

Corrientes de retorno (rip currents) y ondas de orilla en playas

ANTONIO LECHUGA ÁLVARO (*)

RESUMEN Las corrientes de retorno se pueden incluir entre los movimientos hidrodinámicos observables en las zonas cercanas de la línea de orilla de una playa y que, de una u otra forma, tienen una estructura rítmica en sentido longitudinal. El hecho de ser observables indujo a tomarlas en consideración desde tiempos remotos siendo descritas por estudiosos y usuarios de las playas. Modernamente una posible explicación de su aparición e importancia fue avanzada. Esta explicación, en general, conecta su aparición a las llamadas ondas de orilla, siendo el objetivo de este artículo el presentar de una manera lo más simple posible la teoría aparentemente implicada.

RIP CURRENTS AND EDGE WAVES ON BEACHES

ABSTRACT Rip currents may be included amongst the hydrodynamic movements observable in zones close to the shoreline of a beach and which, in one way or another, possess a rhythmic structure in a longitudinal direction. The fact that they are observable led to them being taken into consideration from the earliest times, being described both by scholars and people using the beach. In more modern times, a possible explanation of their appearance and importance was put forward. This explanation of their appearance and importance was put forward. This explanation, in general terms, attributes their appearance to the so-called shore waves and this article aims to present, in the simplest possible form, the theory that is apparently implicit in same.

Palabras clave: Corrientes de retorno; Ondas de orilla; Circulación costera.

1. INTRODUCCIÓN

Las llamadas corrientes de retorno (rip-currents) se pueden definir siguiendo a Bowen como una fuerte y estrecha corriente que fluye hacia el mar desde la zona de rotura. Aunque se pueden presentar en distintos tipos de playas donde se encuentran particularmente bien desarrolladas, son en playas abiertas de suave pendiente expuestas a un regular swell oceánico. Ya en las primeras observaciones de Shepard se describieron algunas de sus principales características, como eran que su extensión mar adentro dependía de la altura del oleaje incidente, que se formaban en el centro de los "beach cups" y a cada lado de las zonas con mayor altura de rotura.

Medidas de campo efectuadas por Shepard e Inman en la Jolla (California) señalaron que en las zonas próximas de la playa el movimiento del agua se podía asimilar a una circulación en "célula" compuesta por 1) Transporte de masa del oleaje en sentido de la propagación, 2) Movimientos del agua paralela a la costa como una "longshore current", 3) Una corriente hacia el mar concentrada en algunos puntos llamada "rip current" y 4) una expansión de la cabeza de la rip current. Experiencias más recientes han señalado que para cada sistema de oleaje incidente se forma un tipo característico de circulación. Se observó por ejemplo que para fuertes

oleajes se producían rip currents potentes y espaciados y para oleajes débiles, unas más pequeñas y más numerosas.

Como primera explicación para la causa de los rip-currents se dio la siguiente: El oleaje por transporte de masa acumula el agua sobre la playa entre la barra de arena y la orilla. Este agua debe volver a su primitiva posición pero en vez de hacerlo a través de todo el frente de playa lo hace mediante corrientes localizadas que atraviesan por puntos espaciados la citada barra y estas constituyen los rip-currents. Un hecho que sugieren todas las observaciones es que la oscilación del agua es predominantemente de eje vertical, es decir que el esquema de circulación es horizontal.

Se han propuesto cuatro grupos de teorías para explicar los mecanismos de la generación de rip-currents, estos son:

- 1) La teoría de Bowen e Inman (1969) sobre las "edge waves" estacionarias que inducen variación espacial periódica en la distribución del tensor de radiación.
- 2) Principio variacional de disipación energética.
- 3) Mecanismo de inestabilidad hidrodinámica de Hino.
- 4) Otros mecanismos.

Estos mecanismos no son mutuamente excluyentes como reconoce expresamente Hino.

2. TEORÍA

Pasemos a esbozar la teoría de Bowen e Inman sobre la generación de las rip-currents.

(*) Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Jefe del Área de Costas del CEDEX (Ministerio de Fomento).

En todas las formulaciones se parte del concepto del tensor de radiación (Longuet-Higgins y Stewart 1964) para describir alguna de las propiedades no lineales de las ondas de superficie.

La definición del citado tensor es la siguiente: El exceso del flujo de movimiento debido a la presencia del oleaje y puede ser considerada como la tensión ejercida por el oleaje sobre el agua.

La teoría de Bowen tiene dos partes claramente definidas.

En la primera demuestra mediante las ecuaciones de movimiento del fluido que supuesta una perturbación periódica a lo largo de la playa de la altura del oleaje, se produce una circulación en células análoga a la observada por Shepard e Inman. En segundo lugar, se toman en consideración las causas de dicha variación periódica de la amplitud y se concluye que ellas son debidas a las llamadas "edge waves" estacionarias, ondas de borde estacionarias, como veremos más adelante.

Analicemos brevemente la primera parte de la teoría. Se establece el sistema de ecuaciones del movimiento con las asunciones siguientes:

- 1) Las corrientes son estacionarias.
- 2) Las velocidades son independientes de la profundidad.
- 3) Presión hidrostática.
- 4) Fluido homogéneo e incompresible.
- 5) Fuerza de Coriolis despreciable.
- 6) Las corrientes son lo suficientemente pequeñas como para no interactuar con el oleaje.

En dichas ecuaciones, como sabemos aparece el tensor de radiación en forma de términos de tensión.

Los valores de las componentes del citado tensor en el sentido de la propagación son los derivados por Longuet-Higgins y Stewart según la teoría lineal.

$$\begin{aligned} S_{xx} &= S_I \cos^2 \alpha_a + S_{II} \\ S_{xy} &= S_I \sin \alpha_a \cos \alpha_a \\ S_{yy} &= S_I \sin^2 \alpha_a + S_{II} \\ S_I &= \frac{1}{16} \rho g H^2 (1 + G) \\ S_{II} &= \frac{1}{16} \rho g H^2 G \\ G &= \frac{2kh}{sh(2kh)} \end{aligned} \quad [1]$$

Las ecuaciones en función de las velocidades u y v se escriben:

$$\begin{aligned} u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + R_x + \tau_x \\ u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} &= -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + R_y + \tau_y \\ \frac{\partial}{\partial x} [u(\bar{\eta} + h)] + \frac{\partial}{\partial y} [v(\bar{\eta} + h)] &= 0 \end{aligned} \quad [2]$$

donde $R_x = A_{II} \Delta_{II}$, $R_y = A_{II} \Delta_{II}$, son términos de fricción debidos a la vorticidad horizontal y donde

$$\begin{aligned} \tau_x &= -\frac{1}{\rho(\bar{\eta} + h)} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) \\ \tau_y &= -\frac{1}{\rho(\bar{\eta} + h)} \left(\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) \end{aligned}$$

Son los términos de tensión debidos al tensor de radiación cuyos valores según la teoría lineal los hemos expresado más arriba.

Como vemos las ecuaciones (2) son las clásicas ecuaciones de la circulación costera con términos impulsores debidos al tensor de radiación del oleaje incidente y términos de fricción debidos a los vórtices y remolinos junto a la turbulencia. En su ya clásico trabajo Bowen asumió una estructura periódica a lo largo de la playa en el oleaje incidente. Con esta estructura los términos del tensor de radiación reproducen estos mismos ritmos espacialmente y se crean las condiciones para las bien conocida circulación celular observable en playas abiertas y expuestas. Los detalles del desarrollo de Bowen son bien conocidos y no los repetiremos aquí.

Lo más interesante para resaltar aquí es que teniendo en cuenta los valores del tensor de radiación mediante la oportuna derivación se obtiene que:

$$\frac{\partial \tau_x}{\partial y} - \frac{\partial \tau_y}{\partial x} = -\frac{1}{4} \gamma \frac{\partial^2 H}{\partial x \partial y} \quad [3]$$

$$\text{siendo} \quad \gamma = \frac{H}{(h + \bar{\eta})}$$

Derivando la primera ecuación (2) parcialmente respecto de y y la segunda parcialmente respecto de x , y restando una de otra se obtiene (3) como la contribución impulsora del oleaje a la circulación costera. Por otra parte definiendo una función de corriente Ψ en la forma,

$$\begin{aligned} u(h + \bar{\eta}) &= -\frac{\partial \Psi}{\partial y} \\ v(h + \bar{\eta}) &= \frac{\partial \Psi}{\partial x} \end{aligned} \quad [4]$$

se obtiene una solución de la circulación costera en función de la longitud de onda en sentido longitudinal de la playa, λ (véase figura 1).

Bowen señala que para mayores números de Reynolds la circulación se convierte en más asimétrica concentrándose la corriente off-shore, la rip-current y ampliándose la onshore en correspondencia con la circulación observada. De todas formas este modelo lineal es más cualitativo que cuantitativo, pero hay algunos resultados dignos de destacarse, por ejemplo el confinamiento de la longshore en la zona de rompientes y la correspondencia de las rip-currents con las regiones de menor altura de rotura en consonancia también con las observaciones.

Como mecanismo generador de la modelación rítmica del oleaje a lo largo de la playa la mayoría de los autores apuntaron a las llamadas ondas de orilla, que son objeto del siguiente apartado.

3. ONDAS DE ORILLA

Las ondas de orilla son una clase de ondas atrapadas en la orilla con periodos más grandes que los del oleaje incidente pero mucho menores que los de las ondas de plataforma.

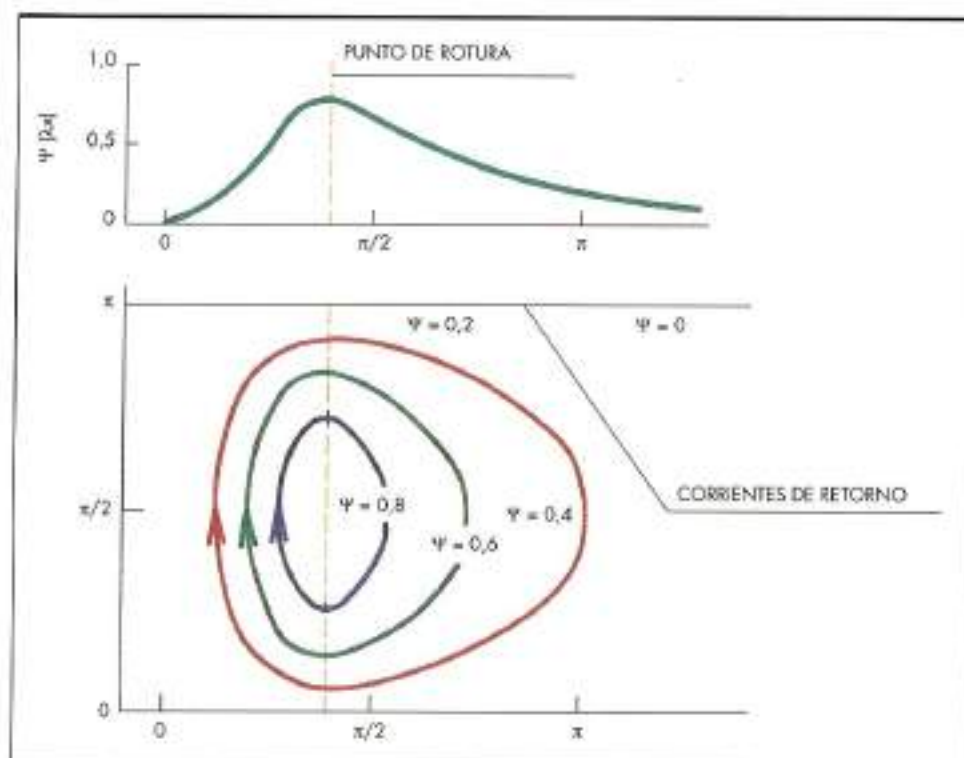


FIGURA 1. Solución de Bowen a la corriente de retorno.

inerciales y de marea, etc. El mecanismo que las atrapa en la costa es la refracción del oleaje de superficie cuando este incide sobre una playa con pendiente relativamente pronunciada.

La solución lineal de ondas de orilla se conoce desde Stokes, en 1846. Si embargo, la correspondiente en aguas poco profundas para los distintos modos se debe a Eckart, en 1951. El problema de autovalores planteado tiene la siguiente solución, para $h = \tan \beta x$,

$$\phi_n = \frac{a_n \cdot g}{\omega} e^{-kx} L_n(2Kx) \begin{pmatrix} \cos ky \cos \omega t \\ \cos ky - \omega t \end{pmatrix} \quad [5]$$

siendo $L_n(2Kx)$ los polinomios de Laguerre de orden n . En el paréntesis figuran, arriba, la solución de la onda estacionaria y, abajo, la de onda progresiva. En ambos casos la frecuencia correspondiente sigue la ley de dispersión para los distintos modos,

$$\omega^2 = gk(2n+1)\tan\beta$$

Como sabemos, los valores de los polinomios de Laguerre se obtienen como,

$$L_n(\xi) = e^{\xi} \frac{d^n}{d\xi^n} (\xi^n e^{-\xi})$$

y para los tres primeros modos, valen,

$$\begin{aligned} n=0 & \quad L_0(2Kx) = 1 \\ n=1 & \quad L_1(2Kx) = 1 - 2Kx \\ n=2 & \quad L_2(2Kx) = 1 - 4Kx + 2(Kx)^2 \end{aligned} \quad [6]$$

Con (5) y (6), y teniendo en cuenta que:

$$\eta = \frac{1}{g} \frac{\partial \phi}{\partial t}$$

queda perfectamente definida la solución lineal de las ondas de orilla en playas de pendiente uniforme (véase figura 2).

Se conoce también la solución de las ondas de orilla para playas no uniformes, en general asumiendo algunas restricciones: playa exponencial (solución de Ball), playas polinómicas, problema inverso (véase bibliografía).

La clase de solución más generalizada de tipo Ball incluyen las funciones hipoergeométricas del tipo,

$$F(a, b, c, Q)$$

cada una con su correspondiente ecuación de dispersión.

En la figura 3 aparece la superficie libre de una onda de orilla de modo 1 en un tiempo fijado. En la figura 4 aparece la superficie libre de una onda de orilla excitada por un oleaje normalmente incidente en una playa. En la figura 5 aparece esta misma onda de orilla pero excitada por un oleaje que incide oblicuamente.

4. CORRIENTES DE RETORNO. OTRA INTERPRETACIÓN

Recientemente ha aparecido una nueva descripción de las corrientes de retorno basadas en la consideración de un oleaje con estructura rítmica bidimensional. Los proponentes son Hammack, Scheffner y Segur (véase bibliografía). Estos autores proponen la descripción del oleaje en aguas someras mediante un tipo de solución de la llamada ecuación de Kadomtsev y Petviashvili, que se escribe:

$$(f_t + 6 \cdot f \cdot f_x + f_{xx})_x + 3f_{yy} = 0 \quad [7]$$

donde los subíndices se entienden como derivadas parciales. Como vemos esta ecuación es una cierta extensión bidimensional de la bien conocida ecuación de Korteweg-de Vries que adimensionalizada se escribía:

$$f_t + 6 \cdot f \cdot f_x + f_{xx} = 0$$

FIGURA 2. Los cuatro primeros modos de la solución de las ondas de orilla en playa uniforme. A trazos, la solución de la onda reflejada.

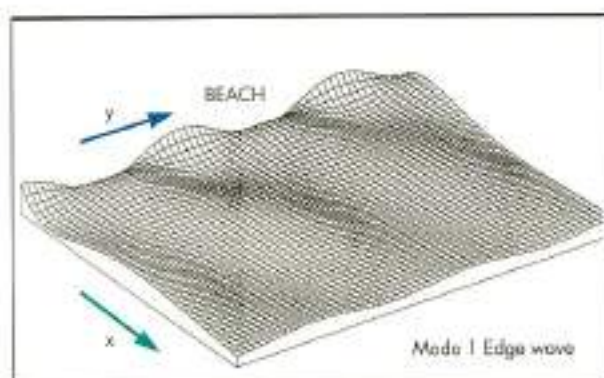
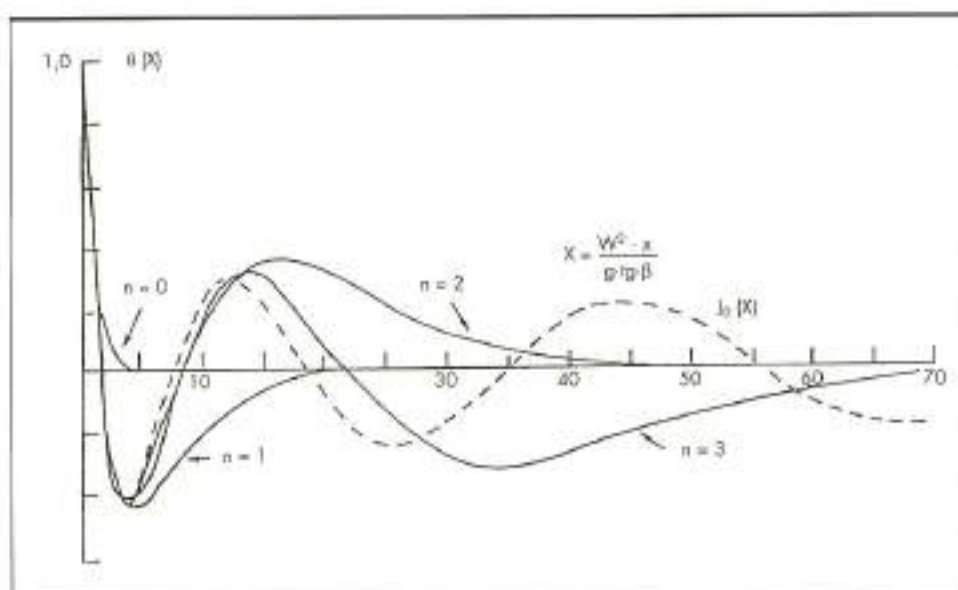


FIGURA 3. Gráfico 3D de la superficie libre de la onda de orilla de modo 1.

Los autores citados han estudiado soluciones periódicas de la ecuación (7), llegando a la conclusión de que existen soluciones cuasiperiódicas en la forma:

$$f = 2\delta_N^2 \ln \theta_N$$

donde θ_N es la función Z de Riemann de género N.

Esta clase de soluciones son llamadas de género 2 para diferenciarlas de las del género 1 que son las clásicas ondas cnoidales.

Lo interesante de esta solución es que simula muy bien el oleaje de tipo de cresta corta que como sabemos es el que mayoritariamente se presenta en una playa. La estructura de la superficie libre es casi hexagonal y tiene una apariencia similar a la representada en la figura 7. Los frentes se propagan en la dirección de las crestas principales manteniendo su forma. Según los autores citados la periodicidad de las ondas a lo largo de la playa se mantiene después de rotura dando origen a una estructura realmente compatible con las corrientes de retorno y que explican algunas características de las mismas difíciles de reproducir en otros modelos teóricos. En particular la solución de género 2 reproduce fielmente una caracte-



FIGURA 4. Onda de orilla y oleaje incidente normal a la playa.

rística esencial de las corrientes de retorno, que es lo que las hace realmente peligrosas y esto es que estas son relativamente estrechas comparadas con su espaciamento. Como en otros modelos las rip-current aparecen en los lugares donde las crestas son pequeñas. La figura 8 reproduce las líneas de contorno relativas a la estructura bidimensional de las ondas.

5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Las corrientes de retorno, aparte de la curiosidad que puedan suscitar pueden ser realmente peligrosas para los bañistas, si no se toman las debidas precauciones, precisamente su peligrosidad es debida generalmente al hecho de que el flujo suele ser intenso ya que la corriente de retorno suele ser bastante estrecha y por tanto con una sección relativamente pequeña lo cual aumenta su velocidad a igualdad de caudal.

Por otra parte las corrientes de retorno se encuentran claramente ligadas a la llamada circulación costera. Han sido numerosas las aproximaciones a este problema usando todo tipo de ecuaciones. En esta revisión señalamos dos de ellas:

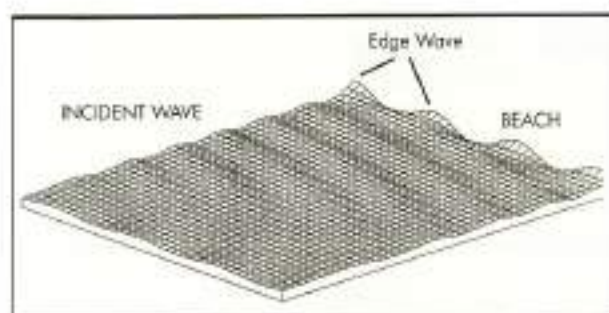


FIGURA 5. Onda de orilla y oleaje incidente oblicuo en una playa.

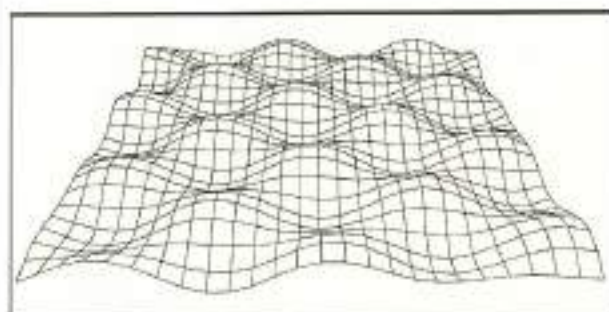


FIGURA 6. Superficie libre de un tren de ondas con periodicidad espacial en dos dimensiones.

- 1) El planteamiento y solución de Bowen.
- 2) La solución de Hammack y otros usando la ecuación (KP).

Las corrientes de retorno se encuentran sin duda ligadas a modelos rítmicos en la playa, pero a diferencia de otros casos la playa donde aparecen suelen ser bastante tendidas con lo cual los mecanismos de excitación parecen ser distintos a los observados en las llamadas "beach cusps".

Como en otros aspectos del estudio de la naturaleza es posible en este caso encontrar diferentes modelizaciones para tratar de explicar el mismo fenómeno y por lo tanto es de aplicación el principio de Ockham (Ockham's razor). En algunos casos las distintas modelizaciones pueden no ser excluyentes sino complementarias. El hecho a modelizar es una cierta estructura bidimensional en la zona de rompientes con aparición de una cierta periodicidad longitudinal. Lo importante de los desarrollos recientes de Hammack et al. es que queda perfectamente modelado el confinamiento de la rip current en estrechas franjas perpendiculares a la playa y separadas por amplios trechos de costa en playas abiertas, expuestas y de poca pendiente.

BIBLIOGRAFÍA

- BALL, F. K. (1967). Edge waves in an ocean of finite depth. *Deep Sea Res.* 14, 79-88.
 BOWEN, A. J. (1969). Rip currents, 1, Theoretical investigations, *J. Geophys. Res.* 74, 5467-5478.



FIGURA 7. Vista frontal de la superficie libre de un tren de ondas con periodicidad espacial en dos dimensiones.



FIGURA 8. Dibujo en planta de las curvas de nivel de las ondas con periodicidad espacial en dos dimensiones.

- BOWEN, A. J., and D. L. INMAN. (1969). Rip currents, 2, Laboratory and field observations. *J. Geophys. Res.*, 74, 5479-5490.
 BOWEN, A. J. and INMAN, D. L. (1971). Edge Waves and Crescentic Bars. *J. Geophys. Res.* 76, pp 8662-8671.
 HAMMACK, J.; SCHEFFNER, N.; SEGUR, H. (1991). A note on the Generation and Narrowness of Periodic Rip Currents. *J. Geophys. Res.* 96, 4909-4914.
 HINO, M. (1975). Theory on formation of rip-current and cuspidal coast, *Proc. Conf. Coastal Eng.* 14th, 901-919.
 LECHUGA, A. (1991). A new solution to the equation of the edge waves on beaches with non uniform slope. XXIV IAHR Congress-Madrid.
 LECHUGA, A. (1995). Subharmonic Edge Waves. Stability Analysis. *Proceedings of the Coastal Dynamics'95*, 281-292.

Drayfil®



Depuradora de aguas residuales Bules MURCIA 120.000 m² (impermeabilizada con lámina DRAYFIL Embalses)

Marca la diferencia para culminar cualquier obra bien hecha.

Drayfil® EDIFICIOS

Drayfil® EMBALSES

Drayfil® AGUA POTABLE

Drayfil® TÚNELES

Drayfil® PISCINAS

AISCONDEL LAMINADOS, S.A. es pionera en España en la investigación y desarrollo de las láminas impermeabilizantes de PVC para todo tipo de instalaciones, en la construcción, obras públicas, embalses y agricultura.

Esta larga experiencia, unida a los constantes avances tecnológicos, la sitúa en la primera línea del sector.

Todas las láminas impermeabilizantes de PVC-P fabricadas por AISCONDEL LAMINADOS, S.A. bajo la marca DRAYFIL, poseen la certificación AENOR.



AISCONDEL
LAMINADOS, S.A.

