

Cálculo estructural de muebles*

Furniture structural performance

MARCELA GUZMAN F., GENARO GOTELLI V., GILDA VARGAS M.

Universidad del Bío-Bío, Casilla 5-C, Concepción-Chile. E-mail: mguzman@ubiobio.cl, jgotelli@ubiobio.cl, gvargas@ubiobio.cl

SUMMARY

The objective of this investigation was to validate the use of numerical tools, widely used in the structural product analysis of articles made with isotropic materials, in the calculation of the strength of furniture made with orthotropic materials such as wood. A standardized test conforming to German standards was used to evaluate the quality of chairs, and this test served as a basis for comparing the results obtained by this analysis with those given by finite element analysis (FEA) developed under the same load conditions. The principal results indicate that it is possible to use this type of numerical tool to evaluate the structural behavior of furniture. It was found that deformation values were near those obtained under real conditions, although there were statistical differences between the two methods. Additionally, the finite element analysis (FEA) allowed the detection of critical strength zones in the furniture structure. Although stresses that exceed the proportional limit for radiata pine did not exist in this case, the results give indications for pre-manufacture redesign and structural optimization to prevent faults.

Keywords: structural performance, furniture, finite element analysis.

RESUMEN

El objetivo de esta investigación apunta a validar la utilización de herramientas numéricas, ampliamente utilizadas en el análisis estructural de productos fabricados con materiales de características isotrópicas, en el cálculo de resistencia para muebles fabricados con materiales ortotrópicos como la madera. Se realizó un ensayo normalizado de acuerdo a lo establecido por normas alemanas, el que fue utilizado para evaluar el control de calidad de sillas, sirviendo de base para comparar los resultados obtenidos por este análisis con aquellos entregados por un análisis de elementos finitos (FEA), realizado bajo las mismas condiciones de carga. Los principales resultados indican que es posible utilizar este tipo de herramientas numéricas para evaluar el comportamiento estructural de muebles, encontrándose valores de deformación bastante cercanos a los obtenidos en condiciones reales del ensayo, pero con diferencias estadísticas entre ambos métodos. Adicionalmente, el análisis de elementos finitos (FEA) permitió detectar las zonas críticas de esfuerzo en la estructura. Si bien en el caso de este ensayo no existen esfuerzos que sobrepasan el límite proporcional para el pino radiata, estos resultados constituyen un indicador que permitiría rediseñar y optimizar la estructura con el fin de prevenir fallas antes de que los productos estén en proceso de fabricación.

Palabras clave: comportamiento estructural, muebles, análisis de elementos finitos.

INTRODUCCION

En Chile, el desarrollo de la industria del mueble ha experimentado grandes avances en la última década. Las exportaciones de muebles chile-

nos se han incrementado fuertemente; sin embargo, esta tendencia se ha visto afectada por exigencias cada vez mayores en términos de estándares de calidad y, por ende, ha sido complicado para la industria conquistar nuevos mercados, cada

* Tesis de Maestría financiada por la Dirección de Graduados de la Universidad del Bío-Bío, Concepción-Chile

vez más competitivos; de ahí la necesidad de contar con herramientas que permitan diferenciar y posicionar nuestros productos en el mercado nacional e internacional. Numerosos autores han desarrollado investigaciones relacionadas con las características estructurales de algún tipo de mueble, sin embargo, la mayoría de ellas se basa en el comportamiento de una parte de la estructura, sin considerar el conjunto completo. Asimismo, las investigaciones recopiladas señalan componentes de una estructura fabricada principalmente con algún tipo de tablero (fibra, partícula y OSB); sin embargo, muy pocas se refieren a componentes de una estructura fabricada con madera sólida.

Eckelman y Zhang (1, 2), por ejemplo, desarrollaron estudios que pretendían encontrar la resistencia mecánica y el momento flector de uniones tipo L conectadas con tarugos y fabricadas principalmente con tableros de partículas, como las que se encuentran en muebles de cocina. El objetivo planteado por los autores consistía en obtener el valor de carga máxima soportada por la unión y transformarlo posteriormente en el valor de momento flector. Ellos evaluaron variables como: diámetro de los tarugos y la profundidad de penetración del conector (tanto en la base como el lateral), obteniendo como resultados que un aumento en el diámetro del conector incide significativamente en el aumento de la resistencia de la unión, al igual que un aumento en la penetración del elemento base; por el contrario, un aumento de la profundidad del elemento lateral no representa variaciones en la resistencia.

Más tarde, los mismos autores evaluaron la relación entre el aumento del número de tarugos y la resistencia del momento flector, encontrando impacto significativo en la resistencia de este tipo de uniones, tal como lo señalaron Bachmann y Hassler (3). Adicionalmente, comprobaron lo indicado en estudios realizados por Engleson, Albin y Wang (citado por 1 y 3), quienes determinaron que la resistencia de la unión se ve fuertemente influenciada por el tipo de tablero, espesor y densidad de los componentes de estas uniones, encontrando que las muestras sometidas a ensayos de compresión arrojaron resultados fuertemente relacionados con la cohesión interna (IB) de los tableros utilizados, mientras que aquellas sometidas a ensayos de tracción se relacionan con la resistencia a la tracción superficial de estos materiales. Finalmente, concluyeron que una dis-

tancia de alrededor de 3" entre conectores y una profundidad de 1" en el componente lateral arrojan la máxima resistencia de este tipo de uniones.

Eckelman (4) señala en otro estudio que existe un tipo de conector ampliamente utilizado en la industria moderna de muebles y que corresponde a un perno con tuerca tipo tarugo. Este conector incluye dentro de sus aplicaciones las fijaciones de soporte asiento-respaldo en sillas, larguero-travesaño en camas y cubierta de mesa-patas, entre otras. De acuerdo a lo señalado por el autor, a pesar de ser uniones bastante conocidas, éstas se utilizan debido a los buenos resultados que se han acumulado por algunos años, sin embargo, existe muy poca información respecto de su comportamiento estructural. Adicionalmente, existen dos tipos de construcción cuando se utiliza este tipo de conector y se diferencian en la forma como se inserta el tarugo-tuerca en la pieza a unir, pues en un caso el elemento es insertado por la cara más ancha de la pieza desde abajo, mientras en el otro caso, éste es insertado por el costado de la pieza. Dado lo anterior, el autor pretende a través de su estudio responder tres interrogantes fundamentales: ¿Cómo deben localizarse en las piezas a unir para maximizar la resistencia?, ¿cuál es la resistencia a la flexión de uniones construidas con estos conectores? y, por último, ¿cuáles son las características de rigidez de tales uniones? La hipótesis fundamental utilizada se basa en que la resistencia a la extracción es un buen indicador de cómo se comportará este conector cuando es usado en uniones sujetas a fuerzas de flexión, sin embargo, esta resistencia se relaciona directamente con factores como: la posición que ocupe el conector dentro de la pieza (profundidad y distancia desde los extremos), además del diámetro del elemento. Los resultados de esta investigación señalan que la mayor resistencia se alcanza cuando el tarugo-tuerca se inserta por el canto de las piezas y que la posición en el ancho de la pieza tiene sólo un pequeño efecto.

Pinedo y Gotelli (5), basado, en las especificaciones desarrolladas por la Universidad de Roeseinheim, realizaron ensayos de tracción y compresión a uniones del tipo L fabricadas con madera de *pinus radiata* y *eucalyptus globulus*. El diseño experimental incluyó la evaluación de tarugo doble y espiga simple como medios de conexión y la medición realizada en este estudio correspondió a la resistencia máxima alcanzada por la unión. Posteriormente, los mismos autores sometieron

muestras similares a ensayos cíclicos con una carga igual a 1/5 de la obtenida en los ensayos estáticos por un total de 100 ciclos y a una razón aproximada de 10 ciclos/segundo, midiendo en este caso el ángulo de deflexión que corresponde a la variación angular que sufre la unión, respecto de su ángulo original (90°) cuando es sometido a los diferentes tipos de esfuerzos. Los principales resultados indican diferencias en los esfuerzos de tracción y compresión, en ambas especies y tipos de conector, alcanzando un menor ángulo de deflexión (mayor estabilidad) aquellas probetas sometidas a tracción. Paralelamente encontraron para las uniones sometidas a esfuerzos de tracción, valores para el ángulo de deflexión dentro del rango aceptado (5° +/- 2,5°), sin embargo, éstos fueron bastante más homogéneos cuando el medio conector correspondía a tarugo doble. Lo anterior se concluye para ambas especies. Por el contrario, en ensayos de compresión, los valores alcanzados para el ángulo de deflexión presentan una alta variabilidad, donde no fue posible obtener tendencias más claras de su comportamiento.

De acuerdo a lo señalado por varios autores (6, 7, 8), existen diferentes formas y estilos de construir una silla, sin embargo, a partir del tipo más simple, donde se reconocen sólo tres miembros (pata frontal, respaldo y soporte transversal), es posible construir cualquier otro tipo. La evaluación estructural de este tipo de muebles depende de sus características estructurales, de la resistencia de las uniones y del diseño y resistencia de sus miembros; sin embargo, la mayoría de este tipo de estructuras falla por la debilidad de las uniones más que por alguna otra razón. Al someter a la acción de cargas externas una estructura simple, observamos que se produce una fuerza de flexión interna en la zona de la unión del respaldo y el soporte transversal, por lo tanto, esta unión deberá ser la responsable de la aptitud en servicio que tenga dicha estructura. Al incorporar miembros adicionales a la estructura, dicha fuerza es compartida por las uniones formadas por este miembro, la pata frontal y la pata trasera, por lo que el esfuerzo asociado a cada unión se reduce en forma considerable y la estructura se ve fuertemente "rigidizada" frente a la acción de la misma carga. Diferentes estudios (9, 10) indican que la resistencia de la estructura se relaciona en forma proporcional con el número y tamaño de estos rigidizadores. Obviamente el aspecto estético tie-

ne también un importante componente, por lo que es necesario equilibrar esta condición.

Otro de los factores de gran importancia en la resistencia de las uniones dice relación con el tipo de conector utilizado. Existen diferentes tipos de conectores, sin embargo, en sillas los más utilizados corresponden a tarugos y caja-espiga. Diversos autores (11, 12) señalan que en el caso de los tarugos la resistencia a la extracción es directamente proporcional al diámetro de éstos y también es ligeramente afectada por el largo del conector. También señalan que la resistencia en este tipo de uniones es proporcional a la distancia de separación entre tarugos (cuando es utilizado más de uno) y que en algún grado también depende del contenido de sólidos que tenga el adhesivo utilizado (comparaciones válidas sólo para PVA). Respecto de la unión caja-espiga, ellos señalan que esta unión es ligeramente más resistente que aquella realizada con tarugos en iguales condiciones.

En el ámbito internacional se han desarrollado por varios años diferentes pruebas que permiten evaluar el comportamiento de un mueble; sin embargo, todos estos procedimientos no proporcionan una medición cuantitativa de la resistencia y durabilidad de elementos estructurales claves en el comportamiento de la estructura y que son necesarios para propósitos en diseño de ingeniería.

Específicamente las pruebas relativas al comportamiento de un determinado mueble califican la aptitud de éste para un determinado uso, sin identificar y menos cuantificar la distribución y magnitud de los esfuerzos y deformaciones a los que estará sometida. Por esta razón, Eckelman (13, 14) propone desarrollar una serie de pruebas que permitan establecer de manera racional las características de resistencia propias que puede tener un determinado tipo de mueble. El autor señala que el principal problema que se debe resolver, al modificar los procedimientos de prueba existentes, consiste en determinar el tipo de análisis que se requiere realizar en función de la respuesta que se persigue, es decir, un *análisis simple*, donde la estructura en estudio aprueba o reprueba el test o, por el contrario, un *análisis múltiple*, donde se establezcan diferentes grados de aceptación. La utilización de uno u otro sistema depende de cómo los resultados van a ser utilizados, pues si el objetivo es establecer un nivel base de comportamiento y seguridad para un determinado grupo de productos, será suficiente utilizar el primero de éstos.

Consecuentemente, este sistema obliga a fijar un nivel mínimo de comportamiento para que el producto sea aceptado, sin embargo, es posible mencionar dos razones que limitan el uso de este procedimiento: el comportamiento mínimo aceptable debe ser seleccionado de tal forma que acomode a todos los miembros de la organización responsables del desarrollo del procedimiento y el nivel de aceptación elegido debe ser razonable, pues si éste es muy alto se hace restrictivo para algunos productos que no alcanzando el requerimiento deberán salir del mercado pudiendo ser satisfactorios para otras aplicaciones.

El método de las *diferencias finitas* (aproximación por porciones) ha sido por largo tiempo el más conocido y utilizado; sin embargo, esta técnica presenta algunas complicaciones cuando, por ejemplo, se deben resolver problemas asociados a una geometría irregular. En este caso, la técnica de diferencias finitas permite “aproximar” con bastante menos exactitud que la de elementos finitos y por ende los resultados obtenidos con este último análisis serán “mejores”. Los métodos de Galerkin y Rayleigh-Ritz son la base del método de aproximación por porciones de los elementos finitos (15, 16).

Antiguamente, estas herramientas se utilizaban exclusivamente en los campos donde el rendimiento era crítico, por ejemplo, en la actividad aeroespacial sin embargo, poco a poco han comenzado a adquirir importancia en otras ramas de la ingeniería, encontrando aplicación en el diseño industrial (17).

Eckelmann y Suddarth (18) fueron los primeros en proponer el uso de métodos numéricos para la construcción de muebles, preparando un paquete especial en lenguaje Fortran IV; años más tarde el programa fue mejorado y en los años 70 fue conocido en el mercado como CODOFF y CODOC-3 (19, 20, 21). También Kamenisky y Paulenkova (citado por 22) trabajaron en este problema y el Departamento de Diseño de Muebles de la Universidad Poznan ha llevado a cabo numerosos estudios basados en la utilización del método de elementos finitos para el análisis resistencia-rigidez de muebles y conectores de muebles.

El método de elementos finitos (FEA) es un método computarizado que permite predecir el comportamiento real de un cuerpo frente a la acción de fuerzas con el objeto de determinar si es posible que trabaje en la forma para la que fue diseñado. El concepto básico de este tipo de análisis consiste en sustituir un objeto real por un objeto idealizado

equivalente compuesto por un número finito de partes discretas llamadas “elementos”¹, que se conectan entre sí por un cierto número de “nodos”², semejando un reticulado o malla de alambre. De esta forma, es posible encontrar –utilizando teoremas de energía– una relación entre las fuerzas actuantes en los nodos y sus desplazamientos y llegar a determinar una matriz de rigidez.

Con esta matriz de rigidez y algunas condiciones de equilibrio aplicadas en cada nodo de la estructura idealizada, es posible formar una matriz de ecuaciones algebraicas simultáneas, cuya solución entrega todos los desplazamientos nodales que, a su vez, se utilizan para determinar todos los esfuerzos internos, con los que es posible obtener las deformaciones, y éstas se relacionan directamente con las tensiones (23).

MATERIAL Y METODOS

Dentro de la gran variedad de muebles fabricados en nuestro país se estima que la gran mayoría de ellos no requiere un comportamiento estructural clave, pues están sometidos a la acción de cargas relativamente pequeñas y por ende su comportamiento estructural no es crítico. De todos ellos, las sillas parecen ser las estructuras que requieren de un cálculo estructural más detallado y por esto son las seleccionadas. Como no es objetivo de este estudio se determinó optar por un modelo diseñado por el CATEM (Centro de Alta Tecnología en Madera S.A.), el que está fabricado con madera de pino radiata y sobre la base de ocho componentes, todos ensamblados con uniones caja-espiga, y el asiento se sujeta por medio de tornillos.

Una vez cuantificada la totalidad de las piezas necesarias para la fabricación de las sillas (lote de

¹ Un elemento es una unidad utilizada para construir la malla utilizada en FEA. Existen muchos tipos de elementos y la elección de uno u otro depende del tipo de objeto a modelar para el análisis de elementos finitos y el tipo de análisis que será desarrollado. Un elemento es una relación matemática que define cómo los grados de libertad de un nodo se relacionan con el próximo y cómo las deflecciones crean esfuerzos.

² Un nodo corresponde a una coordenada en el espacio donde los grados de libertad están definidos y representan los posibles movimientos de este punto debido a la acción de alguna carga en la estructura. Los grados de libertad también representan cómo los momentos y las fuerzas son transmitidos desde un elemento a otro contiguo.

12 unidades), se procedió al corte de las matrices necesarias para la obtención de las diferentes piezas componentes de cada estructura. Cabe señalar que todos los componentes de la estructura, salvo el asiento, corresponden a piezas de madera sólida cuya orientación principal está en la dirección de su largo y son de corte tangencial. El asiento corresponde a un panel unido de canto. Luego, se procedió al ensamble de las piezas utilizando adhesivo PVA (52% de sólidos) y un sistema de prensado manual.

El control de calidad se realizó de acuerdo a lo indicado por la norma alemana DIN 68871 P1 y las recomendaciones del laboratorio LGA-Nurnberg, los que señalan un ensayo dinámico en este tipo de estructuras que debe realizarse en dos etapas: hacia atrás y luego hacia adelante. En ambos casos la respuesta del ensayo es de tipo cualitativo, evaluando el comportamiento general de la estructura en la mitad de su duración total, es decir, 1.500 ciclos y luego del término de ésta (3.000 ciclos). Finalmente, se detecta si la estructura pasa o falla la prueba en función de la estabilidad general de ésta una vez finalizado el ciclo de carga hacia adelante y atrás (3.000 ciclos en cada etapa).

Para efectos de determinar cuantitativamente la deformación provocada por la fuerza del pistón se utilizaron deformómetros mecánicos, situados en la intersección de las patas traseras con el soporte lateral, a ambos lados de cada silla. El procedimiento de instalación consistió en ubicar los instrumentos mediante dos rectas paralelas ubicadas con un ángulo de 45° en cada componente de la estructura y por cada lado de ésta. Una vez deter-

minada la posición, se instalaron conectores tipo L de acero galvanizado como soporte de los instrumentos (figura 1). Finalmente, fueron instalados los deformómetros y luego accionado el pistón de manera tal que completará los 3.000 ciclos indicados por la norma utilizada para la evaluación del ensayo. La deformación de la estructura fue registrada al inicio del ensayo, una vez que la fuerza F alcanza su máximo valor y al final del ensayo cuando la cantidad de ciclos establecida es completada. Por último, se procedió a la etapa b del ensayo realizando los mismos pasos y mediciones que las explicadas anteriormente.

El modelo de la silla fue dibujado por partes, utilizando Mechanical Desktop 5.0 y posteriormente ensamblado de acuerdo a las condiciones de los planos de fabricación. Después, el modelo geométrico fue exportado al software Algor versión 12 para la creación de la malla superficial. La densidad de la malla (o sea el número de elementos que tenga) es posible de ajustar; sin embargo, mientras mayor densidad tenga ésta, mayor será la cantidad de recursos que se utilicen y el tiempo de espera en el procesamiento de la información. En este caso, la creación de la malla fue especificada con un 50% de precisión, para luego proceder a la creación de la malla sólida del modelo. El software utilizado para la realización del análisis de elementos finitos permite seleccionar diferentes tipos de análisis, y la elección de uno u otro dependerá de las consideraciones de lo que se pretende conseguir con la simulación. En este caso se definió: *análisis de esfuerzo estático lineal*, el cual es el más común en elementos finitos y permite el estudio de esfuerzos, defor-



Figura 1: Ubicación de instrumentos de medición.
Measuring instruments location.

maciones, desplazamientos, fuerzas axiales y de corte que resultan cuando se utiliza una carga estática sobre algún cuerpo. Si bien el ensayo considera una carga de tipo dinámica, no es posible realizar un análisis de este tipo (dinámico) con el software utilizado. Dado lo anterior se utilizará la medición de deformación inicial para el ensayo de tal manera de simular el efecto de una carga estática y así poder aplicar este análisis.

Dentro de las restricciones que se especifican para este tipo de análisis se consideran: la magnitud o dirección de la carga no cambia durante el tiempo; el cambio en la dirección de la carga debido a la deformación es pequeño; la carga puede causar sólo pequeñas deflexiones y/o rotaciones (dentro de la región elástica sobre la curva esfuerzo-deformación); las condiciones de borde no cambian significativamente, y no existen efectos de inercia.

Las condiciones del modelo (posición, magnitud y dirección de las fuerzas), además de las condiciones de contorno (restricciones de desplazamiento y rotación) utilizadas corresponden a lo que se pretende simular. Paralelamente se incluyeron las condiciones del material utilizado en la fabricación de la estructura y que, en este caso, por tratarse de un material de características ortotrópicas, es necesario definir sus nueve constantes elásticas: módulos de elasticidad (E_1 , E_2 y E_3), módulos de cizalle (G_{12} , G_{23} y G_{13}) y coeficientes de Poisson (γ_{12} , γ_{13} , γ_{23}), además de los coeficientes de dilatación térmica por cada eje de simetría. Como no es objetivo de este estudio determinar los valores definidos para la simulación fueron obtenidos de la bibliografía (24).

Finalmente, el procedimiento se completa con el chequeo del modelo cuyo objetivo es verificar la convergencia del modelo de elementos finitos. Esto significa chequear la continuidad nodal del modelo, las condiciones de borde y las cargas debidamente aplicadas en los nodos, además de las especificaciones del material, para luego proceder al análisis de la estructura.

Como resultado se obtiene un vector de desplazamiento que representa el movimiento para cada nodo en este análisis, donde un vector de fuerza actúa sobre una matriz de rigidez para desplazar los nodos y el desplazamiento indica el esfuerzo, dado que se conoce el módulo de elasticidad. Adicionalmente, es posible encontrar el tensor de esfuerzo de la estructura, de acuerdo a dos teorías: Tresca y Von Mises.

RESULTADOS Y DISCUSION

Tal y como se señala en la norma utilizada para el control de calidad de sillas (DIN 68871 P1), los resultados del ensayo corresponden a registros cualitativos que indican si la estructura superó o no las condiciones del ensayo realizado en cada una de sus etapas. Adicionalmente, basado en las recomendaciones del laboratorio LGA-Nurnberg, se registraron observaciones complementarias respecto de aspectos generales en la estructura y algunos puntos particulares de unión.

Para este caso, los resultados generales del análisis indican que la totalidad de las estructuras (lote equivalente a 12 muestras) cumple con los requerimientos establecidos, lo que significa que las estructuras completaron ambas etapas del ensayo (3.000 ciclos por cada una) sin presentar fallas aparentes. Las observaciones individuales realizadas corresponden a la visualización de deformaciones en la estabilidad general de la estructura y zonas conflictivas como: unión asiento-pata trasera (unión A - R), unión travesaño-patas (unión P - T), unión respaldo inferior-pata trasera (RI - PT). La figura 2 muestra las zonas de evaluación que fueron consideradas en las diferentes etapas del ensayo.

La deformación inicial alcanzada en cada uno de los extremos para las sillas ensayadas alcanzó valores promedio de 14,30 y 13,38 mm para el lado izquierdo y derecho, respectivamente. Adicionalmente, en ambos casos, se observan coeficientes de variación bastante bajos para un material de características tan heterogéneas como la madera (menores al 30%). Para el tratamiento de los datos se realizó un análisis exploratorio con el fin de verificar la presencia de puntos atípicos en

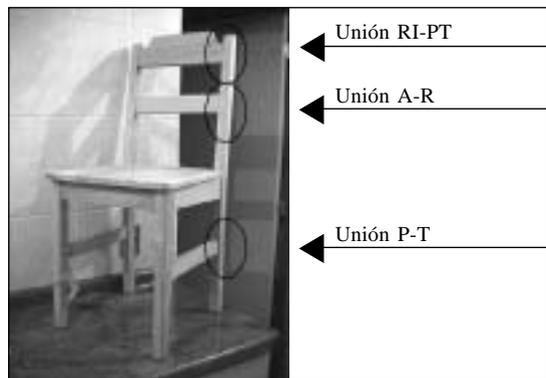


Figura 2: Puntos de medición.
Measuring point.

las mediciones, encontrándose que no existen tales puntos que deban ser excluidos del análisis.

Como las mediciones incluyen datos que fueron tomados desde ambos lados de cada una de las sillas, se obtuvo un resumen estadístico de cada variable que incluyó medidas de tendencia central, variabilidad y forma, obteniéndose valores para los coeficientes de asimetría (skewness) y curtosis (kurtosis) en ambas variables dentro del rango ± 2 , lo que indica que los datos podrían distribuirse en forma normal y con lo cual es posible aplicar pruebas estadísticas basadas en las desviaciones estándar. Dado lo anterior, se realizó un análisis de diferencia de medias para el caso de distribuciones normales con la misma varianza, usando muestras independientes (previo chequeo de la igualdad de las desviaciones de ambas variables), el que arrojó un valor $p = 0,529$, con lo cual se establece que no existen diferencias estadísticas significativas entre las medias de ambas muestras con un nivel de significancia de un 5%, razón por la cual los datos en conjunto fueron considerados provenientes de una sola población. La muestra correspondiente a todas las observaciones (24) presenta un rango de deformación que va desde 7,7 a 23,1 mm, con un valor promedio de 13,84 mm, una desviación estándar de 3,46 mm y un coeficiente de variación de un 25%; sin embargo, la forma de distribución que tienen estos datos es desconocida. Para verificar la forma de distribución de los datos se realizó un test de normalidad a través de diferentes pruebas: Ji-cuadrado (χ^2), la cual compara la frecuencia observada de los datos con la frecuencia esperada

de una distribución normal, Shapiro-Wilks, basado en la comparación de los cuartiles de la distribución normal y los cuartiles de los datos (valor $p = 0,23$), Asimetría (skewness), basada en la simetría de los datos y utilizada para muestras pequeñas (valor $p = 0,24$), Curtosis, basada en la forma más plana o puntiaguda en la que se distribuyen los datos y utilizada para muestras pequeñas (valor $p = 0,20$), Kolmogorov-Smirnov, que calcula la máxima distancia entre la distribución acumulada de los datos y la distribución acumulada de la distribución ajustada (valor $p = 0,596$).

La prueba χ^2 no fue posible de aplicar debido al bajo número de datos, sin embargo, el resto de las pruebas indican valores p superiores a 0,10, lo que significa que no es posible rechazar la idea de que la distribución de los datos corresponda a una distribución normal con un 90% o más de confianza.

En forma gráfica, se muestra un histograma de frecuencias (figura 3) donde es posible observar que los datos de la muestra fueron divididos en 6 intervalos, representados por barras con una altura proporcional al número de observaciones que se encuentran en cada intervalo, y sobrepuesta se representa con una línea blanca una curva de distribución normal. De la misma manera, mediante un gráfico de probabilidad normal, se presenta la forma en la que se distribuyen los datos de la muestra (puntos) y qué tan próxima está dicha distribución respecto de la distribución normal que se representa mediante la línea recta. En la figura 3, las observaciones tomadas se presentan bastante próximas con respecto a la distribución normal, por lo que se asumirá normalidad en su distribución.

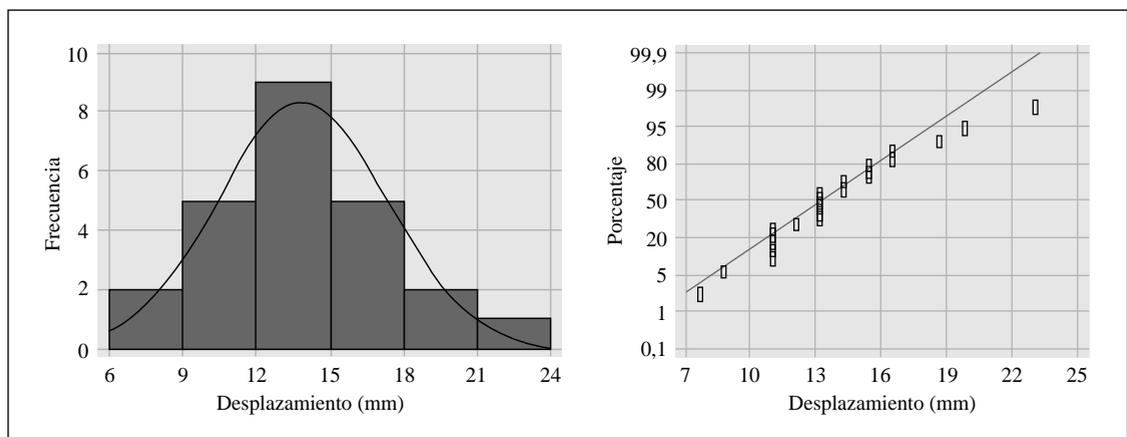


Figura 3: Forma de distribución de los datos, etapa 1.
 Data distribution, stage 1.

Los resultados para el ensayo utilizando la carga hacia adelante arrojan valores de orden similar a los obtenidos para el ensayo anterior, esto es, promedios de deformación de 9,63 mm para el lado izquierdo y 8,62 mm para el lado derecho. En ambos casos el coeficiente de variación obtenido para los valores se encuentra dentro del rango aceptable para este tipo de materiales.

Un procedimiento idéntico al de la etapa anterior fue llevado a cabo para el análisis de la información recopilada en la segunda etapa del ensayo, encontrándose inicialmente que no existen observaciones atípicas que deban ser suprimidas. La información estadística obtenida respecto del promedio, varianza y desviación estándar, mínimo y máximo de cada variable (lado izquierdo y derecho), y los valores obtenidos para los coeficientes de asimetría y curtosis, justifican la realización de pruebas estadísticas basadas en las desviaciones estándar de cada variable.

Previo chequeo de la varianza de ambas variables, se llevó a cabo un análisis de diferencia de medias, el cual indicó, con un nivel de confianza del 95%, que las medias de ambas variables no se diferencian estadísticamente (valor $p = 0,45$). Luego, es posible considerar los datos tomados en ambos lados como submuestras y doblar de esta forma el tamaño de la muestra ($n=24$). Basado en lo anterior, se tiene que el promedio de las observaciones alcanza 9,12 mm de desplazamiento con una desviación estándar de 3,19 mm; sin embargo, la información de la forma en la cual se distribuyen los datos aún no es conocida. El test de normalidad (basado en la comparación de cuartiles, dado que la prueba χ^2 no pudo ser efectuada por el bajo número de

muestras) para esta variable arrojó un valor $p = 0,14$, lo que significa que no se puede rechazar la hipótesis que plantea una distribución normal de los datos, con un 90% de confianza. La figura 4 muestra en forma gráfica la aproximación de la distribución de los datos con respecto a la distribución normal, observándose bastante cercanía en ambas curvas.

Es importante destacar que de acuerdo a lo establecido por la norma utilizada en los ensayos, la aplicación de cargas (hacia adelante y atrás) debe realizarse en forma secuencial sobre las mismas estructuras. En este caso se realizó en primer lugar el ensayo con carga hacia atrás arrojando un valor promedio mayor (13,84 mm) que el correspondiente al registrado con la carga hacia adelante (9,12 mm). Esta diferencia podría deberse al efecto dinámico que si bien no está considerado en este análisis está presente al inicio de la etapa 2, dado que la estructura estuvo sometida a la acción de las cargas por un periodo de 3.000 ciclos antes de ser evaluada en la segunda condición.

Tal y como se mencionó anteriormente, el análisis efectuado corresponde a un análisis de tipo estático, el cual arroja resultados de desplazamiento y esfuerzos asociados a la estructura de acuerdo a las condiciones de carga evaluadas. La figura 5 muestra la estructura utilizada en el análisis con su correspondiente malla (50% de precisión), además de las cargas utilizadas (P_1 y P_2) y condiciones de borde (patas delanteras con movimiento restringido en los tres ejes y con rotación disponible sólo en el eje y ; patas traseras sólo con movimiento restringido en el eje y).

En primer término, se obtiene un vector general de desplazamiento que considera el movimien-

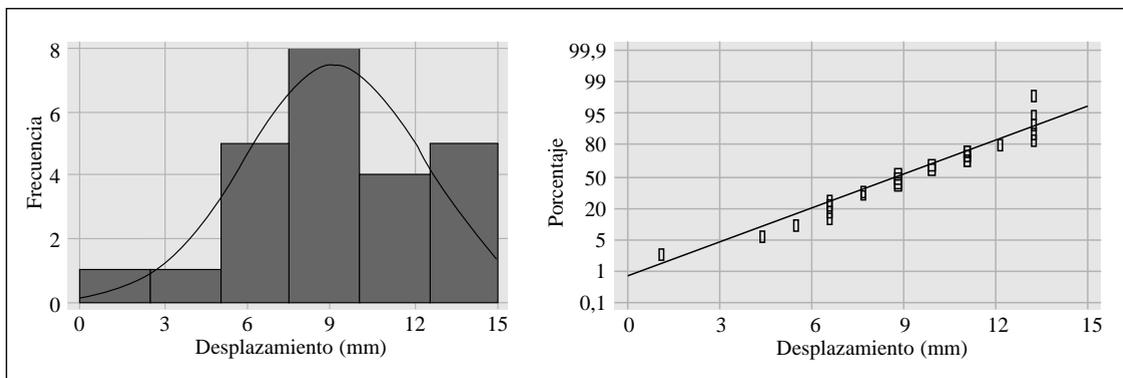


Figura 4: Forma de distribución de los datos, etapa 2.
Data distribution, stage 2.

to que adquiere la estructura en los tres ejes de simetría. El vector alcanza un valor máximo de 28,93 mm en la zona inferior del respaldo, componente que recibe la acción directa de la carga P_2 y por ende presenta el mayor valor de desplazamiento respecto de su posición original. Dicho valor disminuye hasta alcanzar 12,40 mm en la zona de unión del respaldo con el asiento y se anula en la zona de las patas delanteras que actúan como apoyo del movimiento y por consiguiente no presentan desplazamiento. La ecuación general de desplazamiento involucra componentes en las direcciones x, y, z, razón por la cual es importante visualizar cada uno de los ejes por separado. Es así como para la dirección x se observan los mayores valores de desplazamiento en todos y cada uno de los componentes de la estructura, esto debido a que corresponde al eje principal de movimiento, pues la carga P_2 actúa en este eje.

Para el eje y, a pesar que de acuerdo a las restricciones del modelo no debería existir movimiento en este eje, se observa un desplazamiento que si bien es bastante pequeño, no es igual a cero. Esto se debe a que tanto las condiciones de borde como las cargas en este tipo de análisis (FEA) deben ser nodales y dada la geometría del modelo no existe un nodo central en la estructura donde pueda ser aplicada la carga, por lo que necesariamente el punto de aplicación de ésta fue desplazado al nodo más próximo, generando un pequeño movimiento en este eje. Finalmente, en el eje z (eje donde actúa P_1) se observan desplazamientos máximos de 12,70 mm que corresponden al levantamiento de la estructura (respecto del suelo) por efecto de la acción de la carga P_2 .

En términos generales, la zona de mayor desplazamiento respecto de su posición original corresponde al respaldo de la estructura por efecto de la acción de la carga que hace desplazarla,

mientras que la zona de menor movimiento corresponde a las patas delanteras que actúan como apoyo del movimiento (valores negativos corresponden a pequeños movimientos en dirección opuesta a la inicialmente definida).

Como segundo resultado, es posible encontrar un tensor de esfuerzos, lo cual indica las diferentes condiciones que alcanza la estructura al ser sometida a la acción de las cargas (P_1 , en la zona del asiento y P_2 , en el respaldo inferior). Este análisis se realiza utilizando dos teorías: la máxima energía de distorsión (Von Mises) y el máximo esfuerzo de corte (Tresca). Es así como, de acuerdo a la teoría de Von Mises, la carta de colores indica que la zona de máximo esfuerzo en la estructura corresponde a las patas delanteras que alcanzan un valor máximo de 35,75 N/mm² (en compresión), situación esperada dado que esta zona corresponde al único sector de apoyo de la estructura. El resto de la estructura presenta valores bastante bajos, salvo algunas zonas puntuales como aquellas donde actúan las cargas (asiento y respaldo inferior), además de aquella donde se une el respaldo y el asiento que corresponde al sector donde se genera el mayor valor de momento frente a la acción de la carga.

De acuerdo a la teoría de Tresca (esfuerzo máximo de corte), se presenta la misma tendencia anterior, es decir, la zona de máximo esfuerzo corresponde a las patas delanteras, alcanzando un valor de 36,05 N/mm². El resto de la estructura se presenta con una distribución de esfuerzos similar al obtenido en el análisis anterior, indicando como zonas importantes de destacar aquellas donde están aplicadas las cargas P_1 y P_2 (respaldo inferior y asiento, respectivamente) y la zona de unión entre la pata trasera y el asiento.

Si bien ambas teorías se utilizan para comparar los esfuerzos máximos alcanzados con el es-

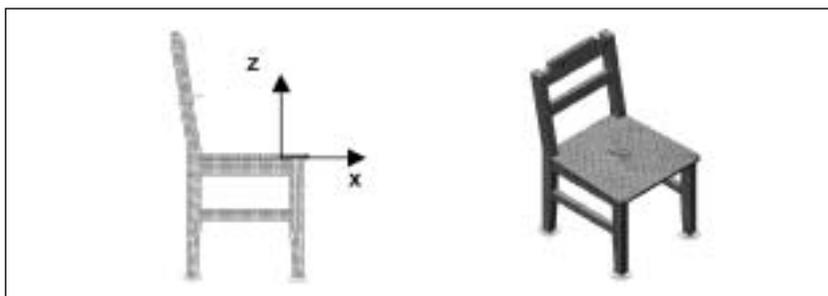


Figura 5: Modelo con precisión de 50%, Algor.
 Algor model accuracy 50%.

fuerzo máximo de fluencia para materiales isotrópicos, en este caso se utilizó el valor correspondiente al esfuerzo en el límite proporcional (σ_{lp}), citado por bibliografía para el pino radiata, que corresponde a 37,30 N/mm² en flexión y 37,00 N/mm² en compresión (paralela) para dicha comparación. De acuerdo a esto, los valores máximos alcanzados por la estructura están, en ambos casos, por debajo de los citados, razón por la cual se estima que bajo la acción de estas cargas estáticas la estructura no alcanza a sobrepasar su límite elástico, produciendo una deformación recuperable después que éstas se liberan.

El mismo análisis efectuado utilizando la carga en la dirección opuesta e invirtiendo las condiciones de restricción para el movimiento de las patas delanteras y traseras arroja los mismos valores antes descritos. Esto es, un valor máximo de desplazamiento general de 28,93 mm, el que se descompone en 26,40 mm para el eje x, 0,25 mm para el eje y, en tanto que para el eje z se alcanzan 12,17 mm.

Paralelamente, los esfuerzos máximos alcanzados corresponden a 35,75 N/mm², de acuerdo a la teoría de máxima energía de distorsión y 35,05 N/mm² para la teoría del máximo esfuerzo de corte (Tresca).

Con el fin de determinar la proximidad de la simulación del comportamiento estructural y los resultados obtenidos a través de la experimentación se plantea la hipótesis que persigue verificar si la media del valor obtenido mediante la determinación experimental (μ) es o no igual a la media del valor obtenido con el computador mediante el análisis de elementos finitos (μ_0). Esto es, $H_0: \mu = \mu_0$ y $H_1: \mu \neq \mu_0$

Antes de proceder al análisis, es necesario recordar que la posición del instrumento utilizado para la determinación experimental (orientación angular de 45°) corresponde a un desplazamiento medido en el plano z-x. Basado en lo anterior, y considerando que el desplazamiento que se produce en el eje y es casi nulo, se utilizó el desplazamiento general de la estructura en la zona contigua a la ubicación del instrumento de medición que corresponde a la zona con un promedio para μ_0 de 10,33 mm (calculado con los valores extremos de esta zona que corresponden a 8,26 y 12,40 mm). Adicionalmente, se establece que la comparación se realizó con los datos obtenidos en la etapa 1 del ensayo, pues los desplazamientos alcanzados en la etapa 2 del ensayo se ven afectados por la condición dinámica de la etapa anterior.

Como resultado de este análisis se obtienen evidencias estadísticas para rechazar H_0 (valor $p = 0,000005$), con un nivel de significación del 5%, lo que significa que la media poblacional difiere del valor obtenido mediante el método de elementos finitos. Los resultados anteriores no son del todo concluyentes debido a dos consideraciones de importancia:

- el desplazamiento en el eje y no es nulo, debido a la posición asimétrica del nodo donde fue aplicada la carga en el respaldo (deficiencia del modelo).
- la deformación μ_0 considerada para la comparación corresponde a un valor promedio que entrega FEA. El rango de desplazamiento es bastante amplio, por lo que si consideramos otro valor para μ_0 más cercano al máximo, el valor p aumenta hasta llegar a un punto en el cual la hipótesis de igualdad no puede ser rechazada.

Ahora bien, si se considera que el triángulo formado por ambas componentes del desplazamiento medido es equilátero, se establece que la medición experimental corresponde a:

$$d_{exp}^2 = d_x^2 + d_z^2 \quad d_{exp} = \sqrt{d_x^2 + d_z^2} \quad d_x = d_z = \frac{d_{exp}}{\sqrt{2}}$$

Donde d_{exp} corresponde al desplazamiento medido con el instrumento, d_x y d_z corresponden a las componentes unitarias de los desplazamientos en cada eje. Como el triángulo formado es equilátero, ambas componentes son iguales. Finalmente, las mediciones deben ser corregidas y con estos nuevos valores se realizó nuevamente una prueba t para detectar si la media poblacional obtenida en cada eje mediante la experimentación es igual o distinta al valor obtenido por el método de elementos finitos. En este caso los valores de μ_0 corresponden a 7,8 mm para el eje x, mientras que en el eje z se utilizó un valor de 9,36 mm. El resultado de ambas pruebas indica, con un nivel de significancia del 5%, en el eje x que la hipótesis de igualdad debe rechazarse (valor $p = 0,0005$), mientras que en el eje z la misma hipótesis no puede ser rechazada.

CONCLUSIONES

- El análisis cualitativo de las estructuras indica que todas ellas superan la condición estableci-

- da por el ensayo normalizado, es decir, todas cumplen la totalidad de ciclos necesarios (3.000 por etapa) sin presentar fallas aparentes en su estructura.
- El análisis cuantitativo realizado para la condición de carga estática indica que las deformaciones registradas alcanzan valores promedio de 13,8 mm en la zona de unión entre el respaldo y el asiento. Mediciones realizadas a ambos lados de la estructura arrojan valores de deformación que no difieren significativamente.
 - El análisis estático realizado con FEA indica que el desplazamiento general de la estructura alcanza valores promedio de 10,33 mm respecto de la posición original de la estructura, en la zona de unión entre el asiento y la pata trasera. Al considerar desplazamientos por cada eje de simetría se encuentra en el eje x valores promedios de 7,80 mm, mientras que en el eje y los valores alcanzados corresponden a 9,36 mm. Para el eje z, en tanto, los valores alcanzados corresponden 0,09 mm.
 - Al comparar valores obtenidos para el análisis estático por ambos métodos se concluye que si bien los promedios de deformación son similares, estadísticamente presentan diferencias.
 - Los esfuerzos máximos encontrados para la estructura bajo la acción de las cargas evaluadas corresponden a $35,75 \text{ N/mm}^2$ y se encuentran por debajo del límite proporcional para esta especie.
 - El modelo geométrico representa el paso de mayor importancia en el análisis de elementos finitos, pues de la continuidad y certeza de éste dependerán los resultados del análisis.

BIBLIOGRAFIA

- (1) ECKELMAN, C., J. ZHANG. The bending moment resistance of single-dowel corner joints in case construction, *Forest Products Journal*, 1993, vol. 43, N° 6, p. 19-24.
- (2) ECKELMAN, C., J. ZHANG. Rational desing of multi-dowel corner joints in case construction, *Forest Products Journal*, 1993, vol. 43, N° (11/12), p. 52-58.
- (3) BACHMANN, G., W. HASSLER. The strength of various furniture constructions, their components and fasteners. Part 1, *Holztechnologie*, 1975, vol. 16, N° 4, p. 210-221.
- (4) ECKELMAN, C.A. Strength of furniture joints constructed with through-bolts and dowel-nuts, *Forest Products Journal*, 1989, vol. 39, N° (11/12), p. 41-48
- (5) PINEDO, P., G. GOTELLI. Ensayos cíclicos de resistencia en uniones de esquina para muebles, Seminario de Título presentado al Departamento de Ingeniería en Maderas, Facultad de Ingeniería, Universidad del Bío-Bío, Chile, 1999. p. 11-26.
- (6) MENENDEZ, C., R. LUENGO. Introducción de Tecnología de Manufactura Avanzada en el Proceso de Fabricación de la Industria del Mueble, Proyecto de Título presentado al Departamento de Ingeniería Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad del Bío-Bío, Chile, 1997, p. 7-32.
- (7) MATAMALA, R., C. SOTO. Comportamiento, Diagnóstico y Propuesta de Desarrollo para la Industria del Mueble de Madera en la VIII Región del Bío-Bío, Proyecto de Título presentado al Departamento de Ingeniería Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad del Bío-Bío, Chile, 2000, p. 37-41.
- (8) DIAZ C. Estrategias de comercialización del Mueble de Madera en el Mercado Internacional (USA), Proyecto de Título presentado al Departamento de Ingeniería Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad del Bío-Bío, Chile, 2000, p. 11-22.
- (9) ECKELMAN C.A. Performance testing of side chairs. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 1999, vol. 57, p. 227-234.
- (10) ECKELMAN C., et al., A structural desing model for sofa seat frames equipped with sinusoidal-type springs, *Forest Products Journal*, 2000, vol. 50 N° 3, p. 49-57.
- (11) ECKELMAN, C., CH. HO. The use of performance test in evaluating joint and fastener strength in case furniture, *Forest Products Journal*, 1994, vol. 44, N° 9, p. 47-53.
- (12) ECKELMAN, C., W. LIU. Effect of number fasteners on the strength of corner joints for cases, *Forest Products Journal*, 1999, vol. 48, N° 1, p. 93-95.
- (13) ECKELMAN C.A. Performance testing of furniture. Part 1: underlying concepts, *Forest Products Journal*, 1988, vol. 38, N° 3, p. 44-48
- (14) ECKELMAN C.A. Performance testing of furniture. Part 2ª multipurpose universal structural performance test method, *Forest Products Journal*, 1988, vol. 38, N° 4, p. 13-18.
- (15) HUEBNER, K., E. THORNTON. *The Finite element methods for engineers*, Second ed., John Wiley & Sons, Inc. USA, 1987, p. 108-123.
- (16) ZIENKIEWICZ O. *Method of finite elements*. Arkady, Warsaw, 1972, p. 48-68.
- (17) CINCUNEGUI D. Ingeniería Asistida: Entorno profesional en sistemas CAD y productos relacionados, *Revista CadXpress* (Argentina), 1998, Año 2, N° 15, p. 22-24.
- (18) ECKELMAN, C.A., S.K. SUDDARTH. Analysis and desing of furniture frames, *Wood Science and Technology*, 1969, vol. 3, p. 239-255.
- (19) ECKELMANN, C.A., F.E.GOODRICK. Computer analysis of furniture frames, *Wood Science and Technology*, 1969, vol. 9, p. 477-489.
- (20) ECKELMANN, C.A. The siffness matrix methods of furniture frames analysis, *Wood Science and Technology*, 1970, vol. 4, p. 221-231.
- (21) ECKELMANN CA. Strength of furniture joints constructed with through-bolts and dowel nuts, *Forest Products Journal*, 1979, vol. 39, N° (11/12), p. 41-48.
- (22) SMARDZEWSKI, Stability of cabinet furniture backing boards, *Wood Science and Technology*, 1993, vol. 28, p. 4-44.
- (23) POLETILO, J., L. TROZT. Finamente Calculado: Entorno profesional en sistemas CAD y productos relacionados, *Revista CadXpress* (Argentina), 1998, Año 2, N° 15, p. 26-33.
- (24) FUENTEALBA, C., E. BARADIT. Determinación de las constantes elásticas en *Pinus radiata* D. Don por ultrasonido: módulos de elasticidad, módulos de rigidez y razón de Poisson. Tesis de Magíster, 2001, p. 48-63.

Recibido: 10.11.04.
Aceptado: 24.03.05.

REGLAMENTO DE PUBLICACIONES REVISTA BOSQUE

BOSQUE acepta trabajos originales relacionados con las Ciencias Forestales en las modalidades de artículos, notas científicas y técnicas, opiniones, reseñas y revisiones bibliográficas, más avances de investigación en castellano e inglés.

Se exige que el material enviado a BOSQUE no haya sido publicado ni enviado a otros organismos de difusión, cualquiera sea su tipo, exceptuando las tesis de licenciatura o magister.

ARTÍCULOS. Informan acerca de una investigación inédita de carácter científico, basada en bibliografía actualizada y datos empíricos.

OPINIONES. Analizan, desde un punto de vista personal o con apoyo bibliográfico, un tema de actualidad relacionado con el carácter de la revista, pudiendo originar una controversia. El Editor puede invitar a contribuir con una opinión a un experto en algún tema de interés o de controversia. Se publican máximo dos *opiniones* por número.

NOTAS TÉCNICAS Y CIENTÍFICAS. Describen metodologías o técnicas nuevas y descubrimientos significativos para el sector forestal.

RESEÑAS Y REVISIONES BIBLIOGRÁFICAS. Analizan y critican una publicación de actualidad o un tema específico.

AVANCES DE INVESTIGACIÓN. Informan acerca de investigaciones en desarrollo, con resultados preliminares.

Formato

Trabajo escrito: impreso tamaño carta (28x21 cm), márgenes de 2,0 cm por lado, interlineado a espacio y medio, letra Times New Roman, tamaño 12, con numeración de página en el extremo inferior derecho. La **extensión máxima** (incluidos cuadros y figuras) será de 30 páginas para los artículos y 18 para las otras contribuciones.

El **título principal** se presentará en letras bajas y negritas, a diferencia de los títulos de secciones que se escribirán en letras altas. En este título deberá omitirse la mención de los autores de nombres científicos que, sin embargo, sí se presentarán la primera vez que se mencionen en el texto.

Las ecuaciones se escribirán en letra cursiva y se numerarán en el margen derecho con paréntesis cuadrados [], luego, en el texto, se mencionarán de acuerdo a esta numeración.

Las unidades de medida utilizadas en el texto deberán circunscribirse al Sistema Internacional (SI), siempre que exista el equivalente.

En la notación numérica, los decimales deberán ser separados por coma (,) y los miles por punto (.).

Las citas bibliográficas en el texto serán del tipo **numérico, por orden de aparición**, entre paréntesis redondos (): ejemplo: (25); cuando se agrupen, deberán separarse con comas, ejemplo: (12, 25, 32). Al utilizar vocativos, la cita deberá asociárseles inmediatamente después, ejemplo: Según Gutiérrez (5) y Burschel *et al.* (16).

Figuras, fotografías y cuadros: el espacio total que éstas ocupen en el trabajo deberá ser menor al 50% de todo el impreso. Deben incluir un título numerado en forma consecutiva, autoexplicativo en castellano e inglés. En el caso de figuras y fotografías el título va en el margen inferior y en el caso de cuadros en el margen superior. Todos con alta resolución tal, que permitan ser reducidos sin perder legibilidad. Sólo se trabaja en blanco, negro y tonos de grises.

Dentro del texto se debe indicar claramente la ubicación de figuras, fotografías y cuadros, que deben ser agregados al final del texto y grabados en archivos separados.

Bibliografía: se regirá según Norma ISO 690 e ISO 690-2 (referencia de documentos electrónicos):

Libro

(12) SNEDECOR, G., W. COCHRAN. *Métodos estadísticos*. 8ª ed, México D.F.: Continental. 1981. 703 p.

Capítulo de Libro

Libro y capítulo son del mismo autor

(4) PARKER, T.J., W.D. HASWELL. *A text-book of zoology*. 5th ed, vol. 1, London: Macmillan. 1930. Section 12, Phylum Mollusca, p. 663-782.

Libro y capítulo son de autores diferentes

(6) WRIGLEY, E.A. Parish registers and the historian. In: STEEL, D.J. *National index of parish registers*. London: Society of Genealogists, 1968, vol. 3, p. 167.