

REFLEXIONES SOBRE FALLOS EN TUBERIAS DE HORMIGON PRETENSADO (I)

JOSE CLIMENT BELTRAN

Laboratorio Central de Estructuras y Materiales (CEDEX)

1. INTRODUCCION

El empleo constante de los materiales por el hombre, para satisfacer sus necesidades, es una característica a lo largo de su devenir histórico; empezó con las piedras talladas, objetos rudimentarios de fundición, bronce, etc. que ha dado lugar a las diferentes eras cronológicas de la historia: edad de piedra, edad de hierro y edad de bronce. Actualmente dispone de una sofisticada serie de aleaciones para realizar las más comprometidas exigencias dentro del campo de la tecnología moderna.

Cada aplicación concreta de un determinado material, como pieza o elementos mecánicos, etc., requiere previamente un conocimiento de sus propiedades mecánicas, físicas, químicas, etc., para que pueda ser cumplida con normalidad la función que se le ha encomendado; sin embargo, la experiencia nos ha enseñado que estos parámetros de diseño, basados exclusivamente en ensayos convencionales, no bastan, pues cuando existe la posibilidad de acciones conjuntas de tensión mecánica y medios ambientales, aparece en el problema otros aspectos más sutiles que pueden producir roturas o fallos en los mismos. Por ejemplo: pequeñas alteraciones superficiales, junto con una humedad ambiental, que generalmente no se ha considerado en el proyecto, hace que la tensión de rotura de un acero de alta resistencia quede mermada en un 50 % (aprox.) al cabo de unos días, destruyendo así el esquema de funcionamiento del elemento mecánico.

La corrosión metálica es un problema que tiene planteado tanto la industria química como la ingeniería de proyectos, ya sea de Obras Públicas, como otra cualquiera. En el Primer Congreso Nacional de Corrosión y Protección se estimaba que las pérdidas económicas causadas por la corrosión metálica ascendían a 30-75 millones de ptas/año (1). Actualmente esta cifra se ha incrementado a 200.000 millones anuales (2).

Dentro del amplio campo de la corrosión metálica está la denominada corrosión fisurante bajo tensión (c.f.b.t.). Aparte de los detalles específicos relacionados con su exacta definición, pues hay mucha confusión terminológica, véase:

- Season cracking (agrietamiento estacional).
- Caustic embrittlement (fragilidad caústica).
- Intergranular corrosion (corrosión intergranular).
- Intergranular stress corrosion cracking (agrietamiento intergranular por corrosión y tensión).
- Transgranular stress corrosion cracking (fisuración transgranular por corrosión y tensión).
- Stress assisted intergranular cracking (fisuración intergranular asistida por la tensión).
- Delayed failure (fallo diferido, rotura diferida).
- Stress corrosion cracking (fisuración por corrosión y tensión).
- Anodic dissolution stress cracking (fisuración por disolución anódica y tensión).
- Active path corrosion (corrosión por caminos activos).
- Strain assisted corrosion (corrosión activada por la deformación).
- Hydrogen assisted cracking (fisuración producida por hidrógeno).
- Hydrogen embrittlement (fragilidad por hidrógeno).
- Environmentally induced fracture (fractura inducida por el medio).

Por tanto, podemos decir que si la corrosión simple es un problema, mayor aún puede ser cuando existen tensiones en el elemento metálico del tipo que sean. La rotura producida por la c.f.b.t. se presenta a tensiones de trabajo que están por debajo de la tensión de proyecto, es decir, bastante inferiores al límite elástico convencional del material en un ensayo de tracción. Anteriormente se

dijo que la corrosión simple es gravosa económicamente, pero una simple inspección puede revisar una pieza y sustituirla. Aparte del aspecto económico que puede ser de la misma magnitud, sabemos que ello no es posible en la corr. f.b.t., ya que sus efectos son poco visibles y sus manifestaciones son ruidosas, a veces con pérdidas de vidas humanas.

El acero de pretensado embebido en un medio alcalino, como es el hormigón (ph aprox. 12-13), está en unas condiciones electroquímicas tales que la oxidación del acero es despreciable. Esto se conoce con el nombre de pasividad, es decir, velocidad de corrosión (reacción electroquímica) es prác-

neamente es lo que debería hacerse antes del proyecto de la obra.

2. FALLOS OCURRIDOS EN TUBERIAS DE HORMIGON PRETENSADO

2.1. SITUACION DEL PROBLEMA

En conducciones de abastecimiento de agua a Madrid y en el sifón del Jerte (Cáceres), se han presentado en un período de cinco años, explosiones de las mismas por fallos en las armaduras activas que formaban el zunchado. El estado en que estaba la tubería puede verse en las fotografías 1 y 2. En la Tabla I se recogen datos sobre el diámetro, fecha de zunchado, colocación y rotura.



FOTO 1. Explosión de la tubería.

ticamente cero. En el curso del tiempo debemos esperar un buen comportamiento del mismo, como la experiencia nos lo confirma.

El Laboratorio de Metales y Corrosión, antigua sección de Metalografía del Laboratorio Central de Estructuras y Materiales (CEDEX) ha estudiado el problema y esclarecido varias roturas por c.f.b.t. en las armaduras activas de estructuras pretensadas. Fruto de esta intensa labor fue la creación de un convenio de trabajo con el Canal de Isabel II, y asimismo, una sección de control de material en obra que no existía anteriormente y el peso de la información técnica de los aceros que anteriormente se importaban y ahora son nacionales. En el presente escrito exponemos unas roturas explosivas producidas en tuberías de abastecimiento de agua potable a Madrid, así como un análisis de los hechos y un estudio detallado para averiguar las causas de las roturas frías de los alambres que constituían las armaduras activas de la tubería. Pensamos que el contenido de estas li-



FOTO 2. Tubo en estación depuradora.

HORMIGONES

CONDUCCION	DIAMETRO	ZUNCHADO	RECUBRIMIENTO	COLOCACION	ROTURA
P. 1	1.900 mm	13-08-67	14-08-67	30-09-67	13-10-69
P. 2	1.900 mm	16-12-67	17-12-67	24-01-68	03-11-72
M-1	1.900 mm	13-10-66	14-10-66	16-11-66	08-09-69
M-2	1.900 mm	02-11-66	03-11-66	03-12-66	10-11-72
SI-1	2.700 mm	—	—	—	Mayo 75

TABLA I.

La presión del agua en la conducción es 2,5 aprox. menor que la presión de rotura del tubo ensayado en fábrica. La tensión que soporta el alambre zunchado está por debajo del límite elástico.

El aspecto que tenía la cabeza de los alambres rotos puede verse en la fotografía 3. La fractura no tiene estricción. Las facies de fractura están contenidas macroscópicamente en unos planos perpendiculares al eje del alambre. El deterioro de los alambres por corrosión, es decir, la pérdida de sección resistente de los mismos es insignificante. En algunas roturas se observa una lúnula de un color negro que se inicia en el borde y se propaga hacia dentro (centro de la sección). En la segunda parte del trabajo.



FOTO 3. Formigón de rotura en obra.

2.2. DESCRIPCION DE LA OBRA

Se trata de una tubería de conducción de agua, fotografía 4, hecha con unidades de unos 5 m de tubos de hormigón pretensado y enterrada en algunos casos a profundidades variables de 0 a 5 m. Los detalles geométricos de cada tubo pueden verse en Fig. 1. Como puede apreciarse en el croquis, cada tubo está constituido por: a) un recubrimiento interno de mortero armado con un mallazo de acero al carbono extrasuave, cuya misión fundamental es proteger la camisa de chapa contra la corrosión que sirve para impermeabilizar la pared del tubo; b) un núcleo de hormigón sobre el cual se zuncha la varilla de pretensado de 7 mm de diámetro, formando dos hélices coaxiales, y c) un revestimiento de mortero especial que sirve para proteger la armadura tesa contra la corrosión. Es importante decir que este revestimiento exterior no se aplica inmediatamente una vez zunchado el núcleo del tubo.

La tensión inicial de zunchado es de $0,75 \sigma_{\text{máx.}}$ $-0,575 \sigma_{0,2}$. Se supone que la tensión efectiva del alambre es de $0,55 \sigma_{\text{máx.}}$, sin la presión del agua y de $0,60 \sigma_{\text{máx.}}$ a presión de régimen (6-14 atm.).

Los materiales metálicos que constituyen una unidad de la tubería, como la descrita en la Fig. 1 son:

1. Armaduras activas.
2. Acero de construcción.
3. Chapa de acero extrasuave.
4. Cordón de soldadura.

Cada uno de los elementos metálicos anteriores lo iremos describiendo en profundidad en lo sucesivo.

2.3.1. Armaduras activas

Las armaduras activas son de acero al carbono eutectoide en estado metalúrgico de austenizado, templado y revenido, fotografía 5. En algunas unidades se empleó un acero eutectoide con temple isotérmico con plomo de 350-450°C. La microestructura que presenta este acero se puede ver en

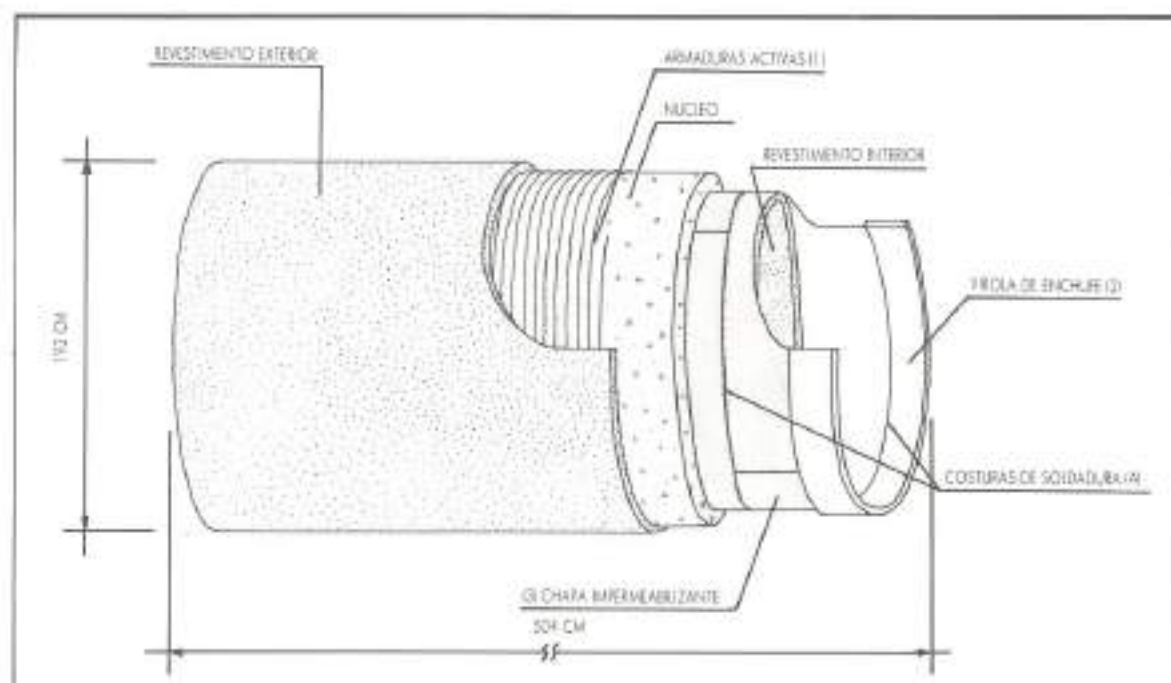


FIGURA 1. Elementos metálicos que forman el tubo.

la fotografía 5. La Tabla II presenta la composición química de este acero.

La discusión de estos datos, así como el análisis y agradecimiento, se publicarán en la parte II de este trabajo. El ensayo de tracción realizado con una Máquina Instron con alambres sacados del tubo roto, da los siguientes resultados:

A. PROPIEDADES DE RESISTENCIA: curva tensión-deformación real,

$$\epsilon_r = \epsilon_e + \epsilon_p \quad ; \text{total} = \text{elástica} + \text{plástica}$$

$$\epsilon_e = \frac{\sigma}{19.800} \quad ; 0 \leq \epsilon \leq 0,0063$$

$$\epsilon = \frac{\sigma}{19.800} + \left(\frac{\sigma}{262,1} \right)^{10,0} \quad ; 0,0063 \leq \epsilon \leq 0,0076$$

$$\epsilon = \frac{\sigma}{19.800} + \left(\frac{\sigma}{170,0} \right)^{20,5} \quad ; 0,0076 \leq \epsilon \leq 0,0170$$



FOTO 4. Tubo enterrado.

HORMIGONES

C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Al	N
% 0,70	0,59	0,28	0,020	0,015	0,018	0,05	0,025	0,005

TABLA II.

$$\epsilon = \frac{\sigma}{19.800} + \left(\frac{\sigma}{184,5} \right)^{29,3} ; 0,0170 \leq \epsilon \leq 0,04475$$

El módulo de Elasticidad empleado en estas fórmulas es, $E=19.800 \text{ kp/mm}^2$, o sea, el módulo isoterma a temperatura de la sala de ensayos.

B. PROPIEDADES DE DUCTILIDAD: deformación bajo carga máxima y estricción, es decir,

$$\epsilon_{\text{máx}} = 4,45 \% \quad ; \quad \Sigma = 36 \%$$

son las características de ductilidad más representativas. En la Fig. 2 pueden verse estos valores en la curva de tracción. El coeficiente de acritud "n" que en el momento de la inestabilidad de carga, $\sigma = \frac{F}{S}$, $dF = \sigma dS + S d\sigma = 0$, es el exponente de la curva tensión-deformación. En la discusión de los resultados hablaremos de él y de su importancia en la micro estructura de los aceros.

C. DUREZA VICKERS

La dureza de un material traduce la resistencia a la deformación plástica, es decir, a la penetración de una bola de acero muy dura o un diamante en forma de pirámide. Los ensayos realizados en este acero dan los siguientes resultados:

$$Hv = 450 \quad ; \quad Rc = 40 \quad ; \quad Hb = 420$$

D. RELAJACION

Esta es una propiedad muy importante para los estudios de corrosión bajo tensión. Podemos decir, en líneas generales, que las varillas de pretensado de 7 mm de diámetro son más resistentes cuanto mayor relajación tengan. Esto no es lo más adecuado para el pretensado, ya que se busca elevada resistencia y baja relajación. Los resultados que dio este acero son (UNE: 36422/85):

$$6 \% \text{ a } 120 \text{ horas y del } 8 \% \text{ a } 1.000 \text{ horas}$$

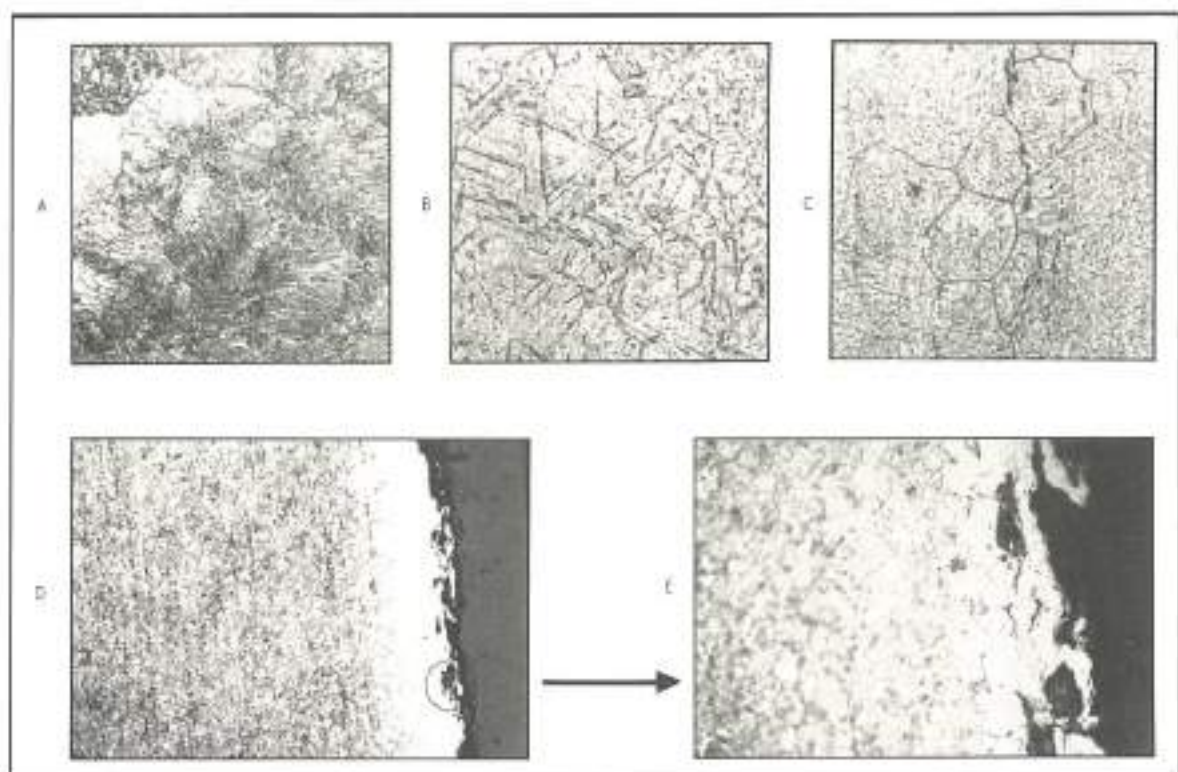


FOTO 5. Acero templado y revenido.

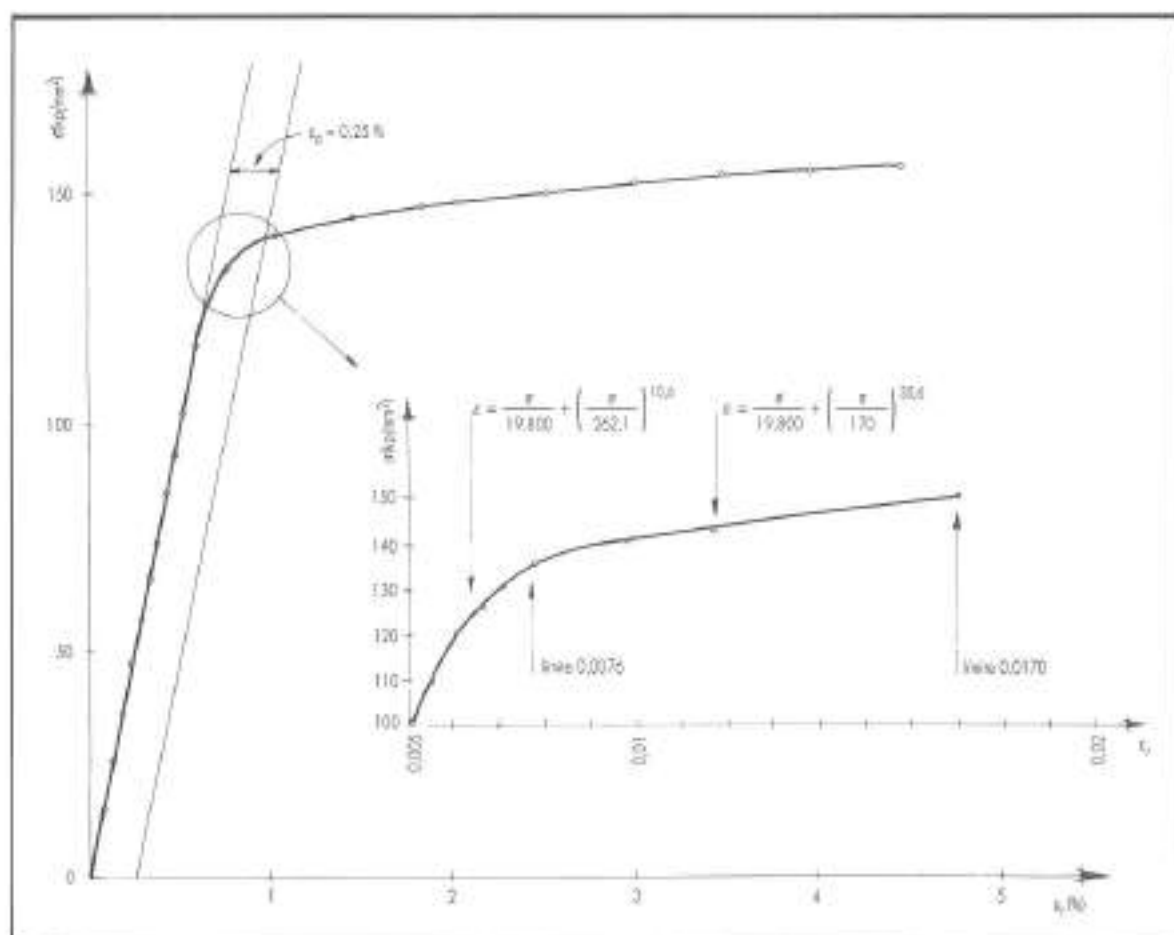


FIGURA 2. Curva tensión-deformación del acero.

E. PLEGADOS ALTERNATIVOS

Este ensayo realizado de acuerdo con la UNE 36461/80 tiene muchos detractores. La cifra de su resultado, número de plegados, no se sabe bien lo que significa; sin embargo, personalmente para los metalurgistas creemos que indica la bondad del proceso metalúrgico por el cual se ha hecho el producto y los defectos que pudiera tener que son múltiples. El caso que nos ocupa, el número de plegados es de 7 sobre un madril de radio 28 mm.

F. FRACTOGRAFIA

La rotura es el hecho físico de separar en dos partes una muestra metálica, generalmente, en el ensayo de tracción. Para esta separación hace falta una energía que viene determinada por el área bajo la curva de la Fig. 2, es decir,

$$\int \sigma d\epsilon = 6,72 \times 10^{-7} \text{ julios/mm}^2 \text{ de acero}$$

Sin embargo, la "Fractura" es algo más que la separación en dos superficies, es la ciencia de cómo quedan esos suelos y de cómo influyen variables como la tensión mecánica, estado metalúrgico del metal, ambiente, etc. Próximamente aparecerá una monografía dedicada a la fractura en aceros.

La fotografía 6, muestra el aspecto de la macrofractura y microfractura de la varilla. La primera cuestión a resolver en un problema de esta naturaleza es ¿cómo sería la fractura si el material estuviera sano? La información óptica que proporciona una macrofractura con una lupa estereoscópica es de una ayuda valiosísima. El especialista puede ver a bajos aumentos aquellos detalles que luego buscará a grandes aumentos y le proporcionarán la causa de la fractura. No es lo mismo realizar un ensayo que inventar el ensayo para medir una propiedad.

En líneas generales podemos decir que en la macrofotografía 6 se puede ver el relieve/suelo de

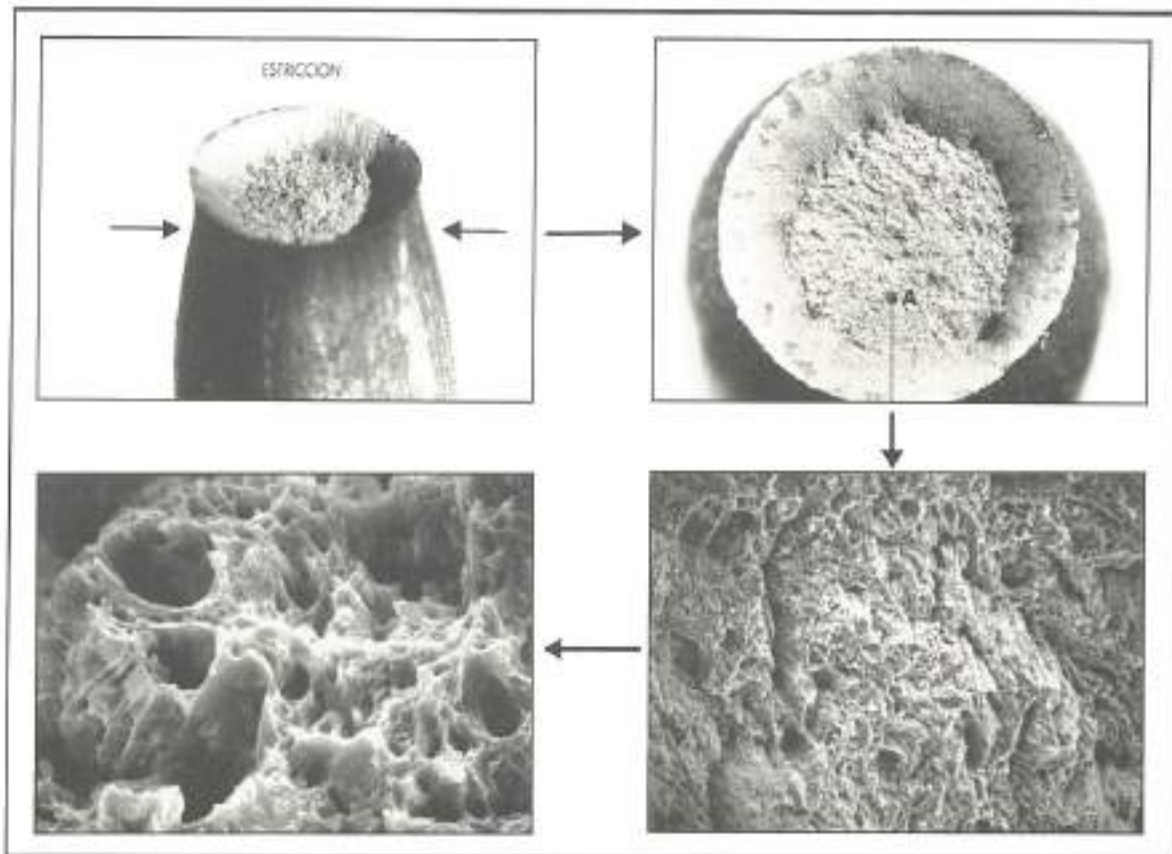


FOTO 6. Aspecto microfractográfico de la rotura dúctil.

la fractura del acero; mucho cambio de forma/estricción, suelo suave como tierra de un hormiguero/granos finos, no hay grietas radiales/ondas de deformación plástica alrededor del centro, etc., matriz metálica sana; no hay macrodefectos. Los labios de elzalladura son gruesos/buena estricción.

Podemos decir, pues, que es una rotura por cambio de forma, esto se llama estricción. La cifra cuantitativa es del 36 %.

Las dos micrografías inferiores se han obtenido con microscopio de barrido electrónico.

PEDIDOS: Contra reembolso ☐ — Cheque adjunto ☐
HYDROLOGIC FREQUENCY MODELING.
 Singh, V.P. —5.054—
 1987 ed. 645 págs. 17.490 Pts. IVA incluido

CONTENIDO: Flood frequency analysis. Empirical flood frequency models. Mixed distributions. Rainfall frequency analysis. Entropy in flood frequency analysis. Parameter estimation. Selection of flood frequency models. Multivariate stochastic models. Indexes.

COMPUTERS RAILWAY OPERATIONS.
 Murthy, T.K.S. —3.913—
 1987 ed. 336 págs. 15.052 Pts. IVA incluido

CONTENIDO: Transmission and traction. Advanced control systems. Train Operations.

SOIL-STRUCTURE INTERACTION. Vol. 43
 Cakmak, A.S. —5.609—
 1987 ed. 373 págs. 19.928 Pts. IVA incluido

CONTENIDO: Effects on an irregular soil profile on site amplification. Earthquake response of nonlinear building-foundation systems. Dam-foundation interaction under spatially correlated random ground motion. Recursive evaluation of interaction forces of unbounded soil in frequency domain. Etc.

HANDBOOK OF WATER PURIFICATION. 2.^a ed.
 Lorch, W. —5.859—
 1987 ed. 777 págs. 22.790 Pts. IVA incluido

CONTENIDO: The hydrologic cycle: turnover, distribution, and utilization of water. Water physics and chemistry. Natural waters. Water quality classification. Measurement and control. Removal of insoluble particles. Ion exchange. Membrane processes. Reverse osmosis. Ultrafiltration. Electrodialysis. Freshwater distillation. Saltwater distillation. Chemical disinfection. Ozonation. Etc.

L'EPURATION ET TRAITEMENT LE DES EFFLUENTS. Vol. 3 (PP)
 Martin, G. —5.613—
 1987 ed. 297 págs. 9.328 Pts. IVA incluido

CONTENIDO: Présence des produits phosphorés dans l'environnement. Chimie analytique des espèces phosphorées. Phosphore et processus d'eutrophisation. Biodisponibilité du phosphore. Aspects chimiques, biochimiques et environnementaux. Substituts des tripolyphosphates dans les détergents. Etc.

APPLIED HYDRAULIC TRANSIENTS. 2.^a ed.
 Hanif, M. —17.809—
 1987 ed. 521 págs. 11.872 Pts. IVA incluido

CONTENIDO: Closed-conduit transient-flow equations. Methods of characteristics and finite-difference methods. Transients caused by pumps. Transients in hydroelectric power plants. Transients in cooling-water systems. Transients in long oil pipelines. Resonance in pressurized piping systems. Etc.

BUCKLING AND POST-BUCKLING.
 Arbocz, J. —5.851—
 1987 ed. 246 págs. 3.922 Pts. IVA incluido

CONTENIDO: Foundations of elastic postbuckling theory. Post-buckling behaviour of structures. Numerical techniques for more complicated structures. Effect of plasticity on post-buckling behaviour. Experimental techniques and comparison with theoretical results.

DEVELOPMENTS IN THIN-WALLED STRUCTURES. Vol. 3
 Rhodes, J. —5.442—
 1987 ed. 285 págs. 11.130 Pts. IVA incluido

CONTENIDO: Developments in cold-formed sections in Europe. Structural behavior of architectural sandwich plates. Developments in thin-walled structures in offshore applications. Lower bound methods in shell buckling. Thin-plated structures in civil engineering. Etc.

DYNAMIC BEHAVIOUR OF FOUNDATIONS AND BURIED STRUCTURES.
 Banerjee, P.K. —5.866—
 1987 ed. 270 págs. 11.978 Pts. IVA incluido

CONTENIDO: Soil dynamics: An overview. Simple physical methods for foundation impedances. Dynamic behavior of axially and laterally loaded piles and pile groups. Experimental studies of the dynamic behavior of piles and pile groups. Dynamic consolidation of nearly saturated granular media. Surface disturbance due to underground explosions. The discrete element method in geotechnical engineering.

FLOOD HYDROLOGY.
 Singh, V.P. —5.050—
 1987 ed. 429 págs. 14.310 Pts. IVA incluido

CONTENIDO: Hydrology of floods. Deterministic streamflow simulation. Stochastic streamflow simulation. Streamflow forecasting. Coastal and urban flooding. Flood management. Flood control programs.

COMPUTER IN RAILWAY MANAGEMENT.
 Murthy, T.K.S. —3.909—
 1987 ed. 224 págs. 11.236 Pts. IVA incluido

CONTENIDO: Planning and management. Information systems.

COMPUTER-AIDED SIMULATION IN RAILWAY DYNAMICS.
 Dukkupati, R.V. —5.607—
 1988 ed. 427 págs. 19.292 Pts. IVA incluido

CONTENIDO: Physical aspects. Mathematical foundation. Parameter identification and model validation. Case studies. Software survey. Track simulators.

RELIABILITY BASED DESIGN IN CIVIL ENGINEERING.
 Harr, M.E. —5.745—
 1987 ed. 290 págs. 11.438 Pts. IVA incluido

CONTENIDO: Elements of probability. Further concepts. System reliability. Reliability analysis. Gaining information.