

04.74.18

C.N.E.A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
NO 1	AÑO 1974

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
DEPENDIENTE DE LA PRESIDENCIA DE LA NACION

APLICACION DE LA FRACTOGRAFIA AL ANALISIS DE FALLA

M.Sarrate-M.R.Marrapodi-M.Ipohorski

VI Jornadas Metalúrgicas
I Jornadas Latinoamericanas
Sociedad Argentina de Metales
Buenos Aires, 20-26 Octubre 1974

I INTRODUCCION

La fractura se realiza a través de un proceso complejo que varía con cada material, y está influido fundamentalmente por el tipo de esfuerzo aplicado, las características geométricas de la muestra, y las condiciones de temperatura y velocidad de deformación. El objetivo de la fractografía es la determinación de los micromecanismos responsables de este proceso a través del estudio de las características geométricas de las superficies resultantes.

Existen actualmente numerosos trabajos en los cuales se describe a través de una vasta bibliografía el desarrollo que ha experimentado la fractografía desde sus comienzos hasta nuestros días. Las referencias se remontan al año 1722 (1), pasando luego por los trabajos pioneros de Martens, 1878, (2) y de Zappfe y Clogg (3), hasta llegar finalmente a los desarrollos más recientes de la microscopía electrónica de transmisión y de barrido. Henry y Plateau (4), hicieron una recopilación histórica muy completa sobre la evolución de la fractografía. Estos últimos autores también hacen mención de los trabajos de Martens, quien fue el primero en describir los "ríos" que caracterizan las fracturas por clivaje y detallan los trabajos de Zappfe y Clogg, quienes en la década 1940-1950 realizaron los primeros trabajos sistemáticos de fractografía óptica.

Con el advenimiento del microscopio electrónico de transmisión se pudieron estudiar detalles que no eran visibles en el microscopio óptico, a través de réplicas obtenidas a partir de las superficies de fractura. Numerosas publicaciones describen estos primeros resultados de fractografía electrónica. Tal vez el trabajo más completo es el "Electron Fractography Handbook" (5), que incluye un atlas conteniendo fractografías representativas de numerosos tipos de fracturas producidas en el laboratorio bajo condiciones preestablecidas. Más información de índole general sobre fractografía electrónica puede encontrarse en los artículos que aparecen en dos seminarios de ASTM (6,7) y varias recopilaciones sobre el tema (8 al 13), ver Fig.1 (a) y (b).

Los primeros resultados de fractografía utilizando técnicas de microscopía electrónica de barrido (ver Fig.2) fueron probablemente los publicados en 1959 por Tipper, Dagg y Wells (14) quienes comenzaron a estudiar las superficies de fractura producidas por clivaje en el hierro. Existe actualmente una numerosa bibliografía sobre técnicas generales de fractografía mediante microscopía electrónica de barrido especialmente referidas al estudio de

metales (15 al 19).

La microfractografía electrónica de barrido se ha convertido actualmente en una técnica indispensable para el estudio de las superficies de fractura involucradas en análisis de falla. En el presente trabajo se describe la aplicación de esta técnica al caso de rotura en una tubería de gas (*).

(*) El estudio de esta falla se detalla en el Informe "Análisis de falla en tubería de gas de la planta compresora General Cerri, Bahía Blanca"; realizado por M.Sarrate, L.Darnond, J.Fritzsche, L.Velo, E.Vassallo y J.C.Máscolo; Comisión Nacional de Energía Atómica, Departamento S.A.T.I., mayo 1973.

II MICROFRACTOGRAFIA OPTICA Y ELECTRONICA

Originalmente los estudios de superficies de fractura se hicieron mediante observaciones al microscopio óptico, pero ciertamente estos estudios no contribuyeron significativamente al esclarecimiento de los micromecanismos responsables de la fractura, objeto último de la fractografía, como ya lo hemos dicho. Además, las observaciones microscópicas se limitaban solamente a los casos en que las superficies de fracturas presentaban áreas planas relativamente grandes (4).

Con la introducción en el estudio de superficies de fractura del microscopio electrónico de transmisión, de alto poder de resolución y gran profundidad de campo, la fractografía se desarrolló rápidamente (1960 en adelante). La técnica utilizada se basa en la obtención de una réplica de la superficie a observar, ya sea mediante películas obtenidas por deposición directa de carbono o a través de una etapa intermedia que implica la preparación de una lámina plástica entre la superficie y la película de carbono. En el primer caso, la extracción de la réplica supone la destrucción de la superficie de fractura, mientras que en el segundo, la réplica plástica intermedia deja intacta la superficie original. Obviamente la resolución de la réplica directa de carbono es mayor. En el caso de superficies extremadamente rugosas se ha utilizado la llamada réplica de tres etapas (goma silicona/plástico/carbono), en la cual se pierden por supuesto todos los pequeños detalles. Por esta razón esta técnica se utiliza solamente como última alternativa para obtener algún tipo de imagen.

De todas maneras, el desarrollo de las técnicas de microscopía electrónica por transmisión permitió superar numerosas limitaciones de la microscopía óptica, aunque quedaban aún varios problemas por resolver. Probablemente los dos más importantes eran:

- a) el tiempo que requiere la preparación de todo tipo de réplica y la posibilidad de introducir artefactos durante el proceso de replicación, y
- b) la dificultad en la interpretación correcta de las imágenes obtenidas por transmisión, debido a las diferencias entre éstas y las imágenes ópticas.

La aparición en escala comercial de un nuevo tipo de instrumento, el microscopio electrónico de barrido, significó una tercera

etapa de incalculable valor en la evolución de la microfractografía. Este microscopio, que permite la obtención de imágenes directas de interpretación similar a las ópticas de todo tipo de superficies de fractura (20), permitió detectar en forma directa accidentes topográficos microscópicos que no habían sido visibles por ninguna de las técnicas mencionadas anteriormente. La resolución del microscopio de barrido, unos 150 Å, posibilitó relacionar más directamente estos rasgos topográficos con los micromecanismos responsables del proceso de fractura.

Digamos brevemente que un microscopio electrónico de barrido está constituido esencialmente por una unidad óptico-electrónica que genera un haz que incide y se desplaza sobre la muestra, una unidad de detección y amplificación de las señales que se originan sobre la superficie de la misma, y un sistema de visualización (tubo de rayos catódicos). Una serie de bobinas deflectoras hacen desplazar el haz de electrones sobre la muestra de manera de barrer una porción de su superficie, y la misma señal se aplica en forma sincronizada al tubo de rayos catódicos. De este modo existe una correspondencia punto a punto entre la superficie de la muestra barrida por el haz y la pantalla de observación. Si además se modula la intensidad del haz del tubo de rayos catódicos con la señal eléctrica correspondiente, por ejemplo a la cantidad de electrones secundarios emitidos por la muestra, en la pantalla se tendrá una imagen que se puede interpretar como si fuera una imagen óptica de la superficie iluminada lateralmente por una fuente luminosa (20).

Esta es una de las grandes ventajas de la microscopía de barrido: la imagen de electrones secundarios se puede interpretar como una imagen óptica de la superficie observada.

También se puede demostrar que un borde agudo, una protuberancia o un escalón sobre la superficie de la muestra aparecen como zonas brillantes, en cambio depresiones u hoyuelos aparecen en la micrografía electrónica de barrido como zonas más bien oscuras.

Otra de las ventajas del microscopio electrónico de barrido, que lo ha convertido en una poderosa arma de estudio de superficies de fractura, es la gran profundidad de campo. Esta es mucho mayor que en el caso óptico y varía con el aumento de la imagen. Por ejemplo, con una magnificación de 100 x la profundidad de campo es del orden de 1000 u, por lo tanto todos los puntos de una superficie con rugosidades de este orden aparecen en foco simultáneamente.

III TIPOS DE FRACTURA

Una clasificación moderna de los distintos tipos de fractura fué presentada por Pereira da Silva (21), proveniente de una combinación de las enunciadas por Pelloux y McMillan (22), Bughard y Davidson (23) y Pelloux y Beachem (26) en sus respectivos trabajos de revisión.

Según las características que se consideren existen diversas formas de clasificar las fracturas y éstas se describen a continuación:

1) Según la magnitud de la deformación plástica macroscópica (Fig.3):

- Fractura frágil, que se produce por una propagación rápida de la fisura después de poca o ninguna deformación plástica, ver Fig.4.
- Fractura dúctil, que se produce después de una extensa deformación plástica, caracterizándose por una propagación lenta de la fisura, generalmente a través de un proceso de formación y coalescencia de microcavidades, ver Fig.5.

2) Según la trayectoria de propagación de la fractura:

- Fractura intergranular: se produce cuando las fisuras se propagan a través de los bordes de grano.
- Fractura transgranular: las fisuras penetran al interior de los granos.

3) Según los micromecanismos responsables de la fractura:

- Fractura plástica: puesto que es el caso que nos interesa en el presente trabajo, este tipo de fractura se describe detalladamente más adelante.
- Fractura por clivaje: el clivaje es un proceso mediante el cual dos o más partes de un cristal se separan a lo largo de planos cristalográficos determinados. En el caso de metales siempre va acompañada de una cierta deformación plástica, ver Fig.6.
- Fractura por semi-clivaje: es un proceso semejante al de clivaje

pero en el cual no se ha encontrado todavía una relación definida entre los planos producidos y la estructura cristalina del metal.

- Fractura por fatiga: es la producida en materiales sometidos a tensiones alternadas.

IV ESTUDIO DE LAS CARACTERISTICAS GEOMETRICAS DE LOS HOYUELOS PRODUCIDOS DURANTE LA FRACTURA PLASTICA.

La fractura plástica incluye dos tipos de procesos: en el primero, la fractura es producida por una deformación plástica ininterrumpida y es consecuencia de un cizallamiento prolongado en planos de deslizamiento dentro de una región deformada plásticamente de un cristal, la que posteriormente se separa también por deslizamiento.

El otro proceso de fractura plástica es el más frecuente en metales y es producido por deformación y coalescencia de microcavidades. En el caso de aceros por encima de su temperatura de transición y aleaciones no ferrosas, la propagación de fisuras se produce por el modo llamado "dúctil" o "fibroso" de propagación (25) y que en este trabajo denominaremos simplemente como fractura plástica.

En todo metal policristalino normalmente existen pequeñas cavidades que se forman alrededor de una inclusión, un precipitado o una impureza. Al tensionarse el material durante el proceso de fractura, estas microcavidades se deforman, coalescen y crecen consecuentemente con la sollicitación a que está sometido dicho material, dando origen a cavidades de mayor tamaño denominadas hoyuelos (dimples en la literatura inglesa), ver Fig.7. Estos hoyuelos, que fueron observados por primera vez por Crussard y colaboradores (26), pueden tener aproximadamente forma de esfera o elipsoides de revolución alargados. En general, la forma depende de la distribución de las deformaciones plásticas específicas en las zonas donde estas cavidades crecen y coalescen, y el tamaño medio está relacionado con la microestructura y las propiedades mecánicas del material.

La influencia de las deformaciones plásticas específicas sobre las características geométricas de los hoyuelos fué estudiada por Beachem (27). En la Fig.8 se muestran los tres mecanismos de ruptura normalmente observados:

En la Fig. 8 (a) el estado de tensiones corresponde a la región que sufre estricción en un ensayo de tracción. Las tensiones que tienden a cizallar el material son despreciables. Existe solamente una tensión de tracción uniforme que da origen a la llamada Fractura normal. Se puede ver en la misma figura que las cavidades son equiaxiales y normales a la superficie de fractura resultante, siendo estas superficies imágenes especulares una de otra.

En la Fig. 8 (b) el estado de tensiones es tal que el material situado encima de las cavidades es cizallado respecto del material situado debajo de ellas, produciéndose de este modo una superficie de fractura oblicua en relación a la dirección de máxima tensión de tracción. Este mecanismo se denomina Fractura por cizallamiento o de corte. Puede notarse que en las dos superficies de fractura los hoyuelos tienen direcciones opuestas. La forma de los hoyuelos en este caso es más bien alargada y su intersección con la superficie de fractura resultante es aproximadamente una parábola.

En la Fig. 8 (c) se ilustra el mecanismo de Fractura por desgarramiento. El estado de tensiones es semejante al de la Fig. (a), salvo que la tensión de tracción no es uniforme sobre la sección de la probeta. En este caso las superficies de fractura son también imágenes especulares una de otra y la inclinación de los hoyuelos resultantes indica la dirección de propagación de la fisura.

Los hoyuelos producidos de esta manera presentan la misma forma parabólica de aquellos producidos en la fractura por cizallamiento, pero con una importante diferencia: en ambas superficies de fractura los hoyuelos apuntan en un mismo sentido, que es además el opuesto al sentido de propagación de la fractura. Precisamente este hecho permitió determinar el origen de la fractura en el caso que se describe en la Sección V.

Es interesante hacer notar que en el último caso las cavidades no coalescen unas con otras, sino que son interceptadas individualmente por la superficie que se origina durante el proceso de fractura.

También se ha observado la aparición de estos tres tipos de superficies de fractura en forma conjunta en lo que macroscópicamente parece ser una superficie producida por un solo tipo de fractura.

V APLICACION DE LAS TECNICAS MICROFRACTOGRAFICAS AL ANALISIS DE FALLA DE LA TUBERIA DE GAS DE GENERAL CERRI.

En el análisis de la falla producida en la tubería de la planta compresora de Gas del Estado en General Cerri, se aplicó la técnica de determinación del origen y dirección de propagación de la fractura mediante el estudio de las características morfológicas de los hoyuelos con el objeto de identificar la zona en la cual se inició la falla, ver Fig.8(c).

En la Fig. 9 se puede observar parte de los daños causados por el siniestro en la tubería de gas. Los estudios se hicieron en las partes de la tubería que salieron despedidas debido a la explosión y que no fueron por lo tanto afectadas por el incendio que se produjo posteriormente.

Se realizaron estudios macrográficos y micrográficos de las superficies de fractura de las probetas. Por los primeros (macrofractografía) se observó que en todos los casos se trataba de fractura de tipo dúctil con bordes a 45°.

Los estudios microfractográficos se hicieron mediante el microscopio electrónico de barrido y permitieron identificar la dirección de propagación de fisuras y ubicar la zona de iniciación de la falla. Se cortaron probetas que contenían la superficie de fractura a analizar y se las sometió a una limpieza previa con un solvente adecuado que permite la eliminación de la capa de óxido sin que se modifiquen las características fractográficas.

Como el tipo de sollicitación a que fué sometida la tubería fué de desgarramiento se generaron en la superficie hoyuelos alargados de forma parabólica cuyo vértice apunta hacia el origen de la fractura. En la Fig. 10 se muestran dos micrografías tomadas en una de las superficies de fractura y en las cuales se observan los hoyuelos que indican la dirección de propagación de las fisuras.

En la Fig. 11 se muestra esquemáticamente un trozo de tubería donde se produjo la ruptura indicándose con flechas el sentido de propagación de las fisuras. Se puede ver en la misma figura que uno de los puntos en los cuales se originaron fallas es el señalado con la letra A.

Como verificación de la técnica empleada se realizó en el laboratorio una experiencia de fractura de una pieza de un acero al carbono (0.2-0.3% de carbono). La probeta tenía la forma indicada en la Fig. 12. Se hizo una entalladura a 45°, tal como se indica

en la misma figura, con el objeto de obtener una superficie de fractura similar a las observadas en la tubería estudiada (con bordes a 45°).

Se observó en el microscopio de barrido la superficie de fractura resultante, obteniéndose imágenes como las indicadas en las Fig. 13 (a) y (b). En todos los casos el sentido de inclinación de los hoyuelos respecto de la superficie indicó correctamente el sentido de propagación de la fractura.

Se concluye por lo tanto que la técnica descrita en el presente trabajo es aplicable satisfactoriamente al análisis de falla, permitiendo determinar zonas de iniciación y propagación de las fracturas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas y al Dr. Juan H. Tramezzani, Director del Instituto de Neurobiología, por las facilidades otorgadas para el uso del microscopio electrónico de barrido y a los señores C. Gómez Cores y J.C. Máscolo por su colaboración en las experiencias de fractura realizadas en el laboratorio.

Desean reconocer asimismo a los señores P. Nieto y F. Segovia por el trabajo fotográfico realizado.



BIBLIOGRAFIA

- 1) REAMER, "L'art de convertir le fer en acier", Paris (1722).
- 2) MARTENS, A., "The Microscopical Examination of Iron", Z.Ver.dent. Ing., Vol.21, (1878), p.11.
- 3) ZAPPE, C.A. & CLOGG, M., "Fractography, a New Tool for Metallurgical Research", Trans.A.S.M., Vol.34, (1945), p.71.
- 4) HENRY, G. & PLATEAU, J., La Microfractographie, Institute Recherches de la Siderurgie.
- 5) PHILLIPS, A., KERLINS, V. & WHITESON, B.V., "Electron Fractography Handbook", AFML-TR-64-416, Air Force Materials Laboratory, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, January (1965).
- 6) Electron Fractography, ASTM STO 436, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pa. (1968).
- 7) Electron Microfractography, ASTM STP 453, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pa. (1968).
- 8) BURGHARD, H.C. & DAVIDSON, D.L., "Fracture Mechanisms and Fracture Surface Topography", Proceedings of the First International Conference on Fracture, Sendai, Japan, Sept.(1965), pp.571-596.
- 9) WARKE, W.R. & McCALL, J.L., "Using Electron Microscopy to Study Metal Fracture", SAE Paper 828 D, Society of Automotive Engineers, March (1964).
- 10) WARKE, W.R. & McCALL, J.L., "Fractography Using the Electron Microscope", ASM Tech.Rept., N°W-3-2-65, American Society for Metals, Feb.(1965).
- 11) McMILLAN, C. & PELLOUX, R.M.N., "The Analysis of Fracture Surfaces by Electron Microscopy" Boeing Report D 1-82-0169, May (1962).
- 12) BEACHEM, C.D.; "Electron Fractographic Studies of Mechanical Fracture Processes in Metals", J.Basic Engineering, June (1965), pp.299-306.
- 13) BEACHEM, C.D., "An Electron Fractographic Study of the Mechanisms of Ductile Rupture in Metals" NRL Report N°6875, U.S.Naval Research Laboratory, Dec. (1962).

- 14) TIPPER, C.F., DAGG, D.I. & WELLS, O.C., "Surface Fracture Markings on the Alpha Iron Crystals", J.Iron and Steel Institute, Oct.(1959), pp.133-141.
- 15) MENY, L., MAILLARD, A., HENRY, G., CHAMPIGNY, M. & LEGRAND, J., "Microfractographic Applications of Conventional and Scanning Electron Microscopes", Metaux-Corrosion-Ind., Vol.45, N°542, Oct.(1960), pp.343-368.
- 16) LIFSHIN, E., MORRIS, W.G. & BOLON, R.B., "The Scanning Electron Microscope and its Applications in Metallurgy", J.Metals, Vol.21, N°12, Dec.(1969), pp.43-50.
- 17) ASHBURY, F.E. & BAKER, C., "Metallurgical Applications of the Scanning Electron Microscopes", Metal and Materials, Vol.1, N°10, Oct.(1967), pp.323-328.
- 18) ALMOND, E.A., KING, J.T. & EMBURY, J.D., "Interpretation of SEM Fracture Surface Detail Using a Sectioning Technique", Metallography, Vol.3, N°3, sept.(1970), pp.379-382.
- 19) McCALL, J.L., "Fracture Analysis by Scanning Electron Microscopy", Metals and Ceramics Information Center, MCIC Report, Dec.(1972) MCIC 72-12.
- 20) IPOHORSKI, M. y MARRAPODI, M.R., "Microscopía Electrónica de Barrido", Comisión Nacional de Energía Atómica, (1973).
- 21) PEREIRA DA SILVA, P.S.C., Metalurgia, Vol.27, N°166, (1971).
- 22) PELLOUX, R.M.N. & McMILLAN, J.C., 1st.Int.Conf. on Fracture, Sendai, (1967).
- 23) BUGHARD, Jr, H.C. & DAVIDSON, D.L., 1st.Int.Conf. on Fracture, Sendai, (1967).
- 24) BEACHEM, C.D. & PELLOUX, R.M.N., ASTM STP 381, (1964), p.210.
- 25) HAHN, G.T., "Mecánica y Metalurgia de la Fractura", Comisión Nacional de Energía Atómica.
- 26) CRUSSARD, C., BOROINE, R., PLATEAU, J., MORRILLON, Y. & MATRAY, F., J.I.S.I., Vol.183, (1956), p.146.
- 27) BEACHEM, C.D., ASM Trans.Quart., Vol.56, (1963), p.318.

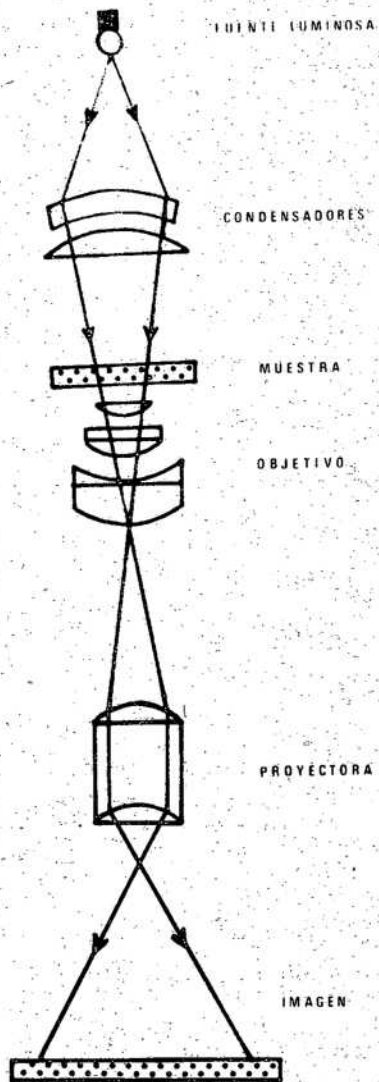


Fig.1(a) Esquema del funcionamiento de un microscopio óptico.

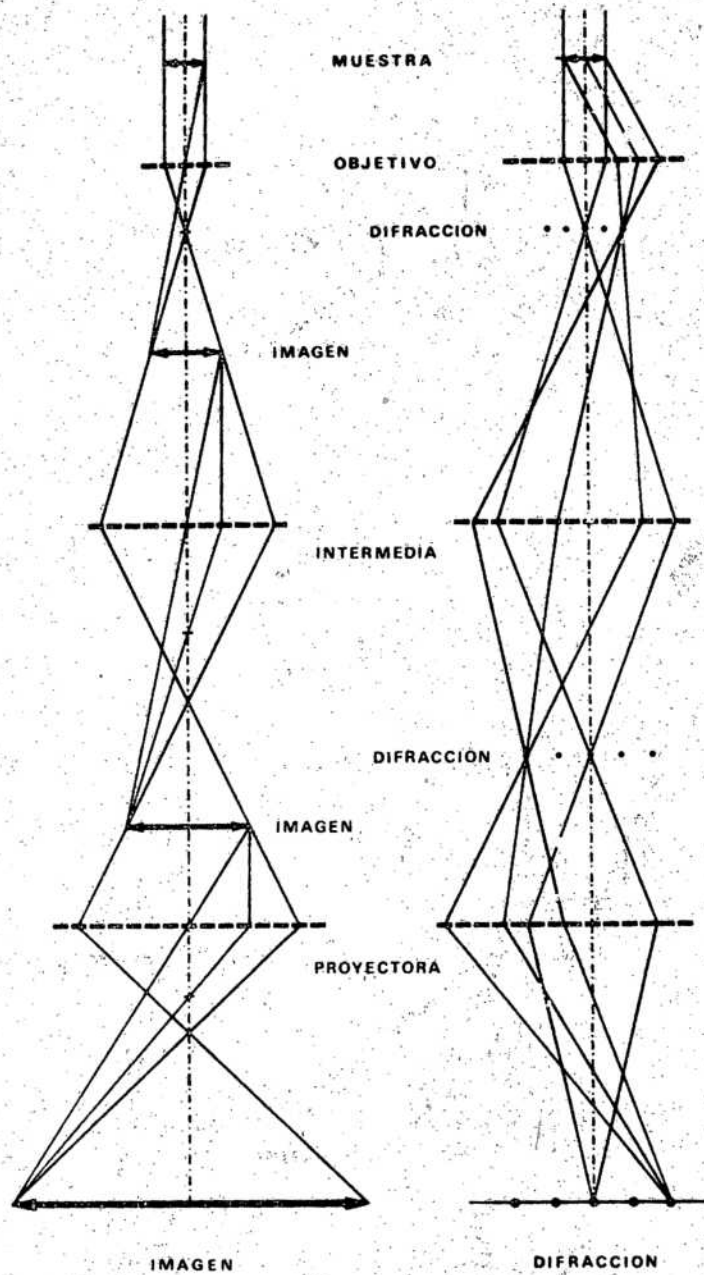


Fig.1(b) Esquema del funcionamiento de un microscopio electrónico de transmisión.

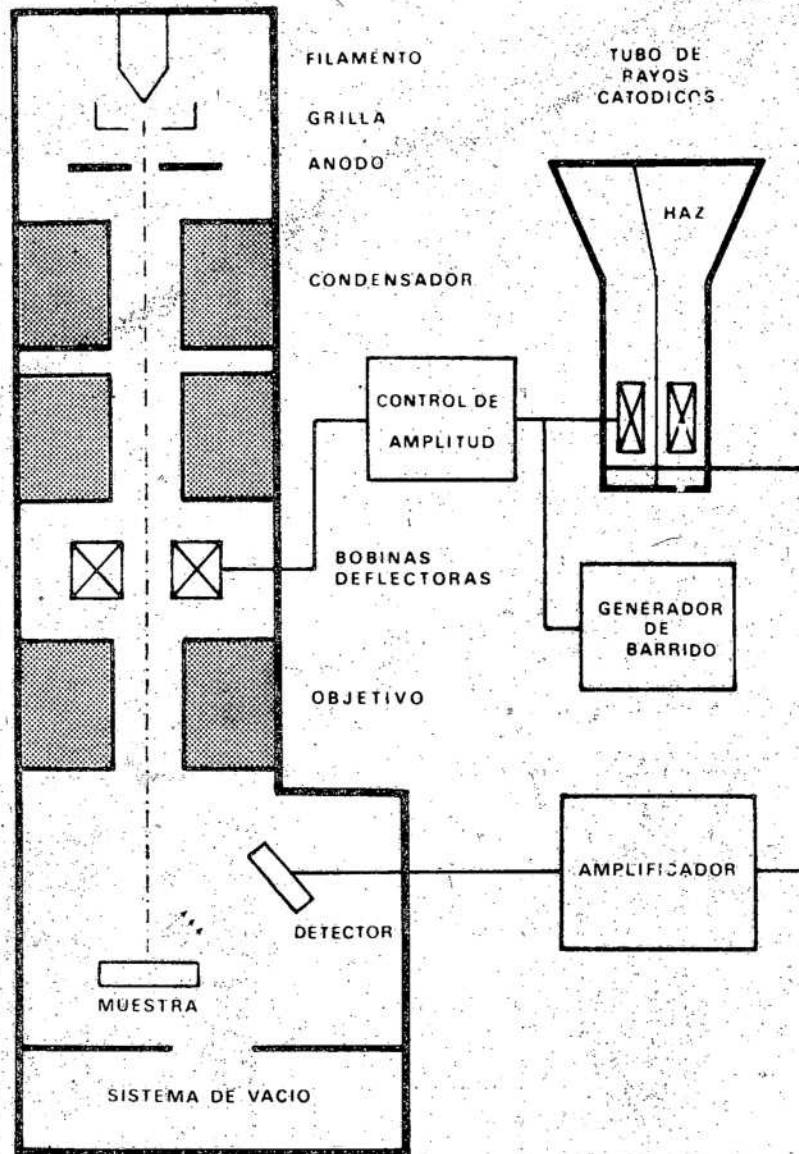


Fig.2 Esquema del funcionamiento de un microscopio electrónico de barrido.

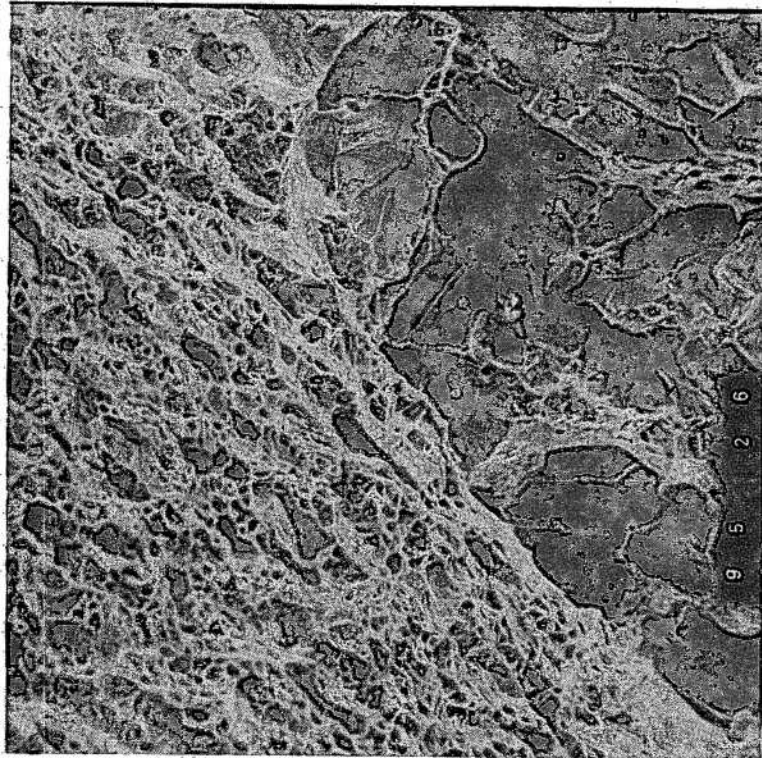


Fig.3 Micrografía electrónica de barrido de la superficie de fractura de un acero sometido a un ensayo Charpy, en la cual se puede observar las superficies características de las fracturas dúctil y frágil. $M = 500 \times$



Fig.4 Micrografía de una superficie de fractura frágil en acero obtenida con el microscopio electrónico de barrido. Nótese las superficies de clivaje y ríos característicos de este tipo de fractura. M = 1500 x

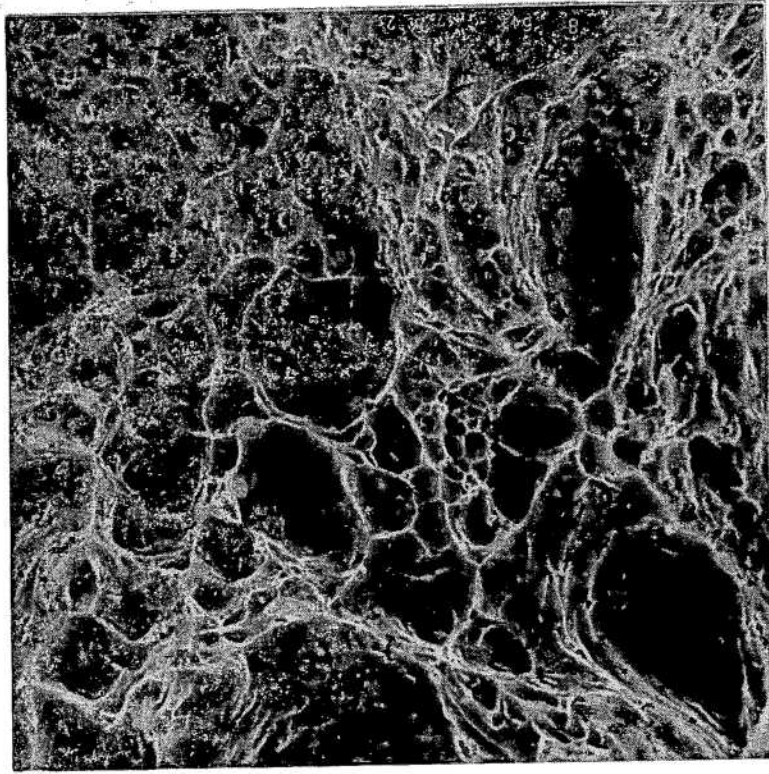


Fig. 5 Superficie de fractura dúctil de un acero obtenida por microscopía electrónica de barrido. M = 2000 x

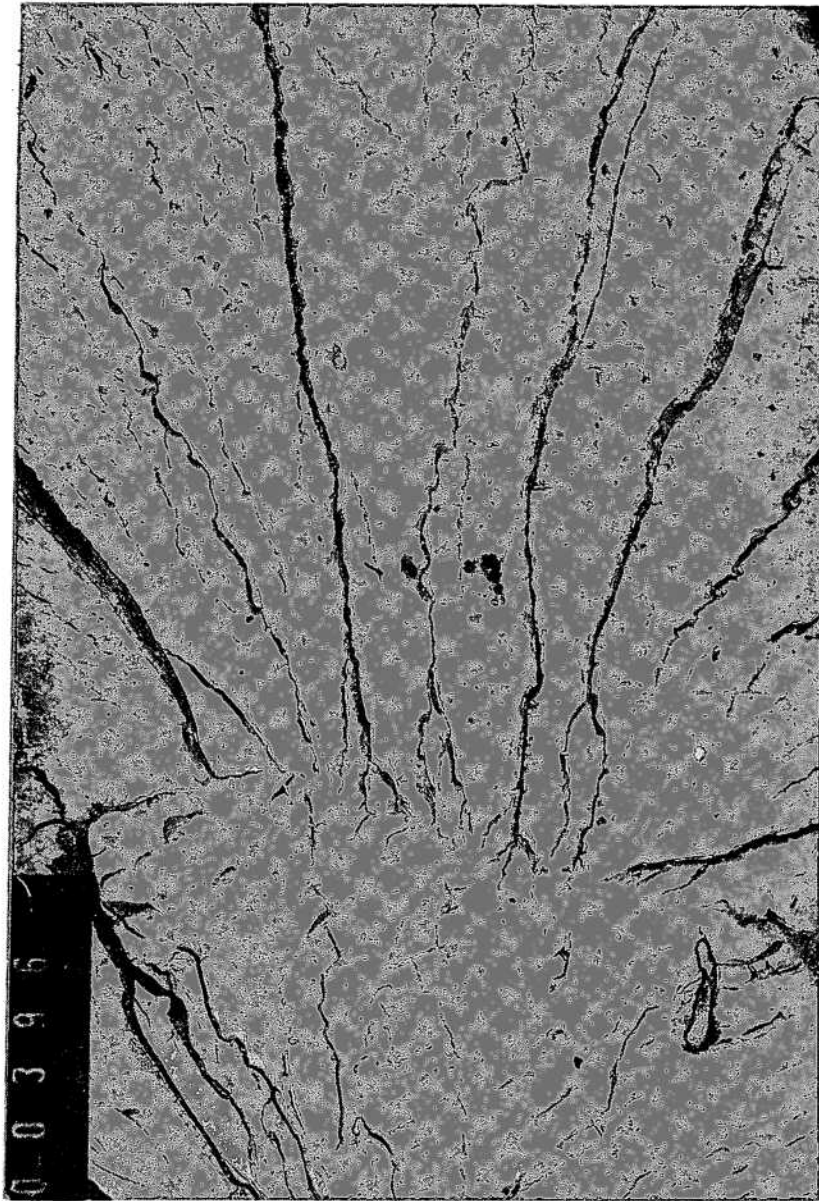
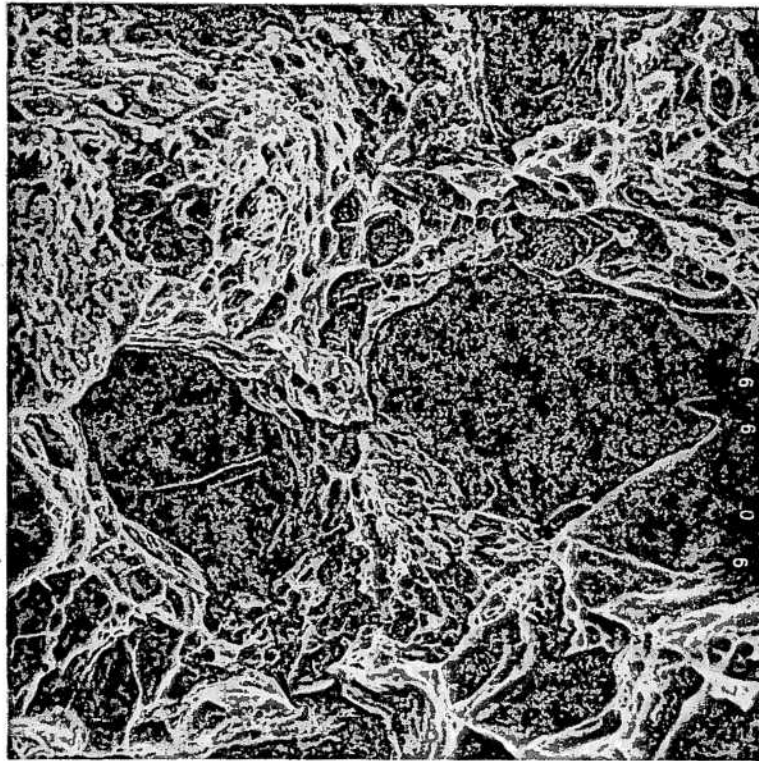
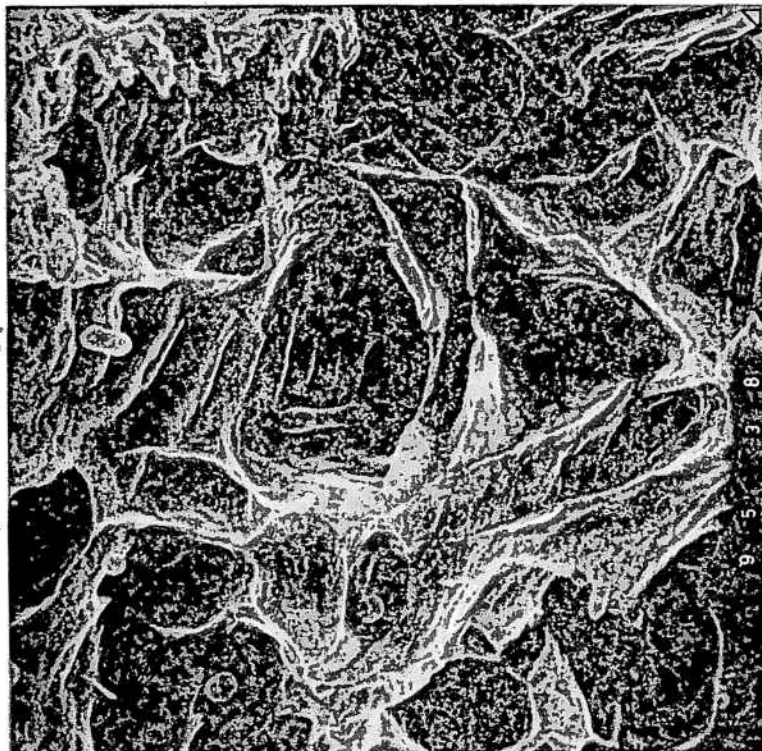


Fig.6 Réplica de dos etapas (plástico/carbono) sombreada con oro de una superficie de fractura frágil de acero, obtenida en el microscopio electrónico de transmisión. Se observan los "ríos" típicos de la mayoría de las fracturas por clivaje. La dirección y el sentido de propagación de una fractura de este tipo puede de terminarse localmente por la observación de la intersección de estos ríos. M = 6000 x



(a)



(b)

Fig.7 (a) Micrografía electrónica de barrido de la superficie de fractura de un acero, en la cual se observan los hoyuelos característicos asociados a la fractura dúctil.
M = 1500 x
(b) idem. M = 2000 x

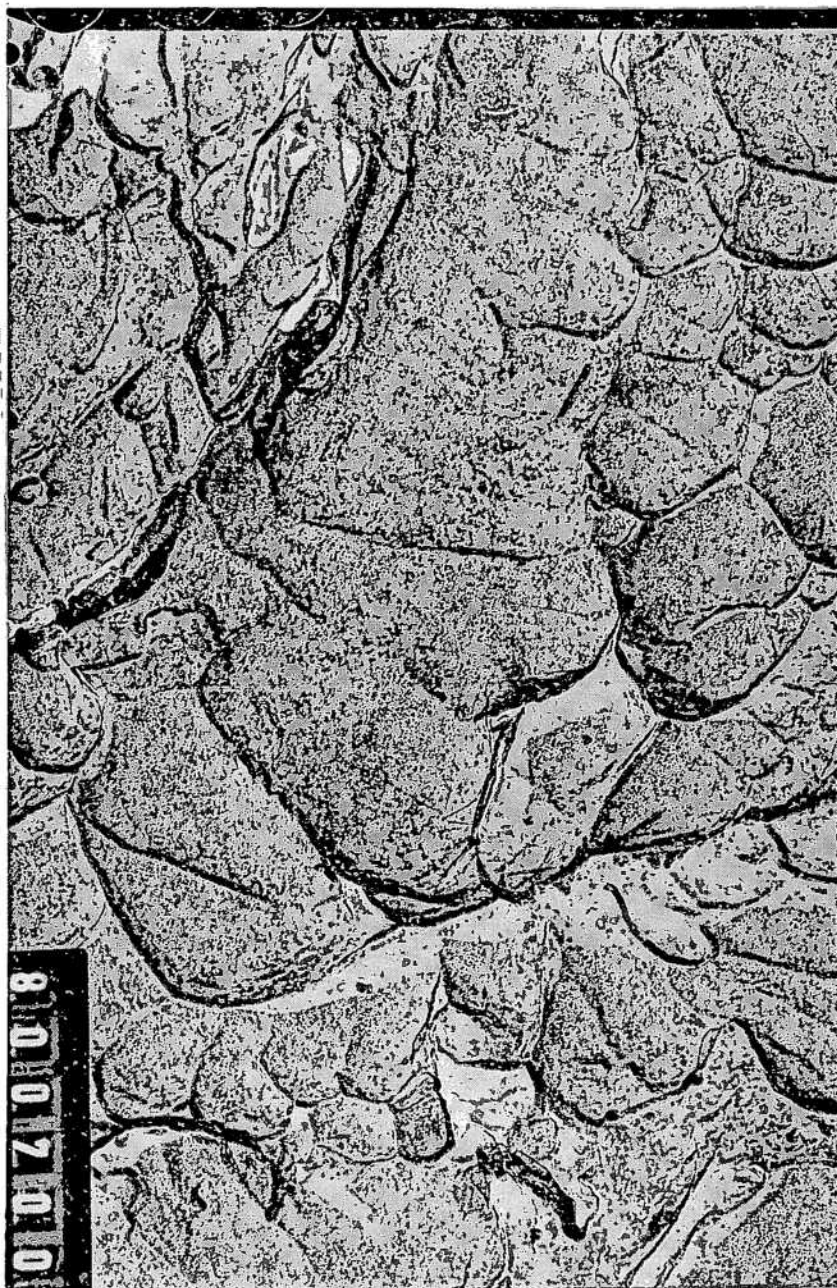


Fig.7(c) Micrografía e electrónica de transmisión obtenida a través de una réplica de doble etapa (plástico/carbono) sombreada con oro. Se observa el contraste debido a los hoyuelos de fractura dúctil. Compárese con las figuras (a) y (b). M = 6000 x

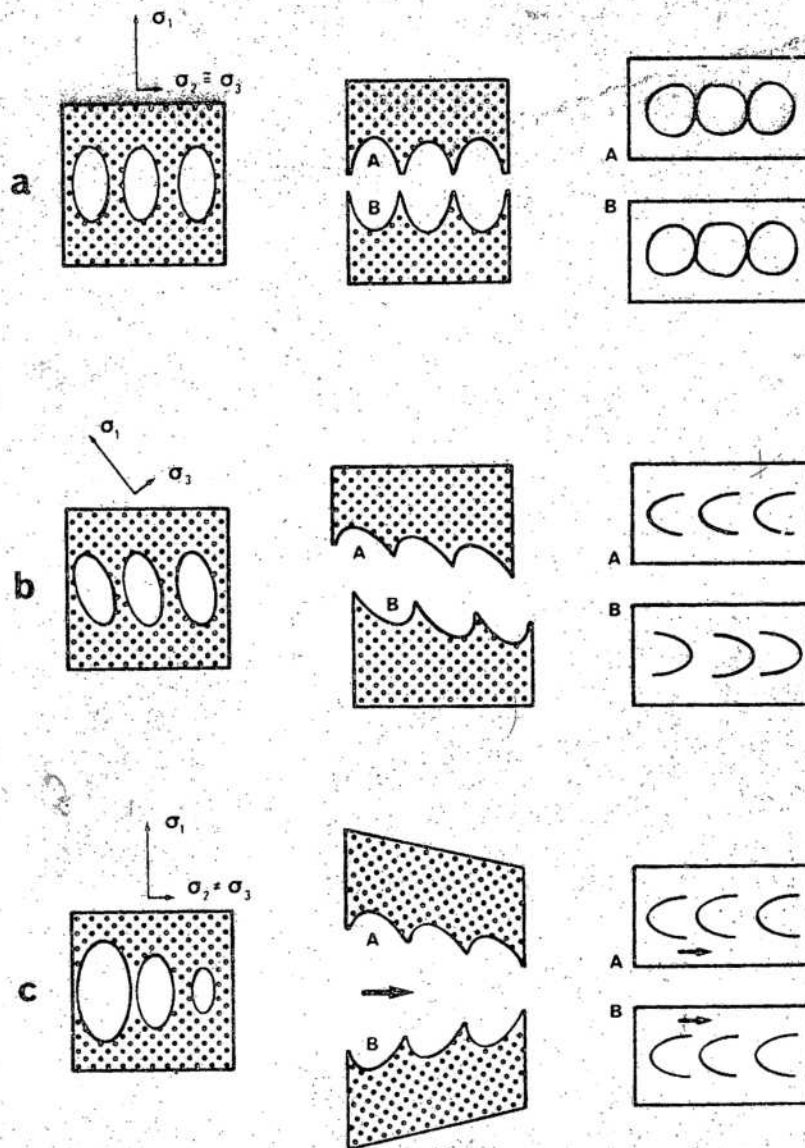


Fig.8 Mecanismos de fractura plástica y su influencia en la morfología de los hoyuelos.

(a) Fractura normal

(b) Fractura por cizallamiento

(c) Fractura por desgarramiento

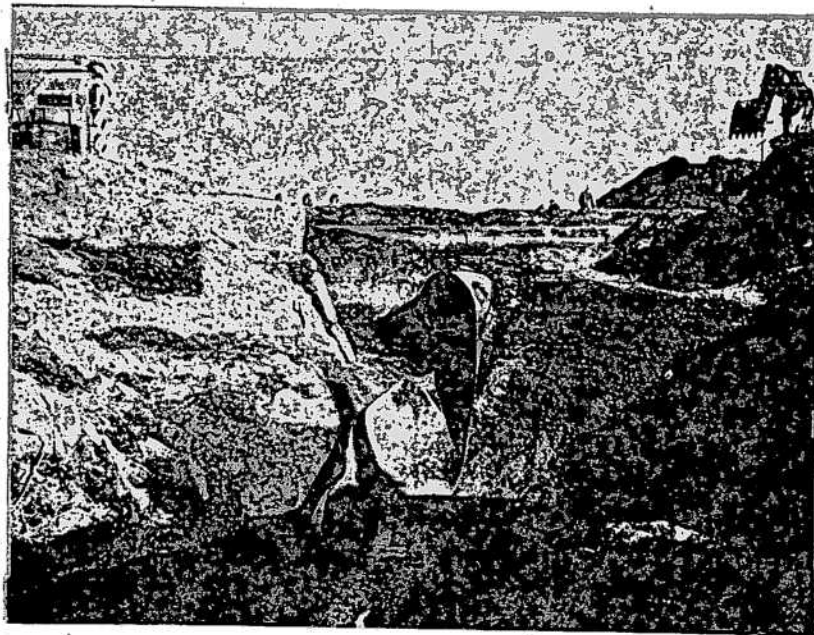
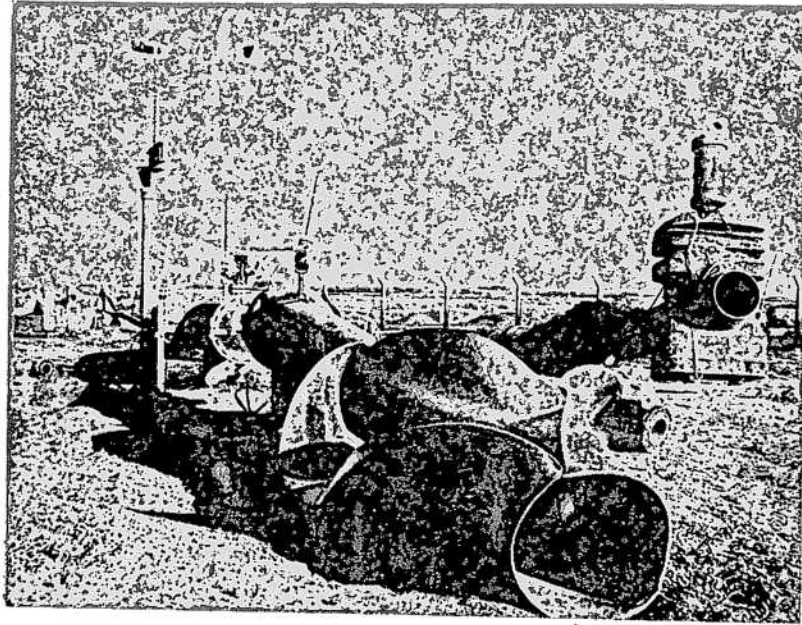
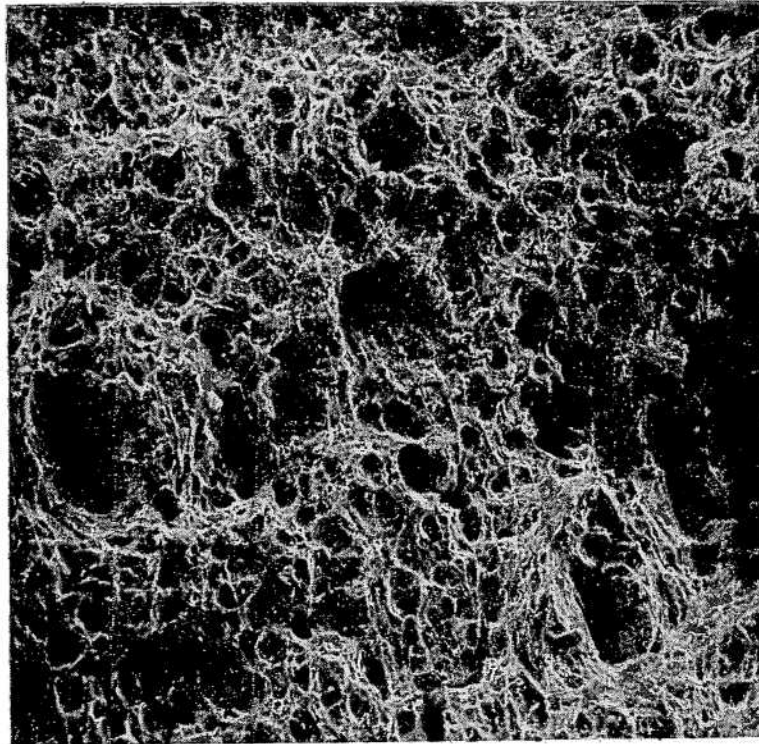
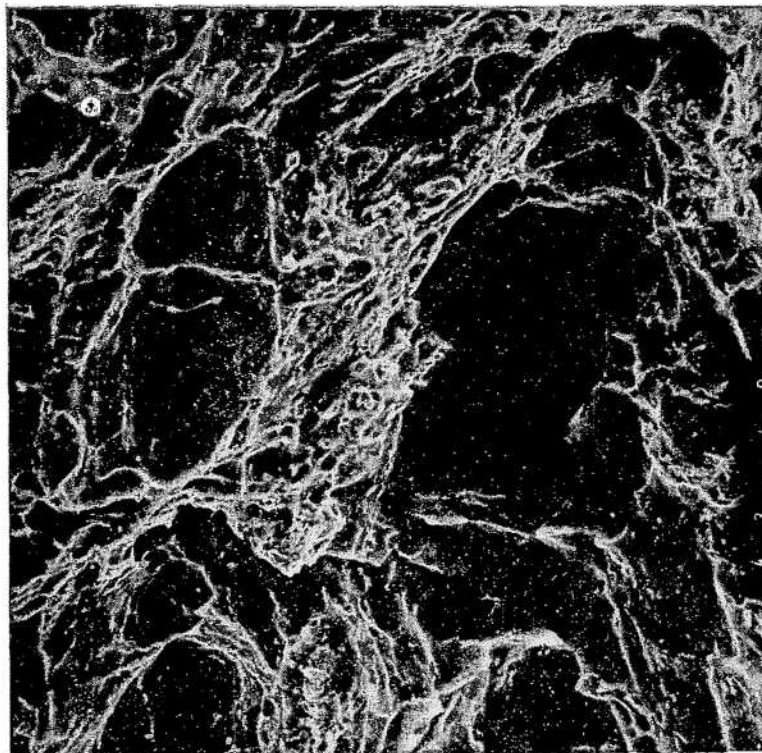


Fig.9 Aspecto de la tubería de gas en el lugar del siniestro.



(a)



(b)

Fig.10 Micrografías electrónicas de barrido tomadas en la superficie de fractura de la tubería de gas examinada. La inclinación de los hoyuelos respecto de la superficie indica claramente la dirección de propagación de la fisura y por lo tanto la zona de iniciación de la fractura. (a) $M = 100 \times$; (b) $M = 1000 \times$
Foto: E. Vassallo

ESQUEMA DE LA ROTURA EN EL
TRAMO 1

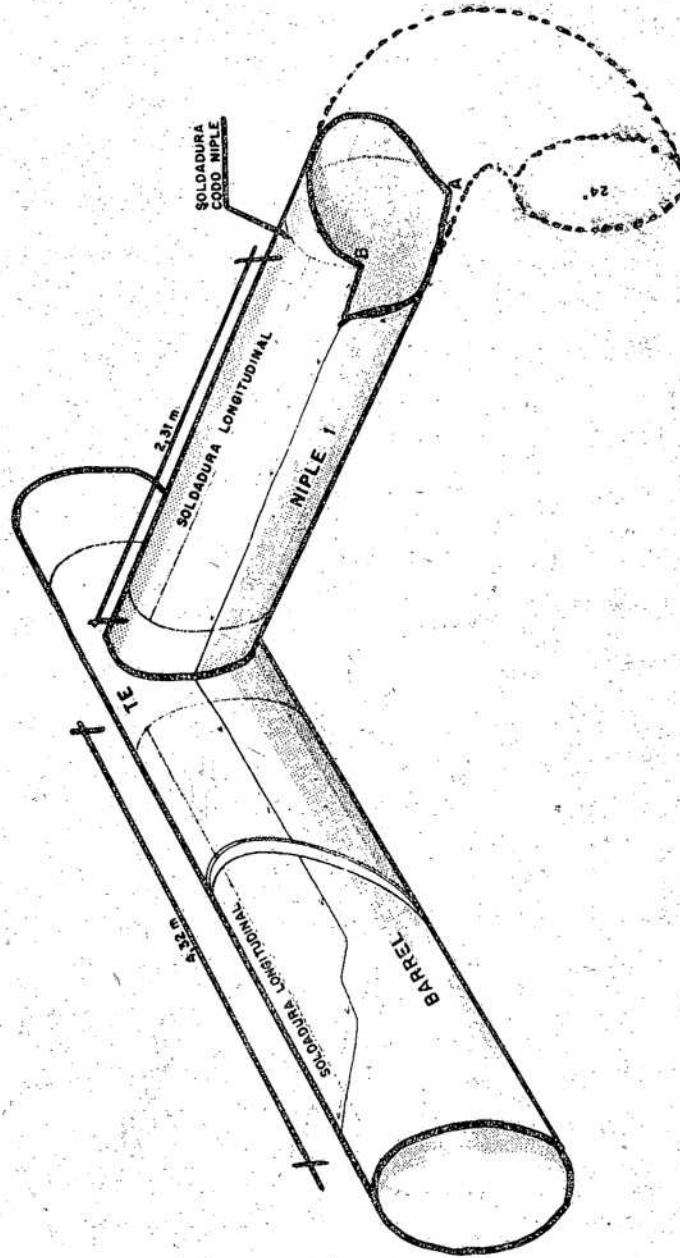


Fig.11 Esquema de una parte de la tubería donde se produjo la fractura. Las flechas indican el sentido de propagación de las fisuras, determinado mediante las observaciones en el microscopio electrónico de barrido. El punto A señala una zona de iniciación de falla.

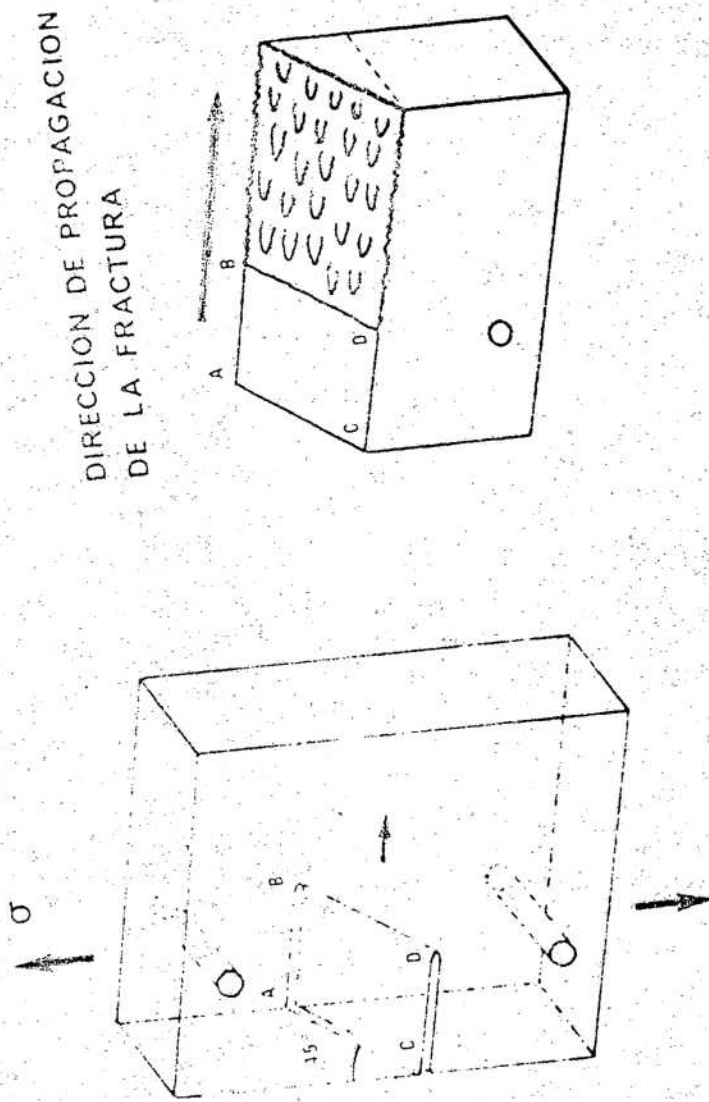
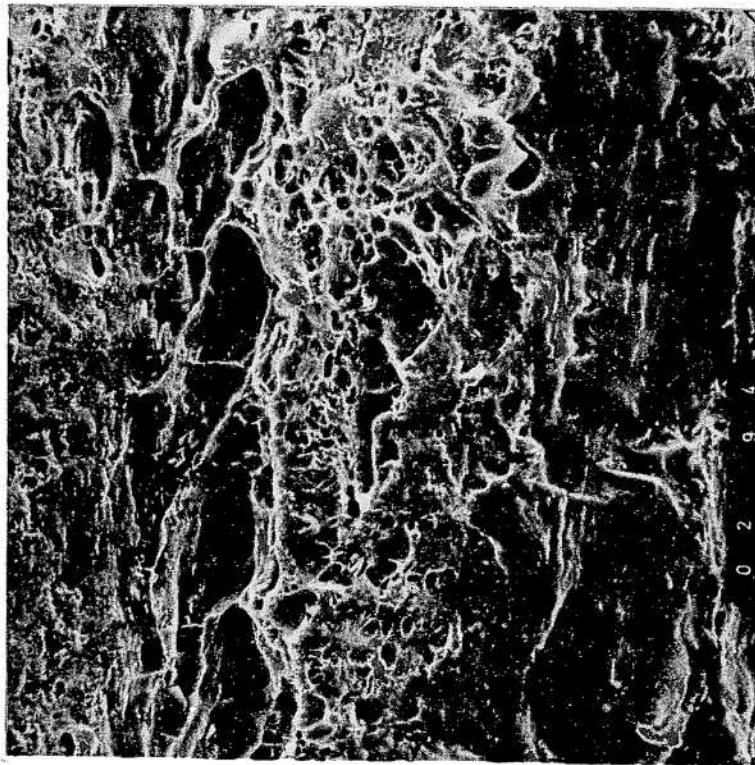
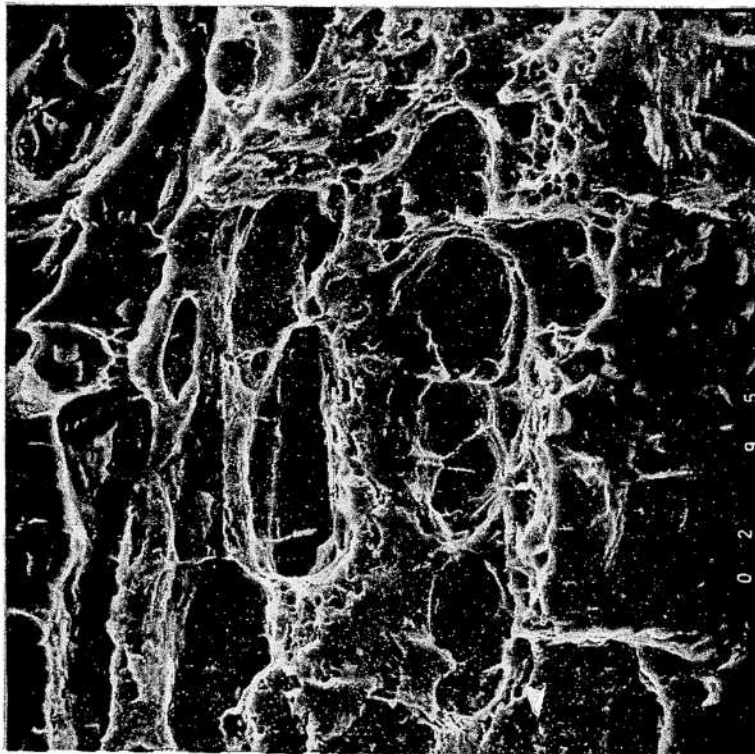


Fig.12 Esquema de una probeta de acero fracturada en el laboratorio, a la cual se le practicó una entalladura de modo de obtener una superficie de fractura con bordes a 45°. La probeta se traccionó de manera de producir una fractura por desgarro.



(a)



(b)

Fig.13 Micrografías electrónicas de barrido de la superficie de fractura de la probeta de acero fracturada en el laboratorio. Las flechas señalan la dirección de propagación de la fisura, que coincide con la dirección en que se fracturó dicha probeta. (a) $M = 1000 \times$; (b) $M = 1000 \times$