

EFFECTOS DE LOS MECHINALES EN DIQUES DE CORRECCIÓN HIDROLÓGICO-FORESTAL.

Ignacio PÉREZ-SOBA DIEZ DEL CORRAL (1)

(1) Ingeniero de Montes. Gobierno de Aragón. Servicio Provincial de Medio Ambiente. Sección de Gestión Forestal. Plaza de San Pedro Nolasco, 7. 50071 Zaragoza. Correo electrónico: iperezs@aragon.es

Resumen:

Los mechinales o troneras cumplen una función vital de desagüe de los diques de corrección hidrológico-forestal. La comunicación analiza cuáles son los efectos del paso de agua por los mechinales sobre la estabilidad del dique, mediante dos métodos. Uno, aproximado, que considera únicamente para el cálculo del peso estabilizador el de la sección más debilitada por los orificios, adoptando posteriormente el reparto de tensiones del macizo inalterado. Otro, que usa la teoría elástica de Timoshenko, permite llegar a la conclusión de que los valores de la compresión vertical sólo se ven alterados de una manera significativa por el mechinal en un entorno de éste definido por un rectángulo vertical cuyos lados son una proporción sencilla del radio del mechinal. Dentro de este rectángulo, el orificio provoca una serie de tensiones que refuerzan la cohesión de la fábrica, lo que permite adoptar para el cálculo de la estabilidad al vuelco en la zona de los mechinales secciones de anchura igual al lado menor del rectángulo antes definido. De esta forma, los valores del peso estabilizador resultan más favorables, lo que permite realizar unos diseños menos voluminosos (y por tanto, más baratos y menos impactantes) con el mismo grado de seguridad.

Palabras clave:

Hidrología forestal, Elasticidad, Dique, Métodos de cálculo.

1. LOS MECHINALES Y SU UTILIDAD EN LAS OBRAS HIDROLÓGICO-FORESTALES.

Los elementos más comunes y sencillos de evacuación del agua en los diques de corrección hidrológico-forestal son los mechinales o troneras. En hidrología forestal, se designa con esos dos términos a los conductos que atraviesan la masa del dique, a distintas alturas, con una cierta pendiente hacia aguas abajo, y que tienen por función la de colaborar al desagüe de la avenida o del caudal habitual, o drenar la cuña de sedimentos retenidos. Fuera del ámbito forestal, el término “mechinal” tiene otros significados. En obras públicas, designa una abertura en los cimientos de una estructura, dejada premeditadamente con la colocación de un tubo dentro del encofrado, antes de verter el hormigón. En arquitectura también designa el agujero que resulta en un muro por haberse incrustado en él, durante su construcción, los maderos de un andamio.

Podemos analizar, muy someramente, cuáles son las consecuencias más evidentes sobre la estructura de esas funciones de drenaje o desagüe. Así, mientras el mechinal no es alcanzado por el aterramiento, desempeña las siguientes funciones:

- Contribuye a la capacidad de desagüe del dique, disminuyendo la altura de la lámina de agua sobre el vertedero y la carga hidrostática sobre la cimentación.
- Ayuda a evitar el desbordamiento por las alas, caso de que se produzca una avenida que superara la de cálculo.
- Permite desaguar las avenidas de escasa entidad en cauces temporales, sin obligar a la acumulación de agua hasta que ésta alcance la altura del vertedero, y por tanto evitando esfuerzos a la estructura (al aminorar los empujes hidrostáticos prolongados sobre el paramento aguas arriba), y permitiendo la circulación de agua si ésta tiene un valor ecológico o social importante aguas abajo.

Una vez esté el dique colmatado de sedimentos, el mechinal tiene como misión fundamental

la de realizar un drenaje en el aterramiento. Éste, nada más producirse, está formado por una mezcla fluida de agua y sedimentos, que conviene drenar cuanto antes para que la cuña de sedimentos ocupe lo menos posible, de modo que se pueda maximizar la cantidad de sedimentos retenida por el dique, y por otra parte la cuña sea coherente y estable, más parecida a un suelo fresco que a uno encharcado. El drenaje del aterramiento sirve también para aliviar los esfuerzos a los que está sometido el dique.

2. ESTADO ACTUAL DE LA CUESTIÓN.

2.1. Bibliografía sobre aspectos generales de los mechinales.

Sorprende que, pese a la importancia que demuestran tener estos elementos, apenas se haya tratado en la literatura científica forestal su cálculo, dimensiones o disposición. En el libro de referencia para los primeros hidrólogos forestales españoles, el del francés THIERY (1914), ni siquiera se trata el tema, puesto que este autor era partidario de aterrizar artificialmente los diques, de modo que se obtuviera cuanto antes la pendiente de compensación. El libro clásico de GARCÍA NÁJERA, en su segunda edición (1962), si bien los califica de “detalle importante”, sólo da una muy somera orientación sobre sus características técnicas (p. 256): deben tener forma rectangular, de altura dos a tres veces mayor que la base (pudiendo ser ésta de 15 a 25 centímetros) y deben ser numerosos, dependiendo de la naturaleza de los materiales, hasta uno por cada 5 ó 6 metros cuadrados de paramento (es de suponer que de proyección sobre la vertical del paramento aguas arriba), dependiendo de “la naturaleza de los materiales” (es de suponer que la de los sedimentos que se pretende retener, no la de los del propio dique). GARCÍA NÁJERA desaconseja el uso de mechinales de forma cuadrada porque si se sitúan bajos, no cumplen su objetivo más que parcialmente, y si altos, están expuestos a que provoquen la formación de un agujero en el aterramiento y que parte de éste escape por ellos durante los períodos de caudal normal o de crecidas moderadas. Hace también una breve referencia (p. 246) a la conveniencia de disponer una línea de mechinales en la misma línea de fundaciones, “con el objeto de evitar posibles subpresiones que quedan prácticamente eliminadas en cuanto el dique empieza a aterrarse, si son en número suficiente y se tiene cuidado de que su desagüe esté expedito”.

Aunque parezca sorprendente, son estas pocas características del libro de GARCÍA NÁJERA (ya recogidas en alguna otra obra suya anterior, como GARCÍA NÁJERA *et al.*, 1959) las que desde entonces han repetido las principales publicaciones generales sobre construcción de diques contra la erosión. Así, el primer gran libro de LÓPEZ CADENAS DE LLANO (1965, p. 172), afirma incluso de los mechinales que “su interés, más que constructivo, puede ser social, permitiendo en todo momento la continuidad de la corriente y su utilización para el riego aguas abajo”, lo que parece obviar las utilidades antes expuestas. Es este libro también el que recomienda dar la pendiente del 3% aguas abajo. En la literatura más moderna, MINTEGUI y LÓPEZ UNZU (1990, p. 258), amplían la recomendación de GARCÍA NÁJERA a una ratio de 5-8 m² para cada mechinal, y proponen como ejemplo mechinales de 20x30 cm, o bien circulares de 30 cm de diámetro. El libro recopilatorio dirigido por LÓPEZ CADENAS DE LLANO, en su segunda edición (1998), recomienda uno por cada seis metros cuadrados, y, aunque menciona como ejemplos las dimensiones de 20x30 cm, remite, para dimensiones y materiales, a “los que indique la buena estética” (p. 681). También hace una breve referencia a la posibilidad de usar mechinales verticales para aliviar la subpresión aguas arriba del dique (p. 688). Por último, JOVER y BIDANIA (2001, p. 24), atribuyen el origen de los mechinales a “tiempo inmemorial”, señalan como antiguos los mechinales rectangulares de 20 ó 30 cm. de altura, califican como más usuales los circulares de 10 ó 20 cm. de diámetro, y recomiendan una densidad de mechinales muy superior a la de los demás autores: la de uno por metro cuadrado.

2.2. Los métodos de BLEIN (1947) para determinación del número de los mechinales.

Como se ha visto, las obras generales sobre construcción de diques dan recomendaciones

sobre el número de mechinales por superficie de paramento aguas arriba sin justificarlas, basándose en la experiencia constructiva. La única publicación que recomienda, basarse en por otra parte elementales principios hidráulicos, para determinar el número de mechinales a utilizar en un dique, es un añejo trabajo del Ingeniero de Montes Federico BLEIN (1947). Este autor se preocupa, fundamentalmente, del papel de las troneras en la disminución de los esfuerzos a soportar por la estructura del dique, subrayando la importancia (entonces no tan clara) de calcular los diques en función de los esfuerzos hidrodinámicos, y no de los esfuerzos estáticos de las tierras retenidas.

Para analizar la capacidad de desagüe de los mechinales, usa BLEIN sucesivamente las expresiones de la hidráulica de la época para los casos de un vertedero en pared gruesa (caso difícilmente asimilable al de un mechinal, por desprestigiar por completo el rozamiento del líquido con las paredes de la tronera); un canal (más adecuado para los mechinales más altos); un desagüe por orificio con tubo adicional (para los mechinales de alturas intermedias en los que la presión debida a la cota de la superficie libre influye en la salida más que la velocidad con la que llega el líquido) y una tubería forzada (más adecuado para grandes alturas del líquido, y por tanto mechinales más bajos).

Las fórmulas propuestas por este autor para calcular la capacidad de desagüe de un mechinal, en cada uno de los supuestos, se describen a continuación. Para el caso de asimilarlo a un canal, BLEIN propone usar la fórmula de BAZIN:

$$R \cdot I = \varphi(U) = \frac{1}{7.568} \left(1 + \frac{\gamma}{\sqrt{R}} \right)^2 U^2$$

siendo R el radio hidráulico, I la pendiente del mechinal, U la velocidad media, y $\gamma=0,46$ según BAZIN para paredes de albañilería irregular. Esta expresión nos permite calcular U, y de ahí la obtención del caudal es elemental.

Para el caso de asimilarlo a un orificio con tubo adicional, BLEIN propone como fórmula:

$$Q = 0,82S \sqrt{2gH}$$

siendo S la superficie del mechinal, H la altura de la lámina libre con respecto al centro de éste y g la aceleración de la gravedad. Por último, para el caso de que lo supongamos asimilable a una tubería forzada, la expresión sería

$$S^2 \delta H = XL \frac{1}{7.568} \left(1 + \frac{\gamma}{\sqrt{R}} \right)^2 U^2$$

siendo δ la densidad del líquido, X el perímetro mojado, y los demás parámetros los explicados para el primer caso.

A partir del caudal de cálculo, y de la capacidad de evacuación de los mechinales, este autor propone calcular éstos de tal manera que sean, ellos solos, capaces de evacuar la avenida, lo cual, en nuestra opinión, conduce a un dimensionamiento claramente excesivo de estos conductos, al menos en diques convencionales (no “vacíos”).

3. CÁLCULO DE LOS EFECTOS DE LOS MECHINALES SOBRE LA ESTABILIDAD Y RESISTENCIA DEL DIQUE.

De este modo, con una elección previa de dimensiones y materiales, y con la aplicación de los métodos propuestos por BLEIN, o por cualquier otro análogo, podríamos determinar el número de mechinales que precisa el dique. Ahora bien, la existencia de un número determinado de mechinales o troneras dentro del cuerpo del dique, al margen de sus indudables efectos hidrológicos positivos, tiene también unos efectos negativos sobre la estabilidad y resistencia del dique, que no por ser pequeños hemos de olvidar. La capacidad de resistencia a las cargas y sollicitaciones a que

estará sometido, de acuerdo con las hipótesis de trabajo generalmente admitidas para los diques de gravedad (la inmensa mayoría, dentro del ámbito forestal), se verán alteradas tanto por la disminución del peso estabilizador (debido a la existencia de unos orificios que a veces son de cierta envergadura) como por la disminución de las secciones de reparto de las cargas, lo que a su vez producirá una alteración en la distribución de las tensiones principales, que no seguirán las mismas líneas isostáticas que en un macizo de gravedad no alterado.

La finalidad fundamental de esta comunicación es analizar esta cuestión, para incluirla dentro de los cálculos habituales de un dique, en el caso de que éste (o el mechinal) tenga unas dimensiones tales que requiera un estudio detallado. Para ello se nos ofrecen, a priori, dos posibilidades: un método aproximado, muy sencillo, que nos valdrá para obras de poca entidad, y otro más detallado, derivado de la teoría de la elasticidad, que nos da conclusiones útiles para el cálculo de diques de cierta dimensión.

3.1. Método aproximado.

El método que podría seguirse para el cálculo de estas secciones debilitadas por troneras amplias, sería el de considerar únicamente, para el cálculo del peso estabilizador del macizo, el correspondiente a la sección más debilitada por los orificios, lógicamente llenos de agua, adoptando posteriormente un reparto de tensiones análogo al del macizo inalterado.

Este método es muy sencillo, pero sólo resulta aplicable en el proyecto de obras de escasa altura útil, por dos motivos derivados de las simplificaciones adoptadas. El primero consiste en que, desde el punto de vista económico y ambiental, este método tiene el evidente problema de que el peso estabilizador queda demasiado infravalorado (por ejemplo, no se considera en absoluto la cohesión transversal del macizo), y por tanto el cálculo da como resultado unas tensiones máximas muy alejadas de las reales existentes, por lo que se tiende a diseñar secciones excesivamente gruesas, antieconómicas, que en obras de escaso volumen son asumibles, pero que en obras de tamaño respetable elevan notablemente el presupuesto y el impacto ambiental de la obra, sin beneficio para la seguridad de la estructura.

Por otro lado, desde el punto de vista constructivo, este método tampoco consideraría los efectos que en determinadas zonas causan los orificios, a efectos de establecer la condición de no deslizamiento. En el caso, nuevamente, de obras de pequeña dimensión, los valores de las tensiones originadas por las cargas son siempre muy pequeños, en general inferiores a la décima parte de la capacidad portante de cualquier clase de hormigón existente en el mercado, o de la mampostería hidráulica bien realizada, por lo que este defecto sería despreciable. Ahora bien, en el caso de diques de hormigón o de mampostería hidráulica que, en la sección ocupada por las troneras o mechinales, alcancen una altura considerable sobre cimientos (más de 8 metros, por ejemplo), o bien una alta carga de agua en las condiciones más desfavorables (más de 10 metros), conviene emplear un método más ajustado a las condiciones elásticas que realmente se producen en el macizo de gravedad alterado por los orificios practicados.

Ese caso se le presentó al eximio Ingeniero de Montes Antonio PÉREZ-SOBA BARÓ, en un proyecto de los redactados en la corrección del Noguera Ribagorzana (Lérida), y lo resolvió mediante la aplicación de la teoría clásica de la elasticidad, basada en los trabajos, antiguos pero aún hoy vigentes en sus líneas generales, de TIMOSHENKO, el llamado “padre de la elasticidad”. A partir de ese caso concreto (PÉREZ-SOBA BARÓ, 1968), hemos generalizado el estudio de las condiciones de tensión que origina un orificio abierto a lo largo de un macizo sometido a compresión (como es el caso del dique). De ahí obtendremos los datos necesarios para establecer una forma de cálculo adaptada al estado de tensiones que se puede esperar en el funcionamiento real del dique.

3.2. Cálculo basado en la teoría elástica de TIMOSHENKO.

El título de este apartado ya refleja las simplificaciones adoptadas. En primer lugar, se

considera el mechnal como un orificio circular, lo cual no siempre es cierto, ya que son frecuentes los mechnales cuadrados o en forma de herradura, pero tampoco se aparta demasiado de la realidad. Por otro lado, se considera que las fuerzas actuantes sobre el macizo constituyen una compresión simple, obviamente vertical, pues aunque efectivamente existen también fuerzas de compresión horizontales, éstas se producen en el sentido del eje de los mechnales, por lo cual puede considerarse que no producen alteración en la distribución de las tensiones, más aún teniendo en cuenta la reducida longitud de estos conductos, que no permite suponer que puedan producirse efectos análogos a los del pandeo. De hecho, en obras públicas sólo se consideran los efectos de estas tensiones longitudinales en el estudio de revestimientos de gran longitud en túneles.

Aplicando las fórmulas deducidas por TIMOSHENKO (1970; véase también ANTMAN, 1995) para el caso de una placa perforada, con dimensiones infinitas (caso asimilable muy fácilmente al que nos ocupa), se obtiene las siguientes expresiones que permiten el cálculo sencillo de las tensiones polares de un punto cualquiera del macizo:

$$\sigma_r = \frac{P}{2} [1 - Y^2 + (1 - 4Y^2 + 3Y^4) \cos 2\phi]$$

$$\sigma_\phi = \frac{P}{2} [1 + Y^2 - (1 - 3Y^4) \cos 2\phi]$$

$$\tau_{\phi_r} = -\frac{P}{2} (1 + 2Y^2 - 3Y^4) \sin 2\phi$$

en donde las variables tienen los siguientes significados:

p, que es la tensión de compresión existente en el macizo inalterado,

r, que es el radio del orificio,

Y, que es el resultado de la expresión r/x , siendo r el parámetro antes definido y x la distancia del punto en cuestión al centro del orificio,

y ϕ , que es el ángulo (en radianes) que forma con la vertical la línea que une el punto x con el centro del orificio.

Conociendo, de este modo, los esfuerzos de dos direcciones perpendiculares, es sencillo deducir los correspondientes a las tensiones verticales y horizontales existentes para el punto de cálculo, en el plano vertical normal al eje del orificio, aplicando las fórmulas correspondientes de la elasticidad:

$$\sigma_h = \frac{\sigma_\phi + \sigma_r}{2} + \frac{\sigma_\phi - \sigma_r}{2} \cos 2\alpha + \tau_{\phi_r} \sin 2\alpha$$

$$\sigma_n = \frac{\sigma_\phi - \sigma_r}{2} \sin 2\alpha + \tau_{\phi_r} \cos 2\alpha$$

siendo σ_h la componente horizontal de la tensión en el punto, σ_n la componente vertical de la tensión en el punto y α el ángulo que forman las dos direcciones. Usando estas fórmulas, podemos calcular la distribución de tensiones en el entorno de un mechnal para distintos valores de ϕ y de Y.

Si representamos gráficamente, en función de P, los valores de σ_n obtenidos de las fórmulas anteriores, así como algunas isolíneas del coeficiente P dentro del macizo, obtenemos el gráfico que aparecen en la Figura nº 1. Este gráfico es perfectamente simétrico, como es lógico, con respecto a los ejes vertical y horizontal, pero no tiene simetría diagonal. Dos curvas de equilibrio, que vienen a pasar aproximadamente por las esquinas del módulo de cálculo, separan dos zonas decomprimidas de otras dos hipercomprimidas.

Quizá las conclusiones de más interés, en lo que respecta al cálculo del dique, las obtengamos

del análisis del estado de tensiones de las distintas secciones horizontales del módulo de cálculo. De un análisis de los valores de σ_n y σ_h , podemos obtener las siguientes conclusiones en relación con el procedimiento de cálculo más conveniente para el dimensionamiento de la sección afectada por los mechinales:

- Los valores de las tensiones verticales máximas se van desplazando, desde las cercanías del orificio, hacia las zonas extremas del módulo escogido para el cálculo, debido a la irregularidad en forma de alubia que presenta la parte central de las isolíneas exteriores de la zona hipercomprimida.
- A medida que nos alejamos del orificio, se van amortiguando de manera creciente las diferencias entre las tensiones verticales máximas creadas por la presencia del mechinal y las que se darían en el macizo sin alterar. También se amortigua aceleradamente la varianza de las tensiones en la sección horizontal, hasta el punto de que para $h=5,0 \cdot r$, vienen a coincidir prácticamente las tensiones mínima, máxima y media.
- Por otro lado, los valores mínimos se dan siempre en el centro del módulo de cálculo, en cuanto consideramos alturas tales que éste se halla ya fuera del orificio ($h>1,0 \cdot r$).

En definitiva: los valores de la compresión vertical σ_n , que son los que realmente afectan al cálculo de la estabilidad del macizo de gravedad, sólo se ven alterados de una manera significativa por la presencia del mechinal en un entorno de éste definido por un rectángulo vertical cuyo centro coincidiría con el del orificio y cuyos lados tendrían como valores $6r$ y $10r$ (en horizontal y vertical, respectivamente). Fuera de este entorno, los valores de σ_n no varían, por exceso o por defecto, en más de un 10% de los valores de p correspondientes al macizo sin alterar.

Dentro de este rectángulo, el orificio provoca una serie de tensiones de componente horizontal, y por tanto normales al plano del eje del orificio. La existencia de estas tensiones transversales indudablemente refuerza la cohesión transversal propia de la fábrica de un dique de densidad constante (hormigón o mampostería hidráulica), lo que permite suponer que, a los solos efectos del cálculo del dique, puede considerarse perfectamente solidario el elemento del cuerpo del dique incluido entre dos planos verticales paralelos al que contiene el eje del orificio, y distantes tres veces el radio del mismo, a cada lado del eje.

Por tanto, se puede adoptar como método de cálculo para la estabilidad al vuelco en la zona de las troneras o mechinales, en vez de las secciones típicas de un metro de ancho, secciones de anchura seis veces la del radio del orificio que contengan en un plano de simetría el eje de éste. De esta forma, los valores del peso estabilizador resultan menos desfavorables que en el primer método de cálculo expuesto, y ello permite realizar unos diseños menos impactantes desde el punto de vista ambiental, y más económicos desde el punto de vista constructivo.

4. BIBLIOGRAFÍA CITADA.

ANTMAN, S.S.; 1995. *Nonlinear Problems of Elasticity*. Springer-Verlag, Nueva York.

ANTONIO, R. de; ALMOROX, J.; SAA, A. y RUEDA, J.P.; 1995. Erosión y aterramiento de embalses. Situación en España. *Agricultura*, 64 (751): 151-154.

BLEIN ZARAZAGA, F., 1947. Utilidad de los mechinales. *Montes*, 3 (14):157-162.

GARCÍA NÁJERA, José María, 1962. Principios de hidráulica torrencial. Su aplicación a la corrección de torrentes. IFIE, Madrid.

GARCÍA NÁJERA, J.M.; RIPOLL, D. y JIMÉNEZ, A., 1959. Hidráulica torrencial. Cálculo de

diques rectos de mampostería hidráulica. *Anales del IFIE*, 4: 27-36

JOVER FERNÁNDEZ DE BOBADILLA, Federico y VIDANIA MUÑOZ, Vicente, 2001. Especificaciones técnicas básicas para proyectos de corrección hidrológico-forestal de cauces torrenciales mediante hidrotecnias. Colegio de Ingenieros de Montes y TRAGSA, Madrid.

LÓPEZ CADENAS DE LLANO, Filiberto, 1965. Diques para la corrección de cursos torrenciales y métodos de cálculo. IFIE, Madrid.

LÓPEZ CADENAS DE LLANO, Filiberto (Dir.), 1998. Restauración hidrológico-forestal de cuencas y control de la erosión. Ministerio de Medio Ambiente, TRAGSA, TRAGSATEC y Mundi-Prensa, Madrid.

MINTEGUI AGUIRRE, Juan A. y LÓPEZ UNZU, F., 1990. La ordenación agrohidrológica en la planificación. Gobierno Vasco, Vitoria.

PÉREZ-SOBA BARÓ, Antonio, 1968. Proyecto de construcción del dique nº 1. Cabecera del Noguera Ribagorzana, TT.MM. de Vilaller (Lérida) y Bono (Huesca). Patrimonio Forestal del Estado. Inédito.

THIERY, E., 1914. Restauration des montagnes, correction des torrents et rebioisement. Librairie Polytechnique Beranger, París y Lieja.

TIMOSHENKO, Stephen, 1970. Theory of Elasticity. 3ª ed. McGraw-Hill. Nueva York.

Figura nº 1: Representación gráfica de las tensiones verticales producidas en cada punto del entorno de un orificio horizontal sometido a una compresión vertical.

