

Análisis y estado del arte de la técnica de clasificación mecánica por máquina de la madera aserrada estructural (Revisión)

J.I. Fernández-Golfín Seco *, M.R. Díez Barra, E. Hermoso Prieto

Laboratorio de Estructuras. CIFOR-INIA. Apartado 8111. 28080 Madrid
golfin@inia.es

RESUMEN

En los últimos cuarenta años la técnica de clasificación mecánica automatizada de la madera aserrada ha sufrido un notable desarrollo en todo el mundo, especialmente en los países anglosajones y nórdicos.

En este artículo se analizan los orígenes y la evolución histórica de la técnica de clasificación automatizada de la madera aserrada de uso estructural, comparando el funcionamiento de los distintos equipos existentes actualmente en el mercado.

También se analizan las variables del sistema y su incidencia sobre el proceso clasificatorio.

Se discute sobre los modelos matemáticos que ligan las variables clasificadoras con las predictoras medidas por cada máquina, analizando los factores que afectan al método y la mejor forma de ser tomados en consideración. También se dan indicaciones sobre la mejor forma de deducir los reglajes de cada tipo de máquina, de acuerdo con el método normalizado aprobado por el Comité Europeo de Normalización (CEN).

Se concluye sobre la aplicabilidad del método, su estado actual de desarrollo, precisión, fiabilidad y eficiencia así como sobre la investigación previa requerida para su puesta en marcha con nuevas clases de maderas y la forma de integrar las variables del método en el proceso clasificatorio.

PALABRAS CLAVE: Clasificación resistente
Clasificación resistente por máquina

INTRODUCCIÓN

La madera es un material que presenta una acusada variabilidad en sus propiedades mecánicas. Coeficientes de variación del 40 % no son infrecuentes, al menos en las coníferas españolas.

Esta elevada variabilidad tiene sus fundamentos en factores de tipo genético, de tipo selvícola e, incluso, de tipo tecnológico (Díez y Fernández-Golfín, 1998).

* Autor para correspondencia
Recibido: 6-4-00
Aceptado para su publicación: 12-1-01

La calidad mecánica de una madera, de acuerdo con la norma europea EN 338 de clases resistentes, es función de sus valores de Módulo de Rotura a la flexión (MOR), de Módulo de Elasticidad a flexión (MOE) y de la densidad. Estas tres son las variables clasificadoras del material que permiten su asignación a las clases resistentes descritas en la norma anteriormente citada.

Dado que el ensayo mecánico, necesario para determinar de forma directa y exacta el MOR, imposibilita el posterior uso de la madera, se han considerado un sinnúmero de indicadores externos e indirectos de la calidad del material.

Tomando como referencia el aspecto exterior de la madera, la antigua norma europea EN 518 y la actual EN TC 124.1-1 (en fase de votación formal) establecen un completo listado de variables que el clasificador debe considerar a la hora de decidir sobre la calidad mecánica del material.

La clasificación visual de la madera en función de su aspecto exterior ha sido, y es, el método más usado para decidir sobre la calidad mecánica de la madera. Una de las primeras normas de clasificación visual de la madera estructural data de 1923 y fue desarrollada y publicada por el Forest Products Laboratory de Madison (EE.UU.). Hacia 1950 tuvieron su desarrollo normas similares en Europa, apareciendo las primeras versiones de las normas alemana (DIN), inglesa (BSI), francesa (AFNOR), etc.

Un patrón común a todas las normas de clasificación visual es su elevado conservadurismo, que las lleva a eficiencias clasificadoras (porcentaje de acierto) que difícilmente superan el 50 %. En España y para pino laricio la efectividad de la norma española UNE 56.544 es tan sólo del 53 % (Fernández-Golfín *et al.*, 2000). Esto quiere decir que las normas de clasificación visual subestiman fuertemente, en un 50 %, la calidad mecánica del material y, por tanto, el beneficio económico del productor.

Buscando un mayor grado de eficacia y objetividad en la predicción de la calidad mecánica del material, las investigaciones sobre nuevos métodos clasificatorios se orientó hacia el empleo de ensayos no destructivos (NDT).

Dentro de este grupo de ensayos no destructivos se incluye un amplio abanico de técnicas de ensayo y clasificación del material, que ha dado lugar a los modernos equipos de clasificación automatizada de la madera cuyo desarrollo y análisis es el objeto último de este trabajo.

ORIGEN Y DESARROLLO DE LA TÉCNICA

La clasificación mecánica por máquina –conocida con el término anglosajón «Machine Stress Grading o Rating (MSR)»– habitualmente se basa en la determinación de la elasticidad o rigidez de la madera y en la posterior predicción de su resistencia mediante el uso de relaciones conocidas entre ambas variables.

La posibilidad de usar diversos métodos y técnicas para determinar el módulo de elasticidad o la rigidez de la madera es el origen de las diversas técnicas de clasificación automática que existen en la actualidad.

La utilización de la elasticidad o de la rigidez de la madera como predictor de la resistencia se basa en su estrecha relación con el MOR y en su facilidad de medición a ritmo elevado.

Otro hecho no desdeñable en el desarrollo de la técnica es la notable mayor efectividad de la clasificación por máquina respecto de la visual. Así Müller (1968) estimó en los orígenes de la técnica que ésta mejoraba la eficacia en un 20 %, respecto de una norma visual. Más modernamente, trabajando sobre pino laricio español y haciendo uso de máquinas de tipo mecánico, Fernández-Golfín *et al.* (2000) incrementaron esta eficacia llegando al 84,6 %, es decir, un 31,6 % más que haciendo uso de la norma de clasificación visual española.

El aspecto más interesante de esta técnica clasificatoria radica, no obstante, en la práctica eliminación de los rechazos de clasificación. Así Fernández-Golfín *et al.* (2000) sobre pino laricio español y clasificando para la agrupación de clases C35/C18/R, consiguieron un 0,4 % de rechazos, mientras que Helgerud (1999) sobre pino silvestre y usando la agrupación C35/C24/C18/R consiguió establecerlo en un 3 %. Con efectos puramente informativos baste aquí decir que en cualquier norma de clasificación visual y haciendo uso de madera de pino, el nivel de rechazos es muy difícil que descienda por debajo del 25 % de la madera clasificada.

De acuerdo con Fewell (1982) los orígenes de esta técnica clasificatoria se remontan a los trabajos de Bauschinger y Unwin, quienes en 1883 el primero y en 1888 el segundo pusieron de manifiesto la existencia de relaciones entre la resistencia y la rigidez de la madera. La bibliografía recoge también los trabajos de Cline y Heim (1912), así como los de Chaplin y Latham (1935) quienes confirmaron las primeras evidencias de Bauschinger y Unwin. Langlands (1938) fue el primero en establecer relaciones de tipo lineal entre los Módulos de Rotura (MOR) y de Elasticidad (MOE) a flexión, usando para ello probetas libres de defectos de pino radiata.

Con independencia de la fecha de sus orígenes, fue en la década de los sesenta (Curry, 1966) cuando se empezó a aplicar estos modelos de regresión a madera de tamaño estructural, incorporando de este modo en ellos la incidencia de defectos de tamaño y características reales. El primer trabajo en este sentido recogido por la bibliografía se debe a Hoyle (1961), quien obtuvo regresiones de tipo lineal para el alerce, abeto Douglas, abeto rojo y hemlock. Relaciones significativas (R^2 del 49 % al 64 %) entre los Módulos de Rotura y de Elasticidad a flexión en madera estructural también fueron establecidas por Senft, Suddart y Angleton en 1962.

Este tipo de relaciones también ha sido establecido entre otro tipo de propiedades y así Hofstrand y Howe (1963) obtuvieron relaciones de tipo lineal entre el Módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión (R^2 del 40 % al 81 %) o a la tracción (R^2 del 25 % al 64 %). Estudios posteriores debidos a Curry y Fewell (1977) confirmaron la existencia de tales relaciones entre la resistencia a la tracción paralela y el módulo de elasticidad, si bien empleando ecuaciones del tipo $Y = a * X^b$, con coeficientes de determinación en el entorno del 60-64 %.

Con respecto a la posibilidad de emplear relaciones Resistencia-Rigidez más complejas y supuestamente más precisas, Müller (1968) estableció que no es rentable el empleo de una regresión múltiple entre la Resistencia, por un lado, y la Rigidez y la densidad por otro, ya que la ganancia en el coeficiente de determinación (R^2) es muy reducida y la complejidad operativa que se introduce en el momento de la clasificación es muy elevada. Esta conclusión justifica por qué habitualmente no se emplea a la densidad como variable predictora.

A partir del establecimiento de estas relaciones es cuando en Norteamérica y Gran Bretaña empiezan a desarrollarse las bases tecnológicas de los clasificadores automáticos

de madera estructural, tomando como principio operativo la evaluación no destructiva de la rigidez de la madera (EI) y la posterior predicción de la resistencia, empleando para ello las relaciones de tipo estadístico previamente establecidas en laboratorio entre ambas variables.

Los primeros trabajos industriales se deben a Hoyle (1961) en América, quien diseñó en los laboratorios de la Potlach Forest Inc. (Lewinston, Idaho, EE.UU.) la que puede ser considerada como la primera máquina de clasificación mecánica de madera estructural (conocida como Endo method), analizando el efecto de variables tales como el contenido de humedad, la temperatura, la sección, la velocidad de paso o la posición de la madera (de cara o de canto).

En Gran Bretaña los trabajos fueron casi coetáneos ya que, en 1962, Sunley y Curry describieron los primeros trabajos y equipos, siendo efectuada una primera y concienzuda revisión del funcionamiento de estas máquinas pioneras por Sunley y Hudson en 1964. En este trabajo los autores avanzaron la importante conclusión de que este procedimiento sólo es aplicable cuando las regresiones resistencia-rigidez, base de la técnica, han sido obtenidas con coeficientes de determinación superiores al 36 %. Comprobaron la aplicabilidad del método con madera estructural de 2×4 y 2×7 pulgadas ($50,8 \times 101,6$ y $50,8 \times 177,8$ mm) de Pino silvestre y abeto rojo, estableciendo una clara advertencia sobre el peligro de aplicar directamente la técnica sobre especies y dimensiones distintas a las ensayadas.

Vemos, pues, que en los años sesenta tiene lugar la expansión industrial de la técnica y así Curry cita en 1966 que aunque ya en 1962 el Forest Products Laboratory (Reino Unido) diseñó una primera y muy rudimentaria máquina, las primeras máquinas de tipo industrial se desarrollaron inicialmente en Estados Unidos a comienzos de los sesenta (Endo-method en 1961 y Stress-O-Matic y CLT en 1963) y posteriormente, en 1964 (Anton y Bryant, 1973) en Australia (Microstress). La expansión de la técnica es vertiginosa a partir de este momento, así Booth en 1964 cita su introducción en Australia y Müller en 1965 lo hace en Sudáfrica. Una completa y exhaustiva revisión de los comienzos de esta técnica en Norteamérica, Europa y Australia, puede ser leída en Müller (1968).

Este autor (Müller, 1968) comparó los seis tipos de máquina existentes hasta ese momento [Prototipo de FPRL en el Reino Unido, Vibration-Stress Grading Machine en Canadá, Stress-O-Matic Machine en EE.UU., Continuous Lumber Tester (CLT) en EE.UU., Microstress Grading Machine y los prototipos del CSIRO en Australia], deduciendo la simplicidad y superioridad del modelo Microstress.

El modelo conocido inicialmente como Microstress, desarrollado en Australia, fue la base del equipo más desarrollado y vendido industrialmente en todo el mundo, conocido como Computermatic (que en la actualidad se construye en Gran Bretaña). Otros equipos fueron desarrollados con posterioridad (Galligan, Snodgrass y Crow, 1977; Fewell, 1982 y 1984; Sandoz, 1989 y 1993; Boström, 1998, Johanson *et al.*, 1998) a la revisión de Müller, tales como los conocidos como TRU (Sudáfrica), E-Computer (EE.UU.), Rauté-Timgrader (Finlandia), Dynagrade y Ersson (Suecia), Stress-Wave MOE Computer (Canadá) y Sylvatest (Suiza), basándose los dos últimos en la medición del MOE mediante ultrasonidos.

En la actualidad el mercado está dominado por ciertas máquinas de tipo mecánico, la ya citada Computermatic y la conocida como Cook-Bolinder, que tiene su origen en el modelo diseñado en 1979 por el Princess Risborough Laboratory de Gran Bretaña (Fewell, 1982).

Un sistema portátil de clasificación de la madera, de características y prestaciones muy alejadas a los equipos anteriormente citados, ha sido descrito por Percival (1981).

De todo lo anterior se deduce que a comienzos de los años ochenta, al menos en el mercado europeo, coexistían diversos equipos y sistemas de clasificación automática, junto con distintas normas de clasificación visual de la madera estructural (DIN, AFNOR, BSI, UNE, etc.), lo que traía consigo un notable confusionismo en el mercado europeo de la madera estructural.

La normalización europea, muy intensa durante la segunda mitad de los años ochenta y especialmente en los noventa, ha permitido salvar esta situación tan negativa para el libre comercio de los productos madereros en el seno de Europa, adoptando el sistema de clases resistentes, definido en la norma EN 338. Esta norma establece los valores mínimos que, para cada clase resistente, han de tener cada una de las propiedades mecánicas consideradas como importantes para el uso constructivo de la madera, así como los criterios para que un determinado lote de madera pueda ser asignado a una clase de resistencia concreta.

Gracias a la existencia de esta norma ha podido desarrollarse otra norma, la EN 1912, en la que se establecen intercomparaciones entre clases de calidad (o grados) –adoptados en cada una de las normas y métodos de clasificación mecánica–, especies y clases resistentes. De esta forma un prescriptor de madera podría exigir en su proyecto una determinada clase de resistencia (por ejemplo C30) y el constructor podría emplear un elenco de maderas clasificadas con distintas normas (y por tanto procedentes de distintos países) con el denominador común de poseer todas ellas la misma resistencia.

La utilidad de las máquinas de clasificación mecánica de la madera se ha visto fuertemente incrementada con la existencia de esta norma EN 338 de clases resistentes. La razón fundamental de este incremento de utilidad se debe a que estas máquinas son capaces de clasificar, directamente y a la vez, la madera en una o varias clases resistentes. Ésta es la causa por la cual en los años noventa se ha visto crecer el interés industrial y científico por esta técnica, procediéndose a revisar unos fundamentos y equipos que apenas habían evolucionado desde sus comienzos, en los años sesenta.

En la actualidad en Europa existen cinco tipos de máquinas, que pueden ser agrupadas en dos grandes familias:

– **Máquinas de tipo mecánico (también conocidas como «máquinas de flexión»):**

Se basan en la evaluación de la rigidez de la madera por métodos mecánicos. A su vez dentro de esta denominación general existen dos tipos distintos de máquinas pues unas se basan en la aplicación de una carga conocida y en la medición de la deformación resultante, o/y otras en todo lo contrario. En ambos casos la máquina mide la rigidez de la pieza.

Dentro del primer tipo (aplicación de carga y medición de la flecha resultante) la más conocida comercialmente es la Computermatic, que por otra parte es la que ha sido más ampliamente comercializada en Europa y la que más años lleva en funcionamiento.

En el segundo tipo (medida de fuerza necesaria para producir una deformación dada) la más conocida es la Cook-Bolinder, actualmente comercializada como SG-AF por la empresa Tecmach (Reino Unido), si bien existe otra segunda máquina, menos conocida, denominada Timgrader (Finlandia).

Ambos tipos de máquina (Computermatic y Cook-Bolinder) llegan a clasificar espesores de 76 mm y anchuras de 300 mm (Glos y Schulz, 1980; Fewell, 1984).

De los tres tipos de máquinas mecánicas que operan en Europa, las conocidas como Computermatic y Timgrader son las que dan una mayor producción (Fewell, 1984) y la

Cook-Bolinder la que aporta más precisión (Böstrom, 1994), a la vez que es la única que no exige una clasificación visual de los extremos (Fewell, 1984). La Computermatic mide la rigidez de cara de la madera en un vano de 914 mm, la Cook-Bolinder en uno de 900 mm y la Timgrader en 510 mm.

Una máquina mixta, de tipo mecánico pero que incorpora visión artificial y métodos de medida por láser de la deformación, es la denominada como Ersson. Esta máquina, de origen sueco, fue introducida en el mercado en 1998 y aún está sujeta a evaluación.

– **Máquinas de tipo no mecánico:** Dentro de este grupo existen, a su vez, dos tecnologías completamente distintas:

- Las que se basan en la determinación del módulo de elasticidad bien mediante la medición de la velocidad y amplitud máxima de propagación de ondas o ultrasonidos en el seno de la madera (Sylvatest) o bien mediante la medición de la frecuencia de resonancia de una vibración longitudinal producida por el impacto de una bola de acero en un extremo de la pieza (Dynagrade).
- Las que se basan en la localización y medición de los defectos presentes en la madera y de su densidad y humedad mediante la combinación de técnicas de radiofrecuencia (microondas) y de absorción de radiaciones ionizantes (Finnograder).

Una muy interesante comparación de los sistemas operativos, de los rendimientos clasificatorios y de la calidad de la clasificación obtenida con máquinas de los tipos antes reseñados, ha sido efectuada por Glos y Schulz (1980), Boström (1994), Johansson *et al.* (1998) y Helgerud (1999).

Del análisis de las conclusiones aportadas por los estudios de Boström (1994) y Johansson *et al.* (1998) se deduce la mejor precisión observada en las máquinas de tipo mecánico (Cook-Bolinder, Computermatic y Ersson) y dentro de éstas el mejor rendimiento de la denominada como Cook-Bolinder. Entre de las máquinas de tipo no mecánico la de mejor comportamiento es la Dynagrade, la Finnograder aporta valores adecuados, ligeramente inferiores a los de las máquinas mecánicas, y la conocida como Sylvatest parece estar todavía en una fase muy incipiente de desarrollo ya que no aporta resultados comparables a los de las restantes máquinas analizadas. La validez de estas conclusiones viene limitada por la velocidad de clasificación exigida a la máquina, ya que si se superan los 90 m/minuto, la denominada como Finnograder y la Ersson pueden llegar a presentar los mejores resultados, debido a que en ellas tiene menos incidencia en el proceso de medida la vibración que se produce en la madera como consecuencia del empleo de altas velocidades de alimentación.

VARIABLES DEL SISTEMA

Imputables a la técnica

Las relaciones Resistencia-Rigidez empleadas para el control de las máquinas habitualmente hacen uso de la resistencia evaluada mediante ensayo de canto (según EN 408) y de la rigidez determinada mediante ensayo de cara (colocando la pieza como si fuera una tabla, de forma similar al ensayo descrito en EN 384). Esto se hace así por cuanto la evaluación de la rigidez de cara obliga a emplear menores esfuerzos mecánicos, lo que genera menores tensiones internas y expone al material a menores riesgos de daño durante el proceso clasificatorio.

En este sentido es importante considerar la aseveración de Hoyle (1968) indicando que las máquinas de clasificación mecánica de la madera (que se basan ya en su totalidad en la alimentación de la madera en forma de tabla) no dan suficiente énfasis a los nudos de canto, que sí influyen, y muy marcadamente, en la resistencia mecánica de la madera cuando ésta es empleada de canto (lo que resulta lo más habitual en la práctica constructiva).

Por este motivo Müller (1968) y Hoyle (1968) concluyen sobre la necesidad de tener en cuenta otros aspectos cualitativos en la clasificación mecánica de la madera, combinando una clasificación visual previa, en la que se eliminarían defectos inadmisibles (deformaciones, coloraciones, gemas, dimensiones incorrectas, etc.) y se tendría en cuenta el efecto del nudo de canto, con una clasificación por máquina posterior, convirtiéndose de esta forma esta técnica en una parte de un proceso integral de clasificación mecánica de la madera.

Más recientemente, Boström (1994) constató mejoras de hasta el 17 % en el valor del Coeficiente de determinación en regresiones de tipo lineal entre la Resistencia y la Rigidez de la madera por el simple hecho de incluir como variable predictora adicional el tamaño máximo del nudo de canto.

Imputables al material

Sobre la influencia que las distintas variables del material y del medio tienen en los resultados finales de la clasificación, es necesario decir:

1.º **Especie:** Sunley y Hudson (1964) demostraron que materiales de diferentes anchuras de cara, aun para la misma especie, exhiben regresiones de Resistencia-Rigidez diferentes pero que las regresiones descritas para diferentes maderas (pino silvestre y abeto rojo) sobre el mismo ancho de tabla no son estadísticamente distintas. En este orden de cosas, Curry y Tory (1976) concluyeron sobre la posibilidad de adoptar las mismas regresiones para *P. sylvestris* y *Picea abies* pero no para el *Hemlok*.

Basados en este hecho y en la búsqueda de una deseable simplificación del método, hay autores (Sunley y Hudson, 1964; Müller, 1968) que concluyen sobre la conveniencia de considerar una única regresión de la resistencia sobre la rigidez, con validez universal.

Esta práctica en el caso de ser aplicada sobre un número elevado de especies ha de llevar a la fuerte penalización de muchas de ellas, motivo por lo cual si se quiere conseguir altos rendimientos clasificatorios es conveniente adoptar el criterio de considerar regresiones comunes sólo para especies cuyo comportamiento sea similar.

2.º **Dimensiones:** Es un hecho comprobado que conforme la sección de la madera aumenta la resistencia a la flexión (MOR) disminuye (Curry y Tory, 1976), no ocurriendo lo mismo con el Módulo de Elasticidad (MOE). Debido a la variación del MOR y a la estabilidad del MOE con la sección, las relaciones MOR-MOE necesarias para el control de la máquina varían significativamente en función de las dimensiones, aun dentro de la misma especie, por lo que no se debe emplear la misma regresión MOR-MOE para todas las dimensiones (Sunley y Hudson, 1964; Curry, 1969).

La influencia de la anchura de cara en los modelos de regresión MOR-MOE ha sido constatada por prácticamente todos los investigadores (Sunley y Hudson, 1964; Curry, 1969; Curry y Tory, 1976) que han abordado este tema.

Con respecto al espesor, Curry y Tory (1976) trabajando sobre piezas estructurales de pino silvestre y abeto rojo de 38 y 50 mm de espesor comprobaron que aunque pueden ser establecidas regresiones MOR-MOE distintas para ambos espesores, en realidad las diferencias reales con los valores predichos del MOR usando un modelo combinado que incorpore ambos espesores apenas si llega al 10 %, motivo por lo cual concluyeron sobre la inoperatividad de considerar la variable espesor en el modelo. Análoga conclusión sobre pino silvestre y abeto rojo fue establecida por Fonselius (1997).

No obstante, aunque esta conclusión puede ser cierta desde el punto de vista de las regresiones MOR-MOE de canto, puede no serla si se considera el Módulo de elasticidad obtenido mediante ensayo de cara (como tabla) o el MOE medido por la máquina (E_{mac}), que es una variante del anterior.

La extrapolación de los resultados y ajustes obtenidos empleando un modelo MOR-MOE basado en unas dimensiones concretas (por ejemplo para las de referencia de la normas EN, 150 × 50 mm) al resto de dimensiones provocaría bien subestimaciones (cuando las medidas reales fueran menores que las nominales) o bien sobrestimaciones (para medidas reales superiores)

Para evitar tanto la subestimación (que genera pérdida de rendimiento) como la sobrestimación (que genera pérdida de seguridad) es necesario, por un lado, incorporar las dimensiones de la madera en el modelo MOR-MOE o en el proceso de obtención de los parámetros de máquina y, por otro, se precisa ser riguroso respecto de las tolerancias dimensionales máximas admisibles (que se tendrán en cuenta en una inspección visual previa de la madera). El primer aspecto será abordado en el apartado de este trabajo referido a la obtención de los reglajes de la máquina y el segundo se puede superar con éxito si se adoptan las tolerancias máximas contempladas en la norma EN 336.

Todo lo arriba apuntado parece llevar a la conveniencia de integrar las dimensiones en el modelo MOR-MOE o establecer un método para ajustar su influencia con posterioridad.

3.º Humedad: Las relaciones MOR-MOE se obtienen, habitualmente, para un contenido medio de humedad del 12 %. Por otra parte, es sabido que conforme el contenido de humedad crece, la elasticidad de la madera aumenta (MOE disminuye) y la resistencia disminuye (MOR disminuye). La situación planteada, pues, respecto de la humedad es muy similar a la analizada para las dimensiones por lo que contenidos de humedad reales superiores a los nominales conllevan subestimaciones y contenidos de humedad inferiores producen sobrestimaciones.

Por este motivo, Hoyle (1968) ya estableció de forma clara desde los primeros comienzos de la técnica, que esta forma de clasificar la madera estructural debe ser aplicada sobre madera seca, y si se tiene en cuenta que la mayoría de las normas de cálculo recomiendan el empleo de madera con contenidos de humedad inferiores al 20 %, es entendible que sean perfectamente válidas las relaciones MOR-MOE ajustadas a una humedad del 12 %.

No obstante lo anterior, la búsqueda de una mayor exactitud parecería sugerir efectuar todos los trabajos con una humedad máxima del 20 % y, por debajo de dicho valor, integrar la variable humedad en el modelo o determinar factores de ajuste posteriores.

4.º Temperatura: La temperatura apenas si influye en la resistencia de la madera (McKean y Hoyle, 1964), si bien la clasificación mecánica de la madera caliente, tal y como sale del secadero, al llevar a valores de la rigidez medida por la máquina inferiores

a los reales en uso, lleva a subestimas de su resistencia. El fenómeno contrario ocurriría si se clasificase madera muy fría, situación ésta que no suele darse. Por tanto, vemos que este factor sólo puede tener importancia si la madera se seca en secadero a temperatura elevada y posteriormente es clasificada mecánicamente de forma inmediata, quedando penalizado el fabricante que así procediera. Por esta razón no se considera necesario integrar esta variable en el modelo ni efectuar ajustes posteriores por este motivo.

5.º **Nudos:**

a) **De canto:** Cuando la determinación de la rigidez de la madera se efectúa aplicando la fuerza en la cara, siendo esta la forma habitual de operar de las máquinas de clasificación de tipo mecánico, los nudos de canto apenas si influyen en el valor de la rigidez medida por la máquina. Por el contrario, cuando la madera es empleada de canto, situación muy frecuente, el valor de su resistencia a flexión viene fuertemente influido por los nudos de canto, de ahí que el valor del MOR predicho en la clasificación por máquina de madera con nudosidad de canto sea muy superior al real, es decir que se produce una alta sobrestima de la resistencia de la pieza.

Este hecho pone de manifiesto el principal problema de la técnica, ya que el predictor empleado (la rigidez) no tiene en cuenta un factor fundamental de la resistencia de la madera en servicio, como es el nudo de canto. Obviamente este hecho limita la efectividad de la técnica.

Esta falta de efectividad, no obstante, es limitada ya que este aspecto ya se tiene parcialmente en cuenta cuando se obtienen las regresiones MOR de canto-MOE de cara, que son las que realmente se emplean para determinar los reglajes de la máquina. No obstante, es criterio ampliamente aceptado que resulta muy conveniente efectuar una clasificación visual de los nudos de canto de las piezas de madera previa a su clasificación por máquina, lo que mejora mucho la efectividad del sistema clasificatorio.

Boström (1994) a este respecto constató mejoras de hasta el 17 % en el coeficiente de determinación de los ajustes por regresión lineal entre el MOR de canto y el MOE de cara, por el hecho de introducir como segunda variable independiente la medida del nudo de canto máximo de la pieza

b) **De cara:** Los nudos de cara no influyen fuertemente ni al valor de la rigidez de las piezas ni al valor del MOR cuando éstas trabajan de canto, motivo por lo cual la evaluación que hace la máquina puede ser considerada correcta y no se necesitan medidas adicionales como las descritas para los nudos de canto.

6.º **Desviación de la fibra:** La influencia de la desviación de la fibra en la resistencia de la madera estructural es un hecho ampliamente aceptado, lo que se pone claramente de manifiesto en el hecho de que prácticamente todas las normas de clasificación visual de la madera tienen en cuenta este factor.

La clasificación mecánica por máquina no incorpora ninguna limitación visual de la desviación de las fibras ya que la medición que estas máquinas efectúan de la rigidez de la madera ya incorpora este efecto y, por tanto, considera su influencia en la resistencia. En general puede afirmarse que esta variable es convenientemente tomada en consideración en la clasificación por máquina.

7.º **Estado superficial:** En las máquinas de tipo mecánico en las que la carga permanece constante y la deformación es la variable a medir, tipo Computermatic, es necesario trabajar sobre madera previamente cepillada, ya que los instrumentos de medición de

la deformación son muy sensibles al fuerte rozamiento que se produce como consecuencia de su contacto directo y constante con la madera sin cepillar, dando lugar a imprecisiones en la medida (Müller, 1968). Este inconveniente es superado con el modelo conocido como Ersson ya que la medida de la deformación la efectúa la máquina mediante técnicas láser. Por el contrario, en las máquinas tipo Cook-Bolinder, para las que la fuerza es la variable mensurable, esta exigencia de cepillado previo de la madera no es necesaria.

8.º **Posición:** Habitualmente la alimentación de las máquinas de tipo mecánico se efectúa con las piezas colocadas de cara ya que de esta manera es posible realizar una evaluación de la rigidez de la pieza aplicando mucha menos carga y produciendo, por tanto, menos tensión en la madera, con lo que se minimiza el riesgo de dañarla en el propio proceso clasificatorio.

Un aspecto interesante referido a esta variable es la relación entre el MOR de canto y el MOR de cara (trabajando como tablón), que de acuerdo con el Eurocódigo 5 es 0,24, si bien para Müller (1968) es 0,15; siendo en todo caso el MOR de canto inferior al MOR de cara.

9.º **Velocidad:** La velocidad con la que es clasificada la madera por la máquina es un factor que puede cobrar cierta importancia en las máquinas de tipo mecánico. Para velocidades inferiores a 90 m/min las máquinas de flexión (Cook-Bolinder, Ersson y Computermatic) presentan el mejor comportamiento (Boström, 1994; Johansson *et al.*, 1998; Helgerud, 1999). Por encima de esta velocidad el grado de subestima de la resistencia que estas máquinas introducen crece exponencialmente con la velocidad, debido a las vibraciones crecientes que se provocan en la propia madera y a su influencia en los sistemas de medida.

Las máquinas que no «tocan» la madera, como la Ersson, Finnograder o la Sylvatest, son insensibles a la velocidad (Boström, 1994; Johansson *et al.*, 1998; Helgerud, 1999), pudiendo aportar los mejores rendimientos para altas velocidades de alimentación.

De acuerdo con lo anteriormente descrito, la velocidad de clasificación configura el tipo ideal de máquina a emplear.

10.º **Deformaciones:** En general las curvaturas de cara o canto no producen efectos negativos sobre la precisión del método pero sí pueden producirlos el alabeo.

Para minimizar la influencia del alabeo en la medida de la variable indicadora, la madera debe ser introducida dos veces en la máquina introduciendo siempre primero la misma testa pero girando la pieza 180º entre cada una de las pasadas, evaluándose de este modo las dos caras opuestas y dándose para cada punto el valor medio de las medidas tomadas en cada pasada (Curry, 1969).

Cuando se desea conseguir una muy elevada velocidad de clasificación, este hecho obliga a emplear dos máquinas idénticas puestas en serie.

BASES OPERATIVAS DE LA TÉCNICA

De todo lo hasta aquí descrito se percibe claramente que para que el método pueda ser operativo en una especie dada es necesario haber determinado previamente las relaciones que ligan a la resistencia con la rigidez o la elasticidad de la madera.

Cuando se estudia el sistema de clasificación mecánica por máquina es necesario tener claro dos conceptos fundamentales: Propiedad indicadora (IP) de la máquina y reglaje de ajuste de la máquina.

Por Propiedad o variable Indicadora (IP) debe entenderse la medida (por ejemplo la deformación) o combinación de medidas efectuadas por la máquina clasificadora, que permiten predecir el valor de la variable clasificadora del material (normalmente el MOR), tomando como base la existencia de relaciones conocidas que ligan entre sí a ambas variables. En ocasiones no se usa directamente la variable indicadora (IP) sino otra directamente deducida de ella (por ej. E_{mac}).

Por reglaje de máquina debe entenderse a los valores de paso de la Propiedad Indicadora, que permiten clasificar el material en una o varias clases resistentes.

El sistema, tanto de ajuste de las relaciones resistencia-rigidez, como de obtención de los reglajes de las máquinas, ha cambiado notablemente con el tiempo, habiéndose llegado a su casi completa normalización con la aparición de la norma europea EN 519 y su más reciente versión (enero 2000) contenida en el documento EN TC 124-1-1.

Esta norma tiene la característica de ser, por un lado, muy estricta en lo referente al proceso de deducción de los reglajes de las máquinas, que describe en sus más mínimos detalles, pero, por otro, de ser muy tolerante en lo que se refiere al tipo de modelo resistencia-rigidez a utilizar como base de los reglajes, ya que permite cualquier modelo, aunque también establece mecanismos para evaluar su viabilidad predictiva.

Habitualmente estos modelos predictivos suelen ser simples y de tipo lineal ($Y = a + bX$), aunque no faltan en la bibliografía referencias a modelos más complejos del tipo $Y = aX^b$ (Curry y Fewell, 1977; Curry y Tory, 1976).

Últimamente ganan adeptos los modelos lineales de tipo múltiple, ya que permiten introducir en ellos todas las fuentes previsibles de variabilidad y, de esta forma, deducir los reglajes de las máquinas teniendo en cuenta tales variables. No incorporar dichas variables en los modelos obliga a referir los reglajes a condiciones concretas (de sección, humedad, etc.) y efectuar correcciones posteriores para considerar el efecto de las condiciones existentes en el momento de la clasificación.

Aún cuando hasta el establecimiento de la primera versión de las normas EN 408 y EN 338 podía haber cierta controversia sobre las variables a medir y evaluar, desde ese momento está claro que la variable dependiente será siempre el MOR medido según el ensayo descrito por EN 408 y la variable independiente el Módulo de elasticidad medido por la máquina, E_{mac} , o la variable indicadora (IP).

Un primer tanteo de los reglajes de máquina puede ser efectuado en laboratorio haciendo uso exclusivo del MOR y del Módulo de elasticidad en ensayo de cara (MOET), obtenido este último según la metodología descrita en la norma EN 384. No obstante, debe ser tenido en cuenta el hecho de que el valor del MOET, obtenido en laboratorio, es ligeramente distinto (normalmente algo superior) al medido por la máquina o E_{mac} (Grant, 1986; Müller, 1968), motivo por lo cual siempre será necesario hacer uso de los valores de E_{mac} para un correcto ajuste de las máquinas.

Otra controversia habitual en esta técnica es la que hace referencia al coeficiente de determinación mínimo que deben exhibir las relaciones MOR- E_{mac} . En este sentido la exigencia ha crecido con el tiempo ya que si bien en un principio Sunley y Hudson (1964) consideraban que bastaba con un 36 %, la actual norma EN TC 124.1-1 exige un 45 %.

Un reciente estudio comparativo (Helgerud, 1999) del grado de ajuste de las relaciones MOR- E_{mac} obtenidas por diversos autores arroja los datos de la Tabla 1, donde puede observarse su gran variabilidad en función del tipo de máquina empleado y de las características de la muestra evaluada.

Tabla 1
Grado de ajuste, expresado por el valor del coeficiente de determinación (%), de la relación MOR-IP para los diversos tipos de máquina y autores

Tipo de máquina/Autor	Coficiente de determinación (%)
<i>Cook-Bolinder</i>	
* Hoffmeyer (1990)	36
* Johanson <i>et al.</i> (1992)	55
* Boström (1994)	51
* »	48
* »	73
* Johanson <i>et al.</i> (1998)	50
* Solli (1998)	47
<i>Computermatic</i>	
* Foslie (1978)	63
* Lackner <i>et al.</i> (1988)	55
* Johanson <i>et al.</i> (1992)	49
* Boström (1994)	41
* »	60
* »	62
* » (1997)	34
* »	49
* »	21
* »	52
* »	48
* Johanson <i>et al.</i> (1998)	44
<i>Dynagrade</i>	
* Boström (1997a)	52
* Johansson <i>et al.</i> (1998)	47

Obtenidos los reglajes de las máquinas según lo descrito en la norma EN TC 124.1-1, esta misma norma describe el método a seguir para la correcta evaluación de su funcionamiento. En este sentido siguen siendo perfectamente válidas las conclusiones de los estudios de Curry y Tory (1976), Galligan *et al.* (1977) y Müller (1968), según los cuales la evaluación real de una máquina sólo puede ser correctamente efectuada mediante la realización de ensayos de laboratorio (determinando MOR, MOE y Densidad) sobre una muestra suficiente de piezas previamente clasificadas empleando dicha máquina y que los resultados de la evaluación sólo son válidos para la máquina y especie empleadas.

CONCLUSIONES

Las principales conclusiones que pueden ser extraídas del análisis de la situación actual de los métodos existentes para la clasificación mecánica automatizada de la madera aserrada son:

1. Las técnicas de clasificación resistente por máquina, especialmente las de tipo mecánico, constituyen un método fiable y eficaz de clasificación de la madera aserrada por su resistencia.
2. Existe un cierto número de técnicas todavía en fase de desarrollo (ultrasonidos, visión artificial, resonancia, etc.) que en un futuro no muy lejano permitirán la clasificación a un ritmo muy superior al empleado por las actuales máquinas de tipo mecánico.
3. Para la puesta en marcha de la técnica es necesario obtener, en un número suficiente de muestras y para cada especie, los modelos que relacionan la variable clasificadora (MOR) con las variables indicadoras o predictoras de cada tipo de máquina.
4. La consideración de las variables del material que afectan a los modelos antes mencionados puede hacerse bien integrándolas en los propios modelos o estableciendo un sistema de ajuste posterior.
5. El funcionamiento de las máquinas exige la determinación de sus reglajes, valores de paso de las variables indicadoras, que permiten a cada máquina clasificar las piezas de madera según clases de resistencia. La determinación de tales reglajes debe ser hecha de acuerdo a lo establecido en la norma EN TC 124.1.1.
6. La adopción del sistema de clases resistentes en el seno de la Unión Europea y el establecimiento de normas muy precisas que regulan el funcionamiento, calibración, puesta en marcha y supervisión de las máquinas de clasificación (EN TC. 124.1.1 y EN 519), han permitido incrementar el interés por estas técnicas y han fomentado el diseño de nuevos equipos y la mejora de los existentes.

SUMMARY

State of the art of the machine strength rating of lumber (Review)

Over the last forty years, the machine strength grading of lumber has been developed considerably all over the world, especially in the Nordic and Anglo-Saxon countries.

In this paper the beginnings and development of the machine strength grading system are studied. A comparison is also made of the running principles of the machines operating in the market.

The variables of the system and their influence in the grading process are also studied.

An analysis is also made regarding the mathematical models used to relate classifier variables with predictive variables, measured by the machines, assessing the factors that affect the method and the best way to be taken these into account. Indications about the best way to derive machine settings, according to the standardized methodology approved by the European Committee of Standardization (CEN), are also included.

Conclusions are drawn concerning the applicability, present state of the technology, accuracy, reliability and efficiency of the technology, as well as the research necessary to set this technology under way to grade new timber species and the best way to consider all the influencing factors in the grading process.

KEY WORDS: Strength grading
Machine Strength Grading

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANTON A., BRYANT L.H., 1973. Mechanical stress grading of timber in Australia. Proceedings of IUFRO survey of machine stress grading, 1973:8-12.
- BAUSCHINGER, 1883. citado en Fewell (1982) y Unwin (1888).
- BOOTH H.E., 1964. The machine grading of timber. The Australian Timber Journal, Sept.1964:81-89.
- BOSTRÖM L., 1994. Machine strength grading: comparison of four different systems.. Swedish National Testing and Research Institute, Building Technology SP Report 1994:49.
- BOSTRÖM L., 1997a. Assessment of Dynagrade timber strength grading machine. Swedish National Testing and Research Institute Building Technology, 96B2, 1314B.
- BOSTRÖM L., 1997b. Assessment of Computermatic/Micromatic timber strength grading machine. Swedish National Testing and Research Institute Building Technology, SP AR 1997:28. Technical note.
- BOSTRÖM L., 1998. Setting values for the Dynagrade timber strength grading machine. SP AR 1999:12.
- CHAPLIN C.J., LATHAM J., 1935. Strength tests on structural timbers, Part I. Forest Prod. Res. Rec. N.º 2, HMSO, London.
- CLINE M.G., HEIM A.L., 1912. Tests on structural timbers. Bulletin Div.Forest USDA n.º 108.
- CURRY W.T., 1966. Stress grading machines. Timber trades Journal, 5 nov. 1966:71-77.
- CURRY W.T., 1969. Mechanical Stress Grading of Timber. Forest Products Research Laboratory. Timberlab Paper n.º 18.
- CURRY W.T., FEWELL A.R., 1977. The relations between ultimate tension and ultimate compression strength of timber and its modulus of elasticity. Building Research Establishment. Current Paper CP 22/77. Princess Risborough, BRE.
- CURRY W.T., TORY J.R., 1976. The relation between modulus of rupture (ultimate bending stress) and modulus of elasticity of timber. Building Research Establishment. Current Paper CP 30/76. Princess Risborough, BRE.
- DÍEZ M.R., FERNÁNDEZ-GOLFÍN J.I., 1998. Influencia de diversos factores en la calidad de la madera de uso estructural de *P. sylvestris* L. Invest. Agr. Sist. Recur. For. Vol. 7 (1 y 2), 41-52.
- EN 336 MADERA ESTRUCTURAL. Coníferas y chopo. Desviaciones permisibles. 1998. AENOR.
- EN 338 MADERA ESTRUCTURAL. Clases de resistencia. 1999. AENOR.
- EN 384 MADERA ESTRUCTURAL. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y de la densidad. 1996, revisión 1999. AENOR.
- EN 408 ESTRUCTURAS DE MADERA. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. 1995, revisión 1999. AENOR.
- EN 519 STRUCTURAL TIMBER. Grading. Requirements for machine strength graded timber and grading machines. 1999, a anular cuando entre en vigor EN TC 124.1.1.
- EN TC 124-1.1 TIMBER STRUCTURES. Strength graded structural timber with rectangular cross section. Grading Requirements. Enero 2000. AENOR.
- EN TC 1912 STRUCTURAL TIMBER. Strength classes. Assignment of visual grades and species. 1997. AENOR.
- ENDERSBY J. (1974) Stress grading home-grown softwood. Building Research Establishment. Bre information IS 5/74. Princess Risborough, BRE.
- FERNÁNDEZ-GOLFÍN J.I. *et al.*, 2000. Caracterización de la madera de *Pinus nigra* Subsp. *Salzmannii*. Memoria fin de proyecto. Documento interno.
- FEWELL A.R., 1982. Machine stress grading of timber in the United Kingdom. Holz als Roh- und Werkstoff 40(1982): 455-459.
- FEWELL A.R., 1984. Timber stress grading machines. Building Research Establishment. Bre information paper IP 17/84. Princess Risborough, BRE.
- FONSELIUS M., 1997. Effect of size on the bending strength of laminated veneer lumber. Wood Sci. Technol. 31(1997):399-413.
- FOSLIE, M., 1978. Enkelte faktorerers innflytelse pa boyestyrke og elastisitemodul hos trevirke.NTI internal rapport.
- GALLIGAN W., SNODGRASS D., CROW G.W., 1977. Machine stress rating: practical concerns for lumber producers. USDA Forest Service. General Technical report FPL 7.
- GLOS P., 1982. Die maschinelle sortierung von schnittholz. Holz-Zentralblatt n.º 13. 29/01/1982:153-155.
- GLOS P., SCHULTZ H., 1980. Stand und aussichten des maschinellen schnittholzsortierung.. Holz als roh und werkstoff 38:409-417.
- GRANT D.J., 1986. Computermatic timber-grading machine laboratory evaluation of performance with respect to feed speed and the dynamic/static deflection relationship. New Zealand Journal of forestry science 16(2):187-196.

- GREEN D., KRETSCHMANN D.E., 1997. Properties and grading of southern pine timbers. *Forest Prod. J.* 47(9):78-85.
- GREEN D., ROSS R.J., MCDONALD K.A., 1993. Production of hardwood machine stress rated lumber. 9th international symposium on nondestructive testing of wood: 141-150.
- HELGERUD H., 1999. Yield from machine strength grading of structural timber in Norway. NTI Rapport n.º 44. ISSN 0333-2020.
- HOFFMEYER P., 1990. Failure of wood as influenced by moisture and duration of load. Doctoral thesis. State University of New York. College of Environmental Science and Forestry. Syracuse. New York.
- HOFSTRAND A.D., HOWE J.P., 1960. Comparison of Modulus of Elasticity and Modulus of Rupture in white fir dimension lumber. Potlach Forest Inc.; Consultants' Research Report n.º 2. September 1960.
- HOFSTRAND A.D., HOWE J.P., 1963. Relationship between Modulus of Elasticity and Compressive Strength of white fir. Potlach Forest Inc.; Consultants' Research Report n.º 8. September 1963.
- HOYLE R.J., 1961. A nondestructive test for stiffness of structural lumber. *Forest Prod. J.*, June 1961:251-254.
- HOYLE R.J., 1968. Background to machine stress grading. *Forest Prod. Journal* 18(4):87-97.
- JOHANSSON C.J., 1989. Strength and stiffness of machine stress rated timber. An investigation of the yield from five grading machines. Swedish National Testing and Research Institute, Building Technology SP Report 1989:50.
- JOHANSON C.J., BRUNDIN J., GRUBER R., 1992. Stress grading of Swedish and German timber. Swedish National Testing and Research Institute, Building Technology SP Report 1992:23.
- JOHANSON C.J., BOSTRÖM L., BRÄUNER L., Hoffmeyer P., Holmqvist C., Solli K.H., 1998. Laminations for glued laminated timber. Establishment of strength classes for visual strength grades and machine settings for glulam laminations of Nordic origin. Swedish National Testing and Research Institute Building Technology, SP report 1998:38.
- KRAMER P.R., 1964. Correlation of bending strength and stiffness of southern pine. *Forest Prod. Journal*, October 1964:495-497.
- LACKNER R., FOSLIE M., 1988. Gran fra Vestlandet-styrke og sortering. NTI. Meddelelse 74.
- LANGLANDS I., 1938. The mechanical properties of South Australian plantation-grown *Pinus radiata*. Pamph. Coun. Scient. Ind. Res. Aust. N.º 87, 1938.
- MCKEAN H.B., HOYLE R.J., 1964. Stress Grding method for dimension lumber. American Society for Testing Materials, Special Technical Publication n.º 353.
- MÜLLER P.H., 1968. Mechanical Stress-Grading of structural timber in Europe, North America and Australia. *Wood Sci. And Technol.* 2(1968):43-72.
- PERCIVAL D.H., 1981. Portable E-tester for selecting structural component lumber. *Forest Prod. Journal* 31(2):39-42.
- ROUGER F., 1996. Application of a modified statistical segmentation method to timber machine strength grading. *Wood and fiber Sci* 28(4):438-449.
- SANDOZ J.L., 1989. Grading of construction timber by ultrasound. *Wood Sci. Tech.* 23:95-108.
- SANDOZ J.L., 1993. Valorization of forest products as building materials using nondestructive testing. Proceedings of the Ninth Int. Symp. On Nondestructive Testing of wood: 103-109.
- SENF T J.F., SUDDART S.K., ANGLETON H.D., 1962. A new approach to stress grading of lumber. *Forest products Journal*, april, 1962:183-186.
- SOLLI K.H., 1998. Assessment of Tecmach strength grading machine. NTI, prosjektnr. 369504.
- SUNLEY J.G., CURRY W.T., 1962. A machine to stress grade timber. *Timber Trades Journal* 241(4472):73-75.
- SUNLEY J.G., HUDSON W.M., 1964. A report of research on the Machine Grading of lumber in Britain. *Forest Prod. Journal* 14(4): 155-158.
- TORY J.R., 1978. Machine stress grading in the United Kingdom: theory into practice. Proceedings of the 4th nondestructive testing of wood symposium: 239-281.
- UNWIN W.C., 1888. *The testing of materials of construction*. London: Longmans, Green and Co.