



a)



b)

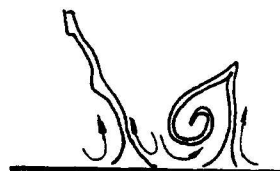


FIG.13.- PROCESO DE BARRIDO VISUALIZADO MEDIANTE BURBUJAS DE OXIGENO

$u_1 = 0,19 \text{ cm/s}$   $U = 2,3 \text{ cm/s}$   $H = 10 \text{ cm}$   $Re = 2005$

El trazo corresponde a  $100 v/u$



a)

FIG.14.- ACUMULACION DE PARTICULAS EN LAS BANDAS DE BAJA VELOCIDAD

$U = 0,93 \text{ cm/s}$   $U = 12,8 \text{ cm/s}$   $H = 6 \text{ cm}$   $Re = 7685$

Los trazos corresponden a  $100 v/u$ .

a) FOTOGRAFIA DEL FONDO DEL CANAL

b) CORTE TRANSVERSAL A LA DIRECCION DEL FLUJO

A: Zona de alta velocidad asociada a un flujo descendente.

B: Zona de baja velocidad asociada a un flujo ascendente.

(Acumulación de partículas)

El trazo corresponde a  $100 v/u$ .



b)

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA  
XII CONGRESO CHILENO



4

ESTRUCTURAS TURBULENTAS DE FLUJOS EN CANALES  
ABIERTOS  
CON NUMEROS DE REYNOLDS BAJOS.  
PARTE II: PROCESAMIENTO DE IMAGENES

ALDO TAMBURRINO T. (1) JUAN ESPINOZA M. (2)  
RODRIGO MUSALEM J. (3)

RESUMEN

En este trabajo se presentan resultados del cálculo de velocidades de flujos en canales abiertos mediante el procesamiento de imágenes obtenidas por medio de fotografías o video. El uso de burbujas de oxígeno permite calcular perfiles de velocidad instantáneos y medios temporales. Estos últimos se ajustan a la distribución de velocidades de Spalding.

Usando partículas de acrílico como trazadores es posible determinar campos de velocidades en planos verticales mediante una técnica de seguimiento de partículas. Los resultados así obtenidos se consideran sólo preliminares para el estudio de las estructuras turbulentas en canales.

- 1) Ing. Civil, Ph.D., Profesor Asistente, Dpto. De Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- 2) Memorista, Dpto. de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- 3) Alumno de pregrado, Dpto. de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

## INTRODUCCION

Si se desea entender mejor los fenómenos que ocurren en la cercanía de la pared en un flujo turbulento, se hace imprescindible su cuantificación. En general, la variable que se mide más a menudo corresponde a la velocidad, aunque también se han reportado mediciones de presión (Thomas y Bull, 1983), gradientes de la velocidad (Sirkar y Hanratty, 1970), esfuerzo de corte (García et al., 1995), etc. Tradicionalmente, la medición de la velocidad se ha hecho como registros temporales en un punto dado. Sin embargo, durante la última década se han hecho comunes técnicas de medición del campo de velocidades en una región del espacio. En general, estas técnicas son una combinación de algún método de visualización de flujo, procesamiento de imágenes e identificación del movimiento del trazador utilizado en la visualización.

El objetivo de este trabajo es presentar algunos resultados del procesamiento de imágenes en escurrimientos con superficie libre, con el objeto de cuantificar el campo de velocidades en planos verticales longitudinales. Este trabajo es complementario a otro presentado en este Congreso (Parte I) y aquí se describe el cálculo de la velocidad friccional usado en el trabajo anterior. Sin embargo, en lo que respecta al estudio de las estructuras coherentes del flujo, el análisis aún no es definitivo, ya que éste está sólo en sus fases iniciales y aquí se ha restringido básicamente a la puesta a punto de los métodos de procesamiento de imágenes y a una descripción cualitativa de los campos de velocidades.

## INSTALACION Y TECNICA EXPERIMENTAL

La instalación experimental consiste en un canal de acrílico de pared hidrodinámicamente lisa, de 30 cm de ancho, 15 cm de alto y 420 cm de longitud, con una pendiente que se mantuvo fija e igual a 0,0007. Las condiciones experimentales con que se trabajó cubren un rango de números de Reynolds ( $Re = UH/v$ , donde  $U$  es la velocidad media,  $H$  la altura y  $v$  la viscosidad cinemática) de 2005 a 7685.

Las experiencias consistían en filmar o fotografiar el movimiento de trazadores en planos verticales longitudinales de iluminación para su posterior procesamiento. Los trazadores utilizados corresponden a partículas de acrílico, con un tamaño medio inferior al milímetro y burbujas de hidrógeno u oxígeno.

La generación de las burbujas se hizo mediante electrólisis (Geller, 1955) al hacer circular una corriente por un alambre de acero inoxidable de 0,15 mm de diámetro. La corriente podía ser suministrada en pulsos cuya duración y frecuencia eran controladas mediante un equipo electrónico especialmente diseñado para tal efecto, con el circuito que se detalla en Ellis y Stefan (1986). La calidad de las burbujas, así como su tamaño se controlan mediante la diferencia de voltaje entre los extremos del alambre, el que puede ser variado continuamente entre 0 y 110 Volts. En general, se trabajó con

un voltaje superior a 50 Volts. El alambre se ubicó verticalmente en el eje del canal, a 280 cm del comienzo de éste. La confiabilidad de las mediciones de velocidad usando burbujas de hidrógeno ha sido ampliamente establecida para velocidades relativamente bajas, como las que se han usado en esta experimentación (Schraub et al., 1965).

El suministro de las partículas de acrílico se realizó a la entrada del canal, mediante una suspensión en agua la que era cuidadosamente incorporada al flujo, teniendo la precaución de reducir al mínimo la perturbación del escurrimiento.

La iluminación se efectuó mediante la luz de un foco halógeno de 1000 watts de potencia, la que pasaba a través de un colimador, generando un plano de iluminación, cuyo espesor variaba de menos de un milímetro para experiencias con partículas de acrílico como trazador, hasta uno o dos centímetros al usar burbujas. La razón de poder usar un espesor mayor para las burbujas se debe a que su ubicación se conoce exactamente en un momento dado (todas ellas se originan en un alambre vertical) y su generación continua da forma a una superficie o manto de pequeñas burbujas. En cambio, las partículas de acrílico se encuentran más o menos uniformemente distribuidas en todo el dominio del flujo, abarcando completamente toda la zona iluminada.

El registro de imágenes se hizo mediante una cámara fotográfica Canon EOS-1 o mediante una cámara de video Sony, modelo CCD-TR200 con cintas de 8mm de alta fidelidad. Las imágenes de video fueron digitalizadas utilizando al interface y software Video Blaster, de Creative Labs. Inc., instalados en un PC 486 Compac ProLinea con monitor VGA. Las fotografías fueron digitalizadas manualmente utilizando una mesa electrónica marca GTCO modelo SL II Plus.

La determinación de los centroides de los trazadores en las imágenes ya digitalizadas se hizo mediante FOCAS, un software empleado en astronomía para la clasificación de objetos estelares (Jarvis y Tyson, 1981). El vector velocidad se calculó como el vector desplazamiento dividido por el tiempo entre dos cuadros o fotografías. La identificación de las partículas en las distintas imágenes o fotografías se realizó mediante la técnica de correlaciones espaciales de Hassan et al. (1992), la que se encuentra descrita también en Tamburrino y Valdés (1994).

## RESULTADOS

### DISTRIBUCION DE VELOCIDADES

A partir de fotografías de burbujas de hidrógeno generadas con una cierta frecuencia se determinó la distribución de la velocidad longitudinal ( $u$ ), en función de la distancia desde el fondo ( $y$ ). Ejemplos de las fotografías de las burbujas se presentan en la Fig. 1. En dicha figura se presenta también la imagen digitalizada a partir de la cual se determinó la velocidad. Para el cálculo de la velocidad se

consideraron las dos o tres líneas de burbujas más próximas al alambre que las genera. La velocidad longitudinal instantánea para una posición «y» dada se estimó como la distancia entre dos líneas consecutivas en esa posición por la frecuencia de generación de las burbujas. El perfil de velocidades medio temporal se determinó como el promedio de más de un centenar perfiles de velocidad instantáneo. La distribución resultante se ajusta bien a la relación de Spalding (White, 1974):

$$y^+ = u^+ + e^{-\kappa B} \left[ e^{\kappa u^+} - 1 - \kappa u^+ - \frac{(\kappa u^+)^2}{2} - \frac{(\kappa u^+)^3}{6} \right]$$

donde  $y^+ = \frac{y u_*}{\nu}$  y  $u^+ = \frac{u}{u_*}$  siendo  $u_*$  la velocidad friccional.

K es la constante de von Kármán y B otra constante experimental. Spalding en su trabajo original, así como White (1974) recomiendan usar los valores  $K = 0,4$  y  $B = 5,5$ , los que fueron adoptados en este trabajo. La determinación de la velocidad friccional se realizó mediante tanteos, hasta obtener el mejor ajuste. Resultados de dicho ajuste para dos condiciones experimentales se presentan en la Fig. 2. En los gráficos de dicha figura, se muestran con líneas segmentadas las distribuciones lineal y logarítmica de velocidades y con línea continua la distribución de Spalding.

## CAMPOS DE VELOCIDADES

Un primer análisis se realizó con imágenes registradas con la cámara de video en las que, simultáneamente al suministro de partículas de acrílico, se incorporaba colorante fluorescente desde el fondo del canal. El usar dos trazadores tenía por objeto visualizar las estructuras de una manera similar a como se hizo en la Parte I, así como poder cuantificar el movimiento de ellas. Sin embargo, debido a la alta luminosidad del colorante, éste hace difícil la identificación de las partículas. Las grandes masas brillantes entorpecen la aplicación de FOCAS, dificultando enormemente la identificación de los centroides de las partículas mediante este programa. Para salvar esta dificultad se optó por ver las imágenes en TV y tomar fotografías a la pantalla para luego digitalizar manualmente las imágenes. Las fotografías presentan una distorsión de la imagen debido a la curvatura de la pantalla, la que fue corregida adecuadamente previo al cálculo de las velocidades. La digitalización manual, aunque permitió calcular velocidades, no resultó ser enteramente satisfactorio porque, en general, no es posible identificar adecuadamente las partículas contenidas en las áreas donde también hay colorante. Un par de dichas imágenes se presentan en la Figs. 3 y 4. Aunque la cantidad de partículas en la fotografía parece ser suficiente y estar relativamente bien distribuida, al calcular los vectores velocidad se determinan muchos que son considerados espúreos, los que son eliminados durante el proceso de

depuración de los vectores. En las figuras anteriores, el cuadro a) corresponde a la fotografía de la pantalla y el b) a los vectores velocidad resultantes. El cuadro c) resulta de restar al cuadro b) la velocidad media. Esto último se hace para facilitar la identificación de movimientos vorticosos, los que son enmascarados cuando tienen superpuestos otras velocidades. El desenmascaramiento surge al tener que tanto la velocidad media vertical como la longitudinal son nulas. Desgraciadamente, en ambas figuras, sólo pueden intuirse la presencia de los vórtices, ya que se presentan grandes áreas sin información. Con el objeto de poder mejorar la calidad de las imágenes y obtener información más adecuada a las necesidades de un estudio de las estructuras turbulentas en la cercanía de la pared, se está intentando mejorar la técnica.

Finalmente, en la Fig. 5 se presenta el resultado del análisis de dos cuadros consecutivos de un registro mediante video del flujo. En este caso, la distribución de vectores que se identifican es más uniforme, debido a que no se producen problemas de grandes zonas muy brillantes como resultado de la presencia del colorante. Sin embargo, puede apreciarse que en la cercanía del fondo (hasta unos 7 mm de él), no se tienen vectores. Esta región es también de alto brillo, generado por la intersección del plano de iluminación con el acrílico que forma el fondo del canal, obstaculizándose la adecuada identificación de partículas. La Fig. 5.a corresponde básicamente al desplazamiento de los trazadores dentro del plano de iluminación, los que se encuentran distribuidos aleatoriamente. En la Fig. 5.b se presentan los vectores velocidad calculados en los nodos de una malla equiespaciada ( $\Delta x = \Delta y = 0,363$  cm) y en la Fig. 5.c, los vectores velocidad resultantes al sustraerles la velocidad media. La razón de tener los vectores velocidad equi-espaciados está en que así se facilita el cálculo de derivadas de la velocidad en las direcciones x e y, las que se necesitan para calcular, por ejemplo, la vorticidad. En el lado derecho de la Fig. 5.c y a unos 3 cm desde el fondo ( $y u_* / \nu = 180$ ), se aprecia un vórtice bien formado, el que podría indicar la presencia de la cabeza de un vórtice herradura. Abajo del vórtice y hacia el centro de la figura, se notan algunos vectores apuntando en la dirección opuesta al flujo principal, probablemente, ellos sean parte de un bolsón de baja velocidad, el que contribuye al levantamiento de la cabeza del vórtice. Un bolsón de baja velocidad fácil de apreciar se identifica al lado izquierdo de la figura, en la cercanía de la pared. El encuentro de este bolsón con las velocidades mayores inducidas, al parecer, por el vórtice del lado derecho antes mencionado, generan una banda de velocidad prácticamente nula (en un sistema de referencia que se mueve con la velocidad media), banda que podría constituir parte de una superficie de corte.

## CONCLUSION

En este trabajo se han presentado algunos resultados referentes al procesamiento de imágenes con el objeto de determinar velocidades en un flujo turbulento. La determinación de perfiles de velocidad mediante burbujas de hidrógeno u oxígeno generadas mediante electrólisis resulta ser una técnica simple y confiable, permitiendo obtener tanto perfiles instantáneos como medios temporales. El cálculo de campos de velocidades mediante seguimiento de partículas, aunque promisorio para el estudio de las estructuras turbulentas en canales abiertos, es una técnica que requiere aún resolver algunas dificultades para su aplicación de una manera eficiente, y es algo en lo que se está trabajando en la actualidad. Los autores consideran deseable poder combinar simultáneamente la visualización con colorantes fluorescentes y el cálculo de velocidades a partir del movimiento de partículas usadas como trazadores, con el objeto de identificar claramente las velocidades en las estructuras del flujo, como aquellas denominadas vórtices herradura o anulares. Aunque dichas velocidades han sido calculadas mediante simulación numérica, los autores no tienen conocimiento de que existan estudios experimentales sistemáticos para medirlas y compararlas con los resultados de la modelación.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento otorgado por Fondecyt mediante el Proyecto de Investigación 1931002-93.

## BIBLIOGRAFIA

- 1) ELLIS, C. and H. STEFAN (1986) «Low-velocity measurements in water», Water Res. Res., (22)10,1480-1486.
- 2) GARCIA, M.; F. LOPEZ and Y. NIÑO (1995) «Characterization of near-bed coherent structures in turbulent open channel flow using synchronized high-speed video and hoy-film measurements», Experiments in Fluids, en prensa.
- 3) GELLER, E.W. (1955) «An electrochemical method of visualizing the boundary layer», J. Aer. Sciences, Dec., 869-870.
- 4) HASSAN, Y.A.; T.K. BLANCHAT, C.H. SEELEY Jr. and R.E. CANNAN (1992) «Simultaneous velocity measurements of both components of a two-phase flow using particle image velocimetry», Int. J. Multiphase Flow (18)3,371-395.
- 5) JARVIS, J.F. and J.A. TYSON (1981) «FOCAS: Faint Object Classification System», The Astronomical Journal (86)3,476-495.

6) SCHRAUB, F.A.; S.J. KLINE, J. HENRY, P.W. RUNDSTADLER and A. LITTEL (1965) «Use of hydrogen bubbles for quantitative determination of time-dependent velocity fields in low-speed water flows», J. Basic Engng., ASME, 429-444.

7) SIRKAR, K.K. and T.J. HANRATTY (1970) «The limiting behaviour of the turbulent transverse velocity component close to a wall», J. Fluid Mech. (44)3,605-514.

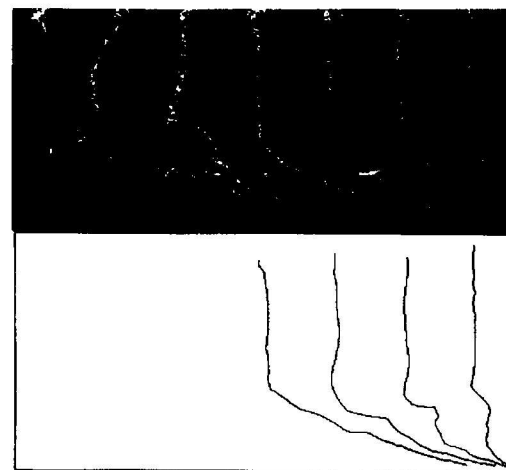
8) TAMBURRINO, A. e I. VALDES (1994) «Determinación del campo de velocidades en la superficie libre de un flujo en canales mediante el procesamiento de imágenes», XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, 7-11 Nov., Santiago, Chile, Vol.1, 291-299.

9) THOMAS, A.S.W. and M.K. BULL (1983) «On the role of wall-pressure fluctuations in deterministic motions in the turbulent boundary layer», J. Fluid Mech. (128),282-322.

10) WHITE, F.M. (1974) Viscous Fluid Flow, Mc.Graw-Hill, Inc., p. 475.



a)



b)

FIG.1.- TRAZAS DE BURBUJAS E OXIGENO UTILIZADAS PARA EL CALCULO DE LA DISTRIBUCION DE VELOCIDADES

a)  $H = 4 \text{ cm}$   $U = 7,5 \text{ cm/s}$   $Re = 2605$

b)  $H = 6 \text{ cm}$   $U = 7,7 \text{ cm/s}$   $Re = 4007$

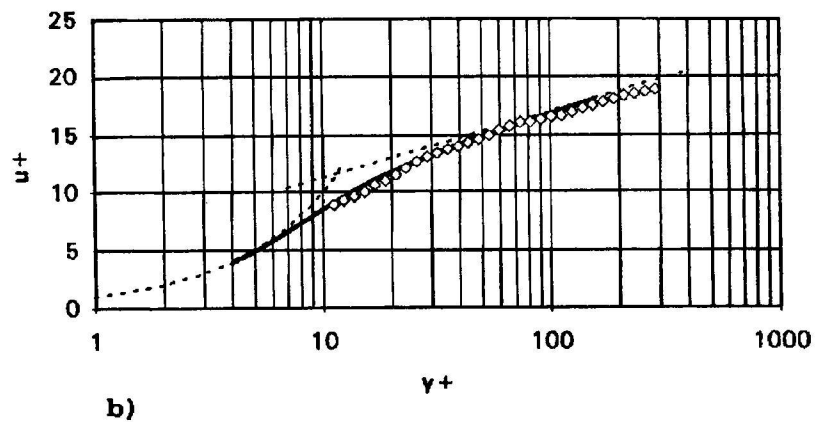
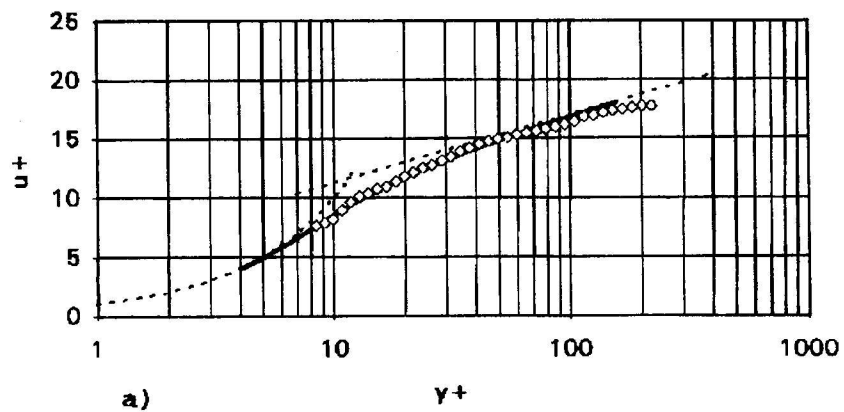


FIG.1.- DISTRIBUCION DE VELOCIDADES MEDIAS TEMPORALES

a)  $H = 4 \text{ cm}$   $U = 7,5 \text{ cm/s}$   $Re = 2605$

b)  $H = 6 \text{ cm}$   $U = 7,7 \text{ cm/s}$   $Re = 4007$

La línea continua corresponde a la relación de Spalding • Datos experimentales

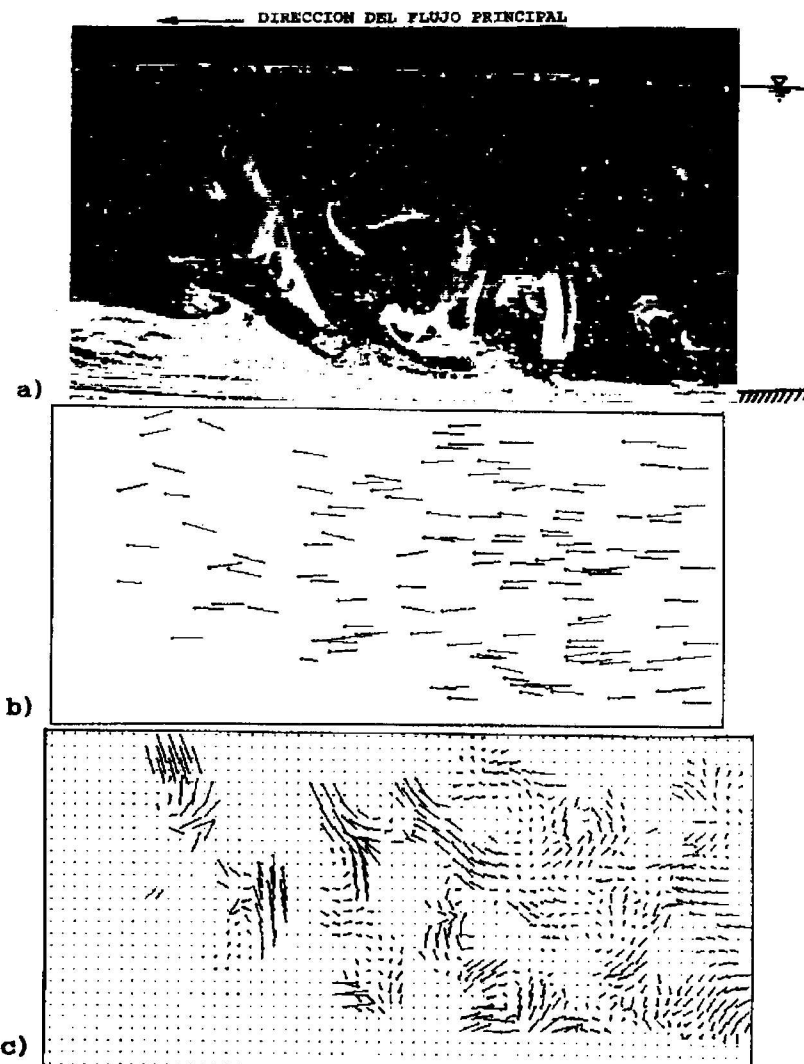


FIG.3 - DETERMINACION DEL CAMPO DE VELOCIDADES A PARTIR DE LA DIGITALIZACION DE FOTOGRAFIAS DE IMAGENES DE VIDEO

$H = 10 \text{ cm}$   $U = 4,6 \text{ cm/s}$   $Re = 4607$

a) Fotografía de la pantalla de TV. b) Vector desplazamiento de las partículas

c) Campo de velocidades interpolado en un sistema de referencia moviéndose con la velocidad media.

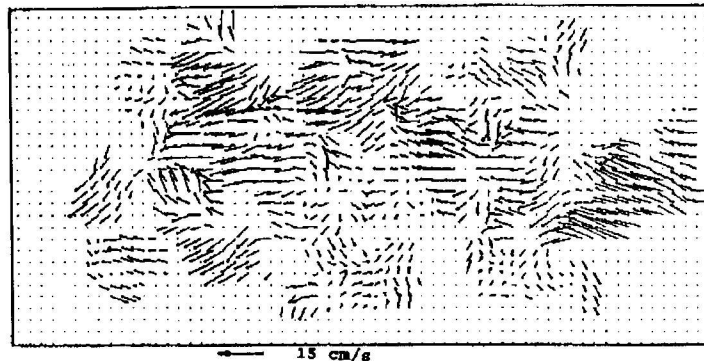
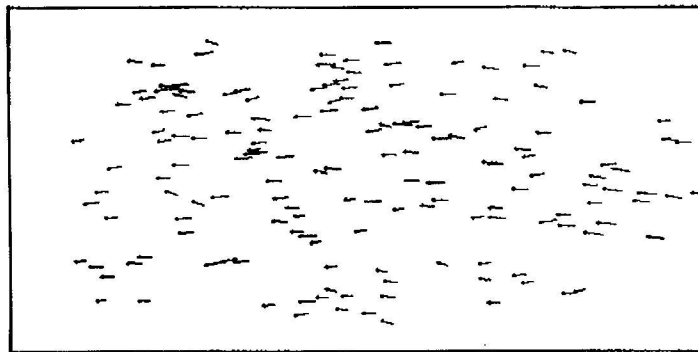
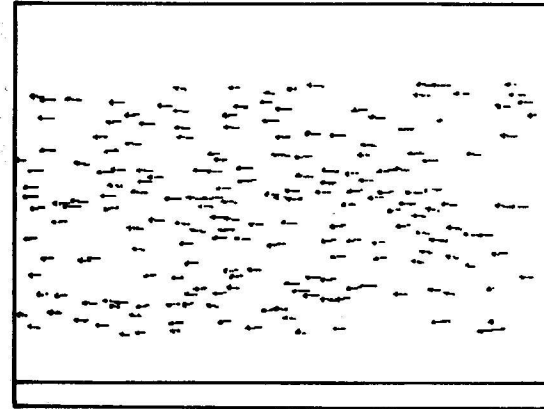


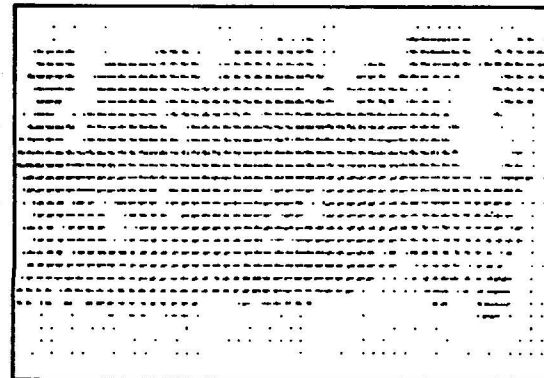
FIG.4 - DETERMINACION DEL CAMPO DE VELOCIDADES A PARTIR DE LA DIGITALIZACION DE FOTOGRAFIAS DE IMAGENES DE VIDEO

H = 10 cm U = 2,3cm/s Re = 2304

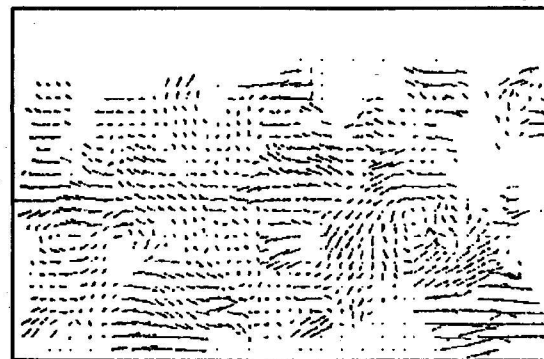
- a) Fotografía de la pantalla de TV. b) Vector desplazamiento de las partículas  
c) Campo de velocidades interpolado en un sistema de referencia moviéndose con la velocidad media.



a) VECTORES DESPLAZAMIENTO



b) VECTORES VELOCIDAD



a) CAMPO DE VELOCIDADES CON LA VELOCIDAD MEDIA SUSTRADA

FIG.5.- RESULTADO DEL PROCESAMIENTO DE LAS IMAGENES DE VIDEO

H = 6 cm U = 10 cm Re = 5250