

Manual para el Análisis de Estabilidad de Arbolado Mediterráneo



Peter Sterken

Traducción: Juan Belvis y Jacobo Llorens

© Peter Sterken 2005.

Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida, de ninguna forma, ni por ningún medio sin la autorización por escrito del autor.

(Título original de esta obra: A Guide For Tree-stability Analysis. ISBN: 9090193774. Traducido al castellano por Juan Belvis y Jacobo Llorens.

En esta versión española se añadieron y suprimieron algunas partes para hacer el concepto y el mensaje más transparentes.)

Exención de responsabilidad

El autor hace constar que cada caso es único y tiene que ser tratado como tal, y que las directrices y recomendaciones publicadas en estas páginas deberían ser seguidas de acuerdo según el juicio, el conocimiento especializado y la experiencia personal del profesional mismo.

Por lo tanto el autor se queda exento de cualquier responsabilidad en cuanto a daños a personas, objetos o propiedades que resulten del uso de la información publicada aquí. Los hechos y resultados obtenidos durante las investigaciones mencionadas en esta publicación, únicamente se refieren a estos casos y no son transferibles a circunstancias similares.

Prólogo

Desde que el Prof. A.L. Shigo presentó su modelo CODIT al mundo, el conocimiento de los árboles avanzó enormemente. En vez de intentar curar al árbol, algo que parecía ser bastante difícil, el nuevo punto de partida de la arboricultura era la mejora de las condiciones de crecimiento y evitar que el árbol se debilite e infecte por cualquier patógeno. Muchos problemas ya han sido resueltos, pero aún quedan muchas cuestiones por resolver, algunas ni siquiera han sido aún planteadas. Una de las principales cuestiones sobre las que trabajar, es el tema de la estabilidad y la seguridad de los árboles, especialmente en medio urbano.

No se pretende con este libro dar todas las respuestas. Incluso ni dará ninguna respuesta que no haya sido dada antes en otras publicaciones. La ventaja de este libro es que combina las diferentes respuestas que han sido dadas, sobre los diferentes aspectos del diagnóstico de arbolado.

Se ha hecho mucha investigación sobre diferentes aspectos de la estabilidad de arbolado, y cada una iniciada desde un punto de vista diferente. Se han investigado los árboles desde su aspecto dinámico, estática y biológico. Para lograr resultados, era necesario ver a los árboles como sólo una masa estática o dinámica o viva. Todos y cada uno de los puntos de partida para recoger conocimientos eran válidos, simplemente porque era necesario recoger y combinar gran cantidad de información. Por ello, este libro no debe ser visto en ningún caso como un ataque a cualquiera que haya realizado alguna investigación en cualquier aspecto de los árboles o a los resultados que obtuvieron. *Pero, como un árbol no es sólo masa estática o dinámica o biológica, algún día había que juntar estos diferentes resultados de los diferentes campos de la ciencia.*

Esto es lo que este libro intenta hacer: reunir todo el conocimiento existente sobre la estabilidad del arbolado para así llegar a un diagnóstico mejor de los problemas de los árboles.

Pero, como aún hay mucho por descubrir, este libro no pretende ser exhaustivo, ni dar todas las respuestas. Simplemente lo que pretende ser es: un pequeño paso hacia el conocimiento y comprensión de los árboles. El diagnóstico de árboles no empieza con este libro, ni tampoco se acaba en él. Sólo es un paso adelante y esperamos que sea en la dirección correcta.

Wim Peeters

Índice

1. Introducción
2. Pronóstico de la resistencia a la fractura de árboles huecos
3. Modelo matemático para la predicción de la velocidad crítica del viento para árboles
 - 3.1 Introducción
 - 3.2 Estructura del modelo V
 - *Análisis de la carga del viento en la copa*
 - *Dinámica*
 - *Cálculo de resistencia a la fractura*
 - *Cálculo de resistencia al vuelco*
 - *Cálculo de resistencia a la torsión*
 - *Cálculo de resistencia a la fractura de ramas principales*
 - *Velocidad crítica del viento*
 - *Espesor necesario de la pared residual*
 - *Análisis de la carga del viento en un cableado*
 - 3.3 Discusión
4. ¿Cuál es el espesor necesario de la pared residual?
 - 4.1 Introducción
 - 4.2 Un ejemplo de estática de árboles
 - *Análisis de la carga del viento con el Modelo V*
 - *Propiedades de la madera*
 - *Geometría*
 - *Espesor de la pared residual: teoría de la flexión de un tubo hueco*
 - 4.3 Resultados: diámetro necesario del tronco y espesor requerido de la pared residual
 - 4.4 Discusión
5. Diagnóstico visual
 - 5.1 Las bases del protocolo del autor
 - 5.2 Hongos xilófagos
 - 5.3 Evaluación de la resistencia a la fractura de troncos huecos
 - 5.4 El lenguaje corporal del árbol
 - 5.5 Estimación de la vitalidad
 - 5.6 Conclusión sobre el diagnóstico visual

6. Comportamientos del cuerpo leñoso

6.1 Introducción

6.2 Comportamientos mecánicos comunes: una breve descripción

- *Fractura en verde*
- *Pandeo de Euler*
- *Pandeo de Brazier*
- *Deslizamiento*
- *Concentraciones de tensiones*
- *Torsión y la compleja combinación de fuerzas*
- *Fractura basal*

7. Uno de los secretos del diagnóstico actual de la estabilidad de arbolado

8. Palmeras y estabilidad

9. Protocolo

Ejemplos

- *Eucalyptus camaldulensis*. Parc Sant Jordi, Terrassa, Cataluña
- *Eucalyptus globulus*. Parc Sant Jordi, Terrassa, Cataluña
- Estática versus dinámica

10. Intervenciones destinadas a la conservación

11. Conclusión

12. Notas finales

Agradecimientos

Literatura consultada

1. Introducción

Este manual ofrece un mejor entendimiento de cómo colapsa un árbol y cómo se previene. Un profundo e intuitivo conocimiento de la perversidad inherente de materiales y estructuras, las matemáticas y los árboles, es una de las cualidades más preciosas que un arboricultor puede tener.

No es necesario exponer de nuevo todos los síntomas de defectos estructurales que se pueden encontrar en un árbol. La oferta actual de literatura sobre diagnóstico visual es amplia y esas obras son buenas referencias donde se describen síntomas comunes.

Este pequeño libro describe brevemente los principios en los cuales se basa el protocolo del autor: micología, biología, matemática, ingeniería eólica, comportamientos mecánicos, diagnóstico visual y sentido común. Pero, sobre todo, aboga por la *integración* de métodos, criterios y conocimientos actuales.

Esta publicación puede servir como guía a la cuál se deben añadir los siguientes excelentes trabajos:

El método V.T.A. como descrito en "The Body Language of Trees" de Mattheck & Breloer (1995) presenta las reacciones y defectos que conducen al colapso de un árbol. En este trabajo se ofrece una descripción de los posibles colapsos por fractura, la cual es una deliciosa y obligada literatura. El método V.T.A. concuerda bien con Gordon (1999) en cuanto al colapso de estructuras. Aquí, los procedimientos dañinos de diagnóstico se reservan a árboles muestran un serio riesgo.

Hoy en día, el método SIA (Wessolly & Erb, 1998) es una poderosa herramienta de estimación de la resistencia a la fractura de un árbol hueco. Este método, disponible gratis, calcula el diámetro necesario y la pared residual necesaria del tronco de un árbol para poder resistir rachas de viento de 32,5 m/s. Los resultados tienen en cuenta la altura del árbol, la forma de la copa, el factor aerodinámico y la resistencia de la madera, entre otros.

En el método Inclino-Elasto (Wessolly & Erb, 1998) el árbol se somete a una simulación de la carga del viento con un tráctel, y su comportamiento se mide mediante instrumentos que registran el ángulo de la base del tronco y los cambios en longitud de las fibras. Un inclinómetro mide la inclinación de la base del árbol con el fin de evaluar el potencial de vuelco. Un elastómetro mide el alargamiento

o acortamiento longitudinal de las fibras más exteriores del tronco. Este método nos ofrece una mejor visión de la estabilidad del árbol. El método I.B.A. (Reinartz & Schlag, 1997) describe la interacción de micología, vitalidad y estabilidad. Este método visual combina la detección visual de hongos xilófagos antes de que aparezcan los cuerpos fructíferos, y el método SIA. Los autores del método IBA afirman que no sólo muchos árboles conviven fácilmente con hongos, sino que también el diagnóstico instrumental es raramente necesaria.

Actualmente, Prof. Dr. Francis Schwarze está investigando la interacción entre los mecanismos de defensa del árbol y las estrategias empleadas por hongos xilófagos para esquivar los primeros. El *status quo*, la condición momentánea de la pudrición en un árbol, puede ser evaluado macroscópicamente. Los métodos descritos más arriba pueden ofrecer una grabación estática de esta condición momentánea. Sin embargo, la *dinámica* de la interacción y, en consecuencia, *la seguridad futura del árbol*, sólo puede ser estudiada a nivel microscópico. De esta manera, y por primera vez, resulta posible elaborar un pronóstico en cuanto al desarrollo futuro de la pudrición y la agresividad de diferentes hongos, en la albura de los árboles.

Por último, el objetivo de la presente publicación es juntar varios componentes de estos métodos. En consecuencia, se presenta un manual razonable y cuidadosamente elaborado, para asistir a los especialistas del árbol durante el análisis de estabilidad del arbolado mediterráneo, como una *síntesis e integración* de estos métodos previamente publicados.

Los estudios exhaustivos fueron realizados por el autor en España sobre árboles mediterráneos y palmeras, fueron el “vivero” para este protocolo. Otro paso lógico en el desarrollo de esta guía fue el estudio de literatura especializada en el colapso de estructuras

El autor de esta publicación emplea con éxito esta propuesta para un nuevo método visual, en especies mediterráneas como *Eucalyptus* spp., *Celtis* spp., *Brachychiton populneus*, *Tipuana* spp., *Cercis siliquastrum*, *Cupressus sempervirens*, *Ficus* spp. y pinos mediterráneos.

Para especies de Centro-Europa el protocolo es igualmente accesible.

El mensaje a transmitir es que, en la mayoría de los casos, los árboles se pueden diagnosticar perfectamente con la combinación de diagnóstico visual y el análisis de la carga del viento para la estimación de su estabilidad.

Incluso muchos árboles monumentales pueden ser muy bien inspeccionados con la ayuda del protocolo propuesto por el autor de esta publicación.

El diagnóstico instrumental parece ser raramente necesario para la evaluación de la resistencia a la fractura de un árbol. Si el ejemplar tuviera un valor monetario extraordinario y si hubieran cuestiones sin resolver, cara a su estabilidad, todavía se podría escoger entre la oferta de buenos métodos instrumentales.

2. Pronóstico de la resistencia a la fractura de árboles huecos

Introducción

En estas líneas se presenta una propuesta para un método nuevo para el análisis de estabilidad de arbolado. Esta propuesta es *una síntesis e integración* de métodos publicados con anterioridad. Cuando se integran conocimientos sobre diferentes disciplinas científicas y métodos, se obtiene un entendimiento mayor sobre cómo los árboles se mantienen, o no, en pie.

En primer lugar, la propuesta presente es básicamente diagnóstico visual combinado con análisis matemáticos de la carga viento. Mediante los últimos, se calculan los factores de seguridad del árbol ahuecado. Igualmente, se estima la velocidad crítica del viento, la frecuencia fundamental de flexión del tronco y la resistencia al vuelco.

En este manual se describe una propuesta que permite evaluar la peligrosidad de un árbol dañado. En este manual, se sugiere que la pared residual debería disponer de suficientes reservas de seguridad, en cuanto al empuje de viento y, a la vez, un riesgo bajo de comportamientos mecánicos catastróficos.

Síntomas externamente visibles de pudrición interna, como el crecimiento reparador y las depresiones en el cuerpo leñoso, deben ser detectados. La propuesta presente puede hacerse aún más poderosa cuando se combina con la tomografía acústica, para poder

visualizar la sección interna del árbol dañado. En cuanto a la interpretación de dichas tomografías, re refiere a Schwarze *et al.* (2004).

Esta parte de la propuesta permite *un entendimiento momentáneo* de la estabilidad de un árbol en concreto.

En segundo lugar, un pronóstico a largo plazo en cuanto al desarrollo futuro de la pudrición en la albura, y, así mismo, de la seguridad del árbol, puede ser formulado cuando se consideran las interacciones entre hongo/ árbol. De acuerdo con Schwarze (2001), muchos hongos xilófagos son capaces de esquivar las estrategias empleadas, para intentar frenar la pudrición, por el propio árbol. Dichas interacciones entre la respuesta del árbol y la agresividad de ciertos hongos, se han estudiado extensamente a nivel microscópico por Schwarze *et al.* Un ejemplo de los descubrimientos más importantes se ha incluido en esta publicación. Para un mayor entendimiento referente a este campo, se recomienda estudiar las publicaciones realizadas.

En las líneas siguientes se presentan los componentes básicos de un modo muy resumido.

Componentes básicos I: ¿Cuál es el grosor requerido de pared residual para un árbol?

La literatura especializada sugiere que los diferentes colapsos de la pared residual de un árbol dependen principalmente del Módulo de Elasticidad y la resistencia a la compresión en distintas direcciones anatómicas, el diámetro y la forma del tronco y las distintas fuerzas.

Lo cuál hace pensar que ratios t/R fijos y destinados al diagnóstico de estabilidad deberían ser tratados con cautela.

Y, por otro lado, se hace evidente que la pared residual tampoco puede ser tan fina como se predice matemáticamente con la teoría de la flexión de un tubo hueco e idealizado.

Lo expuesto en este manual sugiere que la verdad estaría en un punto intermedio en vez de en los extremos.

Componentes básicos II: pronóstico del desarrollo futuro de la pudrición

- **Mecanismos de defensa en el árbol**

Schwarze (2001) ofrece una descripción actualizada y excelente sobre la compartimentación.

- **La interacción en el frente entre hongo y árbol**

A continuación se ofrece un ejemplo de la estrategia de penetración de la zona de reacción y la agresividad correspondiente de hongos xilófagos:

Dependiendo de la especie, la vitalidad y otros factores, algunos árboles disponen de una habilidad relativamente buena para formar madera de compensación.

En éste caso generalmente se observan señales biomecánicas claras de la pudrición causada por *Ganoderma* spp., como por ejemplo la madera de reparación (Mattheck & Breloer, 1995) y depresiones de crecimiento (Reinartz & Schlag, 1997), bastante antes de que el riesgo aumentado de colapso ocurra (Schwarze & Ferner, 2003).

Sin embargo, hace falta distinguir la agresividad de *Ganoderma adspersum* de la de *G. applanatum* y *G. resinaceum*. Las zonas de reacción pueden absolutamente *ineficaces* cuando *Ganoderma adspersum* coloniza especies arbóreas tales como *Tilia*, *Fagus*, *Acer* y *Platanus*!

A la hora del diagnóstico, el árbol puede disponer de una pared residual satisfactoria de madera sana. Esto significa, que la pared dispone de reservas de seguridad satisfactorias en cuanto a las cargas del viento (método SIA method, Wessolly & Erb, 1998) y, a la vez, un bajo riesgo de comportamientos mecánicos catastróficos (método VTA, Mattheck & Breloer, 1995). Esta nueva propuesta de diagnóstico se describe en este manual.

Sin embargo, el pronóstico a largo plazo puede ser negativo, incluso para árboles de muy buena vitalidad. ¡En *Fagus sylvatica*, por ejemplo, las zonas de reacción pueden ser utilizadas por este hongo como sustrato nutricional, ya que éste digiere preferentemente los polifenoles y las tilosis suberizadas! En consecuencia, su agresividad puede ser clasificada como alta en un árbol vivo.

Por el otro lado, cuando se identifican *G. applanatum* o *G. resinaceum*, y el diagnóstico de estabilidad visual desvela que el

árbol no es un riesgo significativo, se puede prescindir de investigaciones exhaustivas (Schwarze & Ferner, 2003). La pudrición puede ser delimitada y controlada a largo plazo en árboles de buena vitalidad.

Finalmente, el desarrollo de la pudrición por un cierto hongo dependerá también la especie arbórea en cuestión y no necesariamente de la vitalidad.

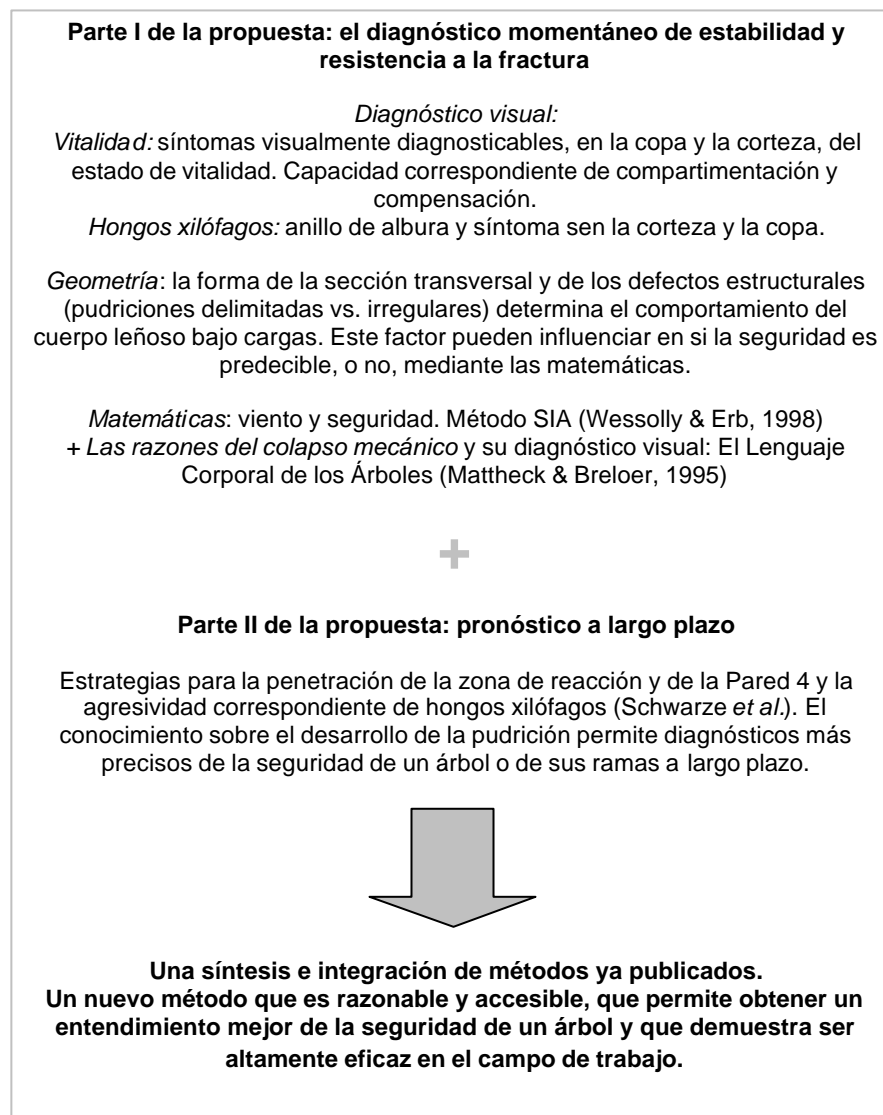
Conclusión

Después de evaluar si el anillo de albura existente, que es lo que aporta la resistencia principal al árbol, es capaz de resistir las cargas impactantes, se formula un pronóstico referente al desarrollo futuro de la pudrición. Asimismo, se permite realizar diagnósticos más precisos sobre la seguridad de un árbol o ramas dañadas.

Durante el diagnóstico es muy importante reconocer si se ha formado una zona de barrera (Pared 4) en el árbol, o no. Una zona de barrera intacta puede permitir la existencia de un anillo intacto de albura, el cuál se puede comportar de acuerdo con la teoría de la flexión. Para el espesor necesario de este anillo, véase este manual.

Cuando se sospecha de la ausencia de la Pared 4, es importante tener en cuenta que la pared residual puede *no* comportarse de una manera simplificada (como si fuera la situación idealizada del tubo hueco bajo puramente tensiones de compresión)! Esto, debido a la agresividad de ciertos xilófagos en cuanto a las zonas de reacción en la albura que puede conllevar una geometría irregular y una forma o claramente definida de la pared residual. Tanto los estudios sobre restos de zonas de reacción esquivadas en la madera podrida (Schwarze, 2001), como los informes sobre síntomas externamente visibles que denotan una pared residual degradada (Reinartz & Schlag, 1997), parecen apoyar esta hipótesis.

Figura 1. Pronóstico del desarrollo de la pudrición y la resistencia a la fractura de árboles huecos.



3. Modelo matemático para la predicción de la velocidad crítica del viento para árboles

Introducción

En el ámbito de la publicación presente, el autor desarrolló un modelo matemático para el análisis de estabilidad de arbolado.

El *objetivo de este modelo* es únicamente apoyar el análisis desarrollado en este libro. De este modo, el modelo también permitirá al especialista en árboles apreciar mejor la interacción entre viento, estabilidad arbórea, biología, hongos descomponedores de madera y comportamientos mecánicos

El *objetivo de la presente publicación* es situar los resultados de este modelo en el proceso global del diagnóstico de arbolado, a la vez que se atempere los cálculos en los cuales este modelo y métodos similares (como por ejemplo “la estática de los árboles”) están basados

La Velocidad Crítica del Viento –“V”- se puede predecir con el modelo V. “V” es la velocidad del viento que causa que la tensión en las fibras externas exceda la máxima resistencia a la compresión y por lo tanto deforme irreversiblemente dichas fibras. Este modelo computerizado calcula la velocidad crítica del viento para varios tipos de fracturas (vuelco, fracturas por pandeo en madera sólida o tronco hueco y fracturas por torsión en cavidades cerradas y concéntricas). Los factores de seguridad obtenidos del análisis de las cargas del viento se incorporan también, para que pueda ser calculado el necesario espesor de la pared residual en cada árbol.

Estructura del modelo V

- *Análisis de la carga del viento en la copa*

De acuerdo con las Normas Europeas (AENOR, 1998), las cuales recomiendan esta ecuación para predecir la carga del viento sobre una estructura, se analiza la carga en la copa del árbol. Para los árboles, la siguiente fórmula es una adaptación lógica de esta ecuación:

$$F = \frac{1}{2} * C_d * \rho * A * u^{(z) 2}$$

Donde:

F = Fuerza que ejerce una ráfaga de viento en la copa

C_d = Coeficiente aerodinámico que describe la flexibilidad que un árbol emplea para disminuir el empuje del viento

ρ = Densidad del aire, la cual depende de la presión y humedad del aire, así como de la temperatura y la altitud por encima del nivel del mar

A = Área de la superficie de la copa expuesta al viento

$u^{(z)}$ = Velocidad del viento “u” a una cierta altura “z” por encima del terreno

Fórmulas similares se encuentran en publicaciones científicas del campo de la arboricultura (Mattheck & Breloer, 1995; Niklas, 1999; Peltola et al., 1999; Gaffrey, 2000; Spatz et al., 2000; Ezquerro et al., 2001).

El modelo “power-law” se emplea aquí para predecir la velocidad del viento a una altura dada por encima del terreno y es representada en la siguiente fórmula (Berneiser & König, 1996; Wessolly & Erb, 1998):

$$u^{(z)} = u^{(g)} * (h^{(z)} / h^{(g)})^a$$

Donde:

$u^{(z)}$ = Velocidad del viento “u” a una cierta altura “z” por encima del terreno

$u^{(g)}$ = Expectativa máxima de velocidad del viento no influida por la desigualdad del terreno

$h^{(z)}$ = Altura por encima del terreno en la cual se alcanza una determinada velocidad de viento (altura del análisis)

$h^{(g)}$ = Altura por encima del nivel del mar a la cual se alcanza la máxima velocidad del viento

a = Coeficiente de fricción de la superficie

tu = Factor de turbulencia

Se incorpora un factor de turbulencia para tener en cuenta la influencia de las fuertes rachas de viento.

- Dinámica

En el modelo V, la frecuencia fundamental de flexión del tronco está representado por la siguiente ecuación (AENOR, 1998):

$$n = (el * d) / (h^2) * v(Ws/Wt)$$

Donde:

n = la frecuencia fundamental de flexión, expresada en Hz

el = factor de frecuencia

d = diámetro del tronco

h = altura de la palmera o árbol

Ws = peso de la parte de la estructura del árbol que contribuye a la rigidez del tronco

Wt = peso total del tronco

En el modelo V, se compara este resultado con los factores de seguridad (en cuanto a un empuje teórico y estático del viento), permitiendo una mejor orientación referente a la estabilidad del árbol.

- Cálculo de resistencia a la fractura

El cálculo de resistencia a la fractura de un árbol está basado en la teoría de la flexión de un tubo hueco. La tensión por flexión, sobre la superficie de un tubo hueco, puede ser calculado mediante la siguiente ecuación (Mattheck & Kubler, 1995):

$$s_{max} = (4 * M) / (\rho * R^3)$$

Donde:

s_{max} = Tensión máxima por flexión en las fibras marginales.

M = El momento de flexión tomado es la suma de las fuerzas en la copa, cada una multiplicadas por las distancias respectivas. Este momento se calcula con el análisis de carga descrito arriba.

R = Radio del tronco.

El momento geométrico de inercia (I) es el parámetro que define la resistencia a la flexión de la sección transversal. Por lo tanto, (I) puede ser definida, asumiendo que la sección transversal tiene forma de elipse, como:

$$I = (\rho / 4) * a * b^3$$

Donde:

I = Momento geométrico de inercia.

b = Radio a 1 metro de altura paralelo a la dirección de la carga

a = Radio perpendicular al primero

El factor de seguridad del tronco entonces se calcula como:

$$S = s/s$$

Donde:

S = Factor de seguridad de la sección transversal

s = Resistencia de la madera verde

s_{max} = Máxima tensión por flexión en las fibras marginales

De acuerdo con estas ecuaciones, está claro que se hace posible calcular el momento crítico de flexión que causaría la rotura del tronco, cuando se conocen el radio del tronco y la resistencia de la madera. Entonces, este momento se expresa como:

$$M_{crit} = I * s$$

Donde:

M_{crit} = Momento de flexión que causaría una tensión en las fibras exteriores del tronco que excedería la resistencia a la compresión.

I = Momento geométrico de inercia

s = Resistencia de la madera verde publicada por Lavers (1983) y otras publicaciones.

De acuerdo con el método SIA (Wessolly & Erb, 1998) y con la teoría de la flexión de un tubo hueco, se emplean factores de corrección en caso de cavidades. Estos factores de corrección disminuyen el momento de inercia y el momento crítico de flexión.

Finalmente, la fuerza crítica del viento en la copa (F_{crit}) se obtiene dividiendo el momento crítico de flexión (M_{crit}) por la palanca (P).

- Cálculo de resistencia al vuelco

El presente artículo trata principalmente de la resistencia a la fractura de los árboles. La resistencia al vuelco es objeto reservado para un futuro estudio y publicación.

Sin embargo, si el árbol urbano en cuestión tuviera cuestiones sin resolver respecto a la estabilidad radicular, se puede recomendar el

siguiente método: Wessolly & Erb (1998) publican que con una inclinación de 0,25° de la base del tronco se llega al 40% del momento crítico de vuelco. Y esto indiferentemente del tipo de suelo, la especie o los posibles daños. El asumir este criterio posibilitaría la predicción de la carga crítica por viento para vuelco de una manera relativamente simple.

En el momento de elaborar esta publicación una empresa holandesa ha desarrollado un interesante test de tracción para la predicción de la estabilidad radical (www.boom-kcb.nl). Su método reconoce que la placa radicular tiene un comportamiento *complejo*, incluso bajo una carga unilateral y estática! El ángulo de la placa radicular y la base del tronco se registran en varias direcciones por medio de varios inclinómetros y la carga ejercida por un tráctel se controla totalmente por un dinamómetro. La carga del viento se simula, con el fin de alcanzar una inclinación máxima en la base del tronco de 0,25°.

De acuerdo con el modelo V, una vez que se conoce la carga crítica para vuelco, se puede predecir la velocidad del viento que rompería el sistema radical.

Las propuestas de la publicación presente respecto a la valoración de la resistencia a la fractura, se completarían muy bien con el test de tracción propuesto por estos expertos holandeses.

Peltola et al (2000) describen dos modelos diferentes para predecir el colapso del sistema radicular por análisis de carga del viento para árboles forestales (Modelos GALES Y HWIND).

- *Cálculo de resistencia a la torsión*

Las formulas empleadas en el modelo V pueden predecir la resistencia a la torsión de un árbol hueco, con tal de que la pared residual sea concéntrica y este totalmente cerrada. Aunque esta situación ideal raramente ocurre en árboles urbanos, en algunos casos esto puede proporcionar una buena información adicional (por ejemplo, en robles viejos pero vitales donde el duramen ha sido destruido por *Laetiporus sulphureus* o *Daedaela quercina*).

Para especies como *Eucalyptus paniculata* por ejemplo, Lavens (1983) publica tanto para la resistencia al deslizamiento paralela a la fibra, como para la resistencia a la delaminación, aproximadamente la misma proporción de ¼ de la resistencia a la compresión en sentido paralelo de las fibras. Otras especies de *Eucalyptus*

demuestran mayor una proporción mas benigna, pero el valor anterior (1/4) se emplea aquí asumiendo la resistencia al deslizamiento y a la torsión de la madera verde.

El momento de torsión es calculado asumiendo que una carga excéntrica del viento impacta en la copa incluso si ésta es muy simétrica, de acuerdo con la normativa Europea para carteles de señalización (AENOR , 1998). Consiguientemente, para copas simétricas, el modelo matemático acepta una palanca de torsión igual a:

$$Pt = Dc / 4$$

Donde:

Pt = Palanca de torsión en metros

Dc = Diámetro de la copa

No obstante, el centro de carga y la palanca de torsión resultantes en una copa con forma excéntrica pueden ser calculados por medio de un software y ser introducidos después como uno de los parámetros del modelo V. El momento crítico con respecto a la torsión de una pared residual cerrada, se calcula de la misma manera que para las fracturas por flexión (ver explicación más arriba).

- *Cálculo de resistencia a la fractura de ramas principales*

La resistencia estructural de las codominancias así como de ramas principales dañadas (por ejemplo cavidades o la influencia de callos de cicatrización) puede ser evaluada con este modelo matemático.

El factor de seguridad de la sección transversal y el grosor necesario de pared residual de un tronco a una altura dada, con respecto a una fractura por pura flexión o por torsión, pueden ser calculados. Se pueden introducir factores de corrección estimando la influencia de pudriciones, grietas, corteza incluida o cavidades (ver explicación más arriba).

Para la valoración de la fractura de ramas, la presente publicación podría permitir el uso más eficaz de los recursos técnicos avanzados. La combinación del diagnóstico visual, los análisis del viento, un cableado correcto y el sentido común, puede hacer milagros...

- *Velocidad crítica del viento*

Cuando se conocen los momentos críticos de fracturas por flexión, por torsión, así como de vuelco, se puede predecir la velocidad del viento que causaría esos momentos, con tal de que los parámetros del modelo expuesto anteriormente sean conocidos. La fórmula empleada para calcular “V” es la lógica consecuencia de calcular al revés la ecuación que define la carga del viento en la copa de un árbol.

La velocidad del viento a la altura del centro de presión en la copa, a la cual ocurrirían los colapsos descritos arriba, se considera como la velocidad crítica del viento para cada uno de estos colapsos.

- *Espesor necesario de la pared residual*

El espesor de pared residual que un árbol necesita para resistir una velocidad estática de viento, puede ser calculada si asumiendo que el tronco hueco se comporte de la misma manera que un tubo hueco.

La ecuación empleada para calcular el espesor mínimo de pared residual, si la cavidad fuera completamente concéntrica y cerrada, está de acuerdo con la teoría de la flexión de un tubo hueco y es la misma empleada en el método SIA (Wessolly & Erb, 1998):

$$t = 0,5 * dm * (1 - (1 - (100/S))^{1/3})$$

Donde:

- t = Espesor mínimo de pared residual
- dm = Diámetro neto medido
- S = Factor de seguridad de la sección transversal

- *Análisis de la carga del viento en un cableado*

La carga estática del viento en la copa, en las ramas cableadas y en los cables puede ser evaluada con el modelo “V”, lo cual permite diseñar instalaciones de cableado no dañino, para prevenir varios tipos de colapso.

Discusión

Mediante estos análisis, se obtiene una idea básica de la seguridad de un árbol, aunque estos sólo pueden ser una pequeña parte del diagnóstico, ya que los árboles y los vientos reales no se ajustan siempre a los modelos matemáticos. Es necesario hacer constancia de que estos modelos sólo ofrecen un entendimiento momentáneo de la estabilidad de un árbol.

Así mismo, a esta “diapositiva” se tienen que añadir los procesos de pudrición, compartimentación, compensación y otros factores que determinarán el tiempo de validez del pronóstico (véase Schwarze et al.).

En el modelo V, la frecuencia fundamental de flexión del tronco se compara con su factor de seguridad (en cuanto a la carga estática del viento), permitiendo una mejor orientación referente a la estabilidad del árbol. Introduciendo la frecuencia fundamental de flexión, se incorpora, de una manera simplificada, los efectos dinámicos del viento.

Por ejemplo, el tronco de un alto *Cupressus sempervirens* puede tener un elevado factor de seguridad de acuerdo con la simplificada carga estática del viento pero, sin embargo, disponer al mismo tiempo de una frecuencia fundamental de 5,8 Hz. Esto significa que el efecto de oscilación debería ser considerado seriamente, ya que éste podría disminuir considerablemente el factor de seguridad previamente calculado.

Se debería subrayar que, debido a la turbulencia, el comportamiento dinámico *real* de un árbol varía de las predicciones realizadas con un ordenador. El árbol puede balancearse tanto en paralelo que en perpendicular a la dirección del viento y producir un movimiento de torsión. Incluso si el árbol tuviera una forma perfectamente simétrica...

De acuerdo con James (2003), este cálculo de la frecuencia natural implica una simplificación, la cual calcula sólo el periodo de balanceo de un tronco desnudo. De este modo, la influencia del amortiguamiento por la masa arbórea se ignora. Esto último es la dramática influencia del balanceo de las ramas laterales, que puede prevenir las largas y peligrosas amplitudes de oscilación del tronco desnudo.

De acuerdo con AENOR (1998), el análisis completo de la carga por viento, como se menciona en esta publicación, es un modelo simplificado que sólo debería ser empleado sobre estructuras que

tienen un coeficiente dinámico de menos de 1,2. Si la estructura fuera más susceptible, en cuanto al efecto dinámico del viento, entonces las fórmulas presentadas en esta sección no son válidas. El coeficiente dinámico puede aumentar el momento teórico de flexión en el árbol con un factor >1 , debido a la interacción de la frecuencia de las rachas de viento próximas y la frecuencia de la estructura.

Una de las cuestiones que han sido remarcadas repetidamente por profesionales y estudiantes, es que es normal obtener desviaciones de la realidad, ya que se introducen múltiples parámetros en el modelo matemático (resistencia del material, arrastre aerodinámico, velocidad del viento...) que pueden variar ligeramente de la situación real en la que se encuentra el árbol.

Por ejemplo:

- La fuerza del viento se incrementa directamente al cubo con la velocidad. En este sentido, las pequeñas diferencias entre el valor introducido y la velocidad real del viento, llevarán a disminuir o aumentar significativamente los factores de seguridad (tanto para fractura como para vuelco). ¡Multiplicar la velocidad del viento por dos significa que el factor de seguridad cae a un cuarto!
- Dentro de una misma especie, las propiedades materiales pueden diferir dentro de la misma sección transversal de un mismo árbol, entre partes del mismo árbol, o de árbol a árbol, y puede fácilmente variar del valor publicado en las tablas de resistencia de la madera (Lavers, 1983).
- ¡La combinación de ambas desviaciones de la situación real llevarán incluso a una desviación mayor!

Por lo tanto, de momento, las ecuaciones matemáticas, e incluso los métodos más refinados, sólo pueden pretender ser *una orientación* para la evaluación de estabilidad de un árbol *real*.

Se deberían introducir factores de seguridad de 150-200% para compensar la imposibilidad natural de calcular, de una forma precisa, las caóticas interacciones entre la estructura del árbol, su geometría, las propiedades materiales y las cargas.

4. ¿Cuál es el espesor necesario de la pared residual?

Introducción

La resistencia de árboles huecos ha sido siempre objeto de fascinación entre arboricultores y técnicos. Los criterios empleados han conllevado discusiones enconadas y públicas en Europa y especialmente en Alemania.

Basándose en Mattheck & Breloer (2003), muchos consultores de arboricultura afirman que el espesor de la pared residual no puede ser inferior a un tercio del radio del tronco ($t/R= 0,3$), para prevenir el “colapso manguera” y el pandeo de la fina concha.

Wessolly & Erb (1998) por otro lado, publican la teoría opuesta, que muy a menudo llega a proponer y aceptar espesores infinitamente mínimos de pared residual. Para ello emplea la teoría de la flexión de un tubo hueco e idealizado.

En el manual se ha incluido un estudio realizado sobre un *Eucalyptus camaldulensis* en Terrassa, Cataluña. De acuerdo con la teoría de la flexión del tubo hueco e idealizado, como empleado igualmente por Wessolly, se calculó el diámetro y grosor de pared residual necesarios para diferentes alturas del árbol. Posteriormente, se contrastaron los resultados obtenidos con los criterios referentes al pandeo de Brazier, torsión y aplanamiento de la sección (el efecto “tubo de manguera”).

Lo expuesto en el manual sugiere que la verdad estaría en un punto intermedio en vez de en los extremos.

Un ejemplo de estática de árboles

- *Análisis de la carga del viento con el Modelo V*

El objetivo es calcular la fuerza que un huracán ejercería sobre el árbol inspeccionado. Las fuertes rachas de viento son la principal razón del colapso estructural de árboles, así que ellos deberían ser incorporados también en la evaluación de estabilidad.

El modelo “power-law” se emplea aquí para predecir la velocidad del viento a una altura dada por encima del terreno y es representada en la siguiente fórmula (Berneiser & König, 1996; Wessolly & Erb, 1998):

$$u^{(z)} = u^{(g)} * (h^{(z)} / h^{(g)})^a$$

Donde:

$u^{(z)}$ = Velocidad del viento "u" a una cierta altura "z" por encima del terreno

$u^{(g)}$ = Expectativa máxima de velocidad del viento no influida por la desigualdad del terreno

$h^{(z)}$ = Altura por encima del terreno en la cual se alcanza una determinada velocidad de viento (altura del análisis)

$h^{(g)}$ = Altura por encima del nivel del mar a la cual se alcanza la máxima velocidad del viento

a = Coeficiente de fricción de la superficie

tu = Factor de turbulencia

Se incluyen diferentes categorías de terreno con sus correspondientes parámetros de fricción. El coeficiente de fricción (^a) puede oscilar desde 0.10 hasta 0.40 para áreas urbanas con edificios altos. De esta manera se incorpora la influencia de construcciones cercanas, otros árboles, césped, o incluso terrenos desérticos, en cuanto a la velocidad viento.

Estos modelos matemáticos se emplean en la industria de la ingeniería eólica y las turbinas de viento en y allí se reconoce que la velocidad del viento puede ser sobreestimada para alturas menores de 250 metros.

Sin embargo, el factor aerodinámico de copa empleado para cada árbol, puede proporcionar un buen equilibrio en los cálculos y en el resultado final.

La fuerza que ejerce el viento sobre la copa se calcula mediante esta formula (Mattheck & Breloer, 1995; Niklas, 1999; Peltola et al., 1999; Gaffrey, 2000; Spatz et al., 2000; Ezquerro et al., 2001):

$$F = \frac{1}{2} * Cd * \rho * A * u^{(z)2}$$

Donde:

F = La fuerza que ejerce una racha de viento en la copa

Cd = El coeficiente aerodinámico describe la flexibilidad que un árbol emplea para disminuir el empuje del viento, y es adaptable para cada árbol de acuerdo con su densidad real de copa.

P = La densidad del aire, que depende de la presión y humedad del aire y de la temperatura y la altitud por encima del nivel del mar

A = La superficie de la copa expuesta al viento

$u^{(z)}$ = Velocidad del viento "u" a una cierta altura "z" por encima del terreno

Para *Eucalyptus camaldulensis* se eligió un coeficiente aerodinámico de 0,25. La superficie expuesta al viento del árbol original se calculó con un software especializado. Se empleó una densidad de aire de 1,292 kg/ m³, lo cual corresponde con una temperatura de 0°C y una presión atmosférica estándar (Windpower, 2003). En el ordenador, las fuerzas impactantes y los momentos resultantes fueron derivados mediante la simulación de rachas de viento de aproximadamente 34m/s.

- *Propiedades de la madera*

Se deberían conocer, como con un proyecto de ingeniería, las propiedades de la estructura (aquí: la pared residual).

Para este estudio el valor importante fue la resistencia (s). Se descontó la desviación estándar para mantener un margen de seguridad en el cálculo de estabilidad.

Los valores publicados por Lavers (1983) para *Eucalyptus diversicolor* (s = 3,15kN/cm², desviación estándar descontada) y el MOE (E= 1340 KN/ cm²) son empleados en el modelo V, ya que todavía no hay datos disponibles para los *Eucalyptus camaldulensis* y *Eucalyptus globulus*, tan comunes en España.

- *Geometría*

El diámetro y la forma del tronco y el espesor de la corteza se mantuvieron igual, así como los parámetros de velocidad del viento, las propiedades materiales y otros. En la introducción de datos en el modelo matemático, solo variaban la altura y la superficie vertical correspondiente de la copa.

Diámetro medio del tronco: 66,5 cm.

Espesor medio de corteza: 1,8 cm.

- *Espesor de la pared residual: teoría la flexión de un tubo hueco*

Se puede calcular el espesor de pared residual que un árbol necesita para resistir cualquier velocidad estática de viento dada, si se asume que el tronco hueco se comporta como si fuera un tubo hueco perfectamente formado.

La ecuación empleada aquí para calcular el espesor mínimo de pared residual, si ésta fuera totalmente concéntrica y cerrada, está de acuerdo con la teoría de la flexión de un tubo hueco y es la misma que se emplea en el método SIA (Wessolly & Erb, 1998):

$$t = 0,5 * dm * (1 - (1 - (100/S))^{1/3})$$

Donde:

- t = Espesor mínimo de pared residual
- dm = Diámetro neto medido
- S = Factor de seguridad de la sección transversal

Resultados: diámetro necesario del tronco y espesor requerido de la pared residual

Con la ayuda del siguiente diagrama, el arboricultor puede apreciar mejor el análisis de resistencia a la fractura del *Eucalyptus camaldulensis* mostrado en la fotografía siguiente.

Se determinan el factor de seguridad (S) del árbol y el espesor necesario de la concha de madera, para ser seguro contra rachas de viento de 117 km/h, creciendo en campo abierto y rodeado de arbusto bajo.

El factor de seguridad de este eucalipto puede ser calculado con la siguiente fórmula geométrica (Wessolly & Erb, 1998):

$$S = 100 * (dm/dreq)^3$$

Donde :

- S = Factor de seguridad del tronco a 1 metro de altura, si éste estuviera completamente sin daños y sano.
- dm = Diámetro neto medido del árbol (diámetro sin corteza)
- $dreq$ = Diámetro requerido de tronco, de acuerdo con la teoría de elasticidad, si este estuviera completamente ausente de daños.

El diámetro requerido y el espesor de pared residual a 1 metro de altura, para diferentes alturas, puede apreciarse en la tabla. Estos

resultados son el resultado del momento de huracán, la resistencia a la compresión y del módulo resistente.

altura en m	diámetro requerido en cm	T requerido en cm	t/R teóricamente requerido
10	24,8	0,65	0,02
11	27,5	0,9	
12	30,3	1,22	
13	33,1	1,61	
14	35,9	2,09	
15	38,8	2,68	
16	41,7	3,41	
17	44,6	4,29	
17,1	44,9	4,39	0,14
18	47,5	5,38	
19	50,4	6,73	
20	53,3	8,48	



Por ejemplo: Si este eucalipto dispone de un diámetro neto de 62.9 cm y una altura de 17.1 m, entonces el diámetro mínimo requerido es de 44.9 cm. El factor de seguridad será aproximadamente de 275%. Esto significa que la tensión longitudinal en las fibras marginales de un tronco sano, durante rachas de 34 m/s, alcanzaría un valor de 1,14 kN/cm². Esto es ligeramente más que un tercio de la resistencia a la compresión asumida.

En este ejemplo, un valor del 275% significa que el árbol necesita un espesor mínimo de pared residual de 4.4 cm de acuerdo con la fórmula $t = 0,5 * dm * (1 - (1 - (100/SF))^{1/3})$, si la pared fuera completamente cerrada y concéntrica. Finalmente, se debería incorporar un *margen de seguridad* de 200%, también para el espesor requerido de pared residual, teniendo en cuenta que los valores de Lavers (1983) representan el colapso plástico (secundario) de las fibras.

Cuando el factor de seguridad es superior al 100%, el tronco puede estar dañado hasta un cierto punto sin llegar a ser inseguro. Si el valor es inferior a 100%, el árbol no puede permitirse ningún defecto

estructural. En este caso, se podría reducir la copa para aumentar la seguridad. La extensión de la reducción de copa también puede ser estimada mediante el modelo matemático.

Discusión

El estudio de literatura especializada sugiere que los diferentes colapsos de la pared residual de un árbol dependen principalmente del Módulo de Elasticidad y la resistencia a la compresión en distintas direcciones anatómicas, la geometría del tronco y las distintas fuerzas.

Lo cuál hace pensar que ratios t/R fijos y destinados al diagnóstico de estabilidad deberían ser tratados con cautela.

Y, por otro lado, se hace evidente que la pared residual tampoco puede ser tan fina como se predice matemáticamente con la teoría de la flexión de un tubo hueco e idealizado.

Está claro que la teoría de la flexión de un tubo hueco puede alcanzar ratios t/R *indefinidamente* bajos ya que no es más que una fórmula geométrica.

Esto se puede observar en la tabla para el árbol de 10 m de altura donde, teóricamente, se necesitaría un espesor de pared residual de 0.65 cm (t/R 0.02). Lo cual es claramente inaceptable. ¡Lógicamente los resultados teóricos obtenidos por esta fórmula no pueden ser aplicados sin límites en los árboles reales!

El eucalipto de 17.1 m de altura, según la teoría de la flexión de un tubo hueco, solo necesitaría un ratio t/R de 0.14 (completamente expuesto en campo abierto, en la ciudad sería aún menos).

Ahora: si la pared residual realmente experimentara solo tensión pura por flexión, este espesor sería suficiente. ¡Pero habría que tener cuidado para excluir otros tipos de colapsos (traicioneros)! Entre ellos está el pandeo de Brazier, la torsión, el aplastamiento de la sección transversal, deslizamientos o la combinación de estos y otros tipos de comportamientos mecánicos.

El lector debe ser consciente de que los modelos matemáticos, los instrumentos de medición y los métodos *solamente* deben ser usados como *una ayuda* para determinar la estabilidad de los árboles. Así mismo, una evaluación basada *solamente* en los resultados obtenidos por estos últimos sería *inadecuada*.

Dada la poca importancia que se les puede dar a las matemáticas en el diagnóstico de arbolado real, éstas sólo pueden pretender ser una buena orientación.

En la publicación de Wessolly y Erb (1998), se muestra un diagrama de Spatz donde se puede concluir que la fractura primaria en el lado de compresión, ocurre con cargas menores de las necesarias para el aplastamiento de la sección transversal, si el t/R es superior a 0.0625 aproximadamente.

Esto significa que, con respecto al riesgo de aplastamiento de la sección transversal de una pared residual *perfectamente cerrada y concéntrica*, los cálculos empleados de espesor de pared residual en el presente estudio, podrían ser fiables si el árbol tuviera un t/R superior este valor.

Sin embargo, habría que tener cuidado ya que con cavidades y secciones transversales irregulares o abiertas y la compleja combinación de las cargas (del viento), este ratio puede no ser aplicable, ya que el árbol podría colapsarse sin obedecer a la teoría de la flexión de un tubo hueco.

Cabe mencionar que, si nos centramos solamente en el colapso la pared residual misma, que esto puede ser traicionero al dar una visión incorrecta sobre la seguridad del árbol. Una fina pared residual se puede colapsar debido a la combinación de cavidades por antiguas podas y tensiones de deslizamiento (Mattheck & Breloer, 1995). Sin obedecer a nuestras matemáticas y predicciones computerizadas.

Y, por ejemplo, gruesas y pesadas ramas pueden desprenderse de la pared residual y causar daños severos, mientras que el tronco hueco se mantiene en pie!

Así que ¿cuál es el grosor necesario de pared residual de un árbol? Esto claramente parece depender sobre todo del *sentido común*.

5. Diagnóstico visual

Según Gordon (1999), no sólo el espesor, sino también la composición de cada componente que soporta la carga, se dimensiona en una considerable medida, por el uso que se le va a dar y por las fuerzas que debe resistir a lo largo de una existencia.

Así, las proporciones de las estructuras vivas están diseñadas para optimizar su resistencia.

De acuerdo con el autor de la publicación presente, esta afirmación podría definir maravillosamente uno de los principales componentes la cuestión de la estabilidad de arbolado.

Las bases del protocolo del autor

Actualmente, Prof. Dr. Francis Schwarze está investigando la interacción entre los mecanismos de defensa del árbol y las estrategias empleadas por hongos xilófagos para esquivar los primeros.

El *status quo*, la condición momentánea de la pudrición en un árbol, puede ser evaluado macroscópicamente. Los métodos descritos en estas líneas pueden ofrecer una grabación estática de esta condición momentánea.

Sin embargo, la *dinámica* de la interacción y, en consecuencia, *la seguridad futura del árbol*, sólo puede ser estudiada a nivel microscópico.

De esta manera, y por primera vez, resulta posible elaborar un pronóstico en cuanto al desarrollo futuro de la pudrición y la agresividad de diferentes hongos, en la albura de los árboles.

El método SIA (Wessolly & Erb, 1998) calcula el diámetro de tronco y el espesor de la pared residual que un determinado árbol necesita para aguantar rachas de viento de 32,5 m/s. El método I.B.A (Reinartz & Schlag, 1997) describe la interacción entre micología, vitalidad y estabilidad. Este método visual combina la detección de hongos, bastante antes de que aparezcan los primeros cuerpos fructíferos, y el método SIA.

Finalmente, en "The Body Language Of Trees" (método VTA, Mattheck & Breloer, 1995) se ofrece una descripción de los posibles colapsos por fractura, la cual es una deliciosa y obligada literatura. La descripción se toma como punto de partida por el autor de esta publicación, hasta que lo contrario pueda ser demostrado incuestionablemente.

Hongos xilófagos

En la mayoría de la literatura actual, cuando aparecen los carpóforos en un cierto tamaño y/ o cantidad, se recomienda abatir el árbol. La presencia de hongos xilófagos, como *Ganoderma* sp., *Meripilus giganteus*, *Kretzschmaria deusta* (llamado antiguamente: *Hypoxylon deustum*, *Ustulina deusta*), *Inonotus hispidus* o *Laetiporus sulphureus*, no significa *ipso facto* que haya una pérdida de resistencia en el cuerpo leñoso.

Un árbol vivo no es un trozo de *madera pasiva*, ni se corroe como si fuera un tubo de hierro.

La perspectiva equivocada sólo generará la respuesta equivocada.

El hecho es que un árbol vigoroso muy a menudo es capaz de establecer un equilibrio entre formación de madera de compensación y destrucción de material causada por la mayoría de las especies de hongos xilófagos. Como crecimiento de compensación se entiende la formación de anillos de crecimiento más gruesos donde el cambium experimenta un aumento de tensiones y deformaciones.

De acuerdo con el Método IBA, la albura y cambium intactos garantizan que el árbol pueda crecer en diámetro y compensar de esta manera la destrucción desarrollada por el hongo xilófago.

Cuando la vitalidad del árbol se resienta, el hongo puede penetrar en la albura e infectar el cambium. Asimismo, se verá afectado el crecimiento de la madera y corteza, lo que llevará a síntomas exteriores visibles. Aparte de estos síntomas, en un estado de pudrición avanzado, aparecen generalmente daños en la copa, relacionados con la baja vitalidad del árbol (Reinartz & Schlag, 1997).

También es posible que la mayoría de los hongos xilófagos tengan serios problemas para penetrar la albura e infectar el cambium cuando el árbol es vigoroso, debido a las células parenquimáticas vivas y altamente eficaces.

Así que la vitalidad, el crecimiento en diámetro y el estado de la corteza son factores críticos cuando se evalúa la estabilidad de un árbol infectado por un hongo xilófago.

La infección y sus efectos deberían ser entendidos en el contexto global de cada árbol.

Evaluación de la resistencia a la fractura de troncos huecos

El hecho es que en algunos árboles viejos y gruesos con buena capacidad de compartimentación, el grosor de la albura puede ser estimado, y este anillo de albura puede ser suficiente para soportar la carga del viento (el grosor necesario de pared se puede calcular con el análisis de carga del viento).

Pero ¿Cómo podemos saber, visualmente, cuánta pérdida de resistencia puede haber causado la pudrición?

La cuarta barrera del modelo CODIT (Shigo,1986) puede ser una muy buena estrategia haciendo muy difícil la penetración del hongo en la albura. Y si el árbol es vigoroso, las células parenquimáticas son muy eficaces en la compartimentación de infecciones. Muchos hongos xilófagos de pudrición marrón, como *Laetiporus sulphureus* por ejemplo, no son capaces de infectar la albura en robles y hayas vitales. Y la albura es la madera que da la principal resistencia estructural al árbol.

Así que, si conocemos la interacción entre hongo, huésped y vitalidad podemos estimar si este anillo de madera está intacto o estructuralmente debilitado.

Si el área esta intacta, podemos valorar si el tronco es resistente a la fractura, contando con el anillo de albura y los cálculos empleados en el protocolo del autor. El grosor de la albura se estima para el árbol en cuestión y se compara con el grosor que sería necesario para resistir la fuerza de una tormenta en la copa. Las “costillas” de madera de herida alrededor de una cavidad abierta, pueden aumentar considerablemente la resistencia del conjunto, no solo por su geometría optimizada, sino debido también por la madera más resistente y rígida.

Golpeando con un martillo de goma es posible, con experiencia y practica, determinar el punto donde la pared es más fina (¡las eliminaciones de árboles huecos pueden ser aprovechadas para practicar! aunque sí nos ensuciamos las manitas...)

Otro método es comparar el sonido de una zona dañada con el de secciones sanas. De esta forma se puede adquirir una mayor precisión para encontrar el punto más interesante.

Cuando se evalúan fracturas por pura flexión, una posibilidad es asumir que la pared residual es igual de fina alrededor de todo el tronco. Esta propuesta concuerda con el modelo de

compartimentación de Shigo, el cual asume que la pudrición, a lo peor, ocupa toda la madera que fue formada antes de que se formara la zona de barrera (Pared 4). Para cavidades abiertas, la capacidad de resistencia puede estimarse con ayuda de factores de corrección.

Golpear con un martillo no siempre es fiable, aunque en muchos árboles viejos es bastante fácil estimar si la pared residual es más gruesa de lo necesario (t/R requerido).

El lenguaje corporal de los árboles

El lenguaje corporal de los árboles supera a cualquier diagnosis instrumental.

La corteza nos habla sobre la vitalidad y la estabilidad. Grietas de crecimiento en el floema (corteza interna) también apuntan hacia su fase de vitalidad. Ciertas anomalías en la piel del árbol permiten a veces determinar la especie del hongo y la extensión de la infección mucho antes de que aparezcan los primeros carpóforos. Esto significa que la estabilidad de un árbol puede ser evaluada con un buen margen de tiempo antes de que se cayera “inesperadamente”.

Un árbol con vigor puede también compensar una debilidad estructural interna.

Síntomas como la base del tronco ensanchada (pie de elefante) o protuberancias en el tronco no necesariamente significan que el árbol tiene un problema. Estos síntomas no tienen que preocuparnos *ipso-facto*. Los síntomas de crecimiento de reparación, como los abultamientos o los “cuello de botella” no significan *persé* que el árbol tenga un problema. Es verdad, ¡el problema puede haber sido ya compensado por ese crecimiento de reparación!

Cuando hablamos de la compensación o el crecimiento de reparación, contemplamos en realidad la geometría y los materiales de la estructura. Como en la ingeniería civil, el árbol puede obtener una mejor eficacia estructural depositando anillos anuales lo mas lejos posible de la “Fibra Neutra” De esta forma se puede ahorrar material, un coste, cuando se elimina material – el duramen por ejemplo -, ya que, en cuanto a la resistencia estructural, este último juega un papel menor que el anillo exterior.

Un árbol puede compensar un defecto si tiene una buena vitalidad y si las altas tensiones y deformaciones han sido detectadas por el cambium (Shigo, 1986; Mattheck & Breloer, 1995; Reinartz & Schlag, 1996; Wessolly & Erb, 1998).

No obstante un árbol puede no ser siempre lo bastante vigoroso como para depositar esta madera extra. Quizás incluso la calidad de su madera –resistencia y rigidez- puede no ser tan buena como debiera debido a vitalidad disminuida.

Algunos tipos de colapso estructural no pueden ser previstos por el propio árbol. También es posible que fuertes rachas de viento temporales no conlleven la formación de madera de compensación, aunque ellas puedan ser el motivo del colapso.

Una evaluación correcta del árbol dañado puede llevar a un empleo más eficaz de instrumentos, si los síntomas se interpretan correctamente contrastándose con la vitalidad, la capacidad de reacción y el factor de seguridad.

¡El propio lenguaje del árbol tiene que ser escuchado!

Estimación de la vitalidad

Se sospecha que una pérdida visible de crecimientos primarios de los brotes (parte superior de la copa) está directamente relacionada con cambios en el sistema radicular o en el cuerpo leñoso (Mattheck & Breloer, 1995; Reinartz & Schlag, 1997; Wessolly & Erb, 1998; Roloff, 2001).

Por lo tanto, el diagnóstico del patrón de crecimiento de esos brotes y las estructuras resultantes de la copa son de vital importancia cuando se evalúa la estabilidad de un árbol.

Roloff (2001) describe como la vitalidad de un árbol (para especies Medio-Europeas) se puede clasificar en 4 fases. Este autor describe cómo los patrones de crecimiento de los últimos 4-14 años retratan la situación biológica real del árbol.

Las pérdidas temporales de vitalidad, debidas a años de sequía o ataques patogénicas suaves, no parecen tener un gran efecto sobre la situación biológica global del árbol. Pero sí pueden conllevar un crecimiento menor y/ o la formación de hojas de un tamaño y verdor menor durante este periodo corto.

Equívocadamente, la capacidad biológica del árbol a largo plazo se evaluaría como disminuida, aunque en realidad no lo fuera. Un árbol

sano se puede recuperar de sus “bajones”, siempre y cuando la pérdida de su masa foliar no exceda el 30 % de su masa original.

Así mismo, finalmente, ¡el aspecto de la copa durante uno o dos años puede desdibujar el diagnóstico y el pronóstico de su estabilidad! ¡Incluso la transparencia de la copa no es un parámetro fiable! (Roloff, 2001).

La valoración de vitalidad por este método es generalmente reproducible por terceras personas, por lo cual la objetividad y la precisión se hace más asequible.

Este método ha sido transferido experimentalmente por el autor de este libro a especies mediterráneas como *Eucaliptos spp*, *Celtis spp*, *Tipuana spp*, y otras. La evaluación de las estructuras de la copa, establecidas por los patrones de crecimiento de los brotes más altos, permite clasificar la vitalidad del árbol.

Así mismo, la capacidad de reacción contra infecciones xilófagos puede ser diagnosticada. Sin embargo, según Schwarze e tal., el desarrollo de la pudrición por un cierto hongo dependerá también la especie arbórea en cuestión y no necesariamente de la vitalidad.

Conclusiones sobre el diagnóstico visual

Un diagnóstico visual experto permite generalmente reconocer daños producidos por hongos xilófagos, a veces antes de que aparezcan los primeros cuerpos fructíferos, y estimar su influencia en cuanto a la estabilidad del árbol.

De este modo, muchos accidentes pueden ser prevenidos a tiempo.

Un diagnóstico visual experto es el instrumento disponible más poderoso. Y probablemente el más noble.

6. Comportamientos de la estructura leñosa

¿Cuál es la verdadera razón por la que se rompen las cosas?

Introducción

El tronco de muchos árboles de elevada edad, puede ser mucho más seguro de lo que creemos para resistir un huracán. El tronco es grueso, la altura del árbol es relativamente baja y por distintas razones el empuje del viento en la copa es relativamente bajo. La tensión en las fibras marginales del tronco, inducida por las rachas tormentosas, se quedaría muy por debajo de la resistencia a la compresión de dichas fibras.

Teóricamente, y de acuerdo con la teoría de la flexión de un tubo hueco, nuestro viejo árbol tan sólo necesitaría un grosor de pared residual mínimo (un ratio t/R bajo).

Tanto la “estática de los árboles” (método SIA y test de tracción-Elastométrico, Wessolly & Erb, 1998) como el Modelo V, se basan en éstos cálculos tradicionales para la predicción de fractura.

Sin embargo, este resultado sólo puede pretender ser *una orientación*, ya que ratios muy bajos de t/R pueden conducir a diferentes tipos de colapso, debido a la flexibilidad de la concha.

Los cálculos de resistencia a la fractura, como empleados en esta publicación y la estática de los árboles, se basan en la teoría de la viga elástica. Varios autores científicos advierten de la utilidad de dicha teoría *en el caso de circunstancias ideales* (Gordon, 1999; Coder, 2000; Horacek, 2003). La interpretación del tronco como si fuera un cilindro homogéneo y la contemplación de las acciones eólicas ejercidas en el árbol como si fueran un empuje simplificado, permiten el uso de matemáticas sencillas.

Pero los problemas estructurales muy comunes como las torsiones, delaminación, deslizamiento y concentraciones de tensiones pueden no obedecer a esta teoría y, por lo menos en un árbol, deberían ser tenidos en cuenta. Al igual que el complejo comportamiento del viento.

¿Cómo se puede predecir la fractura de un árbol debida a la torsión, delaminación, deslizamiento o la propagación de defectos?

En “El Lenguaje corporal de los árboles” (The Body Language of Trees, Mattheck & Breloer, 1995) se ofrecen orientaciones muy válidas que contemplan cómo puede colapsar un árbol muy hueco.

Algunas se mencionan en esta publicación y deberían ser tenidas en cuenta, atemperando los cálculos de la simple teoría de la flexión de un tubo hueco.

Según Mattheck & Breloer (1995), la mayoría de los siguientes componentes del colapso *no se pueden predecir* mediante el test de tracción de Wessolly (elastométrico):

Fracturas causadas por tensiones de flexión:

- Aplanamiento de la sección
- Pandeo de finas paredes residuales cerradas
- Aplanamiento local de la sección (el efecto “tubo de manguera”)
- Pandeo de paredes residuales abiertas
- Fracturas de “árboles-arpa”

Fracturas causadas por tensiones de deslizamiento:

- Fractura basal: fisuras de deslizamiento, delaminación y aplanamiento local de la sección
- Fracturas de la pared residual a la altura de heridas exteriores

Fracturas causadas por torsión:

- En dirección opuesta al crecimiento en espiral
- En dirección opuesta a fisuras internas en espiral
- Fracturas de rotación debidas a ramas descentradas y la compleja combinación de fuerzas

Fisuras debidas a tensiones perpendiculares:

- “Vigas de mala suerte” (muy común en *Pinus pinea*, por ejemplo)
- Delaminación de los contrafuertes
- Corteza incluida

Algunos criterios de la obra mencionada más arriba se pueden contrastar con la publicación de Wessolly & Erb (1998).

Comportamientos mecánicos comunes: una breve descripción

- *Fractura en verde*

Se sospecha que la caída de ramas en verano (fractura repentina de ramas en las tardes calurosas de verano) ocurre parcialmente debido al alargamiento y relajación de las fibras pre-tensionadas. (Mattheck & Kubler, 1995; Wessolly & Erb, 1998). El pretensionamiento de las fibras puede aumentar la resistencia contra la carga de compresión incluso por encima del 140% de la resistencia original de compresión (Archer, 1996).

La combinación del calentamiento de las fibras, el cual causa relajación en éstas, y la evaporación, la cual puede influir la pretensión, puede reducir la resistencia a la carga de estas fibras considerablemente.

También las cargas de compresión pueden ser muy considerables en ramas inclinadas y pesadas y, al menos en madera seca, pueden inducir una ruptura por deslizamiento si la *duración de la carga* es larga. (Wood Handbook, 1999)

Este fenómeno es muy común en España en los largos y calurosos días veraniegos. Según la experiencia del autor, en algunos casos se puede reducir considerablemente el riesgo con un diagnóstico visual y un diseño especial de cableado. Quizás también con un aporte adicional de agua en los periodos de sequía y altas temperaturas.

- *Pandeo de Euler*

Árboles delgados pueden colapsar por la formación de una onda a lo largo de toda la longitud de su tronco. En realidad el árbol “se escapa a sí mismo” de la carga y este tipo de colapso parece depender principalmente de su módulo de elasticidad, altura del árbol y del momento de inercia (Gordon, 1999).

Este fenómeno se puede observar apoyándonos en una vara delgada, la cual se comba hacia un lado debido a nuestro peso. Cuando dejamos de ejercer presión, la vara vuelve a su estado original. Pero forzamos la vara a flexionarse demasiado - la vara se escapa hacia un lado - ésta se rompe y nos caemos al suelo. Su delgadez y su capacidad de deformación elástica determinan cuánto peso puede soportar la vara antes de pandearse.

Normalmente, los árboles bien desarrollados no presentan este riesgo, teniendo un tronco grueso en comparación con su altura. Sin embargo, hay tales como los árboles demasiado delgados y las palmeras.

Si el radio del tubo es grande y la pared fina, puede ocurrir que el tubo sí sea seguro contra el pandeo de Euler o una larga onda; pero que colapsa debido al plegamiento localizado de su pared. Una de las maneras en la que se colapsa localmente se denomina el “pandeo de Brazier”. (Gordon, 1999).

Y, lo mismo puede ser cierto para los árboles bien desarrollados...

- *Pandeo de Brazier*

De acuerdo con Gordon (1999), el sistema de huir de la carga que una estructura emplea, dependerá de su forma y proporción así como del material del cual está compuesta.

Una pared hecha de bloques de piedra (la fábrica, como el puente romano de Segovia) normalmente no colapsa por fractura primaria – los bloques no se desmenuzan por el peso del muro- pero la pared puede plegarse y venirse abajo entera.

Lo mismo puede ocurrir en árboles demasiado huecos que se pliegan por ser demasiado flexibles.

El “pandeo de Brazier” es parecido a aplastar una lata de refresco vacía por pura compresión. La lata vacía colapsa debido a la formación de pequeñas ondas, plegándose. La “pared residual” muy delgada de la lata se arruga. Parece que los colapsos de este tipo dependen del módulo de elasticidad, del grosor de la pared residual y del radio de la sección transversal (Gordon, 1999).

Mattheck & Breloer (1995) parecen referirse a esta fractura como “shell-buckling” y lo trasladan a un árbol hueco, añadiendo que este tipo de colapso ocurre con paredes extraordinariamente finas sometidas a flexión (por el empuje del viento, por ejemplo).

El autor de este estudio observó comportamientos similares en el tronco hueco y abierto de un eucalipto con el test de tracción (Elastómetro, Wessolly & Erb, 1998). Se grabaron las diferentes deformaciones de la estructura dañada con instrumentos de medición muy sensibles, durante una simulación de carga del viento.

Fue asombroso observar como la pared se abrió lateralmente.

Estas deformaciones perpendiculares fueron mucho mayores, con la misma carga de tracción, que el estiramiento longitudinal de las fibras marginales. La pura compresión longitudinal en el tronco se transformo en tensiones perpendiculares a las fibras, debido a la desviación del flujo de tensiones causada por la cavidad abierta. Este resultado parece indicar que este eucalipto colapsaría debido al plegamiento lateral de la pared de la cavidad abierta, sin obedecer a la teoría de la flexión de un tubo hueco.

¡Lo cual significa que su fuerza estructural real habría sido menor que la predicha con la teoría de la flexión de un tubo hueco!

- *Deslizamiento*

Las tensiones por deslizamiento miden la tendencia que una parte de un cuerpo tiene a deslizarse sobre su parte adyacente. Este fenómeno se puede visualizar doblando un libro. Las páginas deslizan unas sobre otras debido a la flexión del conjunto. La deformación debida al deslizamiento obedece a la Ley de Hooke con tensiones moderadas.

Estudios en profundidad fueron llevados a cabo por el autor de este trabajo en una palmera (*Phoenix dactylifera*) que presentaba un tronco muy hueco y abierto.

La deformación de las fibras marginales, en diferentes orientaciones, fueron registradas en el área de la cavidad abierta durante una simulación de viento con un tractel. (Elastómetro, Wessolly & Erb, 1998).

Mediante sensores del módulo de Young, se registraron *deformaciones extraordinarias, debido al deslizamiento* de las dos mitades del tronco entre sí. ¡Y estas deformaciones fueron muchísimo mayores que las deformaciones longitudinales medidas de acuerdo con la teoría de la flexión de la fibra neutras y del tubo hueco!

Este hecho indica que el colapso ocurriría probablemente debido al deslizamiento, rompiéndose el tronco hueco longitudinalmente al principio, sin obedecer a la teoría de la flexión de un tubo hueco.

- *Concentraciones de tensiones*

De acuerdo a Gordon (1999), el modo tradicional de calcular la seguridad de una estructura *ignora* virtualmente las concentraciones de tensión (¡!).

La desviación del flujo de fuerza alrededor de cavidades redondas puede causar un incremento de tensión con un factor de tres. (Mattheck & Breloer, 1995; Gordon, 1999). Sin embargo, el efecto es mucho mayor si el defecto no es tan redondo y al final de una grieta.

En este caso podría ser que la resistencia a la fractura, calculada de acuerdo a la simple teoría de la flexión de un tubo, pareciera satisfactoria, *mientras que la tensión se incrementa peligrosamente en algunos puntos.*

La estructura del árbol podría empezar a fracturarse a partir de aquí sin preocuparse demasiado por las predicciones matemáticas acordes con la simple teoría de la flexión, por ejemplo debido a la propagación de una grieta y a las energías de deformación.

Parece que el crecimiento de reparación, en este caso la madera de herida, lleva a disminuir las tensiones en los bordes de una herida (Mattheck & Kubler, 1995).

Una compensación exitosa –crecimiento de reparación– podría ser la solución en este caso, aunque no sabemos si el árbol puede reaccionar contra cargas temporales (rachas temporales de viento, no una brisa continua). Ni tampoco el árbol es capaz de notar algunos defectos mecánicos o tensiones...

- *Torsión y la compleja combinación de fuerzas*

“Así mismo, no es sorprendente que [la naturaleza] evita la torsión como la peste” (Gordon, 1999).

En el caso de troncos ahuecados por hongos como *Laetiporus sulphureus* o *Daedalea quercina*, se puede encontrar a veces una pared residual concéntrica y cerrada. La resistencia a la torsión puede ser estimada en estos casos, por medio del cálculo de las cargas de torsión ejercidas por el viento y fórmulas matemáticas. Una pared residual cerrada podría ser una muy eficiente “caja de torsión” para resistir tanto torsiones, como las tensiones por deslizamiento. Pero las cavidades *abiertas*, como un descapotable de antes de la 2ª Guerra Mundial (Gordon 1999), no son tan resistentes contra este fenómeno.

No obstante, en la vida real la predicción de fractura por torsión u otros colapsos es muy difícil dada la infinita variación morfológica encontrada en árboles.

Algunos autores describen como un árbol, o partes de él, puede colapsar debido a la compleja combinación de flexión, torsión, su propio peso, oscilación natural, cavidades abiertas, etcétera

Y ésta es la razón por la que el colapso de un árbol no siempre es predecible, incluso con la ausencia de defectos estructurales.

- *Fractura basal*

De acuerdo con el método SIA (Wessolly & Erb, 1998) y el método V, un árbol puede necesitar solamente, en teoría, una pared residual muy delgada para resistir un huracán. O las mediciones del estiramiento de las fibras con sensores de elasticidad durante una simulación de viento, podrían predecir que la base muy hueca del tronco sería seguro. (Elastómetro, Wessolly & Erb, 1998) .

De acuerdo con la teoría que emplea este último método, la estructura colapsaría cuando la pura deformación longitudinal de las fibras de la madera excediera del límite elástico.

Sin embargo: *la base hueca puede fallar sin obedecer a los resultados de estas metodologías, simplemente porque ellos no contemplan ni la torsión, ni la delaminación, ni el deslizamiento, o, las muy comunes de las razones que pueden llevar al colapso de un árbol.*

Este comportamiento fue observado durante un test de tracción (Elastómetro, Wessolly & Erb, 1998) en el Parque de El Capricho, España.

Allí, el test de tracción causó inesperadamente la fractura basal de un plátano. Después, se concluyó que la estructura del árbol colapsó incluso *antes* del punto estimado de fractura del material (Detter, 2002). Eso significa que el árbol era *menos seguro de lo calculado* por este método y que habría colapsado con una carga del viento menor de la predicha.

Cuando las matemáticas calculan que se necesita un t/R muy bajo para un árbol, habría que tener cuidado de excluir la posibilidad de delaminación de la pared residual cercana a los contrafuertes.

La fractura basal parece ganar importancia cuando el ratio entre pared residual y el radio de la sección (t/R) es muy bajo. Esto, otra vez, sería verdad en el caso *idealizado* de contar con cavidades perfectamente cerradas, intactas y concéntricas. No obstante, cavidades abiertas o contrafuertes altamente curvados pueden requerir un t/R aún mayor de lo predicho mediante estos métodos.

Es posible que el sentido común y una buena vitalidad –y en consecuencia una alta calidad de crecimiento reparador- puedan ser la llave, incluso en el futuro, para resolver esta cuestión.

7. Uno de los secretos del diagnóstico actual de estabilidad de arbolado

Meramente observando la poda o la eliminación de un árbol, parece estar claro que el peso en la parte final de la copa, en varias especies de árboles, probablemente aumenta de forma significativa el balanceo. Esto está bastante claro en *Cupressus sempervirens* altos o *Aesculus hippocastanum* cuando tienen sus frutos. El lector puede experimentar la diferencia cuando se balancea adelante y atrás una rama de *Platanus spp.* con hojas y después una rama de *Pinus pinea* con conos.

Probablemente también el MOE (Modulo de elasticidad) del material del que está hecha la rama influirá en este fenómeno, aparte de su peso y centro de gravedad, su forma o la presencia/ ausencia de hojas. Naturalmente y como con otros métodos y modelos, estos factores no son fácilmente encajables en cálculos matemáticos y deberían ser tenidos en cuenta durante el diagnóstico visual de estabilidad.

Es cierto que en el método V, la frecuencia de flexión (en Hz) de un tronco desnudo puede ser calculado desde el ratio de la altura/ circunferencia y su factor de frecuencia. Pero entonces la forma de la copa (balanceo de las “colas de león” por ejemplo), superficies de copa asimétricas, el peso centro de gravedad de la copa, la forma del tronco (si no es tan derecho como una viga), defectos estructurales anteriores, la interacción entre suelo y raíz, y otros variables desmienten los cálculos (Coder, 2000).

Incluso dejando a un lado las rachas descentradas y otros comportamientos caóticos del viento.

Por consiguiente, los movimientos reales de un árbol bajo las cargas del viento pueden variar mucho de la situación ideal de “hacia adelante y hacia atrás”.

Por otro lado, los movimientos de oscilación peligrosos en los árboles se pueden minimizar debido al modo en que las ramas interactúan entre ellas por su complejo balanceo. (James, 2003). Esto último especialmente podría el caso cuando la superficie de la copa esta uniformemente distribuida por el árbol entero.

Las estructuras relativamente flexibles – por ejemplo partes del árbol estructuralmente demasiado dañadas estructuralmente - pueden no obedecer a estos cálculos matemáticos. Esto también es el caso con los árboles demasiado delgados.

La oscilación puede disminuir considerablemente la seguridad de un árbol y no es fácilmente ajustable a las matemáticas. En consecuencia, los árboles muy delgados (algunos pinos por ejemplo) y palmeras sensibles al balanceo, requieren la contemplación de este componente.

Se ofrece aquí una cita traducida de ‘El Diseño Ingenierístico de Sistemas Estructurales’ (Sparling, 1997) se desvela parte del misterio que envuelve al diagnóstico de estabilidad de árboles, aunque se refiera a edificios:

“Es importante reconocer que las presiones del viento, y por tanto sus cargas, no son estáticas en la naturaleza pero fluctúan continuamente. La dinámica natural de las cargas del viento puede, de hecho, excitar movimientos de resonancia en estructuras delgadas o flexibles, generando respuestas dinámicas que pueden ser mucho mayores que las que se producirían por cargas estáticas equivalentes. Por el otro lado, en los edificios bajos y relativamente rígidos, la respuesta dinámica es menos significativa, y el diseño se puede basar con seguridad en las cargas estáticas equivalentes.”

Según el autor del libro presente, uno de los secretos de la actual diagnosis de estabilidad del árbol es que se puede emplear con seguridad un análisis de viento *solamente en los árboles relativamente rígidos y bajos.*

Probablemente el método SIA (Wessolly y Erb, 1998) *solamente* trabaja con formas de copa uniformemente distribuidas y formas de árboles relativamente rígidos y bajos, *por esta razón.*

8. Palmeras y estabilidad

“En todo lo natural hay un código y cada código tiene su clave”. (principio de la alquimia).

En la madera de las dicotiledóneas, árboles, las fibras están bien pegadas entre sí, reduciendo el riesgo de que las fibras se deslicen unas sobre otras (Mattheck y Breloer, 1995). La geometría y el material se comportan muchas veces de una manera coherente, donde además uno de los componentes principales de su estabilidad es la resistencia a la compresión pura y longitudinal de las fibras externas. Esto facilita asumir que la resistencia a la fractura puede ser calculada mediante la teoría simple de la flexión de un tubo hueco.

La mera observación de secciones recién cortadas de troncos de palmeras, sugiere que las fibras del estípite no parecen estar pegadas entre ellas tan bien como las fibras de un (no monocotiledóneo) árbol.

Consiguientemente, la masa de fibras en palmeras no parece comportarse tan coherentemente como la madera de un árbol. Las fibras se pueden apartar entre sí fácilmente con las manos. Por lo tanto, es posible que el estípite sea más propenso a la delaminación (tensiones perpendiculares y de deslizamiento), de lo que es la albura de un árbol. Los experimentos con el test de tracción en palmeras en España dirigidos por el autor de esta publicación también parecen sugerir este comportamiento estructural.

La estructura fibrosa parece comportarse más como los pelos de una escoba- especialmente con paredes residuales finas- en vez de comportarse como si fuera una consistente y maciza viga de madera.

La respetable experiencia de los especialistas en palmeras señala también en la misma dirección.

Por lo tanto, es posible que la resistencia a la rotura de una palmera no sea predecible con la teoría de la flexión de una viga hueca, y que factores de seguridad del tronco no puedan ser calculados todavía.

Tampoco el espesor necesario de la pared residual, de acuerdo con esta última teoría, podría entonces calcularse.

En el momento de esta publicación, las bases para una posible solución han sido desarrolladas por el autor en cuanto al análisis de la estabilidad de palmeras.

Propuesta para el análisis de estabilidad de palmeras

Poca investigación se ha llevado a cabo en cuanto al comportamiento estructural de las palmeras. Así mismo, las únicas reglas que se pueden ofrecer hasta el momento son la intuición, la experiencia y el sentido común.

En este protocolo, el diagnóstico visual de la palmera se combina con las matemáticas para el análisis de las cargas por viento y las *frecuencias de flexión del estípite*. Con el modelo V, tanto la frecuencia de flexión del tronco de palmera (en Hz) como la carga por viento en la copa se estiman de acuerdo con el Eurocódigo 1 (AENOR, 1998). Las ecuaciones para el análisis de la carga del viento y la frecuencia de flexión se describen en la estructura del modelo V. Los resultados se combinan con un martillo de goma para detectar defectos estructurales.

Dentro de los límites del presente modelo, se podrían dar las siguientes directrices :

- Una frecuencia de flexión alta en combinación con una estructura sólida daría un nivel de riesgo bajo.
- Una frecuencia de flexión alta combinada con defectos estructurales requeriría una inspección más concreta de la situación.
- Una frecuencia media no permitiría daños estructurales.
- Finalmente, deberían llevarse a cabo medidas inmediatas para garantizar la seguridad si el estípite tiene una frecuencia baja.

Cuanto más cercana esté la frecuencia natural de la palmera a la de una racha de viento, más baja sería su estabilidad. Por ejemplo, una *Phoenix canariensis* sólida y sana que tiene una frecuencia de flexión de 13,4 Hz presenta muy poco riesgo.

Por otro lado, una *Phoenix dactylifera* más delgada puede representar un riesgo más alto debido a la combinación de la mitad de la frecuencia de flexión y una carga por viento más alta. Si esta

palmera tuviera pudrición, por ejemplo, se debería iniciar una inspección más detallada.

Los límites de esta propuesta son muchos y obvios: se requiere mucha más investigación para establecer los niveles aceptables de la frecuencia de flexión y para encontrar el factor de frecuencia correcto para troncos de palmeras.

El factor de arrastre aerodinámico tiene que ser estimado todavía, al no haberse estudiado. Finalmente, es necesaria una investigación científica *independiente* para estimar el valor de la presente propuesta.

Dentro de este método, la palmera inspeccionada puede cablearse a otras palmeras, árboles o estructuras. En este caso, la carga del viento en la copa debería ser estimada. El resultado permite un diseño más eficiente de la configuración del cableado, del a resistencia del cable, del alargamiento del cable y de la transferencia de las cargas.

Phoenix canariensis. Casa Alegre. Terrassa. Cataluña

(Análisis de la carga de acuerdo con el Eurocódigo 1, Parte 2-4 + frecuencia fundamental de flexión del estípite.)

Altura: 14,15 m

Frecuencia de flexión: 13,4 Hz

Carga estimada (F) en la copa durante rachas de viento:
3,66 kN (373, 32 kg)

Si la teoría de la flexión de una viga hueca fuera *fiable*:

Factor de seguridad a 1 m de altura: 394,8%
t requerida: 2,5 cm
t/R requerida: 0,09



9. Protocolo

La *biología* es uno de los componentes más importantes del protocolo presentado en la Guía:

El anillo de albura es lo que aporta la mayor resistencia estructural a un árbol, por ejemplo referente a la torsión y la flexión. Por eso es posible que la sección transversal sufra una pérdida considerable de resistencia, cuando se detectan síntomas que denotan daños en la albura, por ejemplo por hongos xilófagos.

Cuando la albura está dañada, también se puede ver mermada su capacidad de transporte. Lo cuál puede llevar a una pérdida de vitalidad. Esta pérdida suele producir síntomas en las estructuras superiores de la copa y en la corteza. Otros síntomas, como depresiones de crecimiento o áreas muertas de corteza, también pueden denotar daños serios estructurales en el anillo de albura.

Por eso, es posible tomar como punto de partida *el estado de la copa y la corteza*, en vez de concentrarse a priori en cuerpos fructíferos o cavidades.

Para evaluar visualmente si hubiera una pérdida importante de resistencia estructural, causada por hongos, en el cuerpo leñoso, éste método puede ser una buena orientación.

Posteriormente, y mediante teoría de la flexión, el cálculo de factores de seguridad puede dar información sobre la importancia de ésta pérdida para cada árbol en concreto (Método V y el método SIA).

Así mismo, es absolutamente necesario tener en cuenta los componentes del colapso que no se puede predecir con las matemáticas (Mattheck y Breloer, 1994).

El modelo de crecimiento de las estructuras de la parte alta de la copa y las fisuras por crecimiento en la corteza son medidas visibles para la biología en un árbol individual y son una orientación para:

- del transporte y sistema vascular y por tanto del estado biológico y estructural de la albura
- la eficacia de la compartimentación de la pudrición
- la eficacia del crecimiento de compensación
- un pronóstico a largo plazo en vez de un pronóstico momentáneo

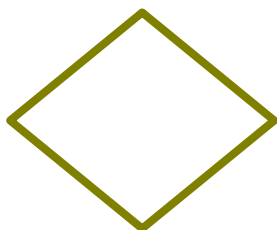
El protocolo ofrece a los especialistas en árboles un proceso cuidadosamente diseñado, que incluye los siguientes elementos:

- La carga del viento en un árbol se analiza de acuerdo con estándares internacionales de ingeniería y procedimientos matemáticos científicamente aceptados. En cuanto a la resistencia a la fractura, se calcula el espesor necesario de la pared residual y el factor de seguridad para el tronco y las ramas principales.
- Las razones por las que los árboles colapsan son muy complejas. Esta compleja combinación se divide en sus componentes teóricos. Primero, los componentes y su influencia en el árbol diagnosticado, tienen que ser comprendidas. Entre ellos, los más importantes parecen ser: la torsión, la flexión, el deslizamiento, la oscilación, la propagación de grietas y las concentraciones de tensión en el cuerpo leñoso, la fatiga de las raíces de anclaje (!), la arquitectura y rigidez de la capacidad de resistencia del sistema radical, balanceos dentro de la copa, y comportamientos reales del viento.
- El resultado de los cálculos de la carga del viento se comparan con el análisis de los componentes que sean relevantes para estabilidad. La utilidad de los cálculos teóricos se tiene que contrastar con los comportamientos *reales* del árbol.
- Las interacciones entre árbol, hongo, vitalidad y geometría arbórea tienen que ser comprendidas. En cuanto a la biología, tanto la compartimentación- la formación de barreras que retrasan el progreso de los hongos descomponedores de madera- y la compensación- posición, cantidad y calidad del crecimiento reparador, están directamente correlacionados con la vitalidad del árbol. Las estrategias empleadas por los hongos xilófagos para esquivar incluso barreras químicas tienen que ser entendidas (Schwarze et al.).
- Al final, el sendero luminoso dentro del protocolo debería ser el *sentido común*.

Figura 2: Los siguientes componentes interactúan entre sí y deberían ser diagnosticados como eslabones de una cadena cerrada:

Biología y vitalidad: capacidad y calidad de compartimentación y compensación. Los síntomas se evalúan visualmente en la copa y corteza.

Geometría: forma de la sección transversal y defectos estructurales (pudriciones delimitadas o irregulares).

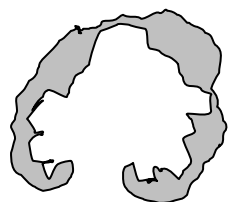
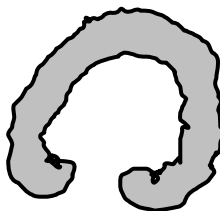


Hongos xilófagos: el anillo de albura y síntomas visibles en la corteza.

Matemáticas: el Método V (Sterken, 2004) y el método SIA (Wessolly y Erb, 1998) + las razones reales del colapso (VTA, Mattheck y Breloer, 1995).

Muchas veces, cuando la vitalidad de un árbol es lo suficientemente buena, la geometría del anillo de albura puede tener una forma bien definida y un comportamiento mecánico coherente.

Esto puede permitir evaluar su resistencia a la fractura con la combinación de un análisis de la carga del viento y la teoría de la flexión de un tubo hueco.



Por el otro lado, cuando el árbol no dispone de la vitalidad necesaria, los procesos de compartimentación y compensación no son tan eficaces referente a pudriciones. Esto puede resultar en una geometría irregular y traicionera, que puede no comportarse de acuerdo con la teoría de la flexión. En este caso, el diagnóstico visual será aún más importante para emplear instrumentos y matemáticas con la eficacia necesaria.

Ejemplos

- *Eucalyptus camaldulensis*. Parc Sant Jordi. Terrassa. Cataluña

Vitalidad: excelente

Altura: 17,1 m

Frecuencia de flexión: 10,1 Hz

Factor de seguridad para fracturas por flexión: 275,7 %

Espesor requerido de la pared residual: 4,39 cm

No hay síntomas que indiquen una capacidad de transporte disminuida. La albura está en muy buen estado y la gran herida está bien limitada por un callo vigoroso.

Posiblemente, y debido a la buena calidad de la compartimentación y de la compensación, el comportamiento mecánico de la pared residual es muy coherente. La resistencia a la fractura del árbol puede ser diagnosticada fiablemente con la teoría de la elasticidad y diagnóstico visual.

La excelente vitalidad (biología) puede afrontar la cavidad confinada y delimitada (estabilidad) durante varios años más.

- *Eucalyptus globulus*. Parc Sant Jordi, Terrassa, Cataluña

Vitalidad: muy baja, aunque el crecimiento de emergencia, estimulado por un terciado, ofrece una visión traicionera de la vitalidad del árbol.

Altura: 14,7 m

Frecuencia de flexión: 16,3 Hz

Factor de seguridad para fracturas por flexión: 1224,03 %

Espesor requerido de la pared residual: 1,09 cm

Teóricamente, este árbol necesitaría solo 1,09 cm de pared residual para resistir huracanes de 117 km/h. La frecuencia de flexión sugiere que la influencia de las fuerzas dinámicas es muy baja.

Por tanto, las matemáticas predicen que este árbol es extremadamente seguro.

Sin embargo, en este árbol, estos resultados no pueden ser admitido ciegamente como el "resultado feliz". Varios síntomas sugieren una capacidad de transporte disminuida. En consecuencia, la albura podría no estar en buen estado, lo que llevaría a una importante

pérdida de resistencia estructural. La gran cavidad no está claramente limitada por madera de herida vigorosa.

Consiguientemente, y debido a la irregular y no claramente confinada pudrición, el tronco hueco podría no comportarse como una viga ideal y coherente. El plegamiento lateral de la finísima concha abierta (el pandeo de cavidades abiertas) podría ocurrir en vez de comportarse según la teoría de la flexión de un tubo hueco. Y probablemente también con velocidades del viento mucho más bajas de las predichas. El experimento con un test de tracción, que fue realizado en este árbol, también sugería esto último.

Así en este caso, la valoración visual, un profundo conocimiento de las posibilidades y limitaciones de las matemáticas, un conocimiento profundo de las causas mecánicas del colapso y una buena dosis de sentido común, sería vital para conseguir el diagnóstico mas consistente.

- *Estática versus Dinámica*

En el modelo V, la frecuencia natural de flexión del tronco se compara a su factor de seguridad (una carga de viento estática), permitiendo una orientación mejor de la estabilidad del árbol.

Se ofrecen los siguientes ejemplos:

<i>Eucalyptus camaldulensis</i> Parc Sant Jordi	<i>Cupressus sempervirens</i> Parc Sant Jordi
Seguridad estática: 275,7%	Seguridad estática: 217,4%
t requerida: 4.39 cm	t requerida: 3,47 cm
Frecuencia de flexión 10,1 Hz	Frecuencia de flexión 5,8 Hz

=el factor de seguridad estático y el espesor teórico de la pared residual pueden ser una buena orientación

= el factor de seguridad estático y el espesor teórico de la pared residual no se pueden confiar ciegamente, dada la elevada influencia de oscilaciones naturales

10. Intervenciones destinadas a la conservación

“...while remembering that the object is to retain the tree for as long as possible with the minimum risk.” (Mattheck & Breloer, 1995)

Las posibilidades para conservar un árbol tanto tiempo como sea posible con un riesgo aceptable son virtualmente ilimitadas.

Entre ellas, el arte bellísimo del cableado de árboles, es una de las maneras más interesantes para disminuir los riesgos de daños por árboles. No sólo la teoría- la contemplación de las leyes de gravedad, ángulos, energías mecánicas y transferencia de cargas- sino especialmente la práctica es muy gratificante.

El protocolo del autor emplea varios métodos para el diseño de configuraciones de cableado de copa.

En primer lugar, se determina el objetivo del cableado, ya que, por ejemplo, *¡la prevención de una fractura* puede necesitar un cableado *diferente* al empleado para *evitar la caída* de una rama que se fractura!

En el primer caso, la carga estática del viento en la copa o ramas principales y en los cables puede ser estimada.

Además, se debería evaluar igualmente la estabilidad global del árbol. Eso, porque no tiene sentido cablear un árbol que con la siguiente tormenta se vuelque entero...

Se debe resolver la cuestión de la estabilidad, a todos los niveles, antes de instalar un cableado. Sin un diagnóstico previo, todas las intervenciones en un árbol son solamente medidas de bajar la tasa del paro...

La resistencia del cableado no debería superar a la de la parte del árbol de apoyo. Por lo tanto, la carga crítica que causaría la fractura de la rama de apoyo, a la altura de la instalación, debería ser estimada.

La resistencia máxima (S_{max}) que debería tener el cable, con el fin de no romper la rama de apoyo cuando la rama defectuosa se rompiera, puede ser representada mediante la siguiente ecuación, que se deriva de la fórmula empleada en el modelo V:

$$S_{max} = [(w * s)/100]/h$$

Donde:

S_{max} = la resistencia máxima del cable en kN

w = el módulo resistente de la base de la rama

s = la resistencia a la compresión de la madera viva en kN/cm²

h = altura de la instalación en metros

Sin embargo, la ecuación de arriba no incorpora la influencia de las dinámicas, las cuales se deberían considerar seriamente.

Igualmente se debería considerar la influencia de los ángulos de instalación. El ángulo de instalación es un factor crítico en cuanto a la transferencia de cargas. Con estos ángulos, la distancia de caída de una rama fracturada puede hacerse lo más corta posible.

Es muy importante comprender que es *muy improbable detener una rama que se cae con un cable*, incluso uno de acero, debido a la elevada energía y carga que crecen enormemente con la caída.

Generalmente, tanto la parte del árbol de soporte o el cable, no pueden resistir el fuerte impacto cuando la rama se detiene después de su caída.

La ecuación siguiente se puede ofrecer como una evidencia (basado en Wessolly & Erb, 1998):

$$F = (m * g * h) / e * 2$$

Donde:

F = la carga en el cable en el límite de elasticidad del mismo

m = la masa de la rama, que es el producto del volumen multiplicado por la densidad específica de la madera

g = aceleración debida a la gravedad y que se expresa como 9,81 m/s²

h = altura de caída de la rama y puede llegar a ser la longitud del cable

e = el límite de deformación o elongación del material del cual esta compuesto el cable, expresándose en %

Es importante subrayar que el cable es sólo una transferencia de cargas a otras partes del árbol, por ejemplo a la rama de soporte.

Hoy en día, el uso de materiales sintéticos flexibles se recomiendan, ya que pueden ayudar a estimular la formación de madera de compensación en el área defectuosa. Es posible que de esta

manera, y en árboles vigorosos, una rama correctamente cableada pueda recobrar su estabilidad estructural después de 15-20 años, haciendo innecesario un cableado después de la compensación.

Los daños por perforaciones se pueden evitar con sistemas de cableado sintéticos que incorporan eslingas que abrazan la rama en lugar de perforarla.

También se puede disminuir considerablemente el riesgo del llamado "efecto kárate" mediante materiales flexibles que absorben los impactos repentinos. Por este efecto se entiende la fractura de las ramas a la altura del cableado, debido a una parada repentina (causada por materiales rígidos como el acero) del balanceo natural de las partes del árbol.

Se debería estudiar también la arquitectura del árbol para aventajarse de sus múltiples dimensiones. Es mejor unir las ramas principales en caja, para prevenir torsiones y balanceos, en vez de montar un cableado cruzado tipo estrella.

La altura de la instalación dependerá de cada situación y una fórmula única no se puede dar realmente. Se requiere entonces un profundo entrenamiento de los especialistas, donde la información recibida debería ser contrastada con otras fuentes.

El cableado de árboles monumentales y palmeras a otras estructuras o árboles ha sido demostrado como satisfactorio. Allí, el análisis de la carga del viento en la copa es indudablemente una necesidad para evaluar las cargas en el cableado y en la estructura de apoyo.

Con el fin de estimular la vitalidad del árbol, y por tanto sus capacidades de compartimentación y compensación, el acolchado y el riego en profundidad son aún imbatibles, y esto último especialmente en periodos de sequía. También, en las regiones donde ocurren las fracturas repentinas en verde, el suministro adicional de agua podría disminuir el riesgo de este tipo de fractura. La capacidad de reacción del árbol puede ser aumentada administrando potasio, fósforo y magnesio durante el periodo de reposo. Por otro lado, el nitrógeno estimula la extensión de los hongos xilófagos.

Posterior al diagnóstico y tratamiento (en este orden) del árbol o de la palmera, se recomienda inspeccionarlo visualmente varias veces al año. Ramas rotas, síntomas de defectos estructurales o cuerpos

fructíferos pueden aparecer más tarde dependiendo a veces de la estación. Síntomas que denoten una pérdida de estabilidad del sistema radicular pueden aparecer después de eventos de lluvia o viento. Se debe considerar absolutamente la morfo-fisiología del árbol a la hora de podar un árbol, por ejemplo para una reducción de copa para disminuir la “vela”. Y los trabajos de Alex Shigo aún deben considerarse como la base de todas nuestras acciones en los árboles.

El autor del presente estudio aconseja al lector consultar bibliografía especializada, para contrastar información y aumentar su equipaje de conocimientos que puedan salvar vidas humanas y arbóreas.

11. Conclusión

En el manuscrito, el autor se limita a describir las bases del puzzle. Su idea personal del diagnóstico de estabilidad de arbolado, para él representa lo que sería “la piedra filosofal” para el alquimista. Una idea que puede descifrar la cuestión de la estabilidad. No se ha hecho ningún intento por escribir algo que ya había sido escrito mejor por anteriores autores.

El hecho es que el lenguaje corporal de un árbol, su expectativa de vida y valor monetario muchas veces sólo requieren un diagnóstico visual experto. Y muchos viejos árboles caben en este protocolo.

Si el ejemplar tuviera un valor monetario extraordinario y si hubieran cuestiones sin resolver, cara a su estabilidad, se podría escoger entre la amplia oferta actual de métodos instrumentales exquisitos.

Y de acuerdo con Mattheck & Breloer (1995), no se puede fiar solamente de la tecnología – ya que ésta sólo puede medir lo que se ha observado.

12. Notas finales

Gordon (1999) describe varios desastres históricos relacionados con barcos, puentes y estructuras, por los cuales perecieron muchas vidas humanas. Allí, la causa real fue la arrogancia de los ingenieros responsables y la aplicación, a secas, de la teoría de la elasticidad. Así que no nos podemos fiar solamente de las matemáticas.

Un diagnóstico que respeta tanto árboles como vidas humanas debería integrar igualmente biología y micología especializadas, experiencia, intuición y, sobre todo, sentido común.

Y algo en qué pensar:

Los árboles reales no suelen encajar perfectamente en expresiones matemáticas. Existen diferencias en el entorno y las cargas en diferentes árboles y palmeras, bajo distintas condiciones extendidas en el tiempo.

Un profundo e intuitivo conocimiento de la perversidad inherente de los materiales, las cargas y las geometrías - las matemáticas y los árboles - es una de las cualidades más preciosas que un arboricultor puede tener.



Agradecimientos

El autor quisiera agradecer especialmente a su padre Jan Sterken, su familia y a María Dolores Infante Mera, Loli, por su apoyo incansable en todo momento.

A Juan Belvis y a Jacobo Llorens, por la traducción de la versión inglesa al castellano y a Isabel González por su continuo apoyo durante estos años. A Wim Peeters por la revisión del manuscrito inglés.

El autor desea agradecer a Prof. Dr. Francis Schwarze por la revisión del manuscrito "Prognosis of the development of decay and the fracture-safety of hollow trees", del cuál se ha incluido un resumen en este libro.

Se agradece a Dr. Ing. L. Wessolly por proveer gratuitamente la instrumentación necesaria para los experimentos de Terrassa y Mataró. A la vez, el autor quisiera exponer sus agradecimientos a Josep Manel Fernández por su paciencia y opinión experta durante aquellos experimentos y a Dr. Petr Horacek por abrir los ojos del autor a los comportamientos mecánicos reales de los árboles.

Se lamenta la actitud desalentadora de varios mercenarios de la arboricultura que, por un puñadito de dinero o de fama pasajera, hacen lo posible para oprimir el avance del conocimiento. Venceréis, pero no convenceréis.

Se agradece a los ayuntamientos de Terrassa y Mataró, por proveer las palmeras y los árboles necesarios, a la vez que los amables asistentes, para los experimentos realizados.

Finalmente, el autor quisiera agradecer a sus compañeros en España, Euskadi, Catalunya, Alemania y Bélgica.

Un gran abrazo para todos,

Peter Sterken

Correspondencia:

Peter Sterken. Scharebrugstraat 132, Blankenberge (código postal: 8370), Bélgica.

Página web: www.sterken.be

Literatura consultada

AENOR 1998. Eurocódigo 1: Bases de proyecto y acciones en estructuras. Parte 2-4. Acciones en estructuras. Acciones del viento. Asociación Española de Normalización y Certificación. Madrid. España.

Archer, R.R. 1996. Growth Stresses and Strains in Trees, Berlin, Germany.

Baker, C.J. 1999. Modeling the failure of trees in high winds. In A. Larsen, G.L. Larose, & E.M. Livesey, editors, Wind Engineering into the 21st Century (Proceedings). Copenhagen, Denmark. June 1999. A.A. Balkema Publishers, Rotterdam, The Netherlands.

Berneiser, A. & G. König. 1996. Full Scale Measurements of Wind-velocity at the New Commerzbank-building in Frankfurt-Main. Institut für Massivbau und Baustofftechnologie i. Gr., University of Leipzig, Germany.

Coder, K.D. 2000. Tree Biomechanics Publication Series. University of Georgia Warnell School of Forest Resources, Athens, GA, USA. FOR00-13 through FOR00-32.

Coutts, M.P. & J. Grace (editors). 1995. Wind and Trees. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Detter, A. 2002. Topic: Is it possible to break a tree in a pulling-test? Comment for AEA Journal. Brudi & Partner TreeConsult. Gauting, Germany.

Ezquerro, F.J. & L.A. Gil. 2001. Wood anatomy and stress distribution in the stem of Pinus pinaster. Investigación Agraria: Serie Sistemas y Recursos Forestales 10(1):165-177.

England, L., C.J. Baker, & S.E. T. Saunderson. 2000. A dynamic analysis of windthrow of trees. Forestry 73(3):225-237.

Gaffery, D. 2000. Stress distribution in a stem of a 64-year old Douglas-fir simulated with a 3D-tree and load model. Pp.425-431 in H-C. Spatz & T. Speck (editors). Plant Biomechanics 2000 (proceedings). Freiburg-Badenweiler, Germany. September, 2000. GeorgThieme-Verlag, Stuttgart, Germany.

Gordon, J.E. 1999. Estructuras, o por qué las cosas no se caen. Celeste Ediciones, Madrid, Spain.

Horacek, P. 1999. Mechanical properties of wood of Norway maple (Acer platanoides) and white eastern pine (Pinus strobus). Paper of the

Department of Wood Science, Faculty of Forestry and Wood Technology, Mendel University of Agriculture and Forestry Brno, Czech Republic.

Horacek, P. 2003. Four Basic Arguments Against Mattheck's Axiom of Uniform Stress. Department of Wood Science, Faculty of Forestry and Wood Technology, Mendel University of Agriculture and Forestry Brno, Czech Republic.

James, K. 2003. Dynamic loading of trees. *Journal of Arboriculture* 29 (3): 165-171.

Lavers, G.M. 1983. *The Strength Properties of Timber* (3rd edition). HMSO, London.

Mattheck, C. & K. Bethge. 1998. The structural optimization of trees. *Naturwissenschaften* 85:1-10.

Mattheck, C. & K. Bethge. 2000. Simple mathematical approaches to tree biomechanics. *Arboricultural Journal* 24(4):307-326.

Mattheck, C. & H. Breloer. 1995. *The Body Language Of Trees: A handbook for failure analysis*. Department of the Environment. Research for Amenity Trees #4. HMSO, London.

Mattheck C. & H. Kubler. 1995. *Wood - The Internal Optimization of Trees*. Springer Verlag, New York.

Mayhead, G.J. Some drag coefficients for British forest trees derived from wind tunnel studies. *Agricultural Meteorology* 12:123-130.1973

Niklas, K.J. 2000. Computing factors of safety against wind-induced tree stem damage. *Journal of Experimental Botany* 51(345):797-806.

Niklas, K.J. 1999. Changes in the factor of safety within the superstructure of a dicot tree. *American Journal of Botany* 86(5):688-696.

Niklas, K.J. & H-C. Spatz. 2000. Wind-induced stresses in cherry trees: Evidence against the hypothesis of constant stress levels. *Trees: Structure and Function* 14(4):230-237.

Peltola, H. S. Kellomäki, A. Hassinen, & M. Granander. 2000. Mechanical stability of Scots pine, Norway spruce, and birch: An analysis of tree pulling experiments in Finland. *Forest Ecology and Management* 135(1/3):143-153

Peltola, H. Gardiner, B. & S. Kellomäki. 2000. Comparison of Two Models for Predicting the Critical Windspeeds Required to Damage Coniferous Trees. *Ecological Modelling* 129 (1-29). Elsevier Science B.V.

Reinartz, H. & M. Schlag. 1997. *Integrierte Baumkontrolle (IBA)*. Stadt und Grun 10/97. Patzer Verlag, Germany.

Roloff, A. 2001. *Baumkronen, Verständnis und Praktische Bedeutung eines Komplexen Naturphänomens*. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart, Germany.

Sagrillo, M. 1994. *Site Analysis for Wind Generators. Part 1: Average Windspeed*. Home Power N° 40.

Schwarze, F.W.M.R., 2001. Development and prognosis of decay in the sapwood of living trees. *Arboricultural Journal* 25: 321-337

Schwarze, F.W.M.R. & S. Baum 2000. Mechanisms of reaction zone penetration by decay fungi in wood of beach. *New Phytologist* 146: 129-140

Schwarze, F.W.M.R. & S. Baum 2002. Large leaved lime (*Tilia platyphyllos*) has a low ability to compartmentalize decay fungi via reaction zone formation. *New Phytologist* 154: 481-490

Schwarze, F. W.M.R., Engels J. & C. Mattheck 2004. *Fungal Strategies of Wood Decay in Trees*. 2nd printing. Springer verlag, New York.

Schwarze, F.W.M.R. & D. Ferner 2003. *Ganoderma* on trees – differentiation of species and studies of invasiveness. *Arboricultural Journal* 27: 59-77

Schwarze, F.W.M.R., D. Ferner, C. Rabe & S. Fink 2004. Detection of decay in trees with stress waves and interpretation of acoustic tomograms. *Arboricultural Journal* 28: 3-19

Shigo, A.L. 1986. *A New Tree Biology Dictionary: Terms, topics, and treatments for trees and their problems and proper care*. Shigo and Trees Associates.

Sinn, G. & L. Wessolly. 1989. A contribution to the proper assessment of the strength and stability of trees. *Arboriculture Journal* 13(1):45-65.

Smiley, E.T. & K.D. Coder (editors). 2002. *Tree Structure and Mechanics Conference Proceedings: How Trees Stand Up and Fall Down*. Savannah, GA, USA, October, 2001. International Society of Arboriculture, Champaign, IL, USA.

Sparling, B.F. 1997. 4.6 Wind loads, Properties of Wind. Structural Engineering Systems Design.

Spatz, H-C & F. Bruechert. 2000. Basic biomechanics of self-supporting plants: Wind loads and gravitational loads on a Norway spruce tree. Forest Ecology and Management 135(1/3):33-44.

Speck, T., H.C. Spatz, & D. Vogellehner. 1990. Contributions to the biomechanics of plants: I. Stabilities of plant stems with different cross-sections against weight and wind forces. Botanica Acta 103:111-122.

Sterken, P. 2004. Método SIA para Pinus pinea. La Cultura del Árbol 37: 13-17.

Sterken, P. & G. Iguñiz. 2004. Un test de tracción simplificado para la valoración del riesgo de vuelco. La Cultura del Árbol 40: 23-25.

Sterken, P. 2005. "Una Hipótesis sobre el Diagnóstico de Estabilidad de Arbolado" y "Protocolo para el análisis de estabilidad de arbolado mediterráneo". International Society of Arboriculture, www.isa-hispana.com

Sterken, P & K. Coder. 2005. "Protocol for Assessing Tree-Stability Part 1: Wind Load and Tree Hold". Arborist News: International Society of Arboriculture. ISA.. Vol. 14, Nº 2.

Sterken, P & K. Coder. 2005. "Protocol for Assessing Tree-Stability Part 2: Uprooting, Bending and Decay". Arborist News: International Society of Arboriculture. ISA. Vol. 14, Nº 3.

Steve Vai 1990. *"I'm fearless in my heart. They will always see that in my eyes , I am the Passion; I am the Warfare. I will never stop...Always constant, accurate, and intense."* Passion and Warfare, Relativity Records, Inc.

Stokes, A. M. Drexhage, & D. Guitard. 2000. A method for predicting the possible site of failure in trees during mechanical loading. In A. Stokes (editor) The Supporting Roots of Trees and Woody Plants. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands. Chapter 27.

USDA Forest Service. 1999. Wood handbook – Wood as an engineering material. Forest Products Laboratory. General Technical Report FPL-GTR-113. Madison, WI, USA

Vogel, S. 1996. Blowing in the wind: Storm-resisting features of the design of trees. Journal of Arboriculture 22(2):92-98.

Watson, A. 2000. Wind-induced forces in the near-surface lateral roots of radiate pine. Forest Ecology and Management 135(1/3):133-142.

Wessolly, L. & M. Erb. 1998. Handbuch der Baumstatik und Baumkontrolle. Patzer-Verlag, Berlin, Germany.

Windpower. 2003. Asociación danesa de la industria eólica. <http://www.windpower.org/es/stat/unitsw.htm>

Wood, C.J. 1995. Understanding wind forces on trees. In M.P. Coutts & J. Grace (editors) Wind and Trees. Cambridge University Press, Cambridge, UK. Pp.133-164.

Royal Belgian Library number: D2005PeterSterkenauteur