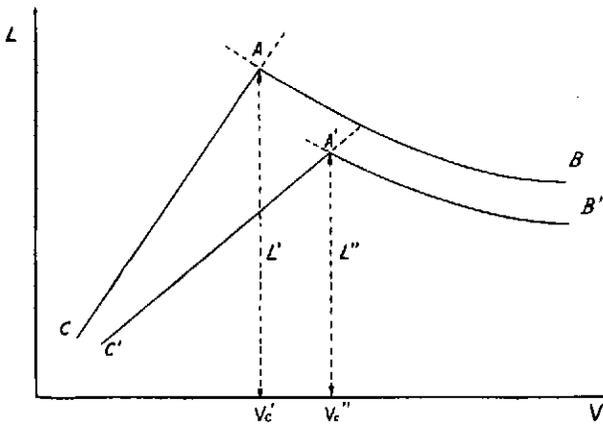
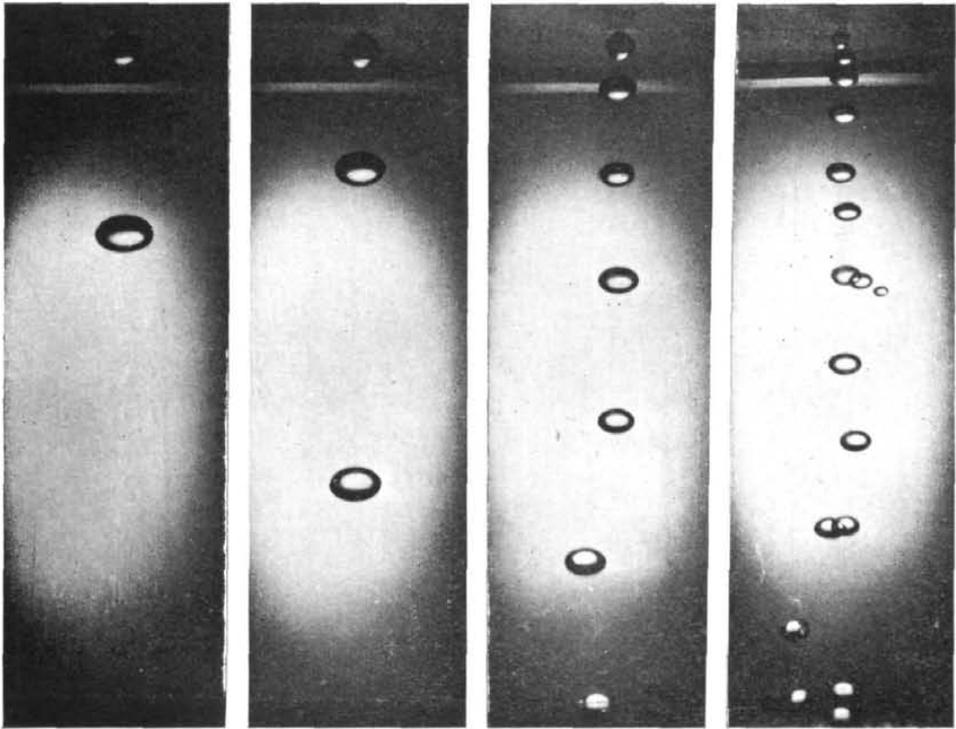


Fig. 26

Sistema: AGUA - BENCENO

Placa plana (A) de 0,03 cm



15 A 3 - 36

15 A 3 - 19

15 A 3 - 10

15 A 3 - 1

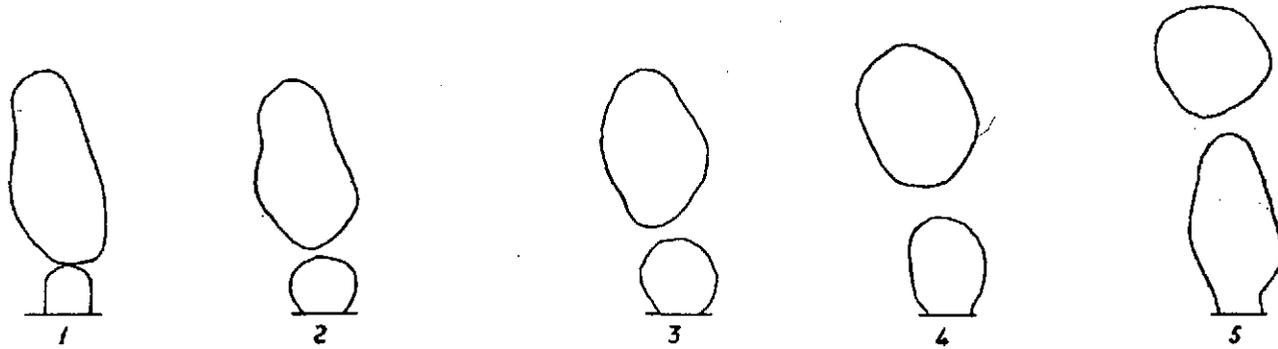
$V_0 = 56,36 \text{ cm/s}$

$V_0 = 60,71 \text{ cm/s}$

$V_0 = 62,78 \text{ cm/s}$

*Figura 28*

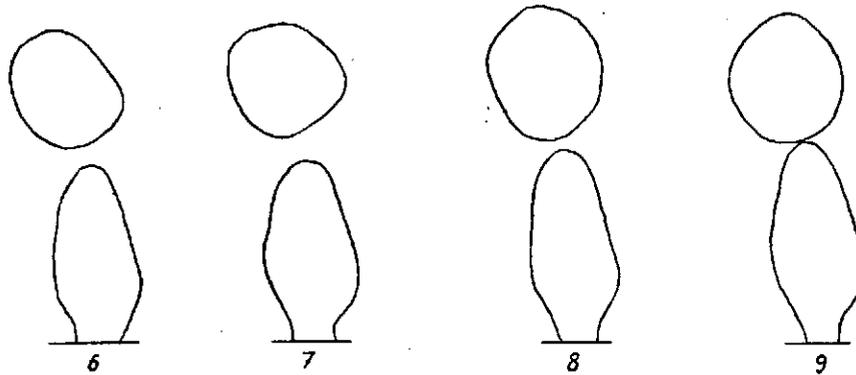
*SISTEMA: Benceno-Agua*



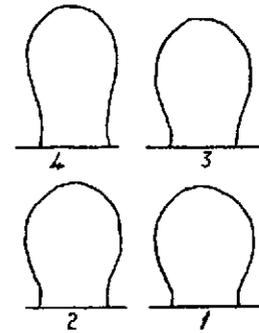
*Placa A-0052*

*Carrete 1A-5*

*Fotografías 10 a 18*



*Gota de comparación*

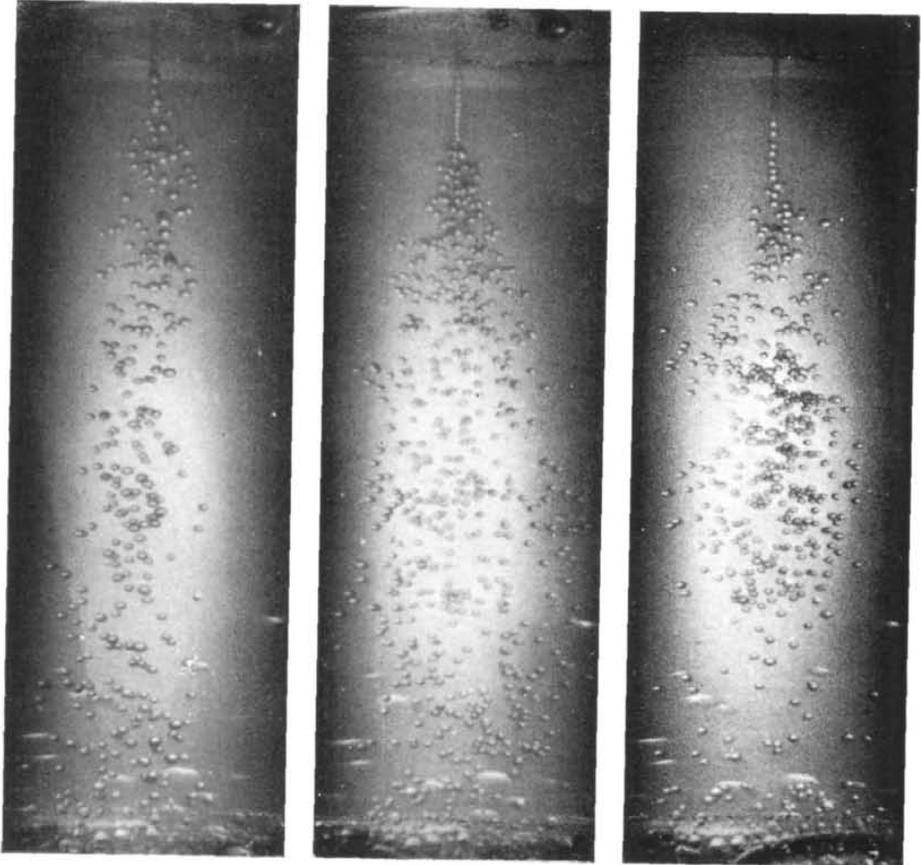


*FIGURA 27*

Sistema: AGUA - BENCENO

Placa Plana (A) de 0,03 cm

Velocidad en el chorro:



68,74 cm/s

82,04 cm/s

94,51 cm/s

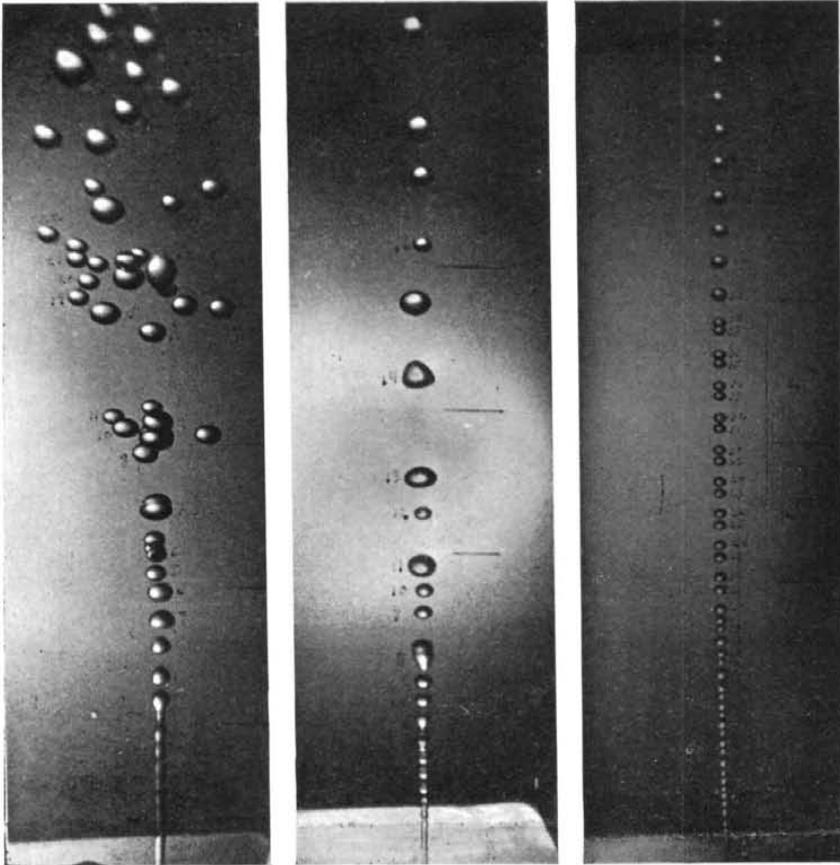
16 A 3 - 10

16 A 3 - 1

16 A 2 - 28

*Figura 29*

Sistema: BENCENO - AGUA



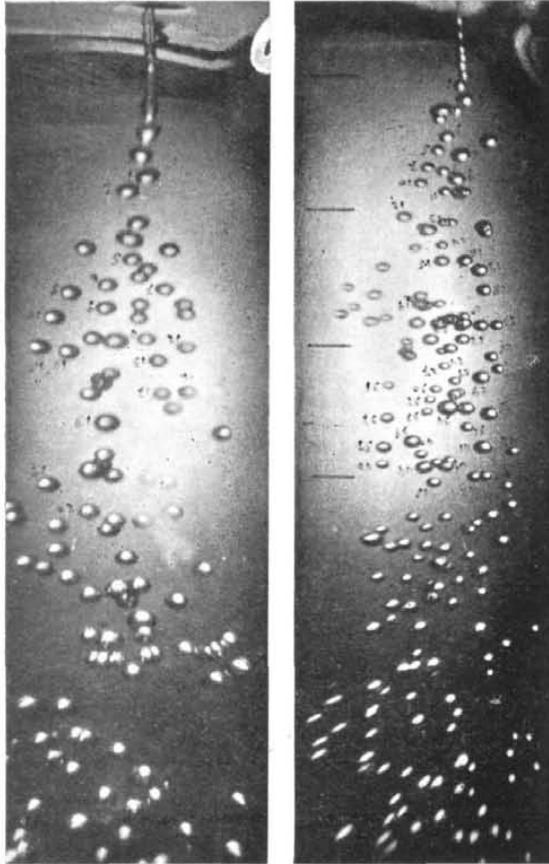
2 A 1 - 11

6 A 1 - 15

8 A 1 - 5

*Figura 30*

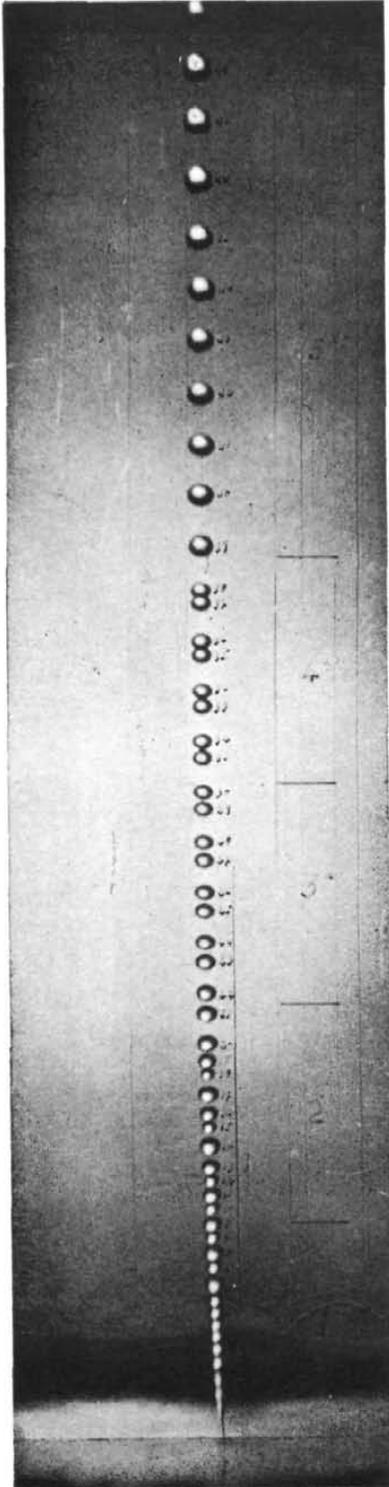
Sistema: AGUA - BENCENO



12 A 1 - 20

12 A 2 - 5

*Figura 31*



Sistema: BENCENO - AGUA

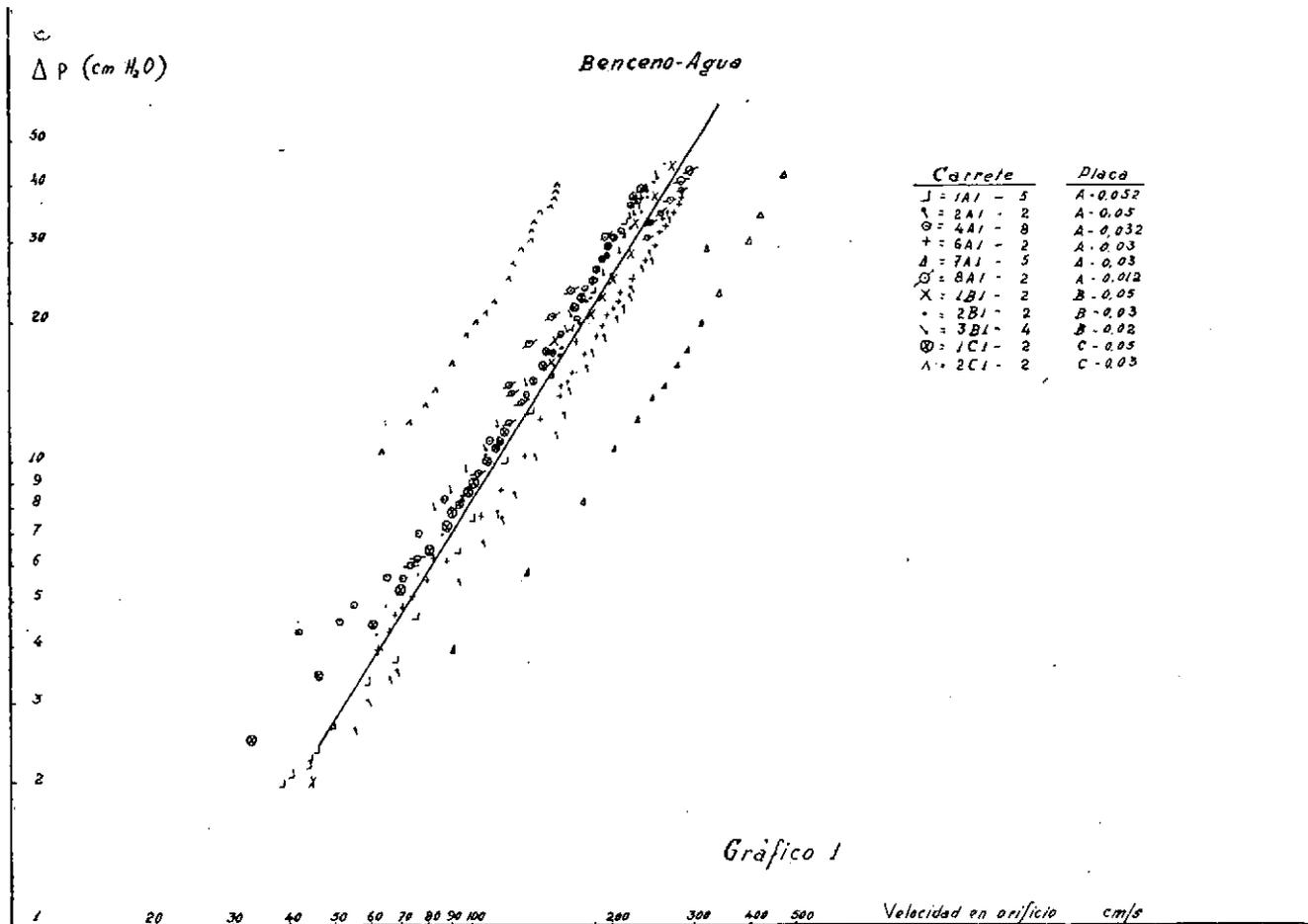
Placa plana (A) de 0,012 cm.

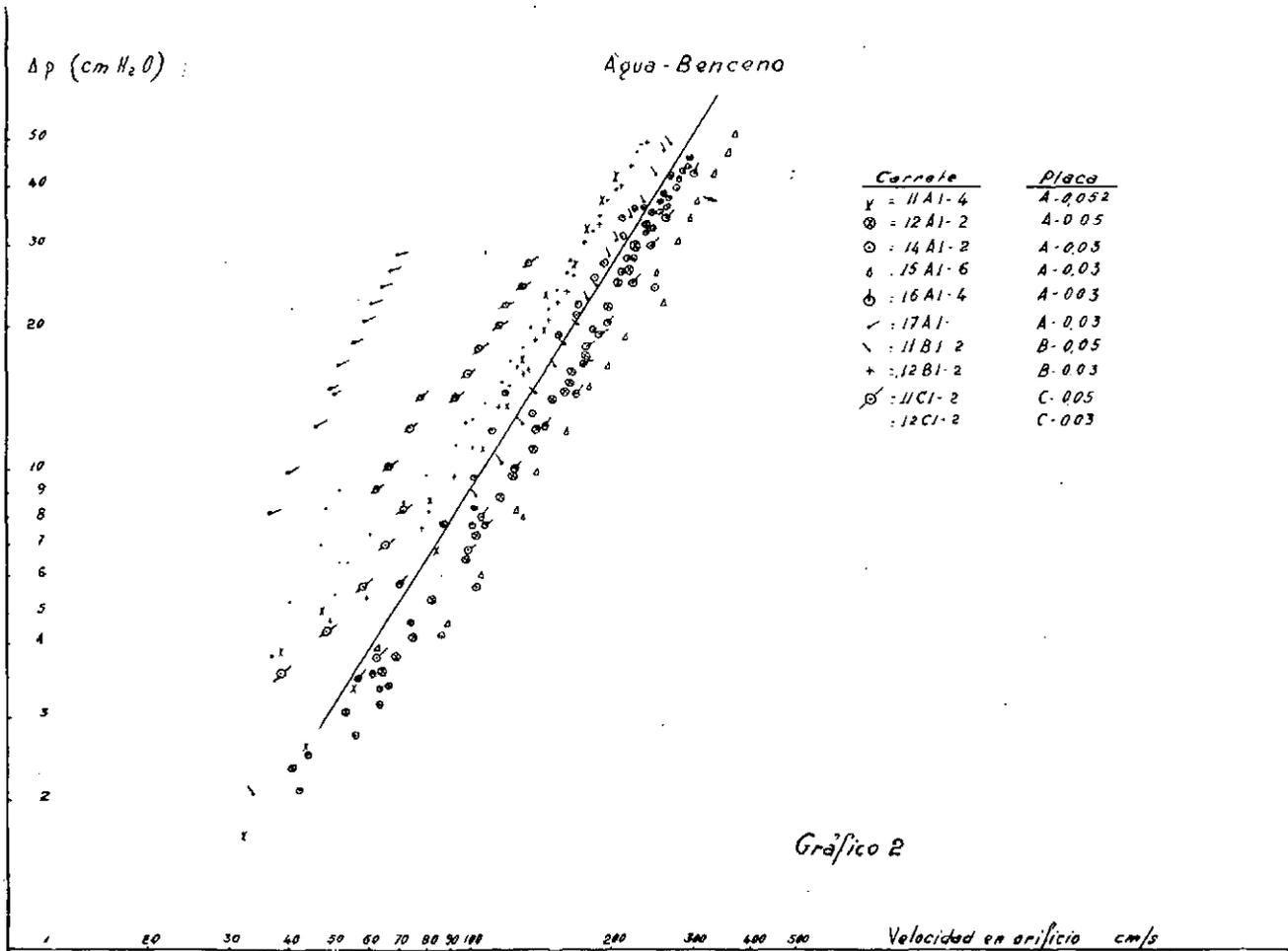
Carrete 8 A 1

Fotografía 5

*Figura 32*

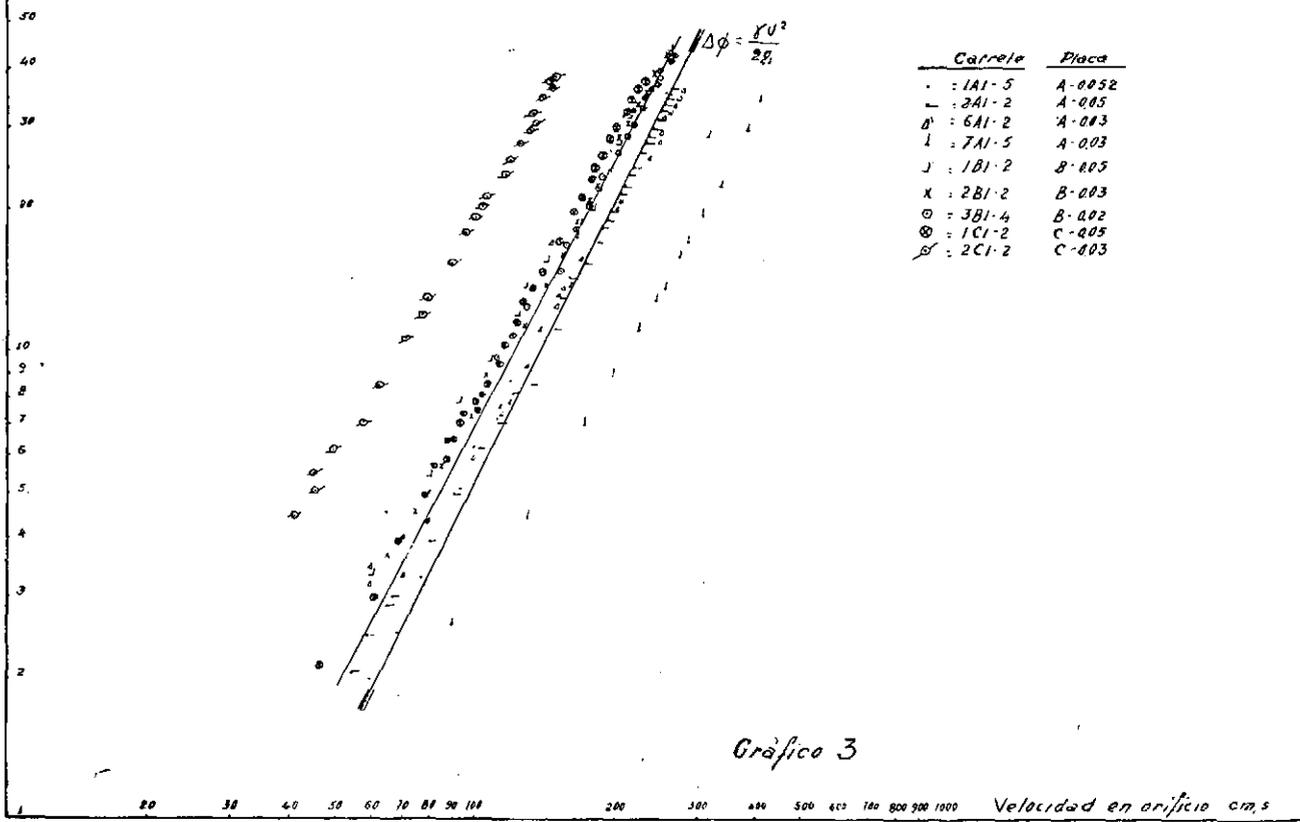






$\Delta p$  (correctada)  
(cm H<sub>2</sub>O)

Agua-Benceno



Carrete	Placa
· : 1A1-5	A-0052
- : 2A1-2	A-005
o : 6A1-2	A-003
l : 7A1-5	A-003
j : 1B1-2	B-005
x : 2B1-2	B-003
⊙ : 3B1-4	B-002
⊗ : 1C1-2	C-005
⊘ : 2C1-2	C-003

Gráfico 3



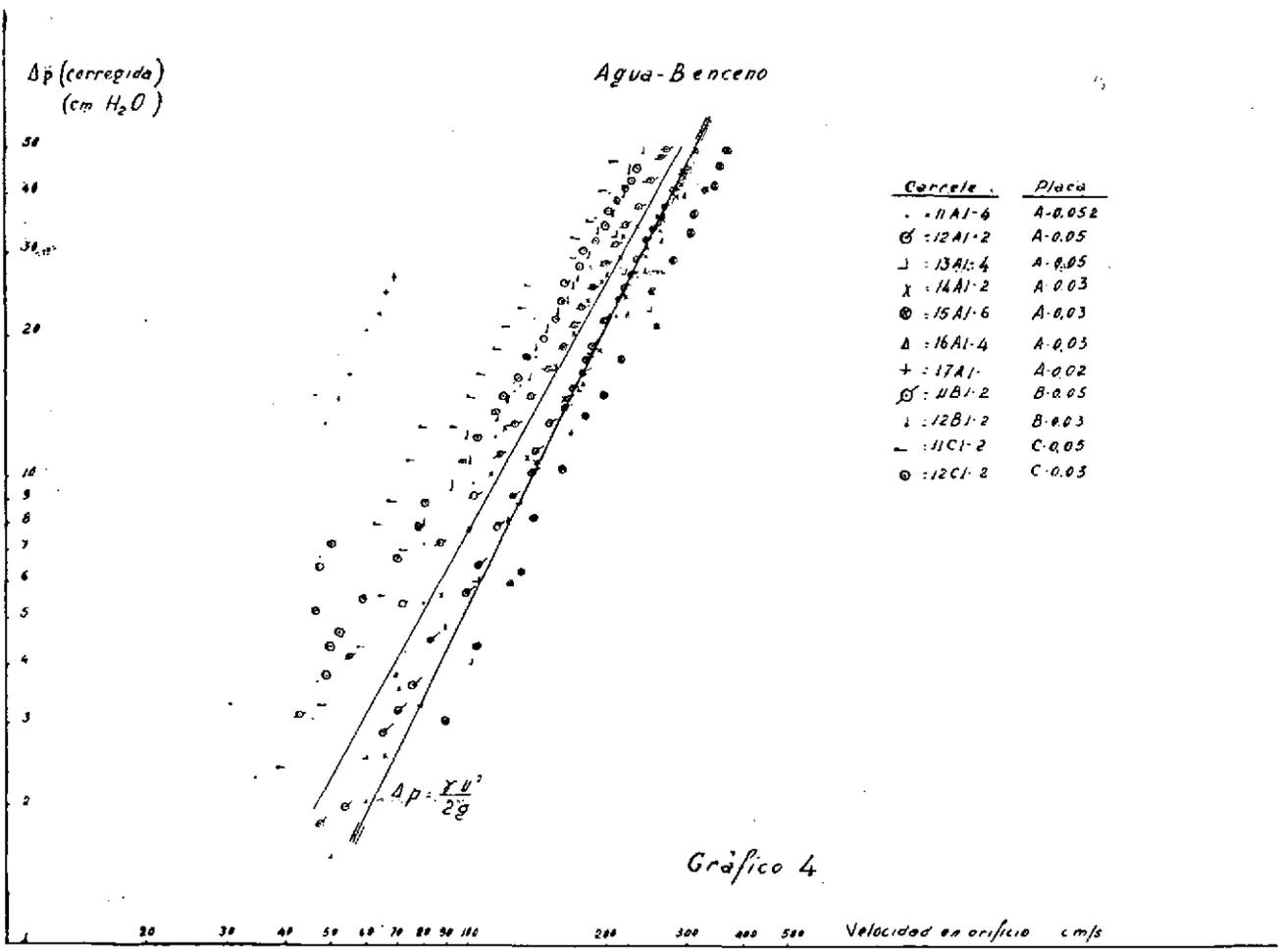


Gráfico 4.



SISTEMA: Benceno-Agua

Longitud del chorro en función de la velocidad del mismo

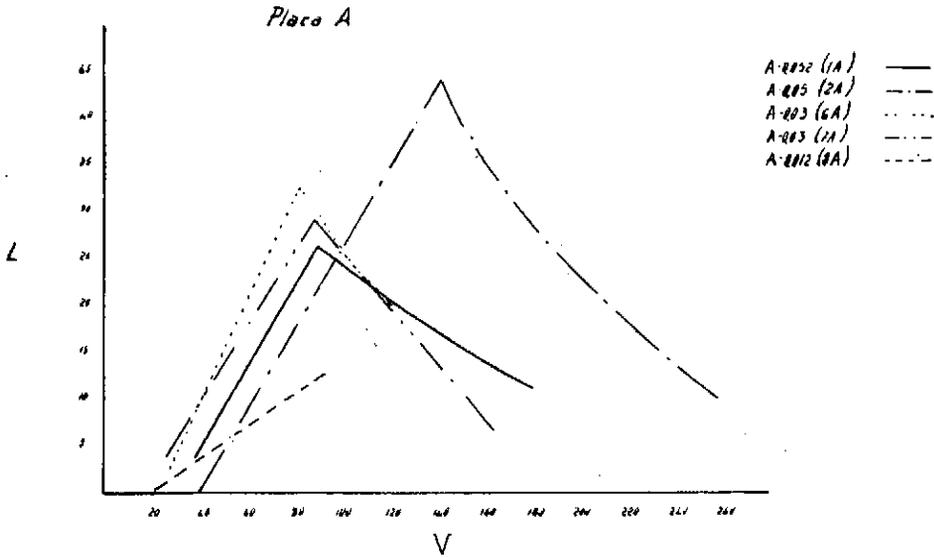


GRÁFICO 5

SISTEMA: Benceno-Agua

Longitud del chorro en función de la velocidad del mismo

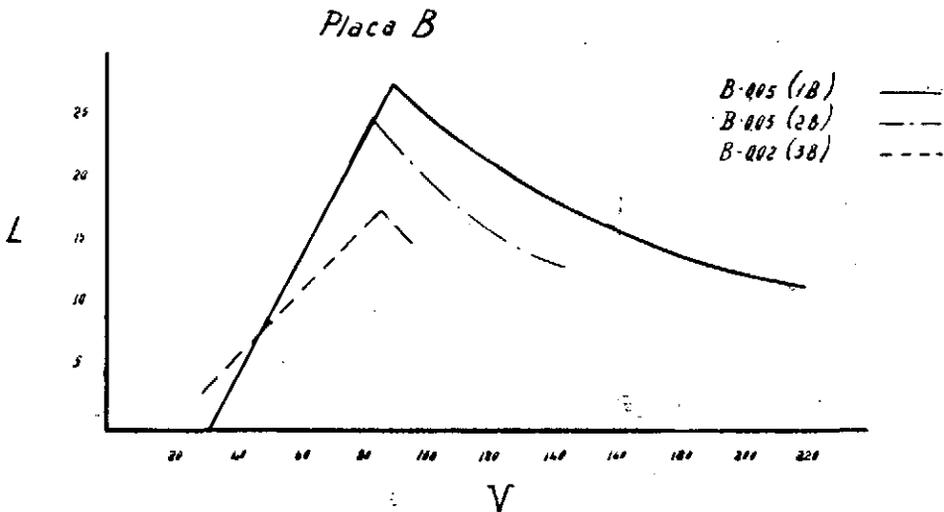


GRÁFICO 6



## SISTEMA: Benceno-Agua

Longitud del chorro en función de la velocidad del mismo

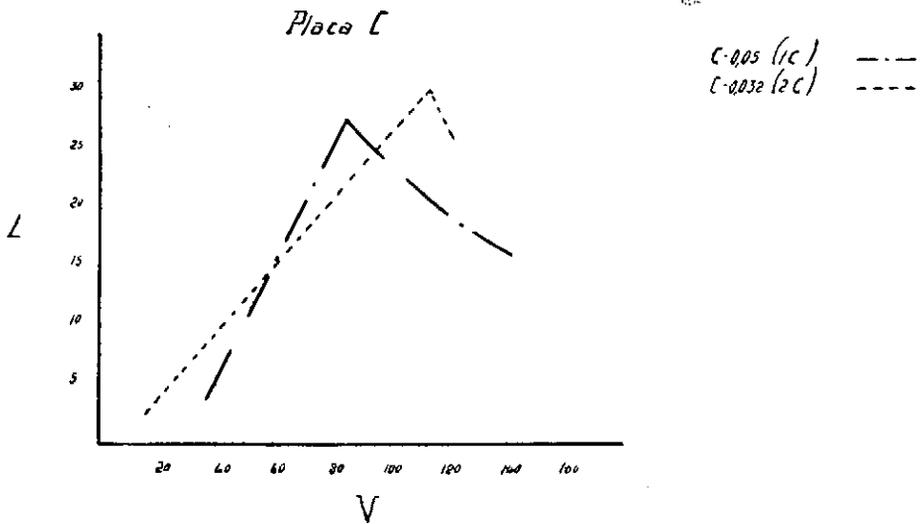


GRÁFICO 7

## SISTEMA: Agua-Benceno

Longitud del chorro en función de la velocidad del mismo

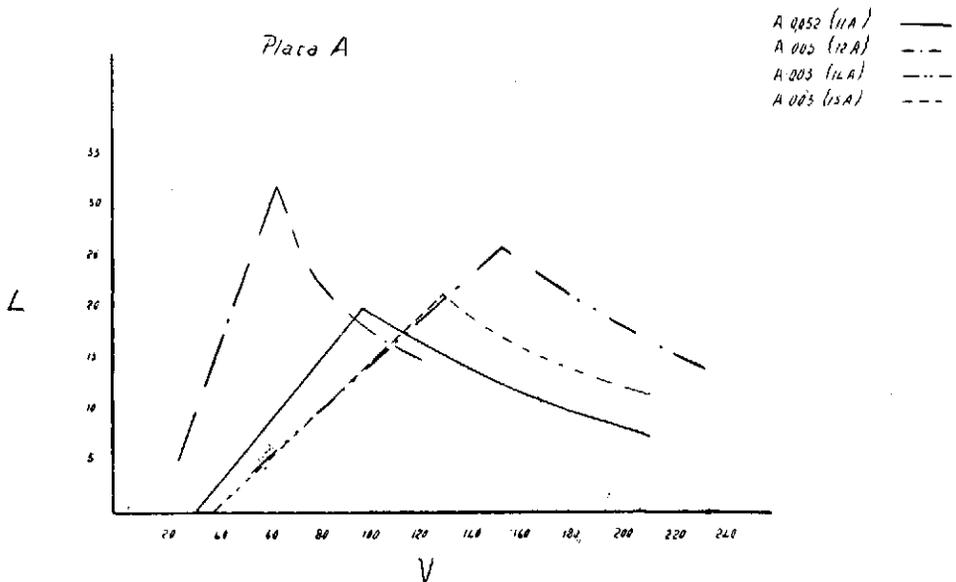


GRÁFICO 8

# SISTEMA Agua-Benceno

Longitud del chorro en función de la velocidad del mismo

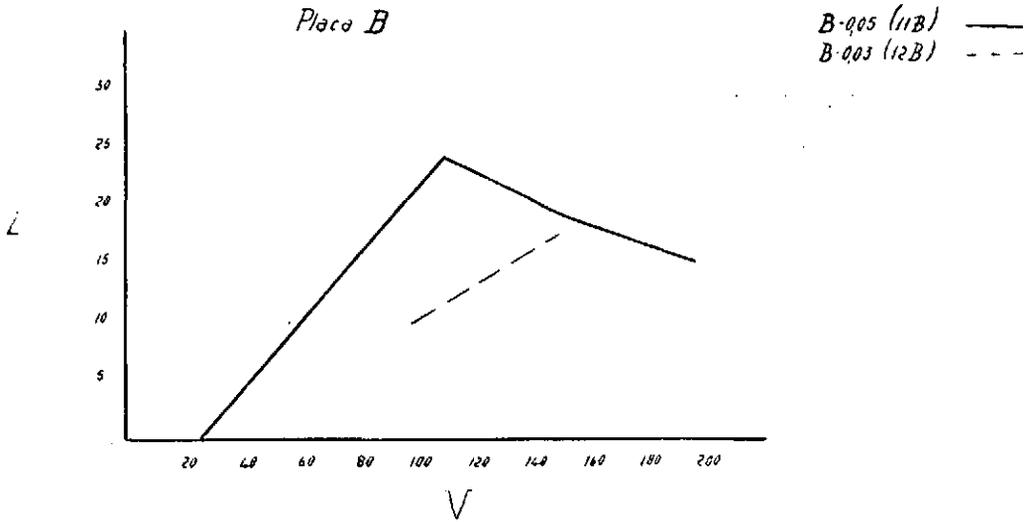


GRÁFICO 9

# SISTEMA Agua-Benceno

Longitud del chorro en función de la velocidad del mismo

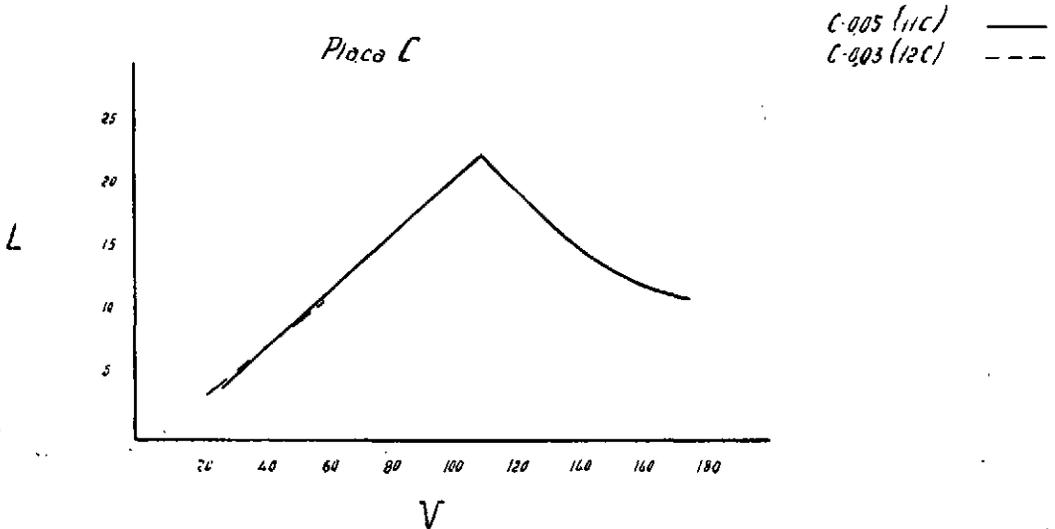


GRÁFICO 10



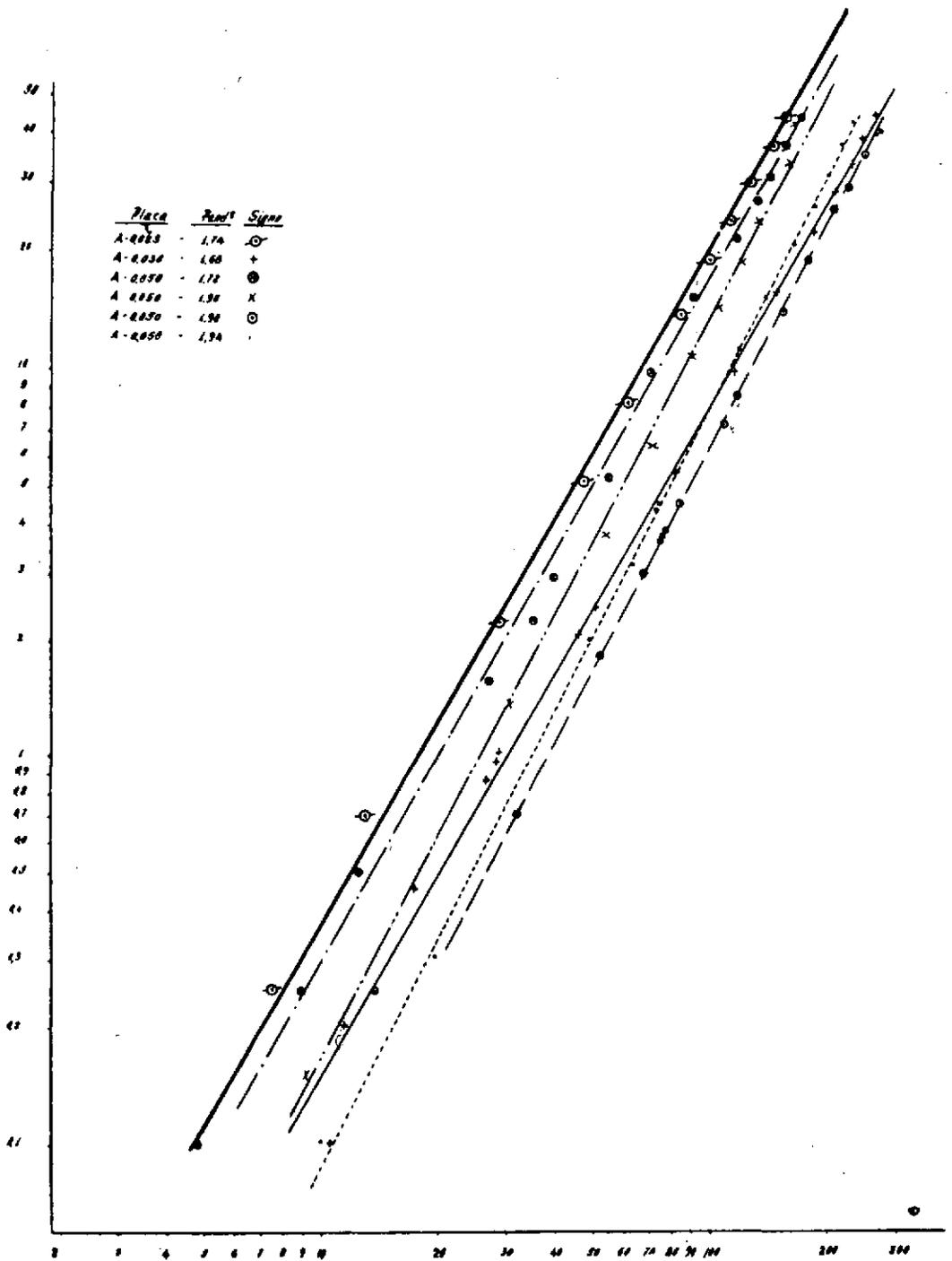


GRÁFICO 11



SISTEMA: Benceno-Agua  
 $L/d$  en función de  $u \left( \frac{\rho d}{\sigma} \right)^{1/2}$

Placa A

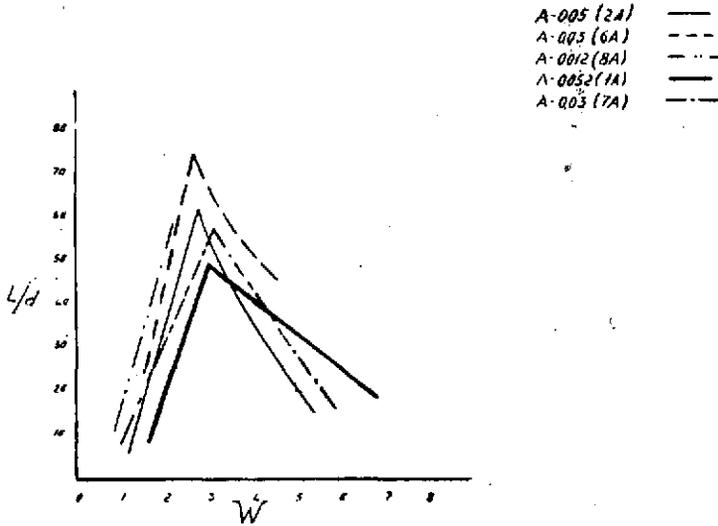


GRÁFICO 12

SISTEMA: Benceno-Agua

$L/d$  en función de  $u \left( \frac{\rho d}{\sigma} \right)^{1/2}$

Placa B

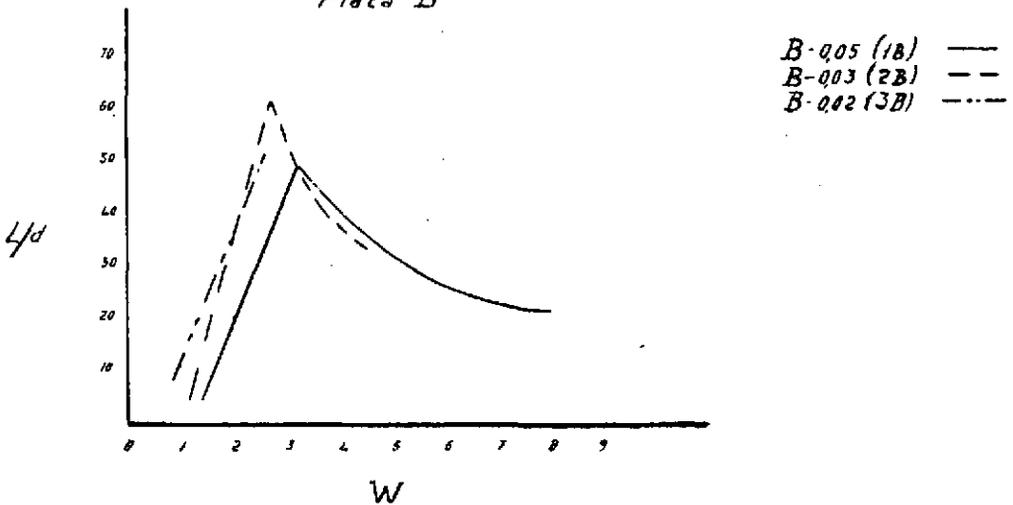


GRÁFICO 13



SISTEMA: Benceno-Agua

$L/d$  en función de  $u \left( \frac{\rho d}{\sigma} \right)^{1/2}$

Placa C

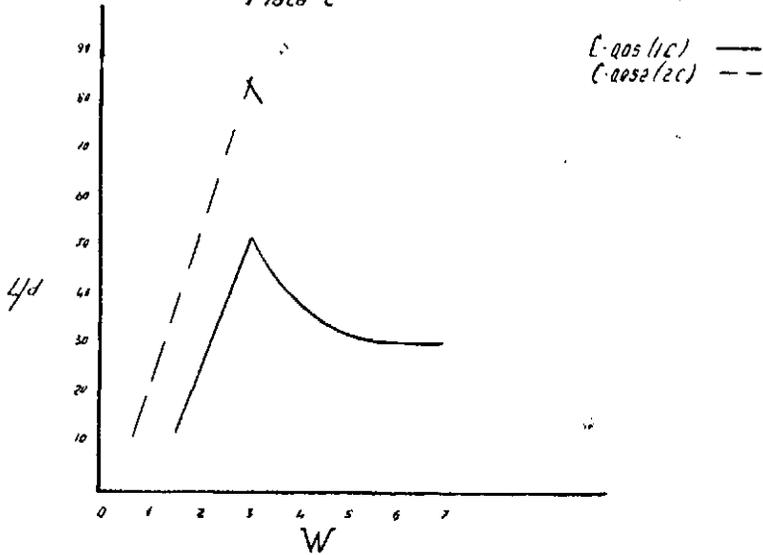


GRÁFICO 14

SISTEMA: Agua-Benceno

$L/d$  en función de  $u \left( \frac{\rho d}{\sigma} \right)^{1/2}$

Placa A

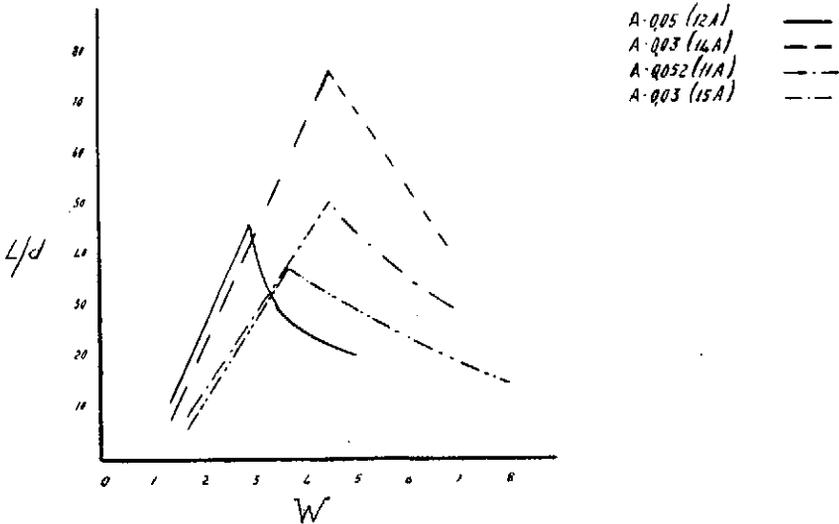


GRÁFICO 15



SISTEMA: Agua-Benceno

$L/d$  en función de  $u \left( \frac{\rho_d}{\sigma} \right)^{1/2}$

Placa B

B-005 (11B) ———

B-003 (12B) - - -

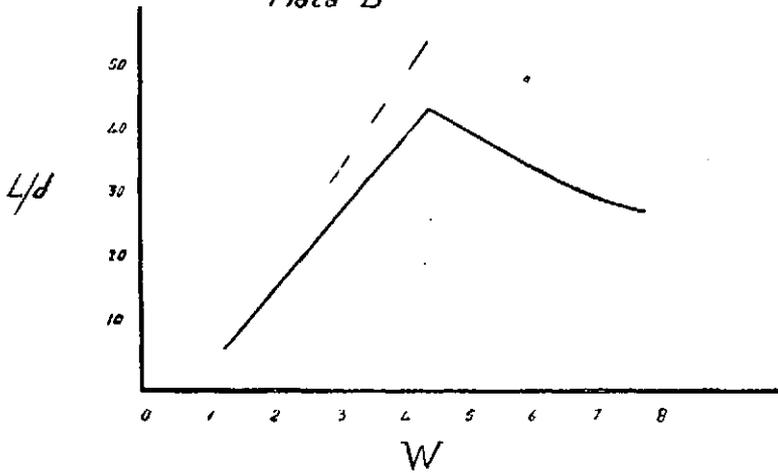


GRAFICO 16

SISTEMA: Agua-Benceno

$L/d$  en función de  $u \left( \frac{\rho_d}{\sigma} \right)^{1/2}$

Placa C

C-005 (11C) ———

C-003 (12C) - - -

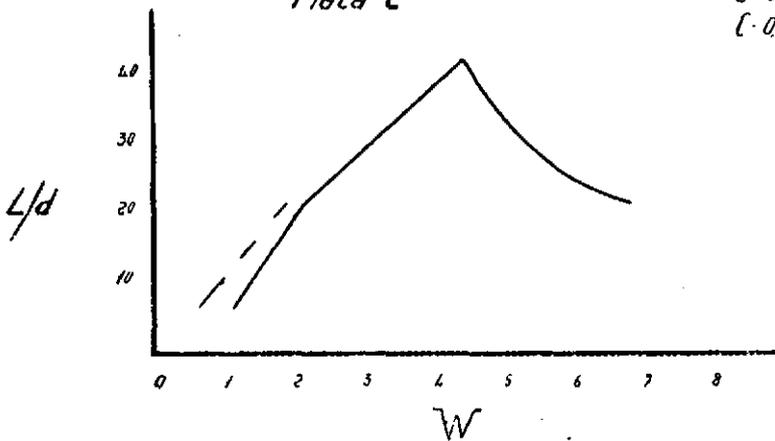


GRÁFICO 17



SISTEMA: Benceno - Agua

Placa A de 002 en  
Carreles 1A-1-5

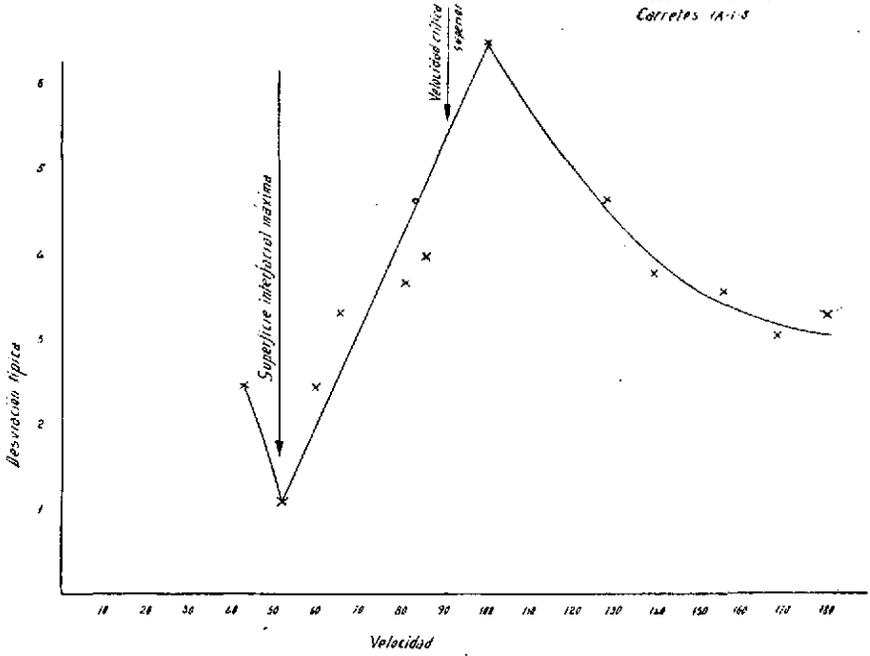


GRAFICO 18

SISTEMA: Agua - Benceno

Placa A de 003 en  
Carreles 15A-1-6

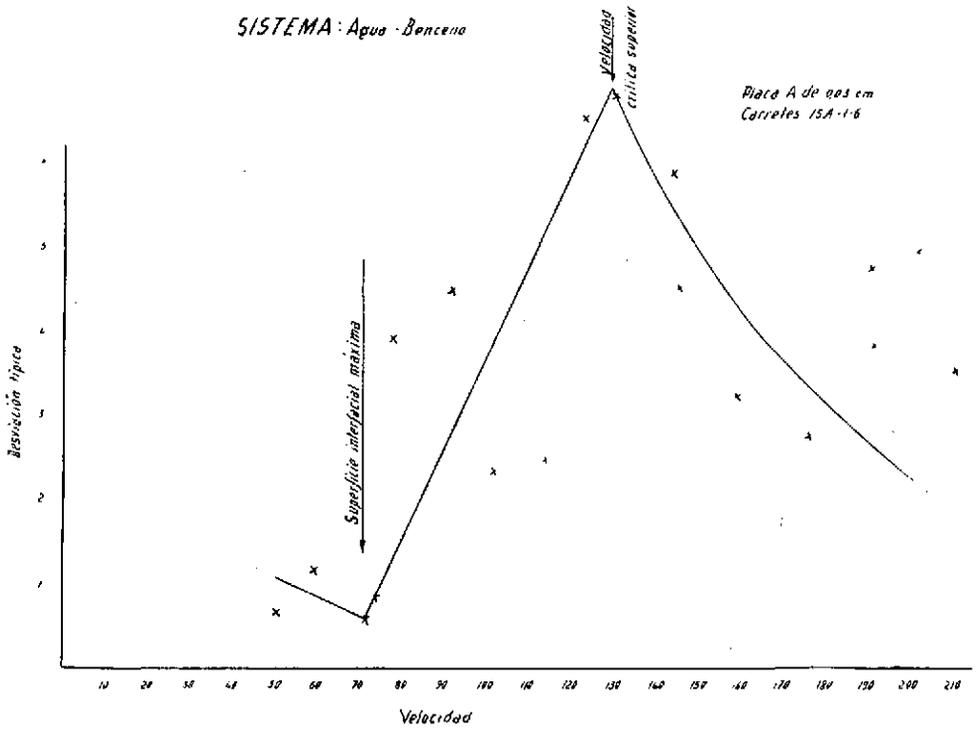


GRAFICO 19



# Diametro de las gotas en función de la velocidad en chorro

SISTEMA: Benceno-Agua

Placa A 0,05 cm

Carretes 3A

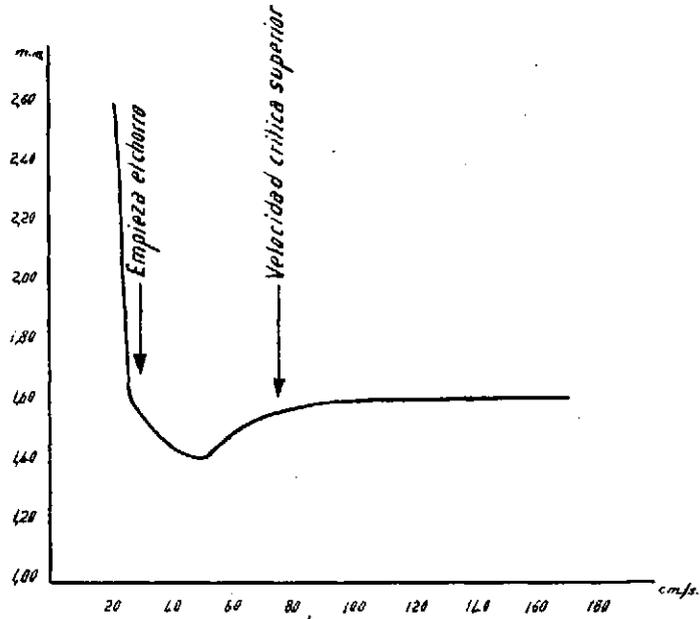


GRÁFICO 20

Placa A 0,032 cm

Carretes 4A

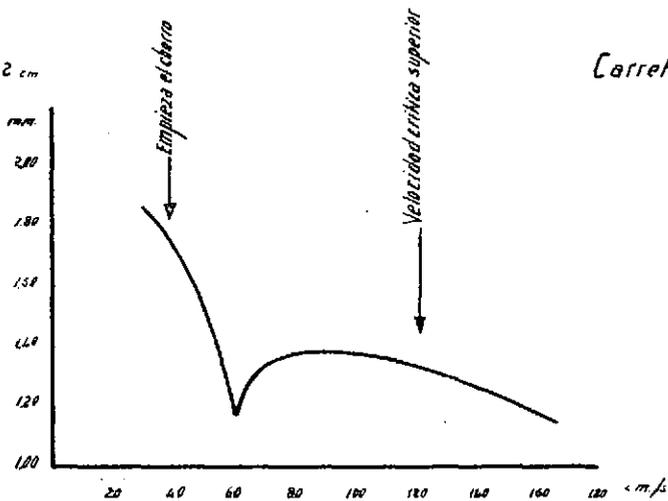


GRÁFICO 21

Placa A 003 cm

Carretes 6A

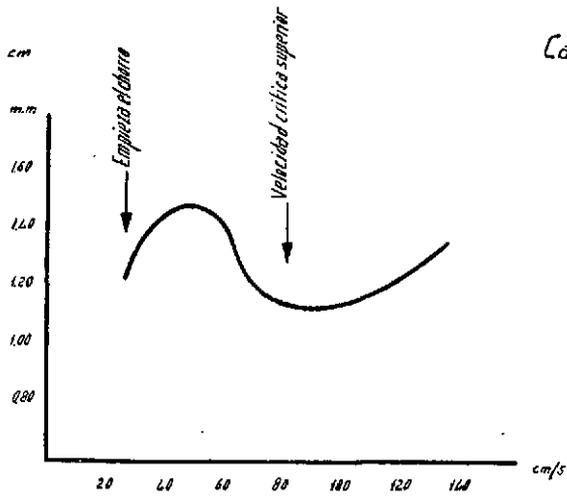


GRÁFICO 22

Placa A 0012 cm

Carretes 8A

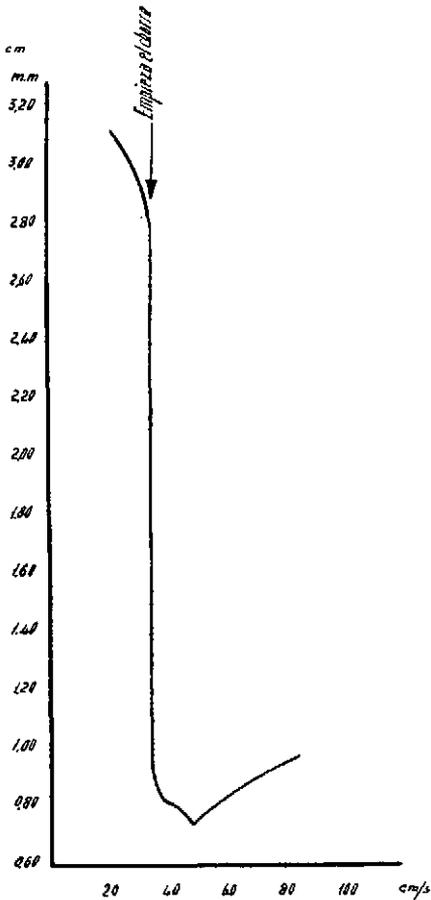


GRÁFICO 23



Placa B 0,05 cm

Carretes 1B

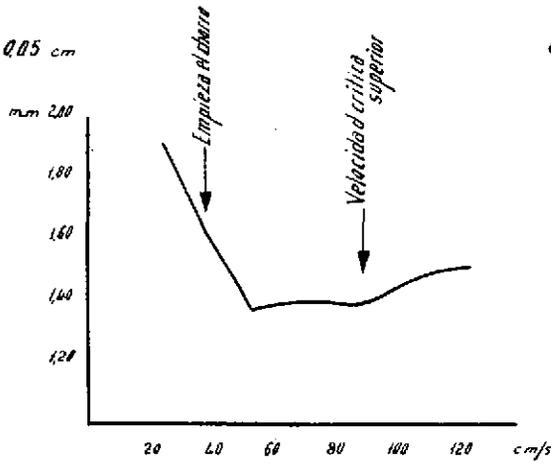


GRÁFICO 24

Placa B 0,03 cm

Carretes 2B

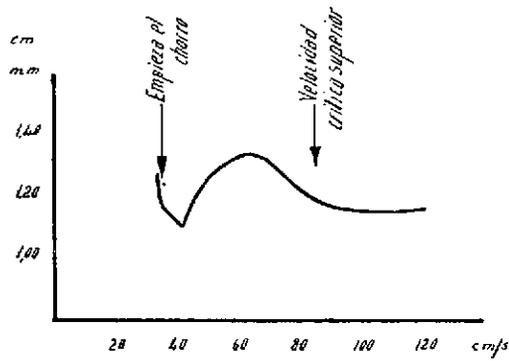


GRÁFICO 25

Placa B 0,02 cm

Carretes 3B

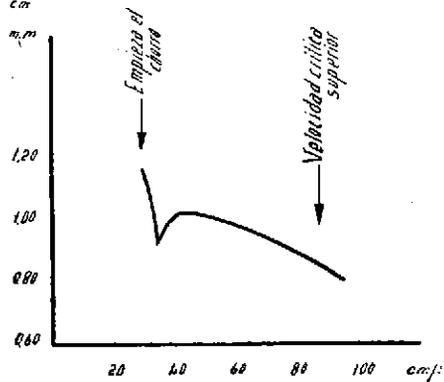


GRÁFICO 26

Placa C 005 cm

Carreles 1C

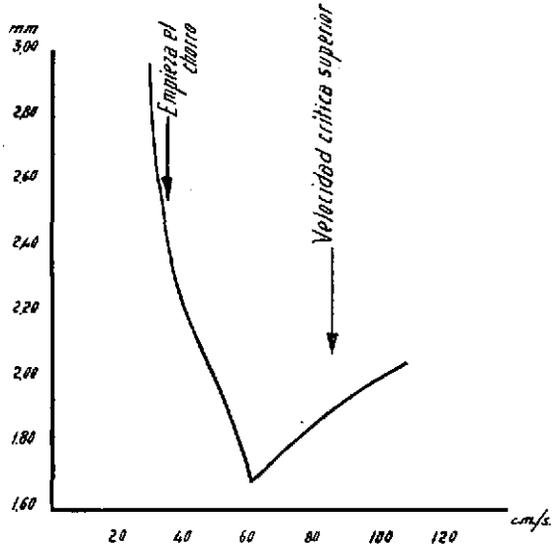


GRÁFICO 27

Placa C 0032 cm

Carreles 2C

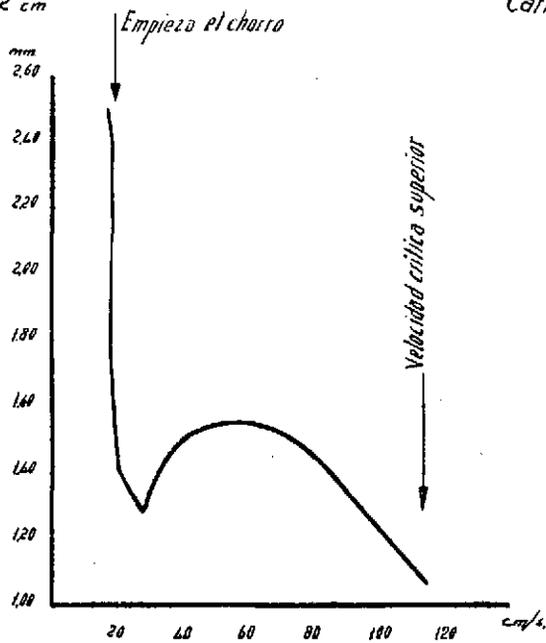


GRÁFICO 28



# SISTEMA Agua-Benceno

Placa A 005

cm  
mm

Carretes 12A

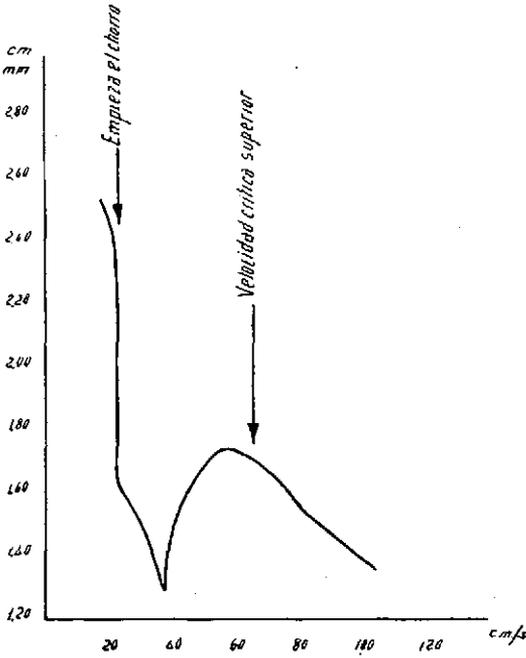


GRÁFICO 29

Placa A 005

mm

Carretes 13A

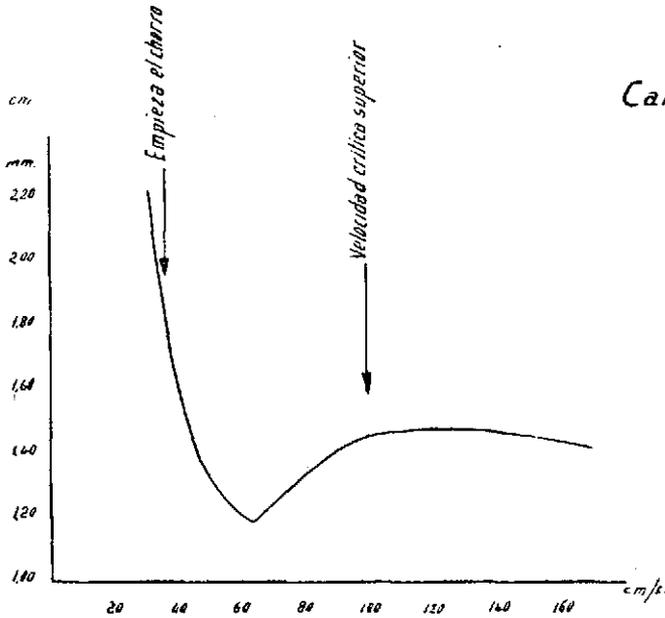


GRÁFICO 30



Placa A 003 cm

Carretes 16A

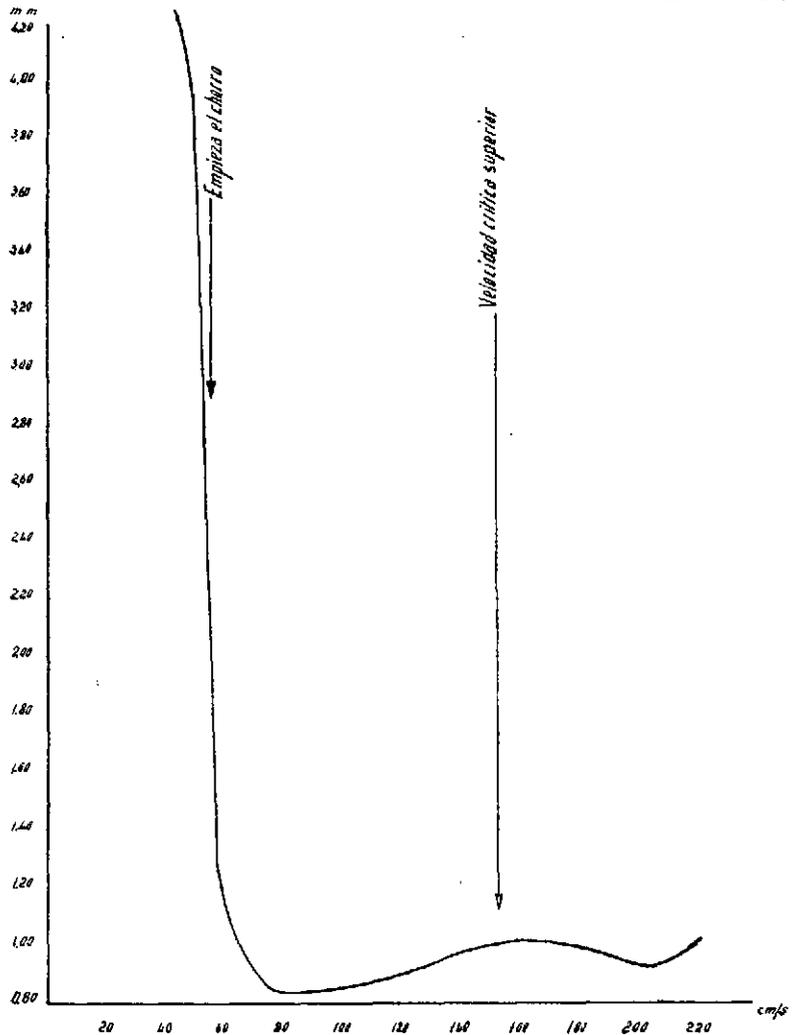


GRÁFICO 31

Placa A 003 cm

Carretes 16A

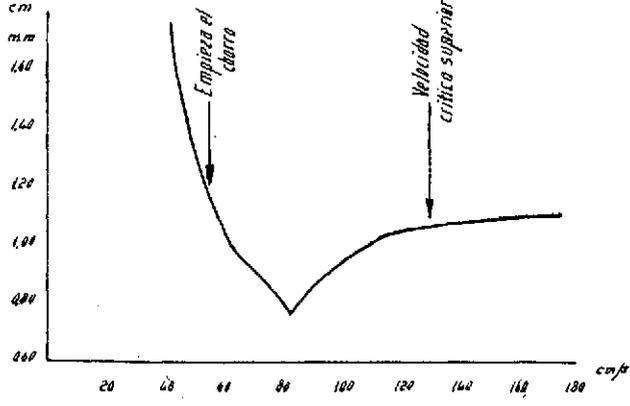


GRÁFICO 32



Placa B 005 cm

Carretes 11B

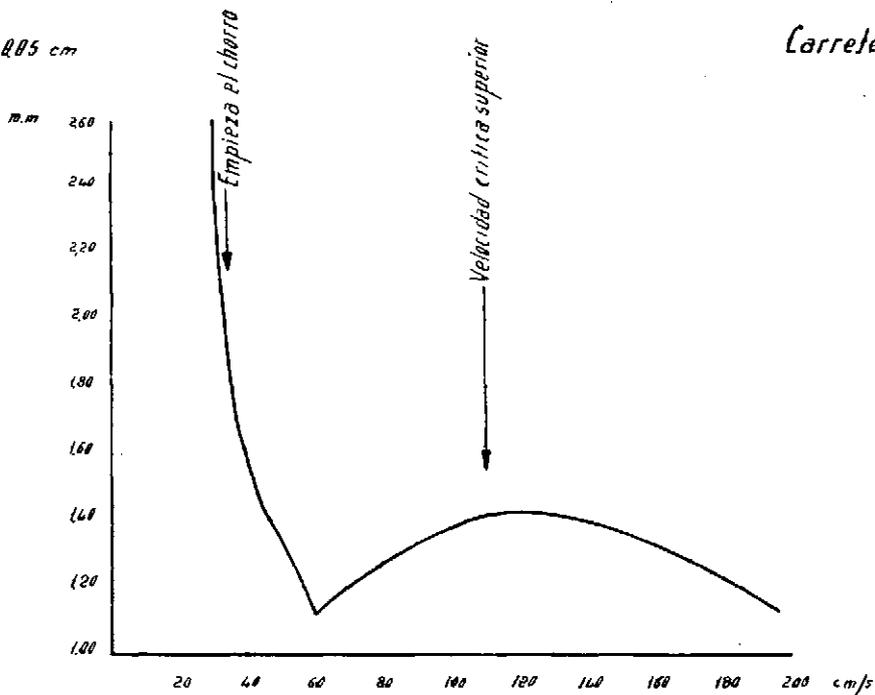


GRÁFICO 33

Placa B 003 cm

Carretes 12B

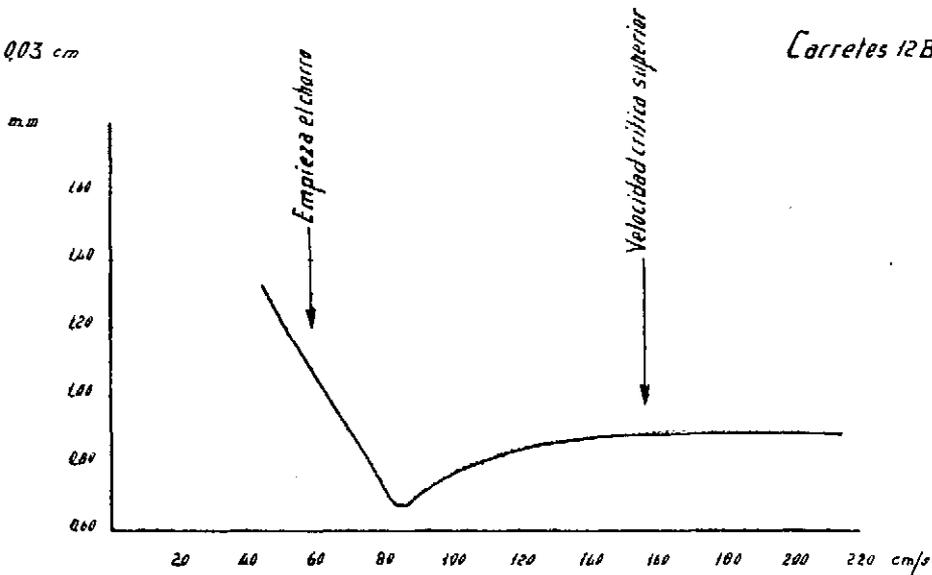


GRÁFICO 34



Placa C 005 cm

Carretes 11C

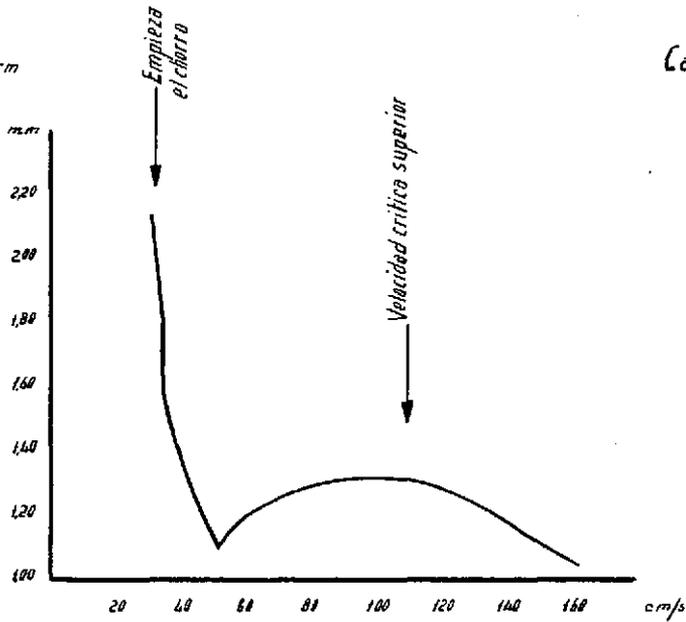


GRÁFICO 35

Placa C 003 cm

Carretes 12C

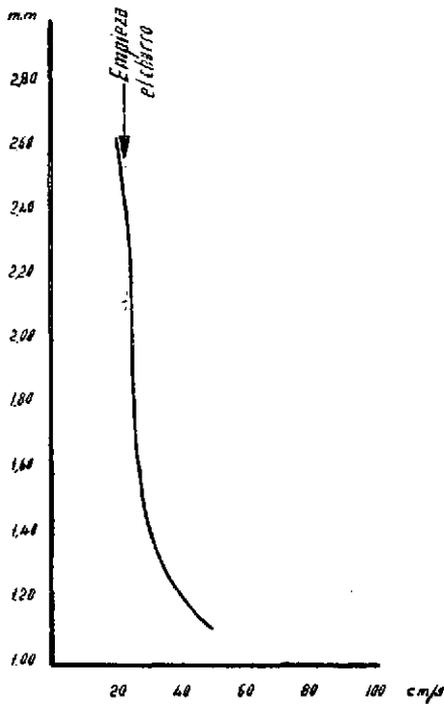


GRÁFICO 36

# HISTOGRAMAS

*SISTEMA: Benceno-Agua*

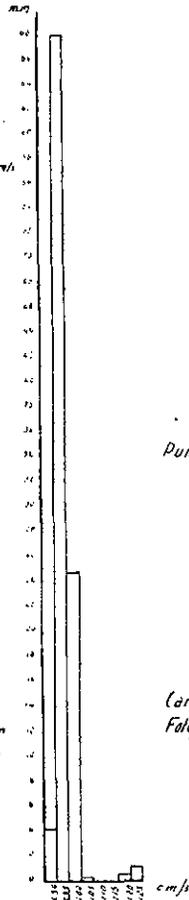
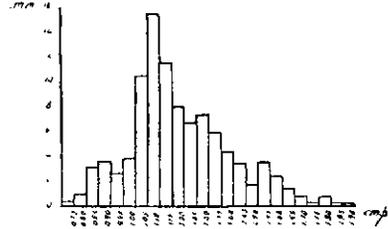
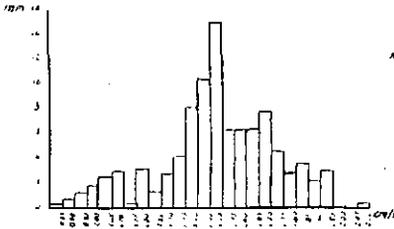
*Placa A 0032 cm*

*Placa A 0052 cm  
Velocidad: 3812 cm  
D. medio: 157 m/m  
Desviación: 0233*

*Carrete 4A-1  
Fotografías 24-33*

*Placa A 0052 cm  
Velocidad 5272 cm  
D. medio: 127 m/m  
Desviación: 0213*

*Carrete 4A-2  
Fotografías 11-20*



*Punto óptimo*

*Placa A 0032 cm  
Velocidad: 6254 cm  
D. medio: 096 m/m  
Desviación: 00635*

*Carrete 4A-3  
Fotografías 1 y*

**GRÁFICO 37**



Placa A 2052 cm  
 Velocidad 6460 cm  
 D. medio: 213 m/s  
 Desviación: 01405

Carrete 4A-3  
 Fotografías 11-19

Placa A 2052 cm  
 Velocidad 12433 cm  
 D. medio: 186 m/s  
 Desviación: 0135

Carrete 4A-5  
 Fotografías 21-30

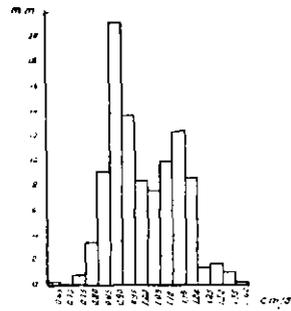
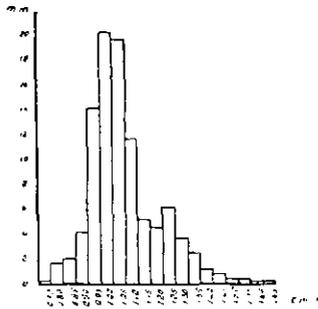


GRÁFICO 38

# SISTEMA: Benceno-Aguá

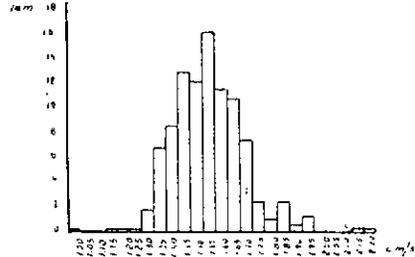
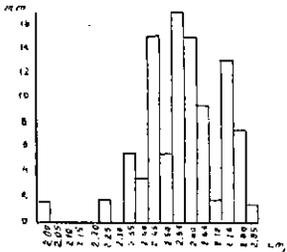
## Placa A-005 cm

Placa A005 cm  
 Velocidad: 2070 cm  
 D.media: 262 m/jm  
 Desviación: 0,159

Carrete SA-1  
 Fotografías 21-30

Placa A006 cm  
 Velocidad: 3125 cm  
 D.media: 160 m/jm  
 Desviación: 0,163

Carrete SA-2  
 Fotografías 7-16

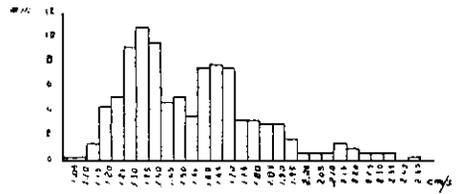
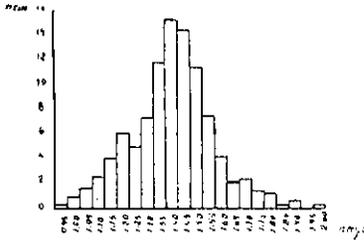


Placa A005 cm  
 Velocidad: 4039 cm  
 D.media: 168 m/jm  
 Desviación: 0,167

Carrete SA-2  
 Fotografías 17-26

Placa A005 cm  
 Velocidad: 6136 cm  
 D.media: 153 m/jm  
 Desviación: 0,275

Carrete SA-3  
 Fotografías 21-30



Placa A005 cm  
 Velocidad: 13356 cm  
 D.media: 145 m/jm  
 Desviación: 0,320

Carrete SA-5  
 Fotografías 30-36

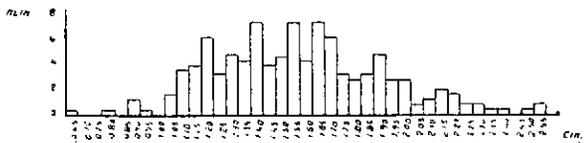


GRÁFICO 39



# SISTEMA: Agua-Benceno

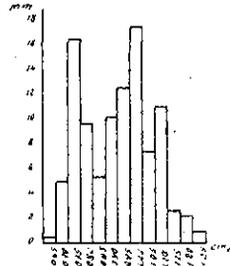
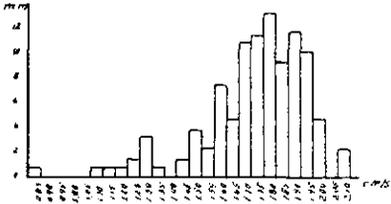
Placa A-003 cm

Placa A 003 cm  
Velocidad: 4.711 cm  
D.medio: 175  $\mu$ m  
Desviación: 0.222

Carrete 16A-4  
Fotografías 1-9

Placa A 003 cm  
Velocidad: 8.974 cm  
D.medio: 85  $\mu$ m  
Desviación: 0.130

Carrete 16A-5  
Fotografías 10-15

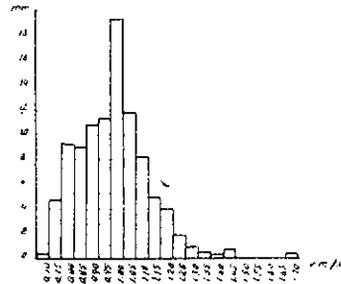
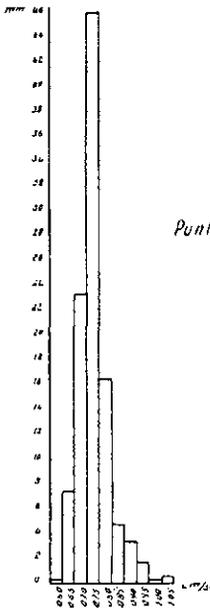


Placa A 003 cm  
Velocidad: 8.204 cm  
D.medio: 87.6  $\mu$ m  
Desviación: 0.263

Carrete 16A-3  
Fotografías 1-9

Placa A 003 cm  
Velocidad: 11.81 cm  
D.medio: 100  $\mu$ m  
Desviación: 0.143

Carrete 16A-2  
Fotografías 18-25



Placa A 003 cm  
Velocidad: 16.204 cm  
D.medio: 109  $\mu$ m  
Desviación: 0.257

Carrete 16A-1  
Fotografías 19-26

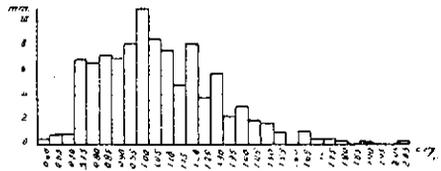


GRÁFICO 40



# SISTEMA: Agua-Benceno

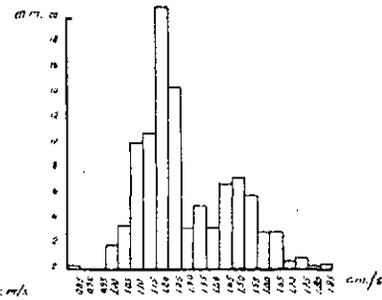
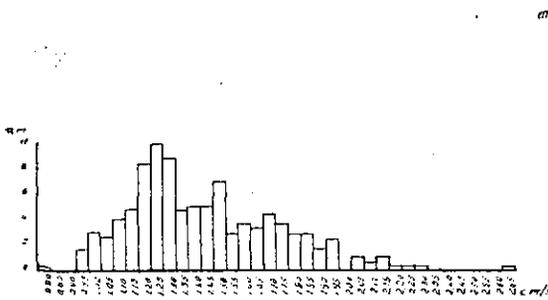
## Placa A-005 cm

Placa A005 cm  
 Velocidad: 1420 cm  
 D. media: 148 m/m  
 Desviación: 0.345

Carrete 13A-2  
 Fotografías 1-9

Placa A005 cm  
 Velocidad: 1385 m/m  
 D. media: 138 cm  
 Desviación: 0.170

Carrete 13A-3  
 Fotografías 1-9

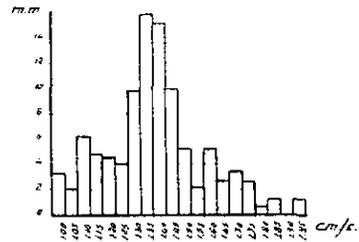
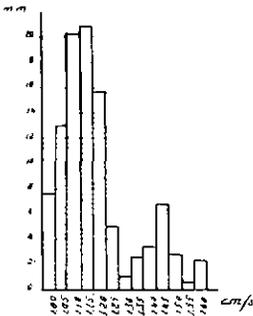


Placa A005 cm  
 Velocidad: 6.37 cm  
 D. media: 119 m/m  
 Desviación: 0.136

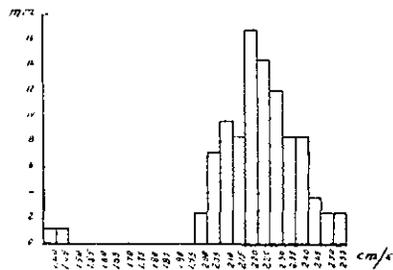
Carrete 13A-3  
 Fotografías 19-27

Placa A005 cm  
 Velocidad: 4.209 cm  
 D. media: 139 m/m  
 Desviación: 0.195

Carrete 13A-4  
 Fotografías 1-9



Placa A005 cm  
 Velocidad: 3.233 cm  
 D. media: 224 m/m  
 Desviación: 0.181



Carrete 13A-4  
 Fotografías 28-36

GRÁFICO 4.1

