

Cálculos relativos al entramado vivo de madera de pared doble y al enrejado de madera

Elementos finitos,
distancias, cociente B/H,
juntas.



G. Menegazzi¹
F. Palmeri²
L. Esposito³
G. Perrella³
M. Araldi³
T. Arlotti⁴

Ingeniero, profesional autónomo - Socio Experto de la AIPIN - (1)
Miembro de la Comisión de Ambiente del Colegio de Ingenieros de
la Provincia de Nápoles - Nápoles (gino.menegazzi@gmail.com)

Forestal, profesional autónomo - Socio Experto de la AIPIN - Presidente
de la Sección AIPIN Bolzano-Alto Adige - Responsable Científico del
Laboratorio de Investigación Altamente Cualificado MUR Tecnovia Srl -
Bolzano (fabio.palmeri@tecnovia.it)

Departamento de Ingeniería Estructural - Universidad de Estudios
Federico II de Nápoles - Nápoles

Ingeniero, profesional autónomo - Bellaria - Rimini (4)

Introducción

Las principales causas de las alteraciones en los senderos de montaña y caminos forestales son debidas a la naturaleza de los materiales, los tipos de cargas soportadas, la falta de ordenación hidráulica de las aguas superficiales y el mal mantenimiento de los sitios y de las obras.

Los sistemas de consolidación de los senderos de montaña y de los caminos forestales que utilizan técnicas de bajo impacto ambiental, tales como las técnicas de Ingeniería Biológica, son las más idóneas para este tipo de ambientes.

En la base de los taludes se emplea el entramado vivo de madera de pared doble (en sus variantes que van desde el entramado vivo de pared doble clásico, hasta el modelo Roma o Vesuvio), mientras que los sistemas de acondicionamiento de los taludes aguas arriba a menudo prevén el empleo de la técnica del enrejado de madera en sus diferentes variantes (pared simple o doble y Vesuvio).

En lo que concierne entramado vivo sostenido, se utiliza con el fin de reconstruir la continuidad de las vías de enlace de montaña y para estabilizar la vertiente inestable; como ya es sabido, se trata de una estructura de drenaje formada por una matriz de troncos de madera, clavados entre sí y rellena de tierra que con frecuencia se coge in situ; para completar la obra se introducen los materiales vivos que constituyen una parte esencial de la obra para poder lograr la eficacia deseada en el trabajo de estabilización. En resumidas cuentas, se obtiene un sistema de drenaje resistente en el que, a medio plazo, la madera de los troncos constituye la estructura portante y que, a largo plazo, será sustituida por las raíces de las especies vivas que se han empleado.

Con relación al enrejado de madera de ladera, tiene el objeto de reconstituir la capa superficial de tierra en pendientes en las que una simple hidrosiembra, incluso combinada con un geotextil, no tiene posibilidades de éxito.

La estructura formada por cuadrados escalonados que retienen la tierra y permiten, por medio de su estabilización, el arraigo de la vegetación y, por consiguiente, la revegetación de toda la ladera afectada por la alteración provocada por la apertura de un sendero o de un camino.

En este artículo se quiere profundizar en algunos temas relacionados con estos tipos de obra.

Para el entramado vivo de madera:

- el análisis de elementos finitos;
- el cálculo del cociente B/H;
- el cálculo de la resistencia al vuelco y deslizamiento de la estructura;
- el cálculo del número de metros de troncos necesarios para construir un entramado de pared doble;

- el cálculo del número de clavos necesarios para realizar un entramado de pared doble;
- el cálculo del diámetro mínimo de los palos empleados en relación al diámetro de los redondos de acero de adherencia mejorada utilizados como clavos;
- la distancia mínima desde la cabeza del tronco en el que realizar el orificio para el clavado a fin de garantizar la sujeción.

Para el enrejado de madera:

- el cálculo de la distancia óptima entra troncos horizontales de un enrejado vivo en relación a la inclinación de la ladera del proyecto y al ángulo de fricción interno del terreno;
- el mismo cálculo que antes en relación a suelos no cohesivos;
- el cálculo del número de metros de tronco necesarios para construir un enrejado de madera de pared simple;
- el cálculo del número de clavos necesarios para realizar un enrejado de madera de pared simple.

Se trata de cálculos resolutivos, efectuados a menudo con la ayuda de hojas electrónicas, que pretenden ilustrar la magnitud del problema y no representan el "cálculo" geotécnico o estructural completo.

Con esta intervención, los autores quieren atraer la atención de los especialistas a este ámbito que todavía no se ha considerado en profundidad por los expertos del sector.

Entramado vivo de madera

Modelo de elementos finitos

El modelo numérico de la estructura de madera se ha realizado para valorar su resistencia a una carga estática accidental de ocho toneladas, en la primera época de su instalación, simulando las tensiones inducidas por una unidad antiincendio forestal totalmente cargada, a través de las cuatro áreas de huella de los neumáticos. Se han adoptado las dimensiones características que se encuentran normalmente en la mayor parte de las instalaciones realizadas por los autores. Se ha procesado la matriz de madera y la tierra, interna y contigua a la obra, con el Método Numérico de Elementos Finitos (*F.E., finite element*), para valorar las reacciones de la estructura en tensión. El modelo se ha dividido en alrededor de 60.000 elementos tetraédricos de 20 nudos.

En una primera aproximación no se han tenido en cuenta ni los efectos del drenaje ni la eventual presencia de raíces, mientras que en estos análisis se ha considerado que el suelo desempeña un papel de simple refuerzo y transferencia de cargas. Para simplificar los procesos de modelado, se ha representado la sección de los troncos con forma cuadrada, manteniendo el momento de inercia equivalente al de la sección circular real.

Cálculo del cociente B/H y cálculo de la resistencia al vuelco y al deslizamiento de la estructura

El valor mínimo de B/H tomado como referencia de forma que garantice al entramado un nivel de estabilidad suficiente, se traduce en la



consecución de un coeficiente de seguridad al vuelco de 1,5 y de un coeficiente de seguridad al deslizamiento de 1,3.

Antes de examinar detalladamente las configuraciones de carga a las que pueda estar sometida puedan el entramado vivo es indispensable exponer las **hipótesis** en que se basan los cálculos efectuados.

1. Ante todo, consideremos la cuestión de la **valoración del peso propio de los diques de contención en torrentes** que son obras construidas con material mixto, es decir, madera, tierra y piedra. En general, el diámetro de los elementos de madera que forman estos diques está comprendido entre Ø20 y Ø30 cm, mientras que la distancia entre los troncos longitudinales (es decir, los que están puestos en la dirección de la corriente) puede variar de 1,5 m a 2,5 m. Consiguientemente, resulta que, un vez fijadas las dimensiones de un entramado, el peso propio de la estructura cambia en función del diámetro y del paso utilizados, visto que al variar estos parámetros, cambia la relación entre el volumen del material de piedra y de tierra de relleno y el volumen de la madera. Para liberarse de la influencia de estos factores en el cálculo del peso propio de estos entramados en **nuestro análisis se han tenido en cuenta sólo las obras realizadas con elementos de madera del diámetro máximo que se emplea normalmente, igual a 30 cm, y con la distancia mínima entre los elementos longitudinales, igual a 1 m**: dichas obras resultan, a igualdad de dimensiones, las estructuras más ligeras, ya que se maximiza el volumen de la madera respecto al del relleno. **Esta decisión es un criterio evidentemente a favor de la seguridad, puesto que se reduce al mínimo la capacidad de los entramados de resistir por gravedad a las tensiones externas.**

Tabla: Resumen de las hipótesis introducidas en los análisis de dimensionamiento de las albarradas

Hipótesis	Descripción
1	A favor de la seguridad, se han tenido en cuenta sólo las obras realizadas con los elementos de madera de diámetro máximo que se usa normalmente (30 cm) y con la distancia mínima (1 m) entre los elementos longitudinales, reduciendo consiguientemente al mínimo la capacidad de los entramados de resistir por gravedad las tensiones externas.
2	Altura del entramado 2m 5m
3	Peso específico del entramado
	$\gamma_m = 19 \text{ kN/m}^3$ (si el relleno está seco) $\gamma_m = 20,5 \text{ kN/m}^3$ (si el relleno está saturado)
4	Peso específico de la tierra
	$\gamma_t = 20 \text{ kN/m}^3$ Ángulo de fricción interno del terreno $\phi_t = 30^\circ$
5	Ángulo de fricción entre las paredes (aguas abajo y agua arriba) y la tierra $\delta = 0,9 \phi_t$
6	Coefficiente de fricción entre la base de los entramados y el terreno de asiento $f = 0,75$
7	A favor de la seguridad, se han desestimado los empujes del terreno situado aguas abajo de la obra, con función de fijación en el pie y la eventual presencia de anclajes.
8	A favor de la seguridad, no se tiene en cuenta la eventual pesantez de la base de la obra, realizada utilizando un relleno de bloques de piedra.
9	A favor de la seguridad, no se tiene en cuenta la eventual contribución de las raíces de las plantas

2. Se han analizado obras de alturas comprendidas entre 2 y 5 m (los 5 metros han sido tenidos en cuenta para los entramados de madera y piedra).

3. A pesar de depender también del valor del espesor de base B y del tipo de material utilizado en el interior de la estructura, **se puede afirmar que el peso por unidad de volumen de los entramados de madera m (el subíndice m significa "mixto") resulta aproximadamente igual a 19 kN/m^3 cuando el relleno está seco, mientras que vale $20,5 \text{ kN/m}^3$ cuando el relleno está saturado de agua.** El valor del peso específico de la madera, adoptado en el cálculo de m , es el del castaño, como media igual a $7,0 \text{ kN/m}^3$ (valor representativo para madera, tanto fresca, como con humedad normal). En lo que concierne al peso específico del relleno, se deben distinguir dos situaciones especiales:

- Los entramados pueden estar llenos sea de material grueso (cantos rodados de dimensiones tales que no salgan por las ranuras de las paredes y material terroso - en el caso de que se quiera hacer una estructura de tipo filtrante);
- Los entramados pueden estar llenos de material fino. En nuestro análisis, se ha tomado en cuenta un relleno fino, de tipo gravilla - arena y tierra, con una porosidad del 25%, cuyo peso específico es de 20 kN/m^3 (el peso por unidad de volumen en condiciones de saturación es de $22,5 \text{ kN/m}^3$).

4. Para la tierra en la que asientan los entramados, asumiremos, además del antedicho peso específico (γ_t) de 20 kN/m^3 , un ángulo de fricción interno (ϕ_t) de 30° , valor compatible con el terreno de gravilla - arena anteriormente mencionado

5. El ángulo de fricción (δ) entre las paredes aguas arriba y aguas abajo, y la tierra que gravita sobre ellas ha sido calculado recurriendo a una regla que se usa para los gaviones (Pedrini, 1993), es decir:

$$\delta = 0,9 \phi_t$$

Por lo tanto, en los casos que analizaremos δ vale 27° .

6. Se asume que el coeficiente de fricción entre la base de los entramados y el terreno de asiento (f) es de 0,75, que corresponde a un ángulo de fricción δ_f de alrededor de $36,8^\circ$, valor definible como de precaución en el caso de material tipo gravilla - arena (por lo tanto, se ha excluido por ejemplo el caso de estar asentados sobre en tierra vegetal).

7. Como criterio a favor de la seguridad, en la valoración de las cargas aplicadas a los entramados, se han desestimado los empujes del terreno que está aguas abajo de la obra, con función de fijación en la base y la eventual presencia de anclajes.

8. Como criterio a favor de la seguridad, no se tiene en cuenta el peso que puede tener la base de la obra, si se realiza utilizando un relleno de bloques de piedra.

Tabla 1: Clavos: distancia entre ejes y distancias-valores

	Juntas madera-madera para coníferas con $lk \leq 400 \text{ kg/m}^3$ sin perforado previo	Juntas madera-madera para coníferas y latifoliadas con perforado previo	Juntas madera-madera para coníferas con $400 < lk \leq 500 \text{ kg/m}^3$ perforado previo
	Acero-madera sin perforado previo	Acero-madera con perforado previo	
a_1 en la dirección de la fibra o veta	10 d 12 d para $d \geq 5 \text{ mm}$	7d	15d
a_2 $\alpha = 0^\circ$ $\alpha \neq 0^\circ$	5d 5d	3d 4d	5d 5d
a_{3t} $-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ lado cargado	$(10 + 5 \cos \alpha) d$	$(7 + 5 \cos \alpha) d$	$(15 + 5 \cos \alpha) d$
a_{3c} $-90^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$ lado cargado	10 d	7 d	15 d
a_4 $-90^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$ lado cargado	$10d \sin \alpha$	$(1 + 6 \sin \alpha) d$	$(4 + 6 \sin \alpha) d$
a_4 $\alpha = 0^\circ$ y 180°	5d	3d	5d
Los demás ángulos α	5d	4d	7d

(*) La distancia a_1 puede reducirse a un mínimo de 5d si se tiene en cuenta una reducción de la capacidad portante del factor $\sqrt{a_1/7d}$. Véase la Fig. 3.2 para el significado de a_1 , a_2 , a_3 y a_4 .

9. Como criterio a favor de la seguridad, **no se tiene en cuenta la eventual contribución de las raíces de las plantas.**

Por lo tanto, se ha diseñado una hoja de cálculo Excel en función de dichos supuestos.

El cálculo del número de metros de tronco necesarios para construir un entramado de madera de doble pared y el cálculo del número de clavos necesarios para realizar un entramado vivo de madera de doble pared

Con frecuencia quien tiene que proyectar y hacer posible que se puedan colocar los entramados vivos en la zona de obra, tiene que calcular la cantidad de madera necesaria para realizar un entramado de madera viva y el número de clavos de diferentes medidas que adquirir (¡lo que resulta aconsejable dado que los troncos tienen diferentes diámetros!).

La hoja de cálculo realizada, a partir de la longitud del entramado y del número de pisos, calcula estos dos valores sea para el entramado vivo de madera como para el entramado de ribera tipo Florineth.

Cálculo del diámetro mínimo de los troncos empleados en relación al diámetro de los barras de acero corrugado utilizadas como clavos y la distancia mínima desde la cabeza del tronco a la que realizar el orificio del clavo a fin de garantizar la sujeción
De la acción de compresión ejercida por el vástago del clavo en la madera, resultaría una **acción de corte total en la dirección de las dos fuerzas paralelas a F (fuerza aplicada al clavo) con el posible deslizamiento del área de madera delimitada por los dos planos** (Figura 1), mientras que los otros dos componentes determinarían una **tracción** que tiende a **abrir la pieza que se está examinando.**

No obstante, dicho razonamiento puede aplicarse únicamente en el **caso de distancias muy cortas del clavo desde el borde (3-4 veces el diámetro del mismo)**, o sea sólo en dicho caso se **podrá calcular la carga soportable por un clavo en función de la resistencia al corte o al deslizamiento del área de madera comprendida entre el clavo y el borde externo de la pieza.**

Por lo tanto, por este motivo, en las normas relativas al dimensionamiento de las juntas, se prescriben siempre que las distancias míni-

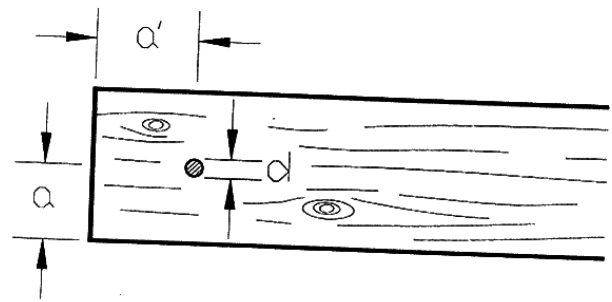


mas entre el borde y el clavo, deben ser iguales a 6-7 veces el diámetro de este último.

El espesor de las maderas debe resultar adecuado incluso con relación al diámetro (d) de los clavos utilizados.

En el caso de dirección de aplicación de la carga perpendicular a la fibra o veta (situación que afecta a los troncos transversales), se asume, que en el **caso en que se realice previamente el orificio del clavo**, un valor de **a** (Figura. 2) igual a **al menos 7d**, que será correcto incluso para casos de ángulos entre la dirección de las fuerzas aplicadas y fibras diferentes de 90° (Giordano, Ceccotti, Uzielli, 1999). En lo que concierne al espesor **a'**, siempre en el **caso en que se efectúe el perforado previo de los elementos que se van a unir**, un valor de **al menos 12d** será adecuado para todas las direcciones de aplicación de la carga que ejerza tensión en la junta.

Figura 2:



La hoja de cálculo preparada, partiendo del diámetro de la barra de acero corrugado, determina el diámetro mínimo del tronco **a** a emplear y la distancia mínima a la que se puede efectuar el orificio para el clavo desde la cabeza del tronco

El enrejado de madera

El cálculo de la distancia óptima a la que colocar los troncos horizontales de un enrejado de madera en relación a la inclinación del proyecto y al ángulo de fricción interno del terreno (suelos cohesivos) y el mismo cálculo en relación a suelos no cohesivos en función de la cohesión

$$l = \frac{h}{\text{tg } \alpha}$$

Esta formula es válida solamente para los suelos no cohesivos donde:

l = la distancia entre los palos horizontales

h = el diámetro de los troncos - h puede ser de 20 - 25 (cm)

α = la inclinación de la pendiente (α puede variar entre 35° y 55°)

φ = ángulo de fricción interno del terreno

Se aconseja que h no sobrepase los 25 cm porque, de no ser así, los troncos se manejarían difícilmente, y que no baje de los 20 cm porque sino podrían surgir problemas de resistencia en las zonas de los clavos.

El cálculo del número de metros de tronco necesarios para construir un enrejado de madera de pared simple y el cálculo del número de clavos necesarios para realizar un enrejado de madera de pared simple.

Con frecuencia quien tiene que proyectar y hacer posible que se puedan colocar los enrejados de madera, también tiene que calcular la cantidad de madera necesaria para realizar un enrejado de madera y el número de clavos de diferentes medidas que adquirir (¡lo que resulta aconsejable dado que troncos tienen diferentes diámetros!).

La hoja de cálculo realizada, a partir de las características del enrejado de madera, calcula estos dos valores.

Conclusiones

El análisis de elementos finitos ha evidenciado una elevada concentración de estados de tensión en el primer nivel del entramado. Las tensiones equivalentes, calculadas según el criterio de resistencia de Von Mises, no alcanzan en ningún punto el valor de 0,5 MPa; dicho valor está muy por debajo de los valores de tensión admisible calculados para la mayor parte de tipos de madera utilizados en las construcciones (σ_{amm} comprendido entre 6 y 15 Mpa). Además, de dichos resultados se deduce el aumento de rigidez de la estructura a causa del efecto de la tierra. De hecho, la tierra utilizada para rellenar el entramado, a pesar de presentar una respuesta elástica inferior respecto a la misma tierra en condiciones de sedimentación normales y drenadas, contribuye a repartir las cargas que actúan sobre el modelo.

El cálculo del cociente B/H demuestra la estabilidad general del entramado vivo de madera tanto al deslizamiento como al vuelco, aún no habiendo tenido en cuenta en el cálculo la contribución de las plantas y a pesar de haber colocado el cálculo en condiciones de dificultades ambientales siguiendo un criterio favorable a la seguridad.

Con relación al dimensionamiento de los palos, emerge claramente que se debe hacer en función del diámetro del tronco empleado y que el perforado también debe seguir reglas concretas para evitar que la estructura se debilite.

Para el enrejado de madera también se demuestra que el campo de empleo óptimo está entre 35° y 50°, de lo contrario los troncos horizontales quedarían o demasiado distantes o demasiado cercanos. Asimismo, del cálculo se deduce que algunas tipologías de enrejado de madera (enrejado Vesuvio) son especialmente adecuadas para inclinaciones elevadas.

Objetivos futuros

El modelo realizado, que , tiene como fin el de realizar un análisis general de los principales estados de tensión, prevé la perfecta adherencia durante los procesos de deformación entre los elementos de las zonas de contacto del entramado y el terreno incorporado. Dicha condición debe eliminarse para realizar un análisis más cuidadoso del comportamiento real de la estructura a fin de valorar la capacidad de contención del entramado y la contribución efectiva a la rigidez de la tierra colocada en su interior. Así se pueden valorar dichos efectos incluso en condiciones de tierra no drenada y establecer el uso límite de la obra con relación a las precipitaciones. Por último, después de cualquiera de las posibles complicaciones del modelo numérico, es fundamental el análisis experimental de una estructura real realizada, a fin de corregir y validar las aproximaciones imprescindibles implícitas en la técnica de la división en elementos finitos.

Para el cociente B/H, a través de la repetición de los cálculos y la verificación experimental de campo, en un futuro será posible acercarse notablemente a la realidad reduciendo progresivamente el cálculo a favor de la seguridad.

Para las juntas queda por determinar la distancia máxima admisible desde el remachado en caso de que haya fuerzas que hagan palanca en el tronco horizontal llevándolo a la ruptura.