

CRITERIOS DE ROTURA DEL OLEAJE

(1.ª PARTE)

JOSE MANUEL DE LA PEÑA OLIVAS
Centro de Estudios de Puertos y Costas

RESUMEN. Se presenta, en orden cronológico de aparición, los distintos criterios, existentes hasta la fecha, de rotura de oleaje, separando éstos en dos tipos según el parámetro que determinan, a partir de la ola en altamar, altura de ola en rotura o profundidad en rotura. Dada su extensión se ha preferido mostrar, inicialmente, aquellos criterios que calculan la altura de ola en rotura, para ulteriores artículos presentar el resto.

1. INTRODUCCION

Corrientemente, uno de los problemas que se le presentan al ingeniero de costas, es determinar el lugar y características de la ola al incidir en la playa y romper.

En este artículo se pretende mostrar los diversos criterios que han ido apareciendo a lo largo de la corta historia de la ingeniería de costas, dando una solución más o menos exacta; pero siempre práctica al problema del conocimiento de la rotura del oleaje. Se presentan en orden de aparición y con la formulación que sus autores dieron a los criterios al publicarlos.

2. DETERMINACION DE LA ALTURA DE OLA EN ALTAMAR

Normalmente los únicos datos que se pueden conocer a priori, son los parámetros que definen la ola en altamar: altura (H_0), periodo de la ola (T) y longitud de onda (L_0). Estos datos se pueden conseguir de diferentes maneras, ordenándose genéricamente en dos grupos:

- A. Observaciones y registros en la naturaleza.
- B. Cálculos y registros experimentales.

El primero de los grupos (**observaciones y registros en la naturaleza**) lo componen todas aquellas prácticas habituales de toma de datos en el mar, de las que cabe destacar como más corrientes:

- Registro por medio de boyas direccionales o escalares.
- Observaciones visuales tomadas por barcos en ruta.

El segundo de los grupos lo forman todas aquellas técnicas de cálculo o experimentales, tendentes

a predecir o determinar con posterioridad el tipo de oleaje, altura que alcanza, etc., en un determinado punto del mar y con unas condiciones geográficas y meteorológicas dadas. Dichas técnicas son muy variables, oscilando desde los cálculos más sencillos a los más sofisticados métodos de simulación matemática.

3. REFLEXION Y PROPAGACION DEL OLEAJE, OLA EN ROTURA

Conocidas las características de la ola en altamar, el siguiente paso es determinar su evolución en el tiempo y espacio, hasta que ésta alcanza la costa y con qué nuevos parámetros incide en ella para finalmente romper, problema que nos ocupa, o bien reflejarse.

La ingeniería de costas ha desarrollado, del mismo modo que en altamar, una serie variada de técnicas que permiten determinar las características de la ola previa a su rotura así como las variables que dominan el fenómeno mismo de la rotura. Dichas técnicas se pueden agrupar, de forma muy general, en dos tipos de métodos:

1. Aplicando los métodos de propagación de oleaje.
2. Transformando los parámetros característicos de la ola en altamar en los parámetros característicos de la ola en rotura, por medio de ábacos y fórmulas más o menos empíricas.

Si se opta por usar el segundo de los métodos para estudiar la rotura del oleaje, método por otro lado rápido y sencillo, se presentan inevitablemente las siguientes preguntas: ¿qué métodos o criterios existen?, ¿cuál de ellos se aplica?, ¿hay mucha diferencia entre aplicar uno u otro?

Estas preguntas se intentarán responder y aclarar en las siguientes líneas.

4. CLASIFICACION DE LOS CRITERIOS DE ROTURA

El primero de los trabajos a efectuar consiste en conocer la totalidad de los criterios aparecidos hasta la fecha, lo que implica un estudio bibliográfico y de recopilación previo, dado la inexistencia de un trabajo completo en este sentido.

Recopilada, inventariada y ordenada la documentación, el paso siguiente consiste en clasificar dichos criterios.

Atendiendo a una homogeneización y una ma-

de los datos conocidos de la ola en altamar. Se han desarrollado basándose tanto en teorías de onda como en datos empíricos medidos en la naturaleza o en el laboratorio.

A continuación, se muestran los diferentes criterios aparecidos, cronológicamente, que, o bien vienen expresados como formulación matemática más o menos sencilla, o bien en forma de ábacos.

Las variables utilizadas en los distintos criterios (figura 1) son las variables adimensionales H_0/H_b y H_0/L_0 .

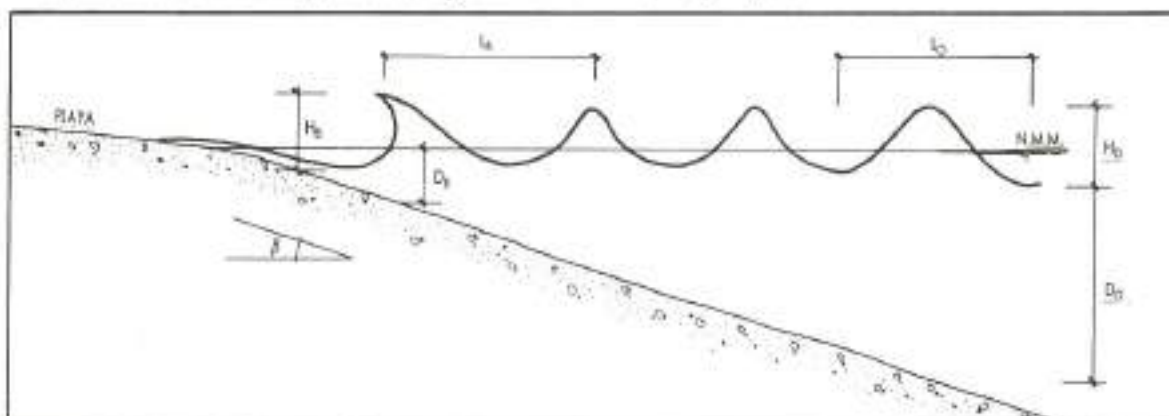


FIGURA 1.

yor facilidad de utilización, se pueden clasificar los «criterios de rotura de oleaje» en dos tipos:

- I. A partir de los parámetros de la ola en altamar se determina la altura de ola en rotura, a dichos criterios se les denomina: «criterios para determinar la altura de ola en rotura».
- II. A partir de la altura de ola en rotura se determina el resto de parámetros afectos a la rotura, a estos criterios se les denomina: «criterios para determinar el punto de rotura del oleaje».

En este primer artículo se exponen únicamente los criterios del primer tipo, «criterios para determinar la altura de ola en rotura», para ulteriores publicaciones presentar el segundo de los tipos de criterios.

Cada uno de los criterios viene acompañado de la referencia a la publicación en que el autor lo expuso, así como el ábaco o fórmula que lo describe, también se inserta un cuadro resumen que engloba todos los criterios.

5. CRITERIOS PARA DETERMINAR LA ALTURA DE OLA EN ROTURA

Este tipo de criterios, como antes se ha mencionado, deducen la altura de ola en rotura (H_b) a partir

Siguiendo, como se ha dicho anteriormente, en orden cronológico de aparición, se pueden distinguir los siguientes criterios:

1. Oficina Hidrográfica de la Marina de los EE.UU. (1944).
2. W. H. Munk (1949).
3. P. Groen y M. P. H. Weenink (1950).
4. H. W. Iversen (1952).
5. A. T. Ippen y G. Kulin (1955).
6. T. Kishi y H. Saeki (1966).
7. B. Le Mehané y R. G. Y. Koh (1967).
8. Y. Goda (1970).
9. J. R. Weggel (1972).
10. P. D. Komar y M. K. Gaughan (1972).
11. A. Svendsen y J. B. Hausen (1976).
12. W. G. Van Dorn (1978).
13. J. A. Battjes (1974) y T. Sunamura (1980).
14. H. G. Wind (1980).

PRIMER CRITERIO

En 1944 la «Hydrographic Office» de la Marina de los EE.UU. publica «Breaker and surf» en la que contiene un ábaco (figura 2) compuesto por una serie de curvas, tanto teóricas como empíricas, para determinar una serie de parámetros adimensionales, entre ellos los necesarios para calcular

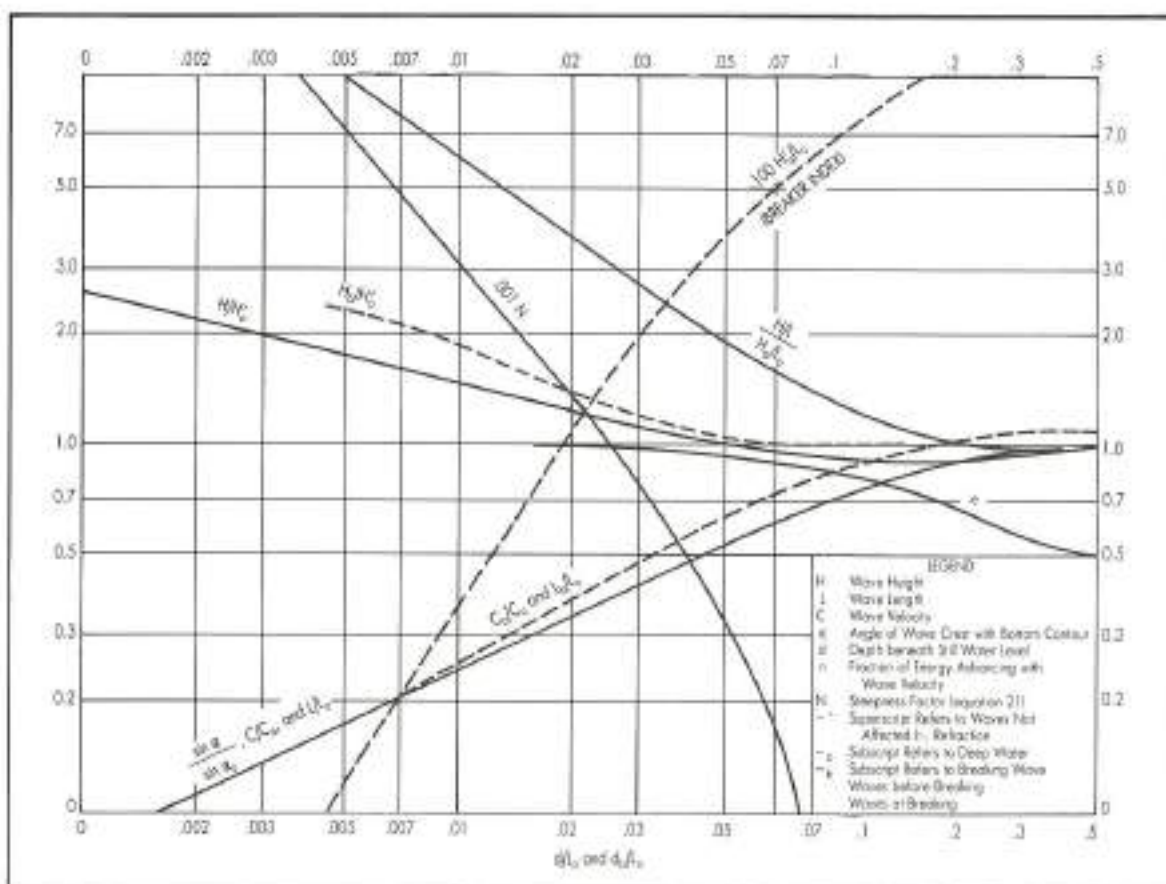


FIGURA 2. Primer criterio H. D. - U.S. Navy, 1944l.

los afectos a la altura de ola en rotura y el punto de rotura del oleaje.

Para ello entrando en la abscisa con valor Db/La o Da/La y tocando la curva correspondiente se determina Hb/Ho y Lb/La .

SEGUNDO CRITERIO

En el año 1949, W. H. Munk publicó «The solitary wave theory and its applications to surf problems». En ella, basándose en la evolución de la celeridad y energía de la onda solitaria de Boussinesq (1877), dedujo la siguiente expresión:

$$Hb/H_0 = 1/3.3(H_0/L_0)^{1/3}$$

TERCER CRITERIO

P. Groen y M. P. H. Weenink publican en 1950 «Two diagrams for finding breaker characteristics along a straight coast», en el que tras criticar la fórmula presentada por Munk, al no tener en cuenta la configuración del fondo del mar, muestran dos ábacos para el cálculo de la altura de ola.

en rotura, *Hb*. Dichos ábacos (figura 3) deben trabajarse de la forma siguiente:

1. Conocida la pendiente de la ola H_o/L_o y el ángulo de incidencia en profundidades indefinidas, α_o , se entra en el ábaco n.º 1 y se determina el ángulo de incidencia en rotura α_b .
2. Conocido el ángulo de incidencia en rotura α_b y la pendiente de la ola H_o/L_o en profundidades indefinidas, se entra en el ábaco n.º 2 y se calcula el término H_b/H_o .

CUARTO CRITERIO

En la ponencia presentada en el Congreso de Ingeniería de Costas de 1952, con el nombre de «Waves and breakers in shoaling water», H. W. Iversen mostró los resultados experimentales realizados en canal, sobre la rotura del oleaje en playas de diferentes pendientes. Dichos resultados fueron plasmados en un ábaco (figura 4) donde las variables adimensionales elegidas son: H_b/H_o y H_o/T^2

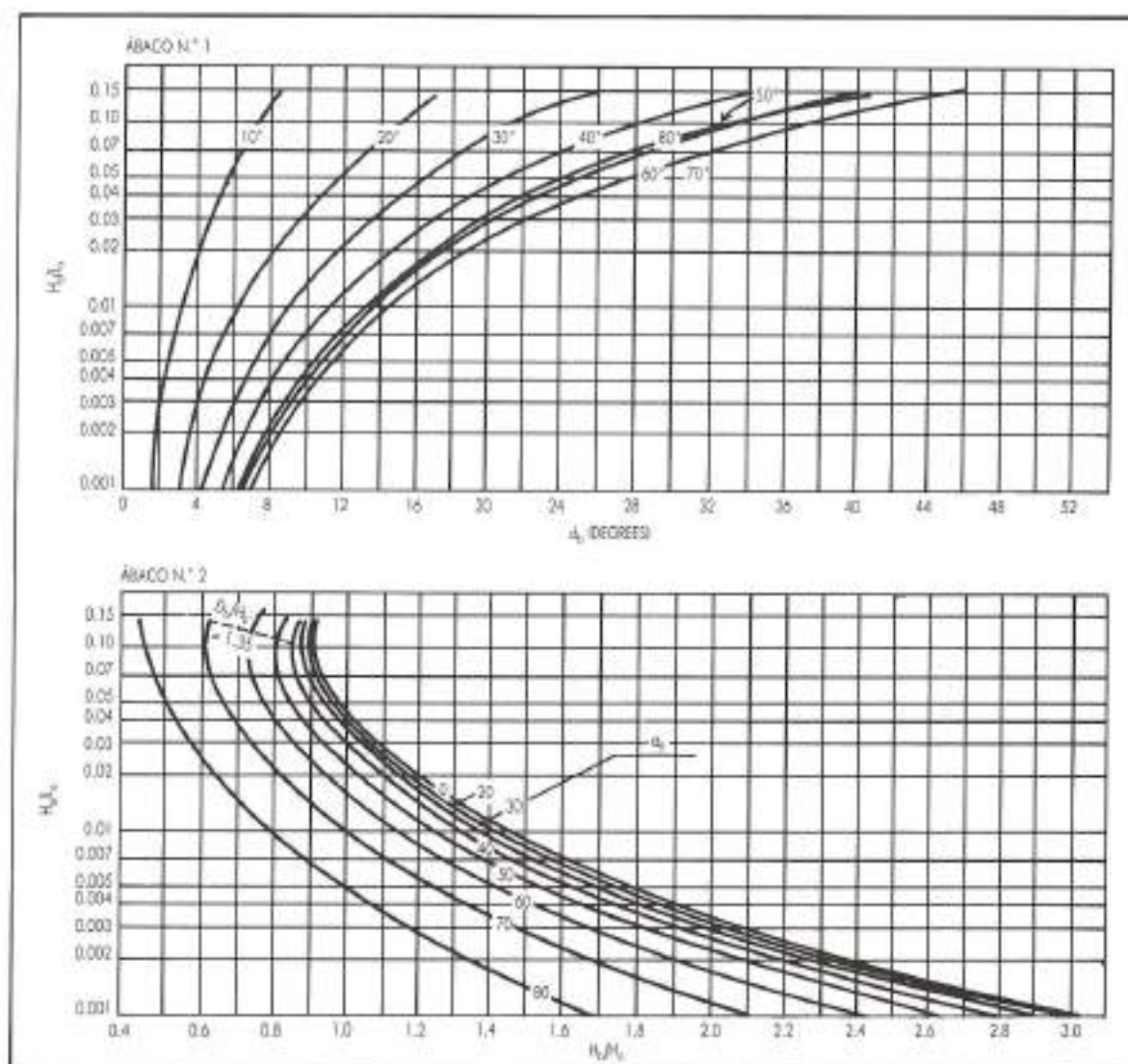


FIGURA 3. Tercer criterio (Groen y Weenink, 1950).

Para comparar los diversos criterios, se ha transformado la variable H_0/T^2 en la variable H_0/L_0 , usando la relación $T^2 = 2\pi L_0/g$, por medio de: $H_0/L_0 = 0,64 H_0/T^2$.

QUINTO CRITERIO

En 1955, Arthur Ippen y Gershon Kulin, publicaron uno de sus trabajos sobre rotura de ola, «The shoaling and breaking of the solitary waves». En dicho trabajo mostraron la deducción teórica del cálculo de la altura de ola en rotura:

$$H_b/H_0 = 0,88/(H_0/L_0)^{1/2}$$

SEXTO CRITERIO

En «The shoaling, breaking and runup of the soli-

tary wave on impermeable rough slopes», de 1966, Kishi y Saeki describen los ensayos realizados en modelos reducidos, con generación de ondas solitarias en diversas pendientes de playa con fondo impermeable. Se ensayaron pendientes de 1/30, 1/20, 1/15 y 1/10 y cuyo resultado se plasmó en diversos gráficos. El correspondiente al cálculo de la altura de ola en rotura se muestra en la figura 5.

SEPTIMO CRITERIO

B. Le Mechanté y R. C. Y. Koh publicaron en 1963 «On the breaking of waves arriving at an angle to the shore», en el que haciendo una recopilación de datos obtenidos por Iversen (1952), Hawada

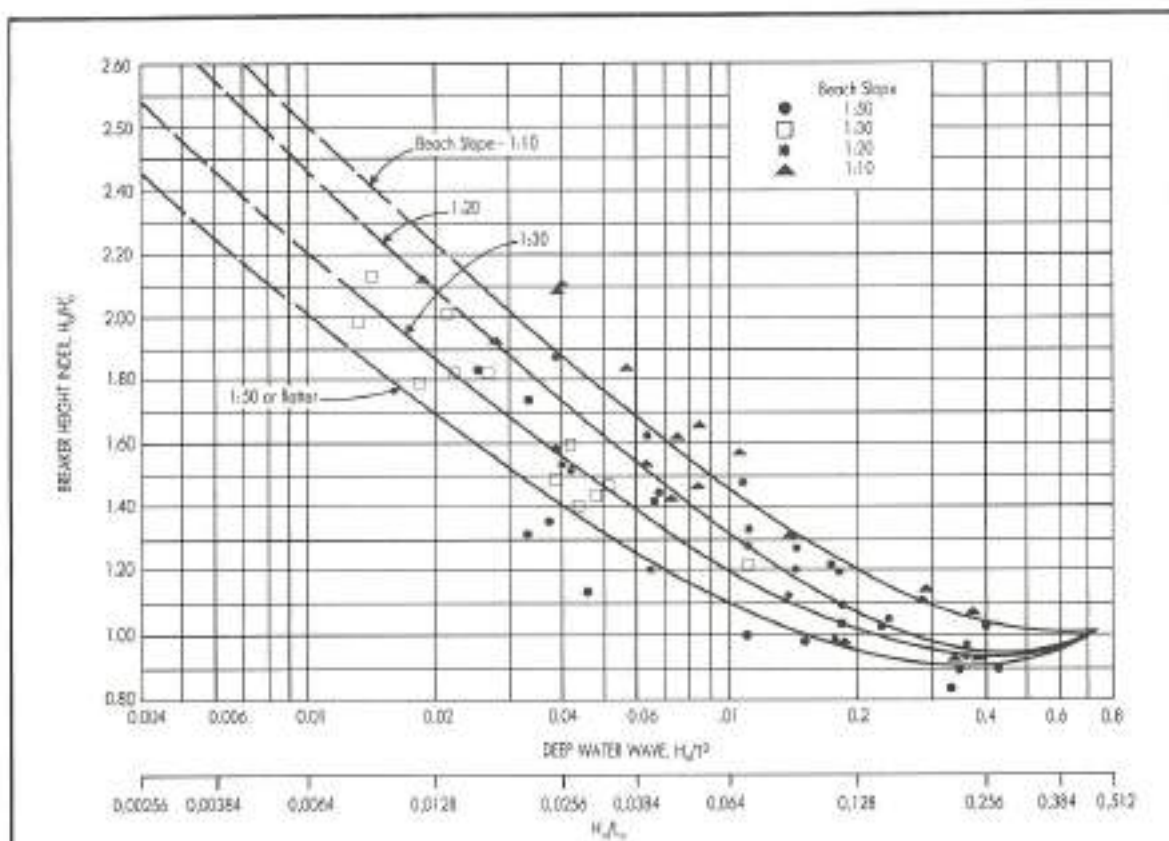


FIGURA 4. Cuarto criterio Iversen, 1952.

(1963) y Suquet (1950), proponían la siguiente ecuación:

$$Hb/Ho = 0,76 m^{1/7} / (Ho/Lo)^{1/4}$$

OCTAVO CRITERIO

Con el título «Synthesis of breaker indices», en 1970, I. Goda publica los trabajos que, basados en las observaciones e investigaciones de Iversen (1952-53), Galvin (1970) y las suyas propias, le han conducido a determinar un ábaco que relaciona las dos variables adimensionales, Hb/Ho y Ho/Lo . En dicho ábaco (figura 6) se puede observar una separación dependiendo del tipo de rotura, expuesto por Galvin en 1968.

NOVENO CRITERIO

Con el título «Maximum breaker height», J. Richard Weggel publicó en 1972 un método para el cálculo de la altura de ola en rotura, basado en sus estudios del tipo de rotura de oleaje. Dicho método se resume en una serie de curvas, según la pendiente (m) de la playa, y que se muestra en el ába-

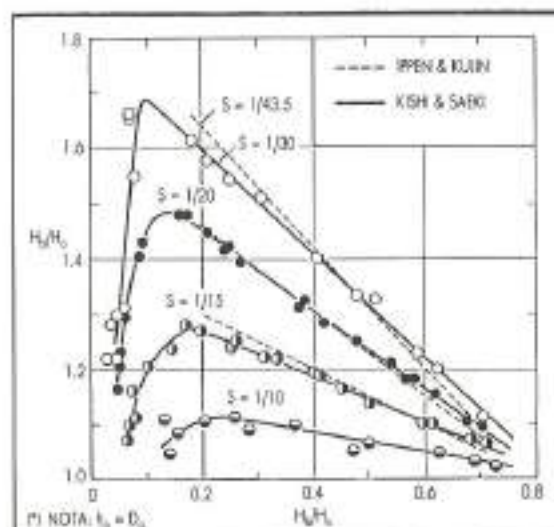


FIGURA 5. Sexto criterio Kishi y Soeki, 1966.

co inserto en la figura 7. Las curvas de rotura tienen la formulación siguiente:

$$Hb/Ho = F(m)/(Ho/Lo)^{1/3} + G(m)$$

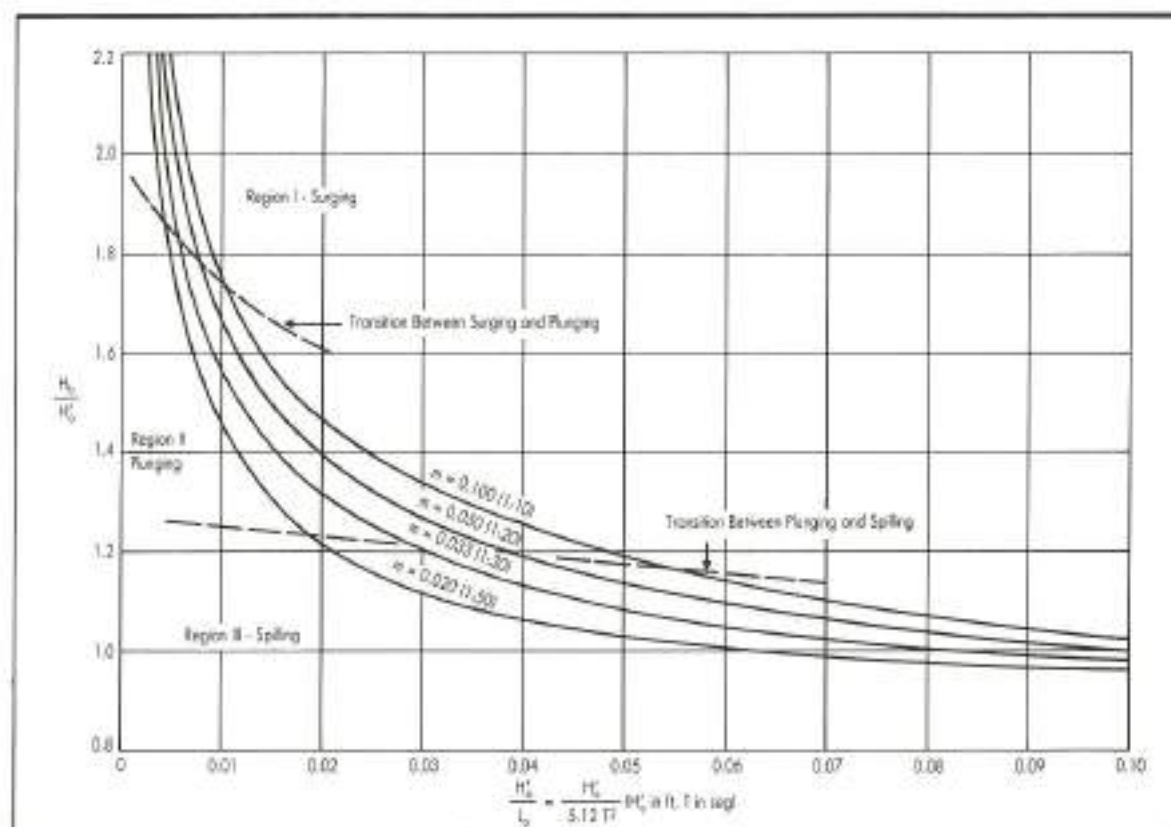


FIGURA 6. Octavo criterio (Goda, 1970).

Donde:

$$F(m) = D_1 (1 + m) - G(m)$$

$$G(m) = D_1 (1 + m) - D_2 (1.715 - 0.185 e^{-28m}) / D_1 - D_2$$

$$D_1 = (0.01 + 0.5m)^{1/3}$$

$$D_2 = (0.01 - 0.01 e^{-28m})^{1/3}$$

DECIMO CRITERIO

En la ponencia presentada en el Congreso de Ingeniería de Costas de 1972, con el nombre de «Airy wave theory and breaker height prediction», por Paul S. Komar y Michael K. Gaughan, aplicando la teoría de onda de Airy cuando se conserva el flujo de energía de la onda, obtienen la siguiente relación:

$$Hb = K g^{1/5} (T H_0^2)^{2/5}$$

Para determinar el coeficiente K de la ecuación, realizaron tres experimentos en laboratorio y uno en la propia naturaleza, y como consecuencia de ellos le adjudicaron el valor $K = 0.39$.

$$Hb = 0.39^{1/5} (T H_0^2)^{2/5}$$

Usando la ecuación $L_0 = g T^2 / 2\pi$ se llega a la siguiente ecuación:

$$Hb/H_0 = 0.56 / (H_0/L_0)^{1/5}$$

UNDECIMO CRITERIO

En el 15º Congreso de Ingeniería de Costas de 1976, A. Swendsen y J. Buhr Hausen presentaron «Deformation up to breaking of periodic waves on a beach», en la que tomando datos obtenidos por Iversen (1953) y Iwagaki-Sakai (1976) los representaron tal y como muestra la figura 8 y en la que haciendo una correlación de dichos datos obtuvieron la siguiente expresión:

$$Lb/Hb = 2.30 / (H_0/L_0)^{1/2}$$

Esta ecuación está obtenida para diversas pendientes de playa.

DUODECIMO CRITERIO

En 1978, William G. Van Dorn publicó «Breaking invariants in shoaling waves», en el que en base a

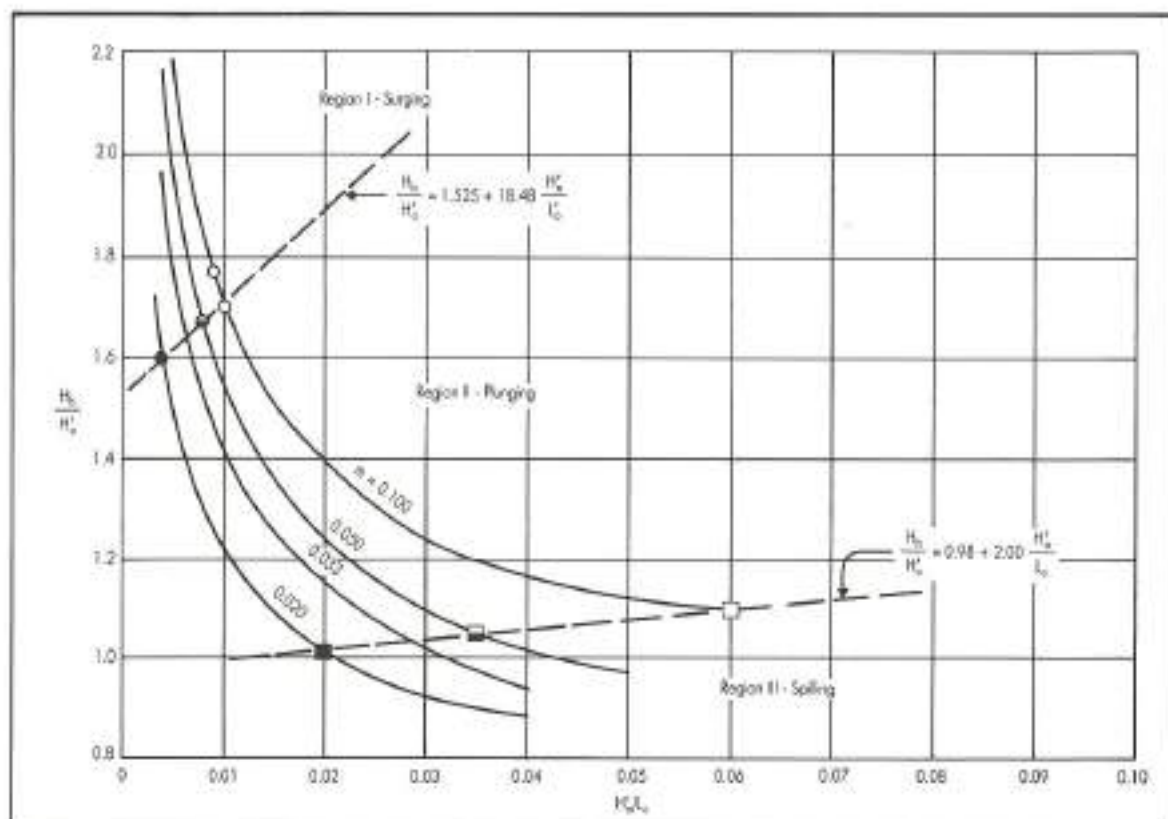


FIGURA 7. Noveno criterio (Weggel, 1972).

trabajos experimentales realizados por él mismo y recogiendo los datos de Bowen (1968) e Iversen (1962), los correlacionó, como se muestra en la figura 9, deduciendo de ello la ecuación siguiente:

$$Hb/Ho = 0.4/(Ho/Lo)^{1/2}$$

Debe hacerse notar que dicha fórmula es similar a la deducida por Munk (II criterio-1944) con la única diferencia de las constantes: 0.4 para Van Dorn y 1/3,3 para Munk.

DECIMOTERCER CRITERIO

En 1974, J. A. Battjes publicó un estudio con el nombre «Surf similray», en dicho estudio, haciendo uso del número de irribarren ($\varepsilon_o = m/\sqrt{Ho/Lo}$) y del peralte de la ola en rotura (Hb/Db), representó los datos experimentales obtenidos por Iversen (1952), Goda (1968), Bowen (1968) y por él mismo (1975). Dicha representación se muestra en la figura 10.

Tsuguo Sunamura, en 1980, en su estudio «A laboratory study of offshore transport of sediment and model form eroding beaches», hizo uso de la

representación de Battjes correlacionando linealmente los datos, y cuya consecuencia fue la ecuación:

$$Ho/Db = 1.1(m/\sqrt{Ho/Lo})^{1/8}$$

Dicha correlación se representa en la figura 10 como mostró Sunamura y también en función de los dos parámetros adimensionales Hs/Db y Ho/Lo .

DECIMOQUINTO CRITERIO

En 1980, H. G. Wind y S. R. Singamsetti, publicaron «Breaking waves» en el que mostrando datos experimentales, llegaban a la siguiente formulación:

$$Hb/Ho = 0.0937 \cdot m^{0.155}/(Ho/Lo)^{0.254}/(Ho/Lo)^{0.254}$$

Se completa dicha formulación con la determinación de:

$$Hb/Db = 0.937 \cdot m^{0.155}/(Ho/Lo)^{0.13} \text{ para } 1/40 < m < 1/5$$

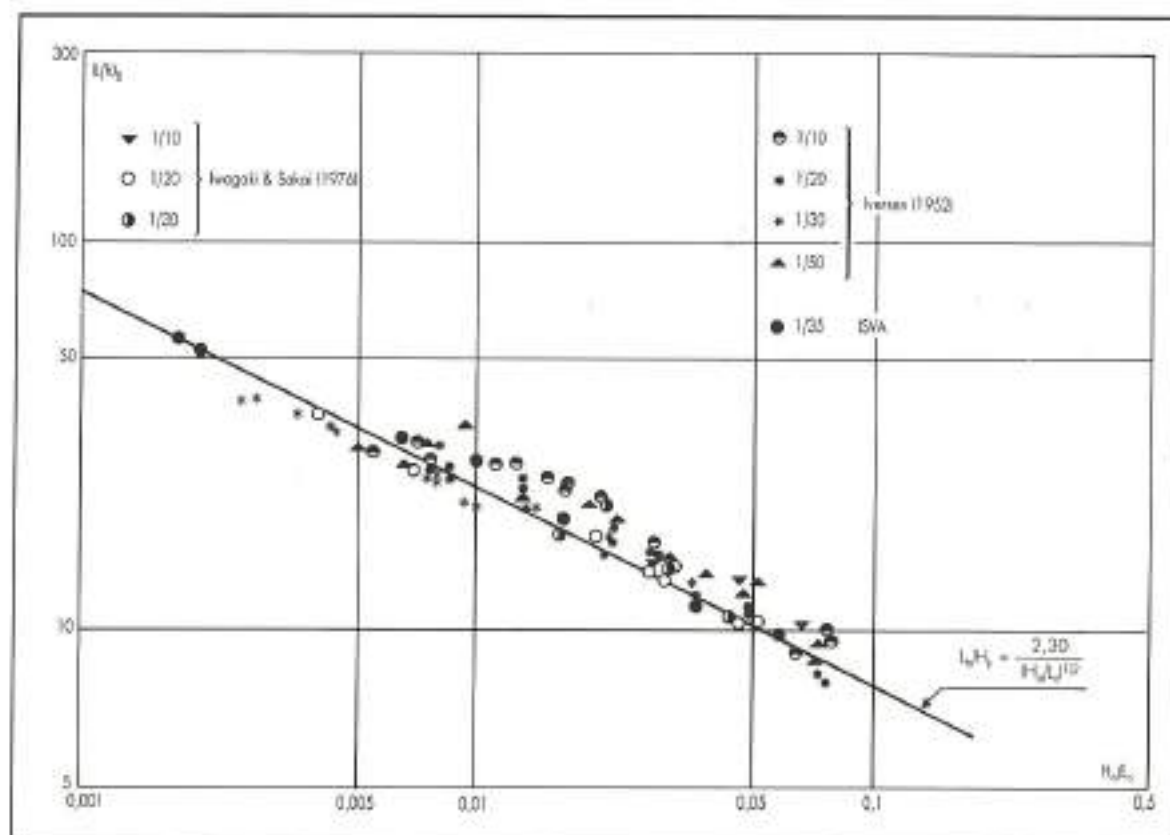


FIGURA 8. Onoevo criterio (Svendsen y Hansen, 1976).

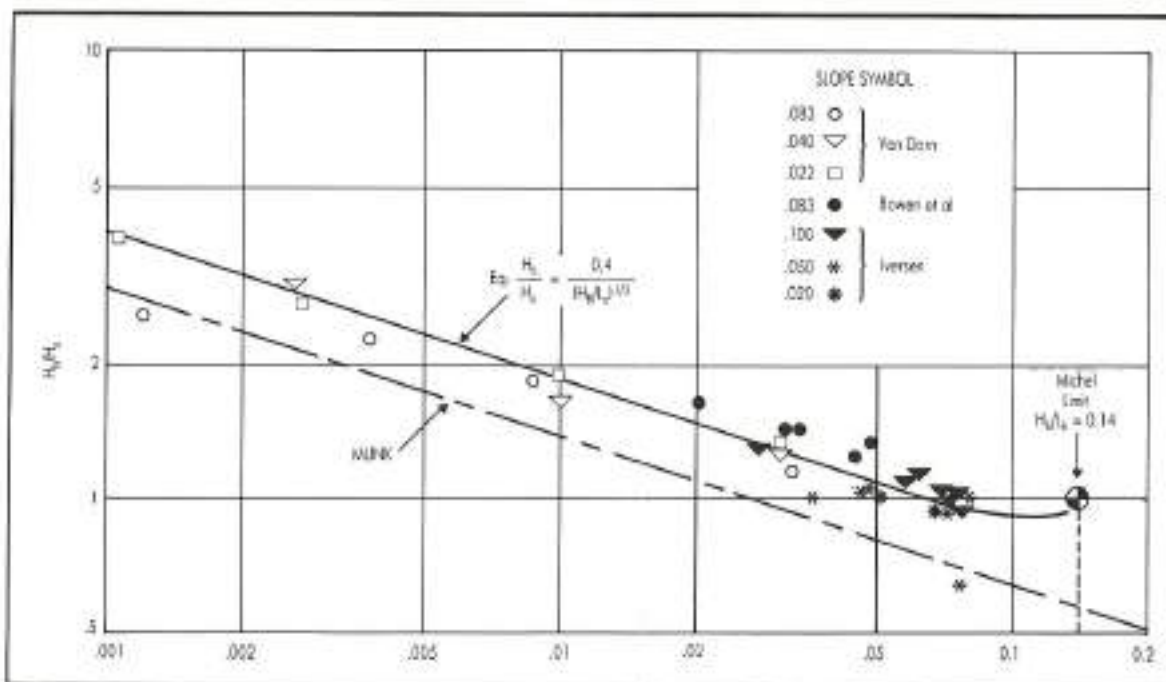


FIGURA 9. Doceavo criteria (Van Dorn, 1978).

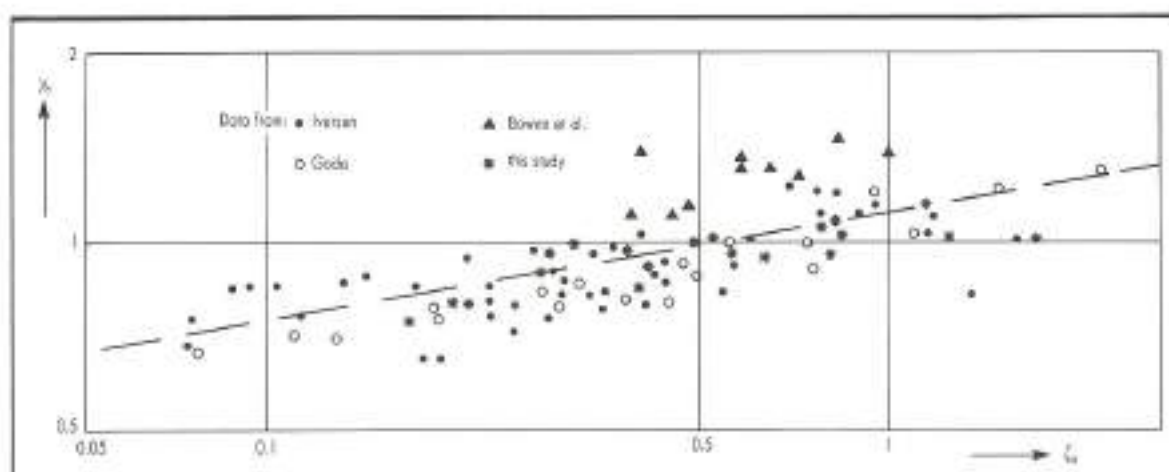


FIGURA 10. Decimotercer criterio (Suzukita, 1980).

$$Hb/Db = 0,568 \cdot m^{0,107} / (Ho/Lo)^{0,237}$$

para $m = 1/5$

RESUMEN

Como colofón de la muestra de los diversos criterios en la actualidad existentes, a continuación se ha realizado un cuadro resumen de todos ellos, para dar una mayor manejabilidad y visión de conjunto de los mismos.

En la careta del cuadro se han dispuesto, en orden horizontal de izquierda a derecha, los siguientes datos:

- 1.^a columna vertical: Año de publicación del criterio.
- 2.^a columna vertical: Nombre de persona o entidad que lo ha determinado.

- 3.^a columna vertical: Teoría en que se ha basado; o sus cálculos o sus experimentos, o ambos.
- 4.^a columna vertical: Tipo de estudio realizado para la consecución del criterio.
- 5.^a columna vertical: Variables que intervienen en la fórmula o gráfico final de dicho criterio.
- 6.^a columna vertical: Se han agrupado los diversos criterios en cuatro fórmulas tipo, a saber:

Fórmula N.º 1 $Hb/Ho = k(Ho/Lo)^A \cdot M^B \cdot C(M) + D(M)$

Fórmula N.º 2 $Hb/Ho = K(Ho/Do)^A \cdot M^B$

Fórmula N.º 3 $Hb/Lb = K(Ho/Lo)^A \cdot M^B$

AÑO	NOMBRE	TEORÍA	ESTUDIO	VARIABLES						FÓRMULA TIPO						GRÁFICA	OBSERVACIONES
				Hb/Ho	Ho/Lo	Ho/Do	Ho/Lb	Ho/D6	M	N.º	K	A	B	C(M)	D(M)		
1944	US-ARMY	O. fixed	Teórico	X	X											SI	
1949	MUNK	O. soil	"	X	X					1	1/3,3	-1/2	0	1	0	NO	
1960	GROEN-W	O. Stokes	"	X	X											SI	Se necesita conocer el ángulo incidente $1/50 \leq M \leq 1/10$
1962	INERSEN	O. fixed	experiment.	X		X			X							SI	
1965	PRINCK	O. soil	"	X		X			X	2	0,68	-1/2	0			NO	
1966	KISH-SAKI	O. soil	"	X		X			X							SI	
1967	LOMBARDI-K	O. fixed	"	X	X				X	1	0,76	-1/4	1/7	1	0	SI	$M = 1/10, 1/50$
1970	GODA	O. fixed	"	X	X				X							SI	$H = 1/10, 1/50$
1972	WEGGEI	O. fixed	"	X	X				X	1	1	-1/3	0	1/2	1/2	SI	$M = 1/10, 1/50$
1972	GAUGHAN	O. fixed	"	X	X				1	0,56	-1/5	0	1	0	0	NO	
1976	SANDERSEN-H	O. Stokes	"	X			X		3	0,435	1/2	0				SI	
1978	VAN COORN	O. fixed	"	X	X				1	0,4	-1/3	0	1	0	0	SI	$M = 1/10, 1/50$
1980	BATTLES-S	O. fixed	"	X				X	X	4	1,1	-1/12	1/6			SI	$M = 1/10, 1/50$
1980	WIND-S	O. fixed	"	X	X				X	1	0,575	0,254	0,031	1	0	SI	$M = 1/5, 1/40$

CRITERIOS PARA DETERMINAR LA ALTURA DE UNA OLA EN ROTURA

$$\text{Fórmula N.º 4 } Hb/D_b = K(H_0/L_0)^A \cdot M^B$$

Los criterios con las casillas en blanco, su resolución con final es en forma gráfica.

- **7.ª columna vertical:** Existencia o no de gráfica para la determinación de solución. No se tiene en cuenta las gráficas aportadas en este trabajo, sino las originales del autor.
- **8.ª columna vertical:** Destinadas a cualquier observación que limite o condicione el criterio.

NOTAS

$$(a) \quad C(M) = D_1[1 + M - D(M)]$$

$$D_1 = (0,01 + 0,5 M)^{1/8}$$

$$(b) \quad D(M) = D_1(1 + M) - D_2$$

$$(1,715 - 0,185 e^{-28M})/D_1 - D_2$$

$$D_2 = (0,01 - 0,01 e^{-28M})/D_1 - D_2$$

$M = m = \tan \beta$ = pendiente de la playa en tanto por uno.

6. NOTA

Este artículo es parte de un trabajo realizado por el CEPYC-CEDEX para la Dirección General de Puertos y Costas.

BIBLIOGRAFIA BASICA

2. Walter H. Hunk. «The solitary wave theory and its applications to surf problems.» *Annals of the New York Academy of Science* (vol. 51, 13 mayo 1949, págs. 376-424).
3. Miguel Angel Hacar. «Rotura de las olas en fondos inclinados.» *Revista de Obras Públicas* (septiembre 1950, págs. 471-473).
4. P. Groen y M. P. H. Weenink. «Two diagrams for finding breaker characteristics along a straight coast.» *American Geophysical Union Transactions* (vol. 31, n.º 3, junio 1950, págs. 398-400).
5. H. W. Iversen. «Waves and breaker in shoaling water.» *Proceedings of the 3th Conference on Coastal Engineering*, Cambridge (vol. 1, 1952, págs. 1-12).

9. Bernard Le Mehaut y R. C. Y. Koh. «On the breaking of waves arriving at an angle to the shore.» *Journal of Hydraulic Research* (vol. 5, n.º 1, 1967, págs. 67-80).
10. Y. Goda. «A synthesis of breaker indices.» *Transactions, Japanese Society of Civil Engineers* (vol. 2, parte 2, 1970).
11. Ib A. Svendsen y J. Bohr Hansen. «Deformation up to breaking of periodic waves on a beach.» *Proceedings of 15th Conference on Coastal Engineering*, Honolulu-Hawaii (vol. 1, 1976, págs. 477-496).
12. J. A. Battjes. «Surf similarity.» *Proceedings of 14th Conference on Coastal Engineering* (vol. 1, 1974, págs. 466-480).
13. Tsuguo Sunamura. «A laboratory study of offshore transport of sediment and a model for eroding beaches.» *Proceeding of 17th Conference on Coastal Engineering* (vol. 2, 1980, págs. 1051-1070).
14. Paul D. Komar y Michael K. Gaughan. «Airy wave theory and breaker height prediction.» *Proceeding of 13th Conference on Coastal Engineering* (vol. 1, 1972, págs. 405-418).
15. William G. Van Dorn. «Breaking invariants in shoaling waves.» *Journal of Geophysical Research* (vol. 83, n.º 6, junio 1978, págs. 2881-2988).
1. Hydrographic Office United States Navy Department. «Breakers and surf (principles in forecasting).» *Hydrographic Office U.S. Navy* (n.º 284, noviembre 1944).
6. H. W. Iversen. «Laboratory Study of Breaker.» *National Bureau of Standards* (circular n.º 521, noviembre 1952).
11. J. Richard Weggel. «Maximum breaker height.» *Proceeding of the American Society of Civil Engineers-Waterways, harbors and coastal engineering division* (WW 4, noviembre 1972, págs. 529-548).
17. H. G. Wind y S. R. Singamsetti. «Breaking waves.» *Delft Hydraulics Laboratory* (M. 1371, 1980).
7. Arthur T. Ippen. «The shoaling and breaking of the solitary wave.» *Proceeding of 5th Conference on Coastal Engineering* (vol. 1, 1955, págs. 27-47).
8. Tsutomu Kishi y Hiroshi Saeki. «The shoaling, breaking and runup of the solitary wave on impermeable rough slopes.» *Proceeding of 10th Conference on Coastal Engineering-Tokyo (Japan)* (vol. 1, 1966, págs. 322-348).

REFLEXIONES SOBRE FALLOS EN TUBERIAS DE HORMIGON PRETENSADO (II)

JOSE CLIMENT BELTRAN

ANGEL MARTINEZ DEL OLMO

Laboratorio Central de Estructuras y Materiales (CEDEX)

RESUMEN. En la parte (I), Ing. Civil No. 64/1987, se exponía el problema de la corrosión fisurante bajo tensión en tuberías de hormigón pretensado. La parte (II) continúa con la exposición de los ensayos realizados con los materiales férricos y la soldadura. Se critica la falta de control de calidad antes del comienzo de la obra y la ligereza que existe en este campo a la hora de emitir opiniones justificadas. Asimismo, se apuntan detalles macroscópicos de cómo es la rotura por c.f.b.t. en las armaduras activas y los fallos del recubrimiento.

En un material policristalino como es este acero, y además, con bastante suciedad del proceso metalúrgico de elaboración, es decir, partículas de óxido de hierro, sulfuro de manganeso, impurezas por agrupaciones atómicas de elementos extraños, defectos propios de la red, dislocaciones, etc., hacen que no haya una linealidad entre la tensión y la deformación correspondiente en un ensayo de tracción monoaxil con probeta cilíndrica, es decir, mientras en algunas zonas se trabaja en el campo elástico, en otras, en cambio, ya se ha rebasado el límite de fluencia plástica y se empiezan a crear microhuecos (pequeñas separaciones atómicas) y cuando aparece la estricción, bajo el efecto de un campo de tensiones triaxil, aumentan rápidamente las cavidades en el centro de la zona de estricción, coalescen y el tamaño del hueco crece produciendo la separación total. El relieve del suelo de la rotura es difícil observar con grandes aumentos por la escasa profundidad de foco de los instrumentos ópticos. El aspecto que presenta este material sano, roto en el ensayo de tracción, después de la observación con microscopio electrónico de barrido, es el de una serie de cavidades o cráteres yuxtapuestos que asemejan a un hueso roto. El borde de unión entre estos huecos es el desgarre final dúctil en la rotura (Tearing). Los mecanismos de la rotura son dúctiles presentando un cambio de forma acusado al intentar separar una probeta en dos partes.

2.2.2. Aceros al carbono para forros y mallas. El verdadero elemento impermeabilizante del tubo de hormigón lo constituye una chapa metálica de acero al carbono extrasuave de espesor de 2 a

3 mm. De bobinas aproximadamente un metro de anchas se recortaban las dimensiones de la virola y se soldaban longitudinal y circunferencialmente, procurando que los cordones de soldadura longitudinales no estuviesen alineados, es decir, estuvieran girados, en una virola, con respecto a la otra.

La virola final era de acero al carbono suave y de mayor espesor de 8 a 10 mm. Esta tiene además la función mecánica de unir las unidades de la tubería, por ello su resistencia mecánica y espesor son mayores. La composición fotográfica de la fotografía 7, muestra una cata en un tubo real y en ella se pueden observar los elementos descritos; análogamente, en la misma fotografía, la malla del revestimiento interior está formada por redondos de armar de diámetros seis y ocho milímetros de acero al carbono extrasuave. Los tramos longitudinales son de mayor diámetro que los transversales. Las unidades de malla rectangular son de 26 mm de separación entre las espiras y 70 mm entre armaduras longitudinales.

A. MICROESTRUCTURAS. En la fotografía 8, puede verse la microestructura de la chapa de 2 a 3 mm de espesor: distribución de fases en forma de mosaico de granos de ferrita, inclusiones de FeO y SMn. La fotografía 9 muestra la microestructura de la chapa de mayor espesor, dos microconstituyentes: Ferrita y Perlita, en forma de bandas de laminación en caliente. Esta disposición de los microconstituyentes le confiere al material propiedades direccionales; además, también se observan partículas de FeO y SMn. La microestructura del redondo de armar, fotografía 10, es similar a

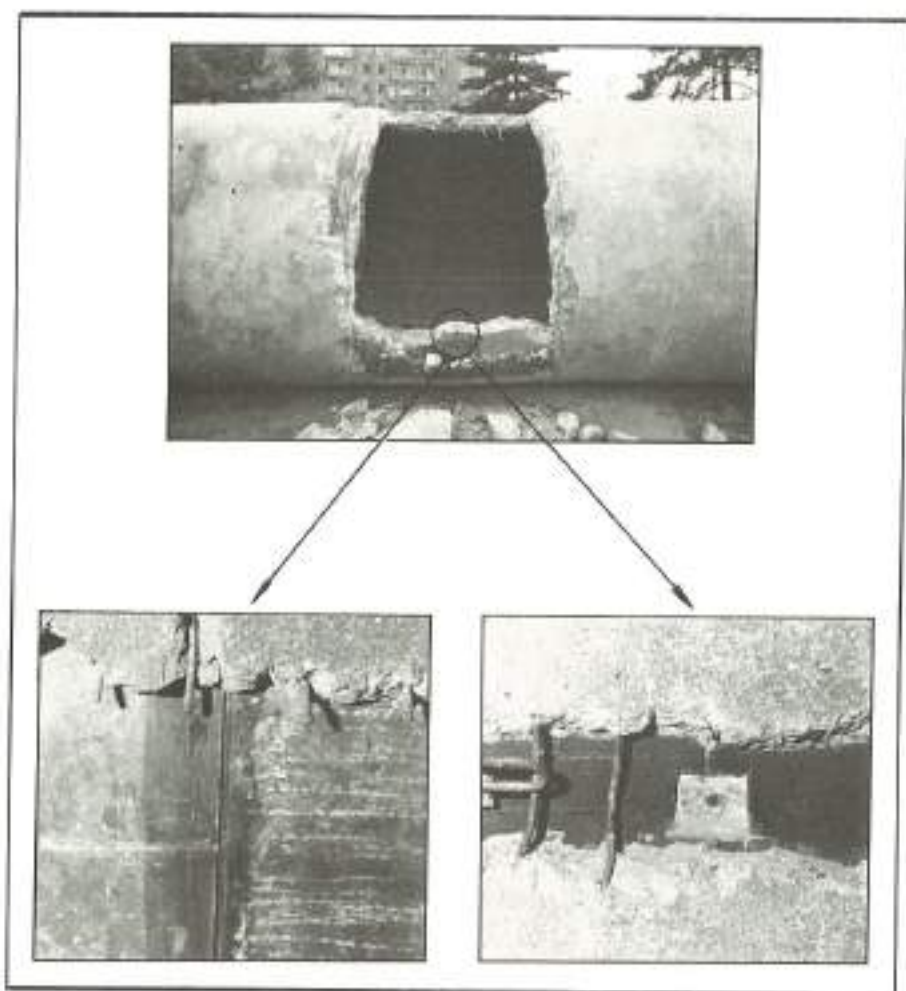
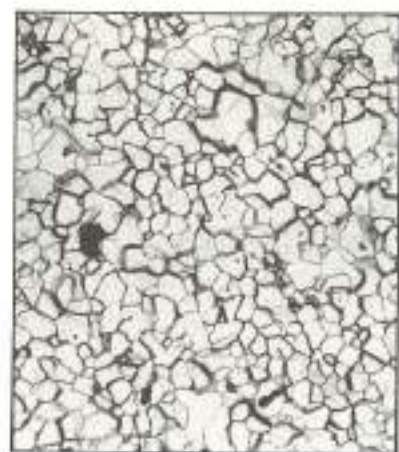


FOTO 7. Celos en un fibro.



100 x 200



100 x 1000

FOTO 8. Microestructura de la chapa: granos de ferita e inclusiones



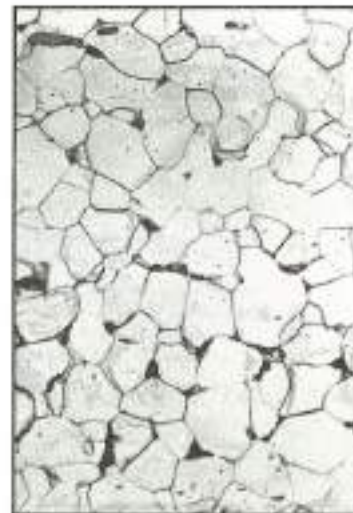
fot x 200



fot x 1000

FOTO 9. Microestructura de
leño y perla en bandas de
laminación.

Diámetro 6 mm



Diámetro 8 mm

FOTO 10. Microestructura del
redondo de armar: leño e
inclusiones.

la de la chapa de menor espesor. El perfil del bruto de fabricación depende del destino y necesidades de la factoría siderúrgica y no de la colada del acero que puede servir para chapa, angular, redondo, etc.

B. PROPIEDADES MECANICAS. Los ensayos mecánicos se han realizado según las prescripciones técnicas indicadas en la normativa vigente en su día, en la actualidad EH-80: «Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado». La Tabla III indica los resultados:

MATERIAL	S_y mm ²	$\sigma_{0,2}$ Kp/mm ²	σ_{max} Kp/mm ²	$\sigma_{0,2}/\sigma_{max}$	Alarg. (%) base 70 mm
CHAPA e = 10 mm	200	26,0	42,0	0,62	28
CHAPA e = 3 mm	60,7	23,5	33,9	0,69	49,6
REDONDO Ø 6 mm	29,9	24,0	36,9	0,65	36,2
REDONDO Ø 8 mm	53,9	33,1	40,8	0,81	31,4

TABLA III.

En el ensayo de doblado, realizado también de acuerdo con las prescripciones técnicas mencionadas, la superficie doblada, donde se producen las máximas tensiones, no presenta ni agrietamiento de la piel, ni defectos de laminación en caliente como: pajas, pliegues, costras de óxido, etc. El acabado superficial es bueno y también la adherencia. Como puede verse en la Tabla III, las características mecánicas de ductilidad y resistencia cumplen el pliego de condiciones.

C. COMPOSICION QUIMICA. El análisis químico efectuado en estos materiales metálicos dio el siguiente resultado (Tabla IV):

MATERIAL	C (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	S (%)
CHAPA e = 10 mm	0,23	—	—	0,003	0,03
CHAPA e = 3 mm	0,06	0,31	0,01	0,006	0,027
REDONDO Ø 8 mm	0,05	0,29	0,02	0,003	0,04
REDONDO Ø 8 mm	0,08	0,32	0,01	0,003	0,04

TABLA IV.

2.2.3. Cordones de soldadura. La unión de las virolas de chapa se ha realizado por el procedimiento llamado «fusión por arco», es decir, la temperatura de fusión del acero y el electrodo de aportación se consigue por el calor que se origina en el cortocircuito entre ambos. Hay muchos procedimientos de soldadura, sin embargo, quizás éste sea el más práctico y sencillo, entre una chapa de espesor pequeño y una varilla de acero al carbono extrasuave, pudiéndose realizar de una manera automática.

Desde el punto de vista metalúrgico, hay que pensar que el cordón/unión es una disolución de metales líquidos muy rápida entre acero base (chapa) y varilla de acero que solidifican con unas condiciones que le impone el tiempo ambiental. Resumiendo, esto quiere decir que entraña todo un proceso metalúrgico de formación de aleaciones, nuevas fases que escorifican, o no, etc., que con la solidificación impuesta pueden dar una buena o mala unión, además de los posibles defectos prácticos usuales.

Lo primero que pide el pliego es «la soldabilidad» de los materiales que entran en juego, sin embargo, ésta no es una propiedad que se pueda

definir de manera clara y depende fundamentalmente de:

1. Composición química de ambos.
2. Procedimiento o técnica empleada.
3. Realización/ ejecución.

El caso que nos ocupa, aceros bajos en carbono, fósforo y azufre, la soldabilidad es buena. La fotografía 11 muestra un estudio metalográfico de un cordón de soldadura en diferentes puntos. No hay formación de fases muy frágiles, sólo la ferrita da lugar al solidificar el acero a la estructura de Widmanstätten por elevada velocidad de enfriamiento.

En algunas inspecciones realizadas a tubos almacenados, fotografía 12, resulta que la cara interior de los bordes de dos virolas adyacentes no estaban soldadas (fotografía 7). El operario cuando realizó el cordón sólo unió los bordes exteriores de las virolas, y mal, porque la geometría del cordón como puede verse en la fotografía 12, no es correcta y no hay unión perfecta.

3. EXAMENES REALIZADOS EN LAS ZONAS DE ROTURA

3.1. ASPECTOS GENERALES

Al examinar en el Laboratorio las cabezas de rotura de las varillas rotas y otras zonas más alejadas de las mismas (fotografías 3 y 13), se observa que no encontramos un excesivo deterioro del material. La pérdida de materia férrea por corrosión es escasa y limitada preferentemente a una zona de anchura irregular que se corresponde con la zona de máxima tracción de las varillas en su incurvación sobre el núcleo de hormigón del tubo y no cubierta por esa parte de lechada, segregada del hormigón del recubrimiento en el momento de realizarlo, y que penetra entre el espacio que dejan las armaduras tesas sobre el núcleo (de 1,5 a 2 cm). Esta zona es donde más alterada estaba la varilla, como si por capilaridad/porosidad hubiese tenido acceso la humedad y se hubiera empezado a iniciar una corrosión húmeda en estas zonas (fotografía 14). Piénsese que si entre el recubrimiento exterior y la varilla tesa, hay un ligero despegue, ésta sería la zona no protegida y expuesta a la humedad, pues ya se ha mencionado que la parte más fluida del recubrimiento en su ejecución, sí puede segregarse y rellenar este espacio.

La superficie de las varillas, al lado de la zona alterada, presentan el color típico gris de la reacción resultante entre una capa de calamina de fabricación de la varilla y un pH muy alcalino. Si se limpian los productos de corrosión de la zona alterada, con una solución decapante, aparecen fisu-

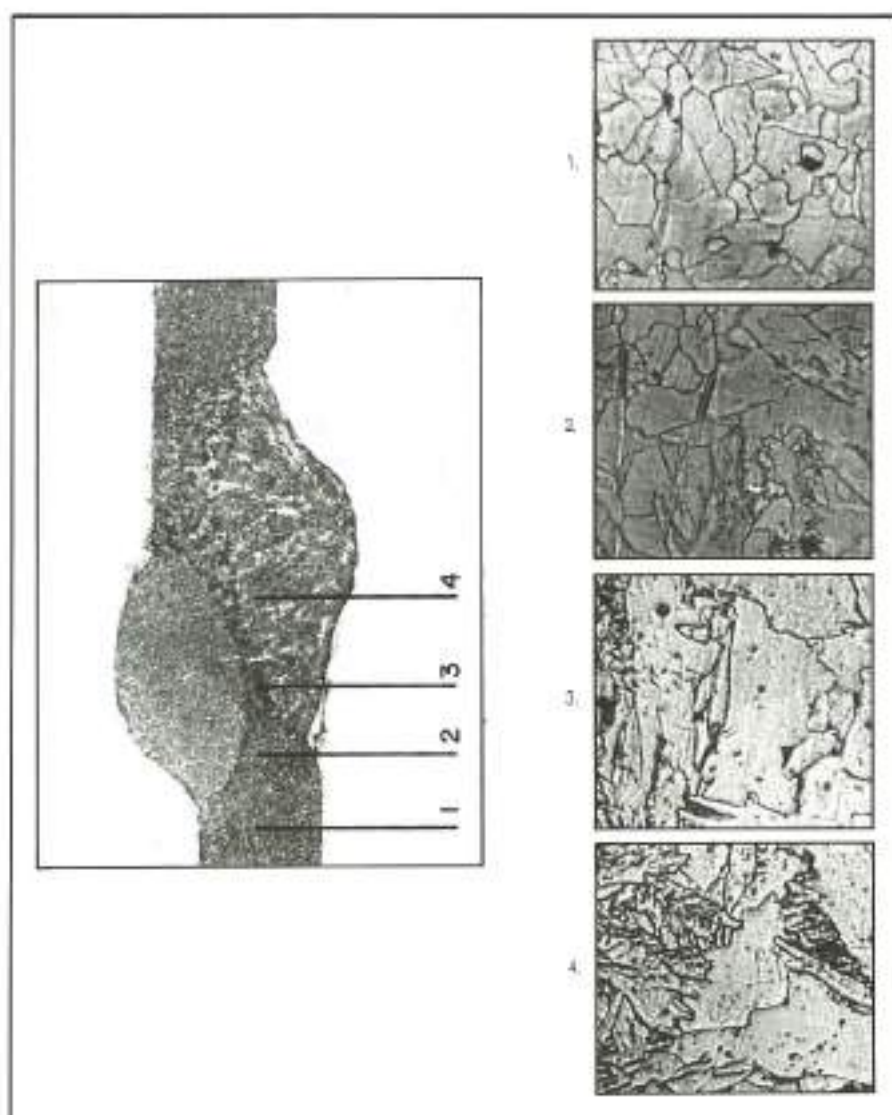


FOTO 11. Micrografías en diferentes puntos del cordón. Buena soldabilidad.

ras en ella (fotografía 15) que contornean y delimitan esta zona corroída.

En todas las varillas las fracturas eran planas y normales al eje de las mismas. La estricción es prácticamente cero (fotografía 3). Por su aspecto macroscópico es una rotura frágil, compárese con el 36 %, de estricción de las varillas sanas (fotografía 6). La observación del relieve de estas fracturas resulta difícil, ya que están cubiertas por los productos de reacción con el medio, posteriormente a la rotura; sin embargo, si se ensaya a tracción, un trozo contiguo a la varilla rota en obra aparecen las manchas negras (lúnulas) de la fotografía 16, que son fisuras existentes y de menor profundidad que las que causaron la rotura explosiva del tubo.

La superficie de esta mancha está compuesta, fundamentalmente, por tres zonas:

- 1.^a La más externa, óxidos de hierro color naranja.
- 2.^a Una media de color verde.
- 3.^a La más profunda de color negro.

El fallo propiamente dicho se produce durante el curso del tiempo (rotura diferida), de la siguiente manera:

1. Etapa de incubación e iniciación de la fisura.
2. Etapa de formación lenta (mancha negra). Crecimiento estable de la grieta. Si se detiene el proceso corrosivo la tensión mecánica existente no rompe la pieza.

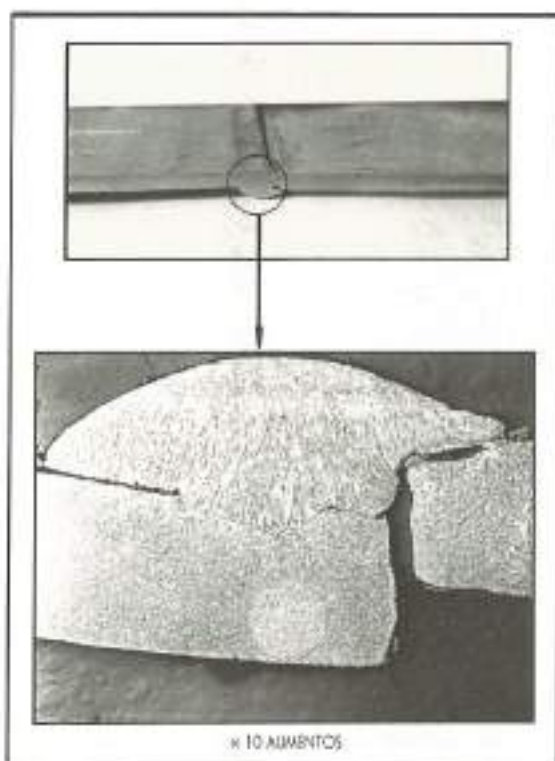


FOTO 12. Macrografía del cordón. Obsérvese la asimetría del cordón.

3. Etapa de tamaño crítico de longitud de grieta, crecimiento inestable y rotura inmediata de la varilla.

En general ocurre que estas fisuras no se corresponden con picaduras fuertes, sino que están al lado, como si fueran la zona catódica de la reacción anódica que están inmediatamente al lado. Las grietas se localizan en torno a fallos del papel protector del recubrimiento, ya sea en las partes

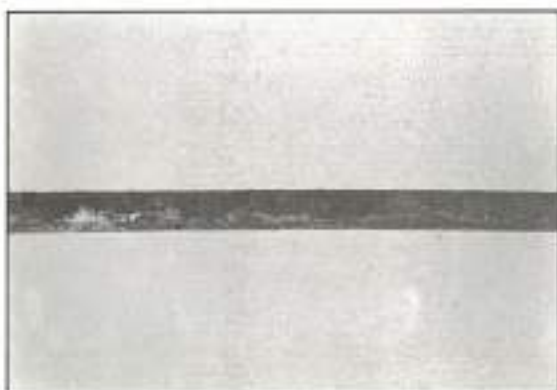


FOTO 13. Dos zonas: una corroída y otra inalterada.



FOTO 14. Zona al lado de la rotura. Obsérvense varillas rotas y la zona descrita.

cercanas a la unión de dos unidades/tubo o en otro punto cualquiera donde el recubrimiento es excesivamente poroso/coqueras, la armadura activa se encuentra sin ese entorno físico protector y el pH inmediato a la piel de las varillas en estos casos está lejos de ser 12,3 unidades.

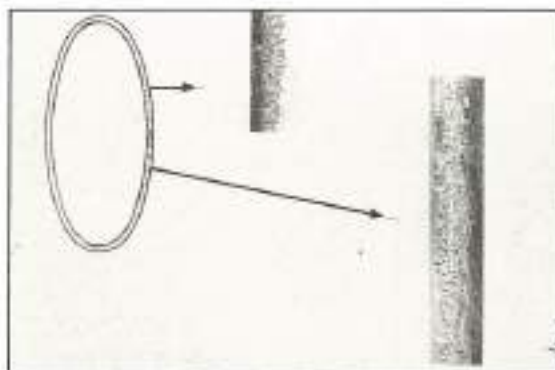


FOTO 15. Zona alterada y fisura.



FOTO 16. Fisura de corrosión bajo tensión.



FOTO 17. Desmontaje del tubo.

Resulta arriesgado, y poco serio, hacer uso del diagrama de Pourbaix para intentar explicar las condiciones electroquímicas de un supuesto problema. Fundamentalmente, porque son varios los potenciales que puede tener un cm^2 de superficie de varilla en condiciones de heterogeneidad y varios los pH locales; por ello, el punto de coordenadas: potencial y pH, no sabemos donde está, además, haciendo caso omiso a la actividad del hierro en solución. Los pares galvánicos óxidos/Fe (u otras fases) son la fuerza impulsora del proceso corrosivo y si no se tiene en cuenta la resistividad, polarización, potencial redox de la solución circundante, etc., entre otras variables, aparte de las ligadas a la mecánica de las fracturas y la metalurgia física de la aleación en cuestión, cualquier explicación del fenómeno será cualitativa.

Podemos decir que el cemento empleado fue un P-350, no se emplearon aditivos y el recubrimiento se curó al vapor. Las propiedades que confiere este recubrimiento a la armadura activa, siempre que haya una buena unión con el hormigón del núcleo, son buenas. No se midió la porosidad y resistencia eléctrica del mismo. El hecho de que la tubería vaya enterrada, y se hayan producido algunas roturas de unidades frente a centenares de los que debe haber, indica una probabilidad del evento insignificante y el papel protector del mismo es bueno, a pesar de la demostrada sensibilidad de este acero al fenómeno.

Los análisis realizados en el agua de conducción y terreno circundante arrojan cifras que no demuestran peligrosidad alguna. La Tabla V da los resultados. Nótese que estas cifras son orientativas y no indican nada orientativo.

Ocurre que cuando hay una explosión de éstas, y se desmonta el tubo de la conducción, se lleva a

MEDIO	pH	$\text{SO}_4 =$	Cl^-	NO_3^-
AGUA DE CON.	6,8	0,01 g/l	0,02 g/l	Nada
SUELO	8	0,02 %	Nada	Trazas

TABLA V.

un parque de almacenamiento, y generalmente, ocurre que al técnico que se le encarga resolver el problema se le llama un poco tarde. Hay un montón de información que se pierde al no observarse in situ por el técnico. Compárese con el caso de un médico que le llevasen un trozo del cuerpo humano y se le preguntara: Doctor, averigüe la causa de la rotura. La respuesta nos la podemos imaginar.

En nuestra experiencia a lo largo de los diferentes fallos se ha podido observar:

1. Recubrimientos defectuosos.
2. Falta de unión íntima entre el recubrimiento exterior que protege la armadura y el núcleo. Suena a hueco cuando se golpea con un martillo. Aquí es donde ocurre el posible fallo. Algunas veces hemos encontrado en estos abombamientos raíces de plantas (fotografía 18).



FOTO 18. No existe el papel protector del recubrimiento exterior.



FOTO 19. Fisura que nace debajo de una mancha de óxido y penetra en la matriz metálica por el borde o atravesando el grano.

Por tanto, el acceso de la humedad a la armadura es la clave para el inicio de la corrosión y tensión que origina la mal entendida corrosión fisurante bajo tensión.

3.2. EXAMEN METALOGRAFICO DE LAS FISURAS

Si se limpian las puntas de las varillas rotas en obra, aparecen fisuras contiguas a la que desencadena la rotura explosiva. La fotografía 19, muestra estas fisuras sobre la varilla y sobre una micrografía después de un corte por un plano paralelo al eje

de la varilla en estudio. Estas fisuras nacen debajo de las costras/productos de corrosión y avanzan con frente amplio, pero de espesor muy pequeño, hacia el interior del alambre impulsadas por la tensión. Este proceso es autoregenerativo, ya que el frente de grieta hace de efecto de entalla y eleva el campo tensional y el consiguiente aumento de energía de deformación plástica, $\sigma \epsilon$, por lo que la reacción electroquímica se acelera en ese punto. El camino de la grieta pasa por el borde de grano o lo atraviesa, es decir, da lugar a grietas/fracturas transgranulares o intergranulares.