



5º CONGRESO FORESTAL
ESPAÑOL

5º Congreso Forestal Español

Montes y sociedad: Saber qué hacer.

REF.: 5CFE01-610

Editores: S.E.C.F. - Junta de Castilla y León
Ávila, 21 a 25 de septiembre de 2009
ISBN: 978-84-936854-6-1
© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Diseño y análisis de perfiles estructurales de madera densificada conformada con refuerzos de fibras

CABRERO, J.M.¹, HEIDUSCHKE, A.² y HALLER, P.²

¹ Departamento de Estructuras. Universidad de Navarra.

² Instituto de la Construcción en Madera. Universidad Tecnológica de Dresde.

Resumen

La sociedad es cada vez más consciente del valor de los recursos naturales, y por ello demanda un uso eficiente de los mismos. Ése ha de ser también un objetivo al diseñar estructuras de madera. Habitualmente se emplean secciones macizas, circulares o rectangulares, que no obtienen un comportamiento óptimo, y que por tanto no aprovechan al máximo las propiedades y posibilidades de la madera. En el Instituto de Construcción en Madera de la Universidad Tecnológica de Dresde se ha desarrollado un proceso para la fabricación de perfiles estructurales de madera eficientes. Aprovechando el efecto memoria de la madera densificada, paneles de madera se transforman fácilmente en todo tipo de secciones prismáticas, cerradas o abiertas. El perfil resultante combina economía, uso eficiente del material y rendimiento estructural óptimo. Junto con un mínimo refuerzo exterior de fibras, se mejoran las características mecánicas de la madera, y se la protege de las inclemencias atmosféricas. Los perfiles así realizados poseen unas excepcionales características resistentes, como demuestran los ensayos experimentales realizados. Se presenta el modelo desarrollado para el análisis estructural de este nuevo concepto de aplicación de la madera. Basado en teorías clásicas para materiales compuestos, describe adecuadamente el comportamiento estructural de la madera reforzada con fibras: predice con un error inferior al 10% los resultados experimentales.

Palabras clave

Eficiencia, fibra de vidrio, procesos de transformación, modelos teóricos, ensayos experimentales, materiales compuestos

1. Introducción

La sociedad es cada vez más consciente del valor de los recursos naturales, y por ello demanda un uso eficiente de los mismos. No es aventurado pensar que en un futuro un uso eficiente de los materiales se volverá un factor de diseño, y habrá de ser también un objetivo al diseñar estructuras de madera.

El bosque no es sólo uno de los mayores, sino también de los más baratos productores de material. Pero diversos motivos han reducido el uso de la madera en las aplicaciones técnicas y constructivas: su bajo espectro resistente, en comparación con otros materiales estructurales; su dependencia direccional, es decir, su anisotropía; y la escasa resistencia biológica de algunas maderas.

La resistencia y la rigidez del material juegan un papel fundamental para las aplicaciones estructurales. Diversas investigaciones muestran que ambas características se relacionan en gran medida con la densidad.





Figura 1. Proceso de fabricación de los tubos de madera conformada.

La madera puede densificarse en dirección perpendicular a la fibra a una temperatura aproximada de 140°C (Kollmann et al, 1975). Mediante la densificación se incrementan la rigidez y la resistencia proporcionalmente a la densidad, en un factor aproximado a dos veces y media en el caso de madera de conífera (Haller & Wehsener, 2004).

El rendimiento estructural no depende únicamente de las propiedades del material. Los elementos estructurales deben transmitir las fuerzas y momentos con seguridad, y cumplir también los requerimientos de servicio. El parámetro principal para ambas tareas es el momento de inercia de la sección transversal, que influye tanto en la resistencia como en la deformación de los elementos estructurales. Normalmente se emplean secciones que no obtienen un comportamiento óptimo, circulares o rectangulares macizas, y por tanto no se aprovechan al máximo las propiedades de la madera. Estas secciones habituales en madera obtienen un rendimiento inferior a las empleadas para otros materiales estructurales. La competitividad del material bruto (la madera) generado en el bosque es excelente, pero es perdida en el proceso de transformación.

Partiendo de estos planteamientos, en el Instituto de la Construcción en Madera de la Universidad Tecnológica de Dresde se ha desarrollado y patentado un proceso para la fabricación de perfiles estructurales de madera (Haller, 2007). A partir de paneles de madera de abeto densificada se pueden producir secciones transversales prismáticas revirtiendo la densificación mediante calor y humedad (Figura 1). Aprovechando el efecto memoria de la madera densificada, paneles gruesos de esta madera se transforman fácilmente en todo tipo de secciones prismáticas, cerradas o abiertas. El perfil resultante combina economía, uso eficiente del material y rendimiento estructural óptimo. En este artículo se aplica a la producción de secciones circulares cerradas. Este tipo de secciones se comportan bien para esfuerzos axiales, por lo que están indicadas para pilares.

Se propone además el recubrimiento exterior con fibras tales como vidrio o carbono. Con este refuerzo adicional de fibras en la cara exterior del perfil se refuerza la madera en la dirección perpendicular a la fibra, evitando su rotura frágil. Además, mientras la madera se beneficia de las sobresalientes propiedades mecánicas de la fibra, ésta lo hace del bajo precio y las ventajas ecológicas de aquélla.

Tabla 1. Propiedades mecánicas empleadas para la madera y la fibra.
 * valor medio de nueve ensayos (desviación estándar), x= longitudinal (0°), y=tangencial=radial(90°)

Propiedad del material	Abr.	Unidad	Madera (parcialmente densificada)	Refuerzo
Densidad	ρ	[kg/m ³]	582 (110)*	1800
Resistencia a flexión	$f_{m,0}$	[N/mm ²]	105,2 (18,6)*	240
Resistencia a compresión	$f_{c,0}$	[N/mm ²]	60,5 (12,1)*	240
	$f_{c,90}$		7,5	70
Resistencia a tracción	$f_{t,0}$	[N/mm ²]	55,9	240
	$f_{t,90}$		1,4	50
Resistencia a cortante	τ_{xy}	[N/mm ²]	8,8	25
Módulo de elasticidad	E_0	[N/mm ²]	16150 (930)*	26600
	E_{90}		1340	6900
Módulo de cortante	G_{xy}	[N/mm ²]	840	3000
Coeficiente de Poisson	ν_{xy}	--	0,04	0,07
	ν_{yx}		0,35	0,26

2. Objetivos

La investigación aquí presentada plantea el desarrollo de un modelo numérico de elementos finitos adecuado para el análisis de tubos de madera densificada reforzada con un *composite* de fibra de vidrio y epoxi. El modelo se validará con los resultados experimentales disponibles.

3. Metodología

3.1. Propiedades de la madera y el refuerzo de fibra

Los perfiles tubulares de madera conformada analizados fueron hechos a partir de madera de abeto *Picea abies*, parcialmente densificada a un 75% de su tamaño original. Las propiedades mecánicas de la madera densificada se obtuvieron a partir de ensayos de tres puntos de flexión, y de compresión en especímenes pequeños y sin defectos, de acuerdo con las normas alemanas DIN 52186 y 52185. El resto de propiedades elásticas se derivaron a partir de las relaciones habituales para madera de conífera definidas en Bodig & Jayne (1982). Las propiedades resistentes son las obtenidas en los ensayos experimentales, según los valores codificados en la norma alemana (DIN 1052).

Las propiedades del *composite* de fibra de vidrio y epoxi se obtuvieron a partir de los valores nominales para la fibra de vidrio-E embebida en una matriz epoxi. Para ello se emplearon las fórmulas de micromecánica de Tsai (1992). En todos los cálculos se estimó una fracción de volumen de fibra de 0,33. En cuanto a las propiedades resistentes, se emplean los valores característicos propuestos en Fiberline (2003). Al emplear la primera rotura (*FPF*, *First Ply Failure*) como criterio de diseño, y romper siempre en primer lugar la madera, dichas propiedades no son relevantes en el modelo numérico desarrollado. Las propiedades del material evaluadas se resumen en la Tabla 1.

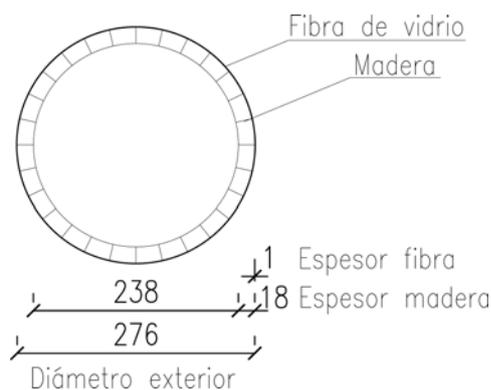


Figura 2. Geometría de los tubos analizados

3.2. Propiedades geométricas

La Figura 2 muestra la geometría del tubo analizado. Se trata de un tubo de aproximadamente 28 cm de diámetro exterior. El espesor medio de la madera es 18 mm. En los tubos reforzados, el refuerzo exterior tiene aproximadamente un espesor de 1 mm. Para un tubo de 2,5 m de altura, el peso propio es 30 kg (correspondientes a la madera), al que hay que añadir 3,9 kg del refuerzo.

3.3. Modelo de elementos finitos

Para el desarrollo del modelo numérico de elementos finitos se empleó el paquete de software comercial ANSYS 11.0.

La geometría del modelo se corresponde con la de los tubos ensayados, mostrada en la Figura 2. Se adopta una deformación inicial para el modelado de las imperfecciones, correspondiente a una combinación de los modos de pandeo local y de Euler del tubo sin reforzar.

Se usaron elementos sólidos, tipo SOLID 46 (SAS IP Inc, 2007). Este elemento es una versión del elemento estructural sólido de ocho nodos con la posibilidad de definir distintas capas. Está adaptada para el modelado de láminas gruesas o sólidos. Para cada capa, requiere la definición de su espesor, su dirección (ángulo) del material, y las propiedades ortotrópicas correspondientes. Tanto la madera como la fibra se consideraron materiales ortotrópicos en el plano del elemento, así como materiales elástico lineales. Los valores empleados se corresponden con los presentados en la Tabla 1.

Para la inclusión de la rotura de la madera y la fibra en el modelo se optó por el criterio de rotura de Tsai-Wu (Tsai, 1992). En este modelo se define la envolvente de rotura mediante una superficie cuadrática. ANSYS implementa de un modo particular algunos parámetros de este modelo (SAS IP Inc, 2007), por lo que, contrariamente a lo habitual, en el presente estudio, se considera que se alcanza la carga de rotura cuando el ratio de resistencia derivado supera la unidad.

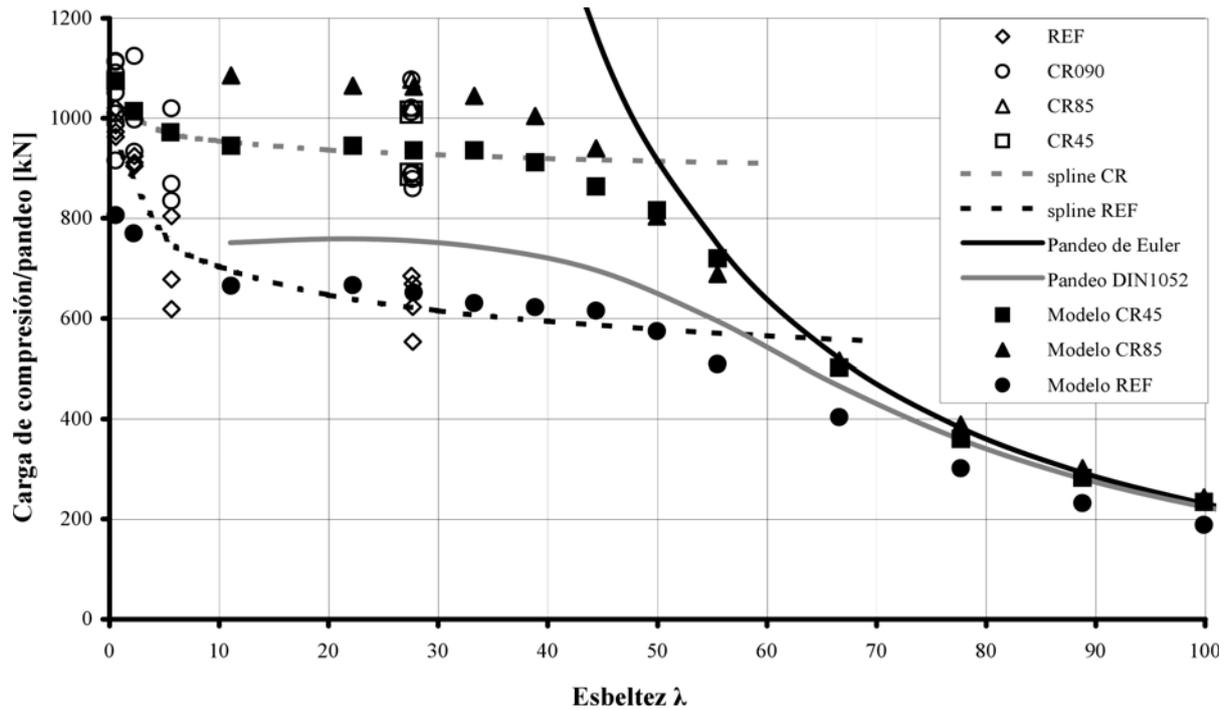


Figura 3. Relaciones carga axial máxima-esbeltez para tubos sin reforzar (REF) y reforzados (CRXX). Comparativa entre los resultados experimentales y el modelo numérico desarrollado.

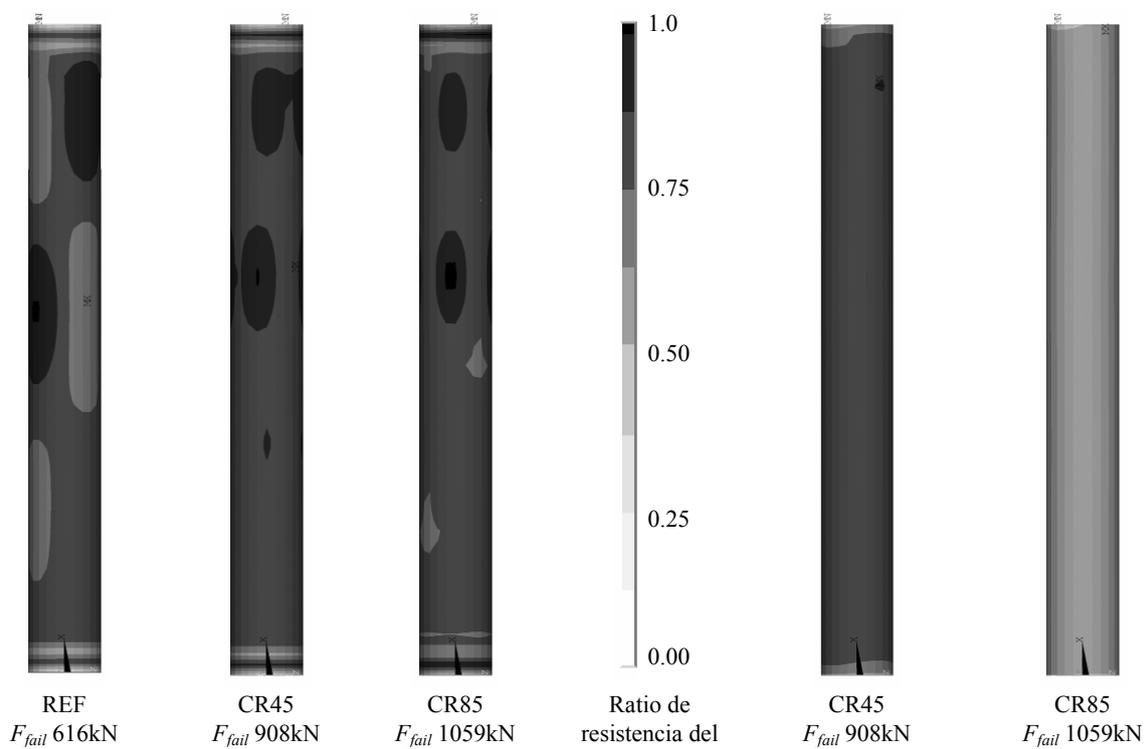


Figura 4. Estado del criterio de rotura (según el ratio de resistencia) en los materiales del tubo en el momento de la primera rotura para los tubos de 2,5 m de altura. Se indica además la carga de rotura en cada caso, F_{fail} .

La carga de compresión se modeló como una presión uniforme aplicada en la superficie superior del tubo. Las condiciones de contorno se corresponden con las experimentales: todos los grados de libertad traslacionales de ambos extremos del tubo fueron restringidos, salvo el correspondiente a la dirección longitudinal (dirección de la carga) en el superior.

Los ensayos experimentales disponibles a compresión (Cabi, 2006; Heiduschke et al, 2008) fueron empleados para validar el modelo. Las propiedades geométricas de la sección transversal y sus materiales se corresponden con lo descrito previamente en las secciones 3.1. y 3.2., pero abarcan un mayor rango de esbelteces λ . Las longitudes de los ensayos varían entre 50, 200, 500 y 2500 mm; el modelo numérico ha permitido analizar tubos hasta una longitud de 10 m.

En los ensayos, como se indicó en la sección 3.2., también se emplean refuerzos de fibras diversos, con un 1 mm. de espesor. Las series CR45 y CR85 se corresponden con un refuerzo de fibra de vidrio y epoxi de un peso aproximado de 900 g/m^2 , y una orientación de $\pm 45^\circ$ (CR45) y $\pm 85^\circ$ (CR85) respecto a la directriz del tubo. La serie CR090, en cambio, se corresponde con un tejido común *cross-ply* de fibra de vidrio, con orientación 0° - 90° . Tres capas de este tejido, con un peso textil aproximado de 160 g/m^2 cada una, conforman el refuerzo de esta última serie de ensayos.

4. Resultados

En la Figura 3 se presentan los resultados del modelo numérico desarrollado y su comparación con los resultados experimentales. Dado que la altura máxima ensayada hasta el momento es de 2,5 m, los resultados experimentales abarcan esbelteces menores a 28. El modelo numérico se ha empleado además para la predicción de las cargas compresivas máximas para rangos de alturas todavía no ensayados, hasta 10 m de altura.

Los resultados del análisis numérico concuerdan con los datos experimentales disponibles. El modelo es capaz de predecir la capacidad de carga de los tubos con gran precisión. En cualquiera de los casos, el error entre el experimento y la simulación numérica es inferior al 10%.

5. Discusión

Se puede observar en los resultados la mejora en el comportamiento producida por el refuerzo de fibra. Reduce la influencia de las imperfecciones y la variabilidad natural de la madera, que claramente afectan al tubo sin reforzar (REF). La rotura de los tubos sin reforzar (REF) está dominada por la baja resistencia a tracción perpendicular de la madera, que es mejorada por una adecuada colocación de la fibra. En el caso de una altura de 2,5 m, por ejemplo, disponer el refuerzo con un ángulo de 45° (CR45) aumenta la compresión máxima en casi un 50% (tensión de rotura aproximada de 60 N/mm^2). Para la misma altura, se consigue un 80% más de resistencia con el refuerzo colocado a 85° (fibra colocada prácticamente perpendicular a la dirección longitudinal de la madera), con una tensión máxima resultante de casi 65 N/mm^2 .

Al aumentar la esbeltez, la capacidad de carga de los tubos se reduce progresivamente. En la Figura 3 se incluyen además los resultados correspondientes a la fórmula de pandeo incluida en el estándar DIN 1052. Dicha formulación permite obtener resultados para el rango completo de esbelteces. Con esbelteces menores a 30, la carga de rotura se corresponde con la resistencia del material; para mayores de 70, se corresponde con la fórmula de pandeo de

Euler. Se puede observar cómo el modelo de elementos finitos es capaz de predecir la tendencia indicada por la curva normalizada (basada en los valores indicados en la Tabla 1). La estrategia de modelado, mediante el escalado de los modos de pandeo, permite reproducir y predecir el pandeo resultante para cada esbeltez, sin necesidad de adaptar el modelo en cada caso.

El tubo sin reforzar muestra siempre una resistencia inferior a los reforzados. En el caso de altas esbelteces, donde domina el pandeo global, la diferencia de resistencias no es tan elevada como cuando domina la resistencia del material o el pandeo local. El tubo reforzado a 85° posee en los casos en los que domina la resistencia del material (en lugar del pandeo global) una resistencia mayor al reforzado a 45°, aunque su diferencia no es tan elevada para esbelteces en las que afecta el pandeo global al comportamiento.

La Figura 4 muestra la distribución del criterio de rotura en los tubos en el momento de la primera rotura (que se produce en la madera). Las áreas donde puede observarse un ratio de resistencia más elevado (más próximas a la rotura, recuérdese que se considera rotura cuando dicho ratio es la unidad) se corresponden con la deformación introducida inicialmente en el modelo. Aunque el pandeo introducido no ocurra, introduce una distorsión geométrica en el modelo que permite tener en cuenta las imperfecciones materiales, sin necesidad de aplicar coeficientes de minoración en las propiedades del material.

En la Figura 4.b. se indica el estado del refuerzo de fibra en el momento de la primera rotura en la madera. Como puede observarse, el refuerzo a 45° está más próximo a la rotura (ratio de resistencia medio del 0,8) que el de 85° (ratio medio del 0,5).

6. Conclusiones

Se ha desarrollado un modelo numérico de elementos finitos para el análisis estructural de este nuevo concepto de aplicación de la madera. El modelo, basado en teorías clásicas para materiales compuestos, describe adecuadamente el comportamiento estructural de la madera reforzada con fibras: predice con un error inferior al 10% los resultados experimentales.

Tanto los resultados experimentales disponibles hasta el momento, como las previsiones del modelo numérico muestran el potencial de los perfiles para aplicaciones estructurales. Mediante la aplicación de un refuerzo de fibra de vidrio, se mejoran tanto su capacidad de carga como su ductilidad. En comparación con los perfiles sin reforzar, la resistencia se incrementa en aproximadamente un 50%. En los resultados experimentales también se muestra una mejora de la ductilidad (prácticamente nula en los tubos sin reforzar).

El modelo numérico desarrollado simula y analiza el comportamiento estructural de los tubos y sus mecanismos de rotura. Su uso proporciona un mayor entendimiento del comportamiento de pilares de madera de sección transversal circular hueca. Permite el análisis de parámetros tales como la esbeltez, el espesor de la pared de madera y la disposición del refuerzo de fibra. Es una herramienta necesaria para el desarrollo de esta nueva tecnología. Junto con la campaña experimental en desarrollo, permitirá la obtención de reglas de diseño adecuadas para el empleo de estos perfiles.

Los perfiles de madera aquí presentados se pueden aplicar en una gran variedad de situaciones en la construcción. Desarrollos innovadores como estos pueden suponer la base para el futuro desarrollo de estructuras de madera con un alto rendimiento, especialmente en el caso de elementos altamente cargados con grandes secciones.

7. Agradecimientos

La investigación presentada forma parte de una estancia del primer autor como Becario Humboldt en el Instituto de la Construcción en Madera de la Universidad Tecnológica de Dresde. Dicha estancia fue financiada por la Fundación Alexander von Humboldt, a la que está profundamente agradecido. Parte de la investigación se inscribe dentro de un proyecto financiado por el Ministerio Federal Alemán de Educación e Investigación (BMBF – Proyecto nº 0330722A).

8. Bibliografía

BODIG, J; JAYNE, B.A; 1982. *Mechanics of Wood and Wood Composites*. Van Nostrand Reinhold Company. Nueva York

CABI, L; 2006. *Stütze aus Formholz*. Bericht zur Doktorarbeit im Ausland. Fakultät Bauingenieurwesen. Stahl- und Holzbau Institut. Technische Universität Dresden. Dresde

DIN 1052:2004-08. *Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken*. Deutsches Institut für Normung. Berlín

FIBERLINE COMPOSITES; 2003. *Fiberline Design Manual*. 2ª ed. <http://www.fiberline.com/gb/tools/designmanual.asp>

HALLER, P; WEHSENER, J.; 2004. *Festigkeitsuntersuchungen an Fichtenpressholz*. *Holz als Roh- und Werkstoff*, Vol. 62, Número 6 452 – 454

HALLER, P; 2007. *Concepts for textile reinforcements for timber structures*. *Materials and Structures*, Número 40 107 – 118

HEIDUSCHKE, A; CABRERO, J.M; MANTHEY, CH; HALLER, P; GÜNTHER, E; 2008. *Mechanical Behaviour and Life Cycle Assessment of Fibre-Reinforced Timber Profiles*. En: COST C-25: 1st Seminar (7th MC & 6th WG sessions). Dresde.

KOLLMANN, F; KUENZI, E; STAMM, A; 1975. *Principles of Wood Science and Technology*, Vol.1 y 2. Springer Verlag. Berlín.

SAS IP, INC; 2007. *ANSYS 11.0. Release 11.0 Documentation for ANSYS*. Online Documentation. SAS IP, Inc.

TSAI, S.W.; 1992. *Theory of Composites Design*. Think Composites. Dayton