

ESTUDIO DE LOS EFECTOS DIRECCIONALES EN LA RUPTURA  
ELECTRICA DE KCl

Alonso Fernández

Instituto de Física U.N.A.M.

(Recibido: Noviembre 15, 1958)

RESUMEN

*El trabajo descrito fue realizado con objeto de buscar evidencia experimental que ayude a entender el fenómeno intrínscico de la ruptura eléctrica de sólidos, en particular de cristales con estructura cúbica iónica.*

*Es observada la orientación preferente de las trazas de ruptura con respecto a ciertas direcciones cristalográficas que en algunos casos difieren de la dirección del campo.*

*Se encontró que la rigidez eléctrica no es isotrópica en cristales sencillos de KCl y se hace notable una marcada relación entre esta caracte-*

*rística y las direcciones cristalográficas preferidas en el rompimiento eléctrico.*

*Las conclusiones se discuten en relación con algunas de las teorías propuestas para explicar el fenómeno.*

## INTRODUCCION

El fenómeno de la ruptura eléctrica intrínseca de sólidos no se ha entendido claramente aunque durante los últimos decenios se ha llevado a cabo una gran cantidad de trabajo en esta materia. La rigidez eléctrica y el efecto direccional de la trayectoria de partículas electrizadas responsables de la ruptura de sólidos tienen una significativa influencia en las teorías propuestas hasta hoy. El conflicto de criterios existente entre los mecanismos prepostulados por von Hippel<sup>1</sup>, Fröhlich<sup>2</sup> y Seitz<sup>3</sup> residen en gran parte en la energía inicial de los electrones que producen la ruptura eléctrica. Es posible relacionar dicha energía inicial con la rigidez eléctrica y el efecto direccional determinados experimentalmente.

M.E. Caspari<sup>4</sup> realizó pruebas con placas de cristales de alogenuros alcalinos en las que es muy probable que se hayan evitado descargas entre los electrodos y la superficie de las muestras. Por otra parte el mismo autor hizo experimentos en los que intencionalmente se produjeron descargas a través del ambiente para iniciar la ruptura eléctrica de las placas. Caspari concluye que sólo en presencia de descargas superficiales las trazas procedieron a lo largo de direcciones cristalográficas preferidas. Esto está en completo desacuerdo con las observaciones de Cooper, Crossart y Wallace<sup>5</sup> quienes obtuvieron trazas perfectamente definidas a lo largo de ciertas direcciones cristalográficas en muestras de KCl y NaCl probadas en condiciones que hacen pensar que no existieron descargas espúreas.

## TRABAJO EXPERIMENTAL

Con objeto de realizar el trabajo experimental en estructuras atómicas sencillas se crecieron cristales de KCl por el método de Kiropoulos<sup>6</sup>. Por este procedimiento se logró obtener cristales casi-perfectos del orden de 200 gramos que crecen alrededor de una semilla cuando ésta se introduce en la sal fundida y se regula adecuadamente el gradiente de temperatura en la semilla, la temperatura de la sal fundida y la velocidad de rotación y extracción de la semilla.

De dichos cristales se cortaron placas de aproximadamente  $2 \times 2 \times 0.35$  cm cortadas a lo largo de los planos naturales del cristal o en tal forma que el campo estuviera aplicado en la dirección cristalográfica (110). En una cara de las placas se maquinó una depresión esférica la cual era finamente pulida así como el plano opuesto (Fig. 1).

Previo trabajo experimental<sup>7</sup> muestra que la deformación mecánica en la estructura cristalina, producida durante el crecimiento de los cristales y preparación de las placas, incrementa el valor promedio de la rigidez eléctrica de KCl y un tratamiento térmico adecuado reduce dicho valor. Sobre estas bases se sugiere que la dispersión de valores de rigidez eléctrica se debe a defectos en la malla iónica que las muestras puedan tener en varios grados. Es posible que las imperfecciones en la malla aumenten la dispersión de los electrones incrementando la rigidez eléctrica.

Por esta razón las muestras usadas para los experimentos iniciales fueron sometidos a un proceso de templado que consiste en calentarlas, una vez totalmente terminadas, elevando la temperatura a un punto del orden de 0.9 la temperatura de fusión y dejarlas enfriar gradualmente durante un período de 12 horas.

Como el presente trabajo fue dirigido a buscar evidencia experimental que ayudara a entender el fenómeno intrínseco de la ruptura eléctrica de die-

léctricos sólidos, es evidente que la primera preocupación sería obtener una ruptura eléctrica libre de efectos extraños<sup>8</sup>.

La oquedad que se maquina en las placas produce una región del orden de 0.4 mm de espesor en la parte más delgada y las orillas de los electrodos quedan a una distancia del orden de 3 mm, reduciendo considerablemente la concentración de campo en los bordes (Fig. 1). Los electrodos fueron pintados con una suspensión de grafito en querosina lo cual asegura un íntimo contacto con la superficie de la muestra evitando la posibilidad de descargas a través del medio.

Para realizar las pruebas eléctricas fue de vital importancia proteger la muestra contra una destrucción excesiva por la disipación de energía cuando el cristal se rompe. El problema consistió en diseñar un interruptor de alto voltaje que interrumpiera la energía aplicada en el menor tiempo posible. Como resultado de las investigaciones al respecto, un circuito (próximo a publicarse) que permite divergir la energía aplicada a la muestra en un tiempo del orden de 0.5 a 1 microsegundo, probó ser satisfactorio.

Las pruebas fueron realizadas colocando la muestra entre dos electrodos esféricos y todo el sistema sumergido en aceite de silicón. A través de los electrodos esféricos fue aplicado voltaje continuo. El circuito protector fue conectado entre el generador de voltaje y la muestra.

## RESULTADOS

Los experimentos iniciales fueron realizados en 40 placas templadas, aplicando el campo en la dirección (110). El resultado mostró que en el 75 % de las placas probadas las trazas de ruptura procedían en la dirección (100) a 45 grados del campo aplicado (Fig. 2), todo el espesor del cristal o parte en la dirección (110) y el resto en la dirección (100) (Fig. 3), no obstante que la componente del campo en la dirección (100) es solamente  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  veces el campo en la

dirección (110). Otro grupo de muestras fueron preparadas en idéntica forma que el anterior pero en lugar de templarse se sometieron a severos esfuerzos mecánicos. En este caso la proporción se invirtió; de 24 placas probadas de igual manera, sólo 37 % presentaron parte de las trazas de ruptura a lo largo de la dirección (100) y el resto procedió en lo largo de la dirección del campo aplicado (110).

Para comparar los resultados se probaron 38 muestras, 17 templadas y 21 con esfuerzos, aplicando el campo en la dirección (100), se encontró que la ruptura eléctrica siempre procedía en la dirección del campo.

Con objeto de estudiar la rigidez eléctrica de KCl en todas las pruebas anteriores fueron medidos los voltajes de ruptura y el espesor de las placas.

El decisivo incremento en los valores de rigidez eléctrica de las placas que se habían sometido a esfuerzos mecánicos con respecto a las muestras templadas tanto en los grupos (110) como (100) (Fig. 4), soportan la proposición de que el tratamiento térmico reduce los esfuerzos internos y la rigidez eléctrica de las muestras. Sin embargo, investigaciones posteriores<sup>9</sup> mostraron que la aplicación del campo comprime suficientemente fuerte el cristal para producir deformaciones mecánicas en un 80 % de las muestras antes que la ruptura eléctrica tomara lugar; encontrando además que las placas que se rompían sin mostrar esfuerzos mecánicos, poseían bajos valores de rigidez eléctrica con respecto a las muestras que presentaban esfuerzos mecánicos antes de la ruptura. Por estas razones se considera válido el criterio propuesto por Calderwood, Cooper y Wallace de tomar los valores mínimos como los representantes de la rigidez eléctrica de cristales con estructuras iónicas casi perfectas.

Comparando los valores mínimos de los grupos de placas (110) y (100) se obtiene la siguiente relación:

$$\frac{E_{110 \text{ min}}}{E_{100 \text{ min}}} = \frac{0.73 \text{ MV/cm}}{0.54 \text{ MV/cm}} \approx \frac{1}{\cos 45^\circ}$$

Es de interés mencionar que las placas que mostraron valores bajos de rigidez eléctrica, exhibieron efecto direccional mientras que aquellas en las que la traza procedió en la dirección del campo, el valor de la rigidez eléctrica fue alto (Fig. 4).

## CONCLUSIONES

El hecho de que las muestras que exhibieron efecto direccional poseen baja rigidez eléctrica sugiere que los electrones que ocasionan el colapso de la rigidez eléctrica interaccionan con una malla iónica periódica<sup>7,9</sup>.

El efecto direccional de las trazas de ruptura hace pensar que electrones rápidos son responsables de la ruptura eléctrica en KCl. Esta proposición se hace apoyado en el comportamiento de electrones en campos periódicos<sup>10</sup> según la cual electrones lentos no tienen ninguna tendencia de moverse en alguna dirección cristalográfica particular.

Parece legítimo concluir que si los resultados experimentales van a ser comparados con una teoría de ruptura eléctrica en la cual se asume una estructura iónica regular, solamente los valores mínimos de rigidez eléctrica son significativos.

Fue observada una bien definida relación entre la dirección de las trazas y la rigidez eléctrica de las muestras. Las trazas de ruptura procedieron a lo largo de la dirección cristalográfica más débil cuando la componente del campo era mayor que la rigidez eléctrica en esa dirección. Esta observación no está de acuerdo con las realizadas por von Hippel<sup>11</sup> y sus colaboradores que han llevado a cabo experimentos para apoyar la creencia que la rigidez eléctrica es isotrópica; ellos explican que la isotropía es debida a la baja velocidad de los electrones que inician la ruptura.

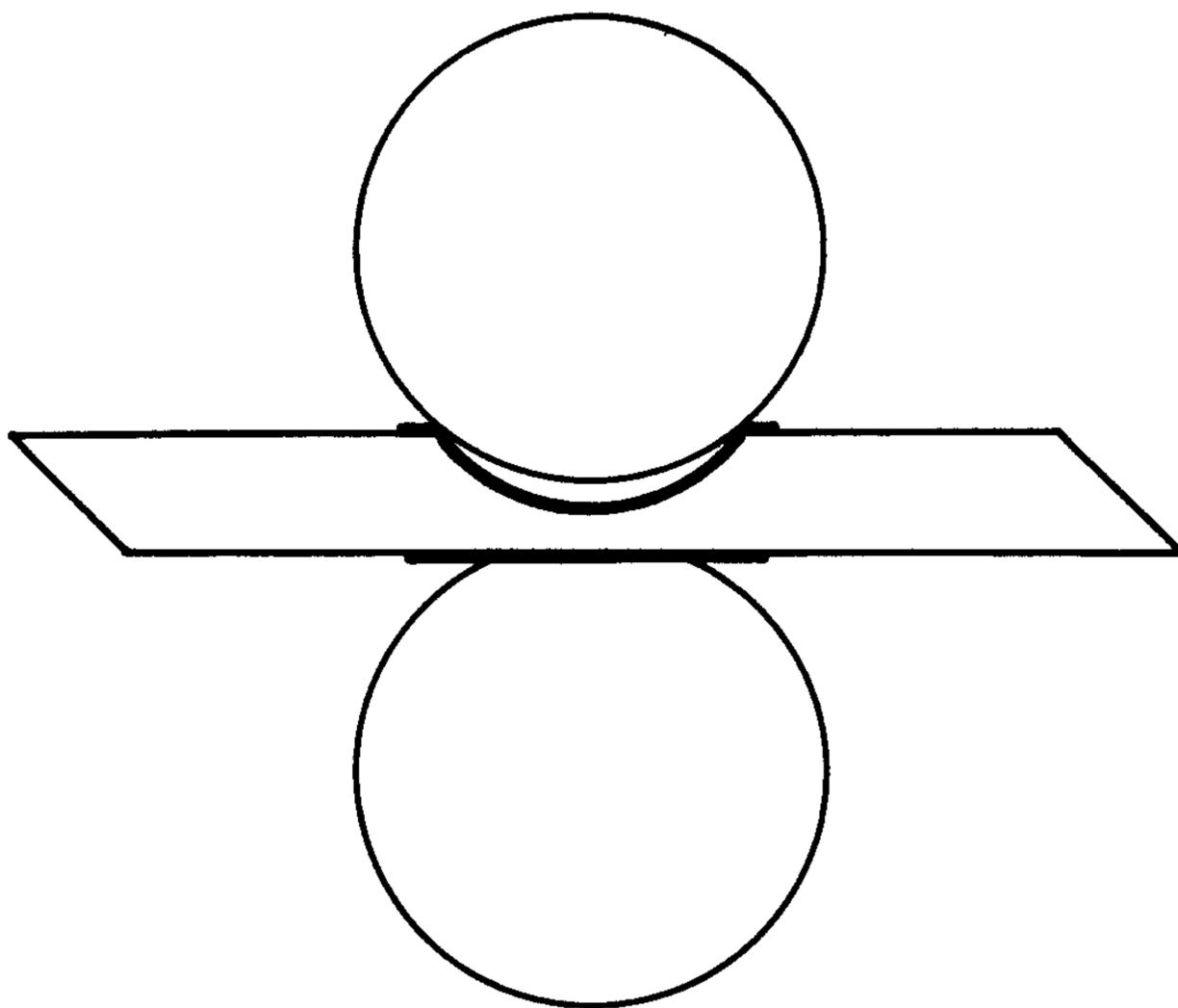
Por otra parte la teoría de Fröhlich, aunque no predice explícitamente la ausencia de isotropía en la rigidez eléctrica, si considera que los electro-

nes que inician la ruptura eléctrica tienen una longitud de onda del orden de magnitud de la distancia interatómica. En este caso es factible cierta interacción preferente de los electrones con los modos vibracionales a lo largo de las distintas direcciones cristalográficas y por lo tanto un efecto direccional de las trazas de ruptura puede ser esperado.

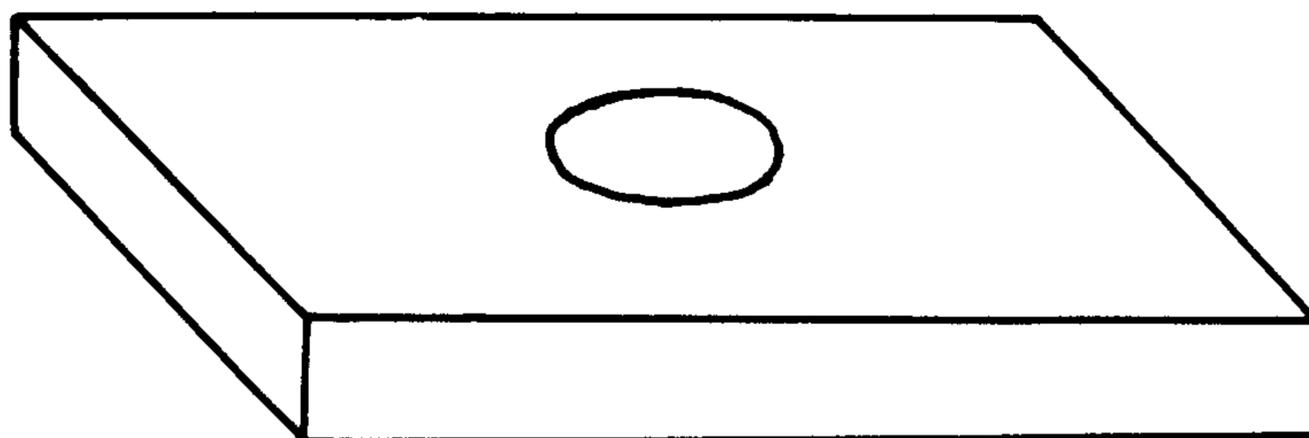
El trabajo experimental descrito fue realizado en la Universidad de Manchester y algunos resultados de esta investigación fueron publicados en *Proc. Phys.Soc.* **71**, 688 (1958).

### REFERENCIAS

- 1.- A. von Hippel, *J.App.Phys.* **8**, 815 (1937).
- 2.- H. Fröhlich, *Rep.Progr.Phys.* **4**, 218 (1937), *Proc.Roy.Soc A*, **188**, 521 (1947).
- 3.- F. Seitz, *Phys.Rev.* **76**, 1376 (1949).
- 4.- M.E. Caspari, *Phys.Rev.* **98**, 1679 (1955).
- 5.- R. Cooper, D.T. Grossart y A.A. Wallace, *Proc.Phys.Soc. B*, **70**, 169 (1957).
- 6.- S. Kyropoulos, *Zeitschrift für Physik* **63**, 849 (1950).
- 7.- J.H. Calderwood, R. Cooper, A.A. Wallace, *Proc.Inst.Elect.Engrs.* **100**, II A, 105 (1953).
- 8.- S. Whitehead, "Dielectric Breakdown of Solids" (1950).
- 9.- R. Cooper, A.A. Wallace, *Proc.Phys.Soc. B*, **76**, 1113 (1953).
- 10.- N.F. Mott y H. Jones "Properties of Metals and Alloys" (1936).
- 11.- A. von Hippel y J.W. Davisson, *Phys.Rev.* **57**, 156 (1940).

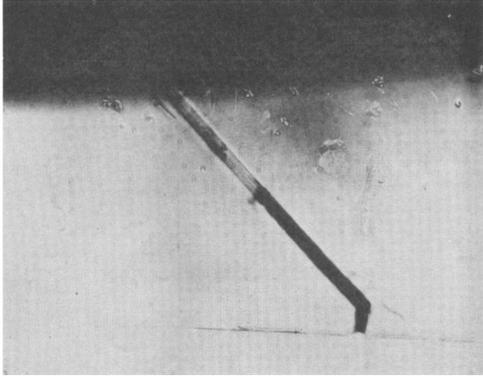


**ENSAMBLE DE PRUEBA**

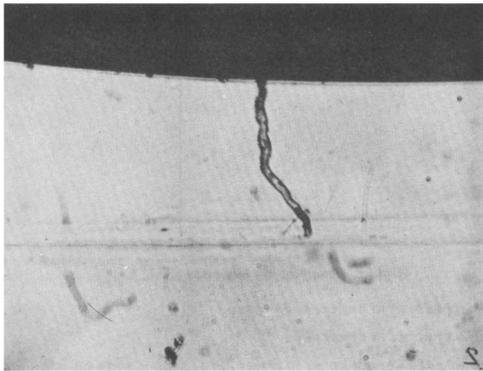


**MUESTRA**

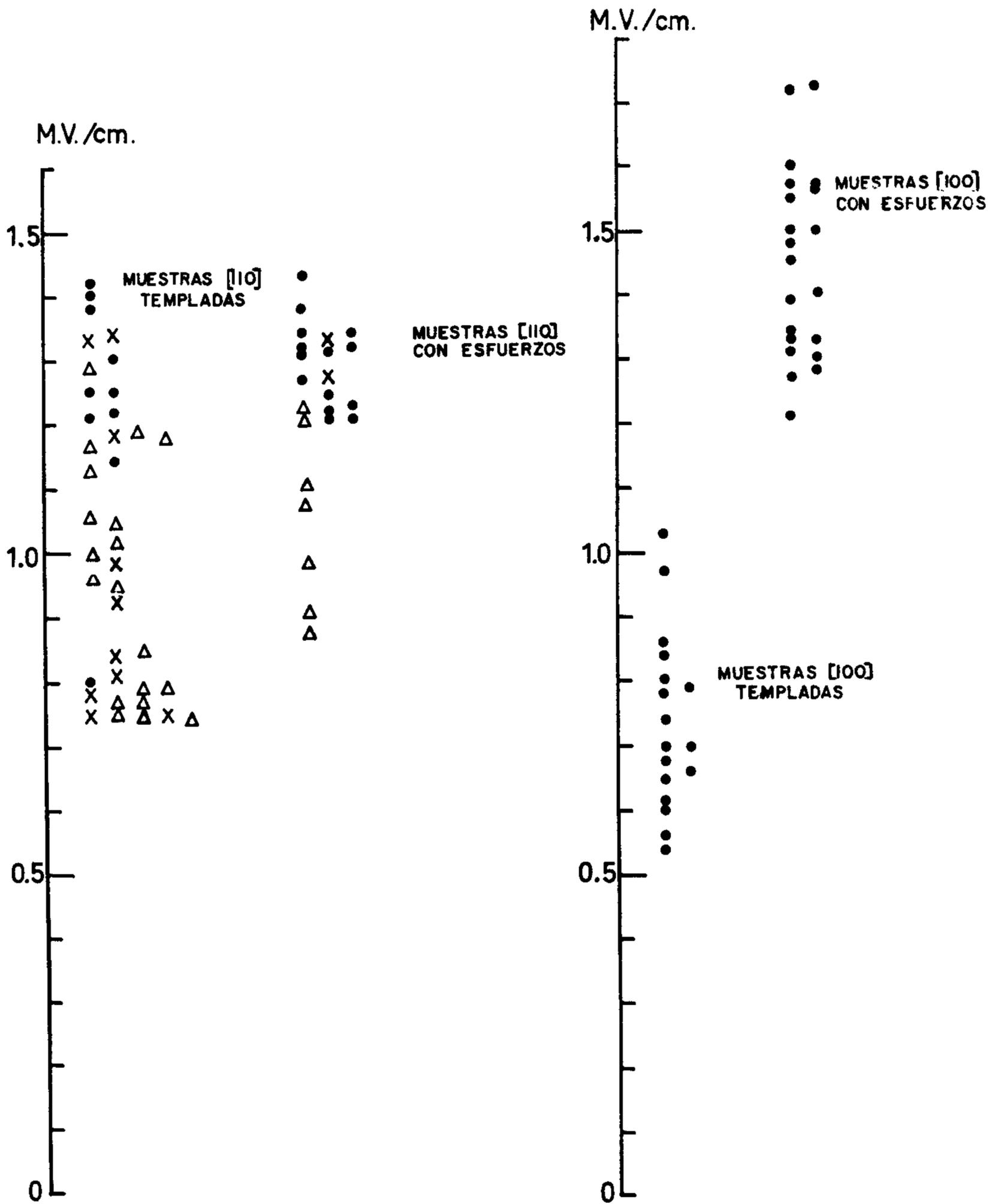
Figura 1.



**Figura 2.**



**Figura 3.**



Rigidez Eléctrica de Muestras de KCl

- Traza de ruptura en la dirección del campo
- △ Traza de ruptura en la dirección [ 100 ]
- x Parte de la traza de ruptura en la dirección [ 100 ] y parte en la dirección del campo.

Figura 4