

## **B 26. INFLUENCIA DE LA VARIACIÓN ESPACIAL DE LAS PROPIEDADES LOCALES EN EL COMPORTAMIENTO DEL OSB**

**Alejandro M. Bozo-González**

Ph.D. en Ingeniería Civil

Magíster en Ciencias Forestales

Ingeniero Forestal

Licenciado en Ciencias Forestales

Profesor Asistente

Departamento de Ingeniería de la Madera

Universidad de Chile

Santiago, Chile

### RESUMEN

El objetivo general del presente estudio fue la modelación del ensayo de carga estática concentrada (Concentrated Static Load test, CSL) de acuerdo a Voluntary Product Standard PS 2-92 y APA PRP-108 y a través de este ensayo determinar la influencia de la distribución espacial en las propiedades mecánicas localizadas en el comportamiento del OSB. Los objetivos específicos fueron: 1) Obtener la deflexión máxima y la carga de ruptura del ensayo de carga estática concentrada, 2) Obtener la deflexión máxima y la carga de ruptura a través de un modelo de elementos finitos usando propiedades promedios y localizadas y 3) Comparar los resultados de los ensayos con los resultados modelados para la deflexión máxima y la carga de ruptura. Para modelar la influencia de la distribución espacial en las propiedades mecánicas locales en el comportamiento del OSB, se condujo el ensayo de carga estática concentrada y se obtuvo la deflexión máxima y la carga de ruptura en forma experimental y utilizando un modelo de Elementos Finitos. Los resultados de la caracterización espacial indican que utilizar la variación de la densidad localizada en el análisis mecánico del ensayo de carga estática concentrada es más apropiado que considerar una densidad global promedio. Los resultados usando Elementos Finitos para el ensayo de carga estática concentrada usando propiedades locales es más exacto que los valores obtenidos usando propiedades globales.

**Palabras Clave: OSB, Carga estática concentrada, CSL, Elementos finitos, variación espacial**

### ABSTRACT

The general objective of this study was to model the CSL test criteria according to *Voluntary Product Standard PS 2-92* and *APA PRP-108*, and through the CSL test example determine the influence of spatial distribution in localized mechanical properties on OSB performance. The objectives of this research were to: 1) Obtain experimental maximum deflection and ultimate load under the concentrated static load test, 2) Obtain maximum

deflection and ultimate load employing a finite element model using average and localized properties, and 3) Compare the testing results and modeling results of maximum deflection and ultimate load.

To model the influence of spatial distribution in localized mechanical properties on OSB performance criteria, the CSL test was performed and maximum deflection and ultimate load were obtained experimentally and employing finite element models.

Results of the spatial characterization indicate that using local density variation in mechanical analysis for CSL behavior is more appropriate than considering an average global density. The finite element results for the CSL test using local properties produced more accurate results than those values obtained using global properties.

## **Introducción**

A pesar de los notables avances en el proceso productivo de los tableros de hojuelas orientadas (Oriented Strandboard, OSB), la variabilidad de la densidad permanece como uno de los problemas sin resolver. (Chen et al 2000). El problema de la variabilidad de la densidad ha sido el tema de múltiples investigaciones anteriores (Suchland and Xu 1989, 1991; Xu and Steiner 1995; Dai and Steiner 1993; Steiner and Dai 1994; Lang and Wolcott 1996; Lu et al. 1998; Wang and Lam 1998; Bozo et al. (a) 2002).

Todos los criterios de comportamiento se han desarrollado en función del uso final del producto independiente de la forma en que este fue fabricado (APA 1994). El principal objetivo de los programas de calidad es asegurar los requerimientos de los productos. Dos importantes atributos para los códigos de construcción, en relación al uso de los OSB en cubierta de piso y cielo, son la deflexión máxima y la carga de ruptura del OSB bajo carga estática concentrada de borde. El ensayo de carga concentrada (Concentrated static load test, CSL) consiste en una carga puntual concentrada aplicada a una probeta de OSB localizada en un marco de ensayo. La carga máxima en un ensayo de carga concentrada es altamente afectada por la variación de la densidad local. Chen et al (2000) mostró que tableros con densidad global similar presentan diferentes cargas máximas dependiendo de la variación de local de la densidad alrededor de la zona cargada.

Hoyle et al. (1982) estudiaron la deflexión de tableros de madera bajo carga concentrada aplicando la teoría de la deflexión de placas ortotrópicas delgadas. En su investigación sobre OSB, contrachapado, y tableros de partículas, el resultado de los ensayos fue comparado con las deflexiones teóricas debido a la carga concentrada en diversas condiciones de carga. Su conclusión fue que las deflexiones calculadas por la teoría de placas delgadas excedieron los valores obtenidos experimentalmente, debido a la información de entrada usada en el análisis de elementos finitos. Laufenberg y Xu (1989) desarrollaron un análisis ortotrópico de la placa y lo utilizaron para solucionar problemas de carga concentrada. Esta investigación encontró la correlación discreta entre las desviaciones teóricas y experimentales.

Los resultados de estos trabajos se muestran prometedores al usar el análisis de placa para modelar casos de carga concentrada; sin embargo, las pruebas experimentales usadas en estas investigaciones no están acorde con los ensayos normalizadas como ASTM E 661-88. Por otra parte, la carga y las condiciones de borde fueron más simplistas. Estos trabajos previos no

consideraron la variabilidad de las propiedades mecánicas que resultan debido a la distribución horizontal de la densidad dentro de tablero de OSB. Asimismo, en su forma actual, proporcionan poca sustento para desarrollar las relaciones empíricas que pudieron estar de acuerdo con programas de garantía de calidad. El objetivo de esta investigación es incorporar la variabilidad espacial en el análisis de elementos finitos con la consideración de las propiedades locales mas que las globales.

## Objetivos

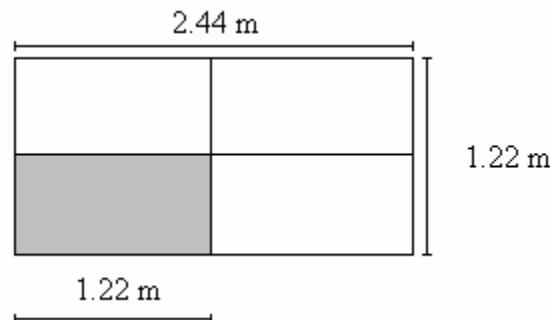
El objetivo general de esta trabajo fue modelar el ensayo de carga concentrada y a través de este ensayo determinar la influencia de la distribución espacial en las propiedades mecánicas locales en el comportamiento del OSB. Los objetivos específicos fueron:

1. Obtener los valores experimentales de deflexión máxima y carga máxima de los ensayos de carga concentrada.
2. Obtener la deflexión máxima y carga máximo empleando un modelo de elementos finitos usando propiedades locales y globales.
3. Comparar los resultados experimentales y los modelados para la deflexión máxima y la carga máxima.

## Materiales y Métodos

### Material de ensayo

Esta investigación fue realizada usando 18 paneles comercialmente producidos de OSB (1.22- x 2.44-m x 19-mm). Estos paneles fueron tomados como una muestra de un estudio más amplio que examina la influencia de la variación espacial de la densidad en las propiedades mecánicas. Los valores de densidad fueron obtenidos utilizando rayos-x con una resolución espacial de 12.7- por 12.7 mm. (Bozo et el al. (b) 2002). Un cuarto de cada tablero de OSB fue utilizado como probeta para realizar el ensayo CSL (fig. 4,1). Los tres cuartos restante del tablero fueron utilizados para establecer las relaciones propiedad-densidad que se utilizaron en este estudio.



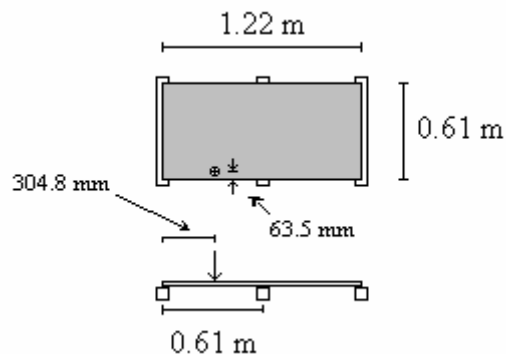
**Figura 4.1.** Representación esquemática de un cuarto de tablero de OSB.

## Ensayo de Carga Estática Concentrada, CSL

La descripción general, la preparación de probetas, y el método de ensayo fueron realizados usando ASTM E-661 (ASTM 1997). La Norma especifica tres condiciones del recubrimiento: apoyo completo de borde, apoyo parcial de borde sin apoyo de borde. La condición sin apoyo de borde (fig. 4.2) fue utilizada en este estudio para representar la más común y desventajosa situación de uso para el producto. El tamaño de la probeta (0.61-m x 1.22-m.) y la instalación requerida para el ensayo se muestra en la figura 4.2.

Durante el ensayo, la carga estática concentrada fue aplicada en el centro de la luz entre los apoyos a 63.5-mm del borde del tablero (fig. 4.2). Según lo especificado, la carga puntual fue simulada usando un disco de 76.2-mm de diámetro para la deflexión y un disco de 25.4-mm de diámetro para la carga de ruptura. El procedimiento para la rigidez fue cargar el tablero con una tasa constante de deflexión de 2.5 mm/minuto, registrando la deflexión máxima bajo una carga de 890 N. Para la carga máxima, la carga fue removida y el disco de carga fue sustituido por el de 25,4-mm diámetro. El panel se carga posteriormente con una tasa de 5 mm/minute hasta la fractura, registrándose la carga máxima.

Todos los ensayos fueron conducidos usando controles computacionales, un pistón servo hidráulico equipado (Interface model 1210AF-1K-B) con una celda de carga electrónica de 450-kg. Un LVDT (linear variable differential transformer) fue utilizado para controlar el movimiento del cabezal de carga. Las deflexiones locales del tablero fueron registradas usando un LVDT de  $\pm 25,4$ -mm (Modelo Sensotec 060-3618-02 de rango  $\pm 1,000$  pulgadas) montada en la cara inferior debajo del punto central de la zona de carga.



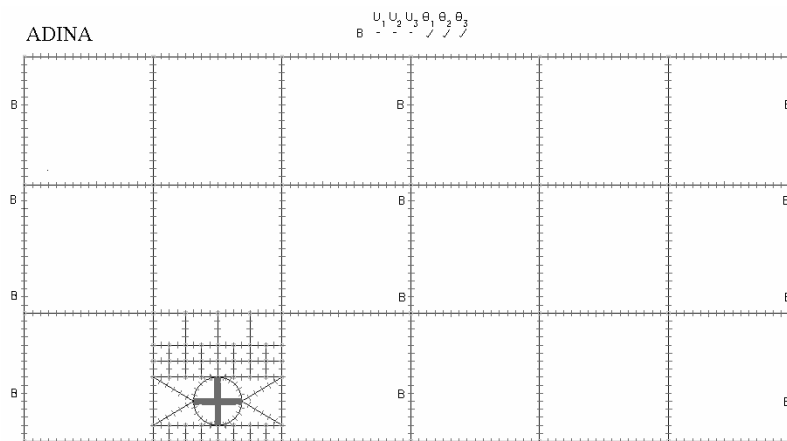
**Figura 4.2.** Representación esquemática del ensayo CSL

## Análisis de Elementos Finitos

Un análisis de elementos finitos fue utilizado para modelar la prueba de CSL con las propiedades mecánicas localizadas. Las ecuaciones de los elementos usados en este análisis asumen que los esfuerzos y las deformaciones son constantes en la dirección del espesor. Esta condición es aproximada cuando el espesor es pequeño en comparación con las otras

dimensiones (Szilard 1974). La razón luz altura de las probetas de OSB utilizadas en este estudio fue de 32 (609.6-mm de luz y 19.05-mm de espesor) y esta de acuerdo con el rango especificado de 24 a 64.

El análisis de elementos finitos fue realizado usando un código comercial (*Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis*, ADINA). La probeta completa fue modelada ya que la condición de carga no presentaba ningún eje de la simetría. La carga fue modelada como presión aplicada sobre un área circular equivalente al area del disco de carga (25,4-milímetro de diámetro y 76,4-milímetro de diámetro para la carga de fractura y deflexión respectivamente). Una representación esquemática del modelo de elementos finitos se presenta en el cuadro 4,3.



**Figura 4.3.** Representación esquemática de modelo de elementos finitos (B representa condiciones de borde).

El OSB fue modelado como una placa ortotrópica, requiriendo nueve propiedades del material. Un análisis preliminar de sensibilidad reveló que el módulo de Young ( $E_1$ ) en la dirección de la máquina y la razón de Poisson ( $\nu$ ) eran las propiedades mas y menos influyentes, respectivamente (Bozo et al. (a) 2002). Además, investigación anterior (Bozo et al. (b) 2002) demostrado que OSB exhibió diferentes propiedades de resistencia y rigidez cuando la carga fue de tracción o compresión y todas las propiedades variaron con la densidad. Valores de,  $E_{1t}$ ,  $\sigma_{1t}$ ,  $E_{1c}$ ,  $\sigma_{1c}$ ,  $G_{12}$ , y  $\tau_{12}$  fueron generados para un valor dado de densidad usando la simulación de Monte Carlo. Los modelos de la regresión utilizados para generar las propiedades de OSB vía Simulación de Monte Carlo se presenta en la tabla 4.1 y fueron obtenida de un trabajo previo (Bozo et al. (b) 2002). Las propiedades de resistencia y rigidez transversal ( $E_{2t}$ ,  $\sigma_{2t}$ ,  $E_{2c}$ ,  $\sigma_{2c}$ ) fueron estimadas de los cocientes de las propiedades proporcionados por Dong (1979). La Razón de Poisson fue asumido constante con un valor igual a 0.3.

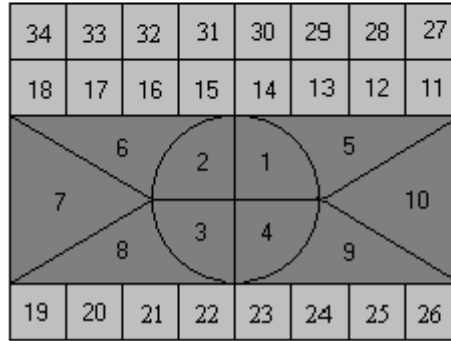
Propiedad	Ecuación de Regresión	$r^2$	Error Estándar
<b>Tracción-50.8</b>	$\sigma_{1t} = 14.705\text{Ln}(\mathbf{d}) - 82.545$	0.87	0.8380
	$E_{1t} = 8932\text{Ln}(\mathbf{d}) - 52487$	0.86	526.60
<b>Compresión-50.8</b>	$\sigma_{1c} = 15.49\text{Ln}(\mathbf{d}) - 88.587$	0.86	0.7845
	$E_{1c} = 3556.5\text{Ln}(\mathbf{d}) - 18832$	0.41	537.17
<b>Corte</b>	$\tau_{12} = 9.8195\text{Ln}(\mathbf{d}) - 53.875$	0.87	0.5712
	$G_{12} = 949.69\text{Ln}(\mathbf{d}) - 4841.3$	0.60	118.13

**Tabla 4.1.** Modelo de regresión logarítmica para propiedades de tracción, compresión y corte.

Para estudiar la influencia de las variaciones localizadas de la densidad, dos análisis fueron realizados. Primero, se modeló un tablero uniforme usando los valores promedios de las propiedades obtenidas de la simulación de Monte Carlo usando los valores de densidad local. En segundo lugar, las propiedades del material fueron asignadas a cada superficie del modelo usando la simulación de Monte Carlo usando los valores de densidad local. El número de simulaciones ( $n$ ) necesarios para una simulación estadísticamente válida fue calculada usando el método del intervalo de confianza (Snedecor y Cochran 1980) y varió para cada probeta, pero en todos los casos el número mínimo fue menor que 10. Para mantener consistencia, un número constante de 25 simulaciones fue tomado para todas las probetas para la deflexión máxima y la carga máxima.

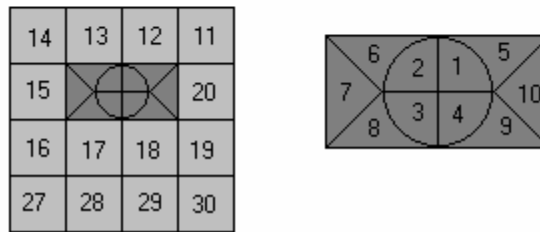
Porque las soluciones de los elementos finitos son altamente sensibles a la densidad (de la malla) en la zona de carga, el tablero fue dividido en diferentes zonas como se muestra en las figuras 4.4 y 4.5 (deflexión máxima y carga máxima respectivamente). Las zonas uno a cuatro corresponden al disco del carga.

44	43	42	41	40	39
45	46	47	48	49	50
51	38 37 36 35	52	53	54	55



**Figura 4.4.** Zonas de la probeta para deflexión máxima del CSL.

42	41	40	39	38	37
43	44	45	46	47	48
49	36 35 34 33	50	51	52	53



**Figura 4.5.** Zonas de la probeta para carga máxima del CSL.

Por simplicidad, el criterio de esfuerzo máximo de fractura fue utilizado para determinar la carga máxima. Fractura de material ocurre cuando alguno de las siguientes desigualdades no se satisface en algún nodo:

$$\begin{aligned}
X_c &< \sigma_1 < X_t \\
Y_c &< \sigma_2 < Y_t \\
-S_{12} &< \tau_{12} < S_{12}
\end{aligned}$$

donde:  $(\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12})$  son los vectores de esfuerzo en las direcciones principales del material.  
 $S, X$  e  $Y$  representan los esfuerzos máximos para corte y las direcciones 1 y 2.  
subíndices  $c$  y  $t$  representan compresión y tracción, respectivamente  
subíndices  $1$  y  $2$  representan las direcciones longitudinal y transversal, respectivamente

En resumen de las condiciones del modelo utilizando ADINA es presentada en la Tabla 4.2 tanto para deflexión máxima como para carga máxima. Los resultados obtenidos del análisis de elementos finitos fueron comparados con los resultados obtenidos por los ensayos experimentales y los criterios de comportamiento del OSB.

Condiciones ADINA	Deflexión Máxima	Carga Máxima
Tamaño de la probeta	609.6- by 1219.2-mm	609.6- by 1219.2-mm
Numero de superficies	53	55
Tamaño de la zona de carga	76.2 mm diámetro	25.4 mm diámetro
Material	elástico ortotrópico	elástico ortotrópico
Condiciones de borde	Translación x, y, y z	Translación x, y, y z
Presión de carga	0.1952 MPa	-
Numero de pasos	1	20
Elemento	shell element	shell element
Número de nudos por elemento	4	4
Formulación Kinematica	small displacement/strain	small displacement/strain
Integración Numérica	8 gauss points	8 gauss points
Sistema referencial de esfuerzos	global	global
Criterio de Fractura	maximum stress	maximum stress
Numero de elementos en la zona de carga	1260	140
Numero de elementos total	5966	4758

**Tabla 4.2.** *Condiciones para modelar la deflexión máxima y carga máxima para el ensayo CSL usando ADINA.*



## Resultados y Discusión

### Resultados del Ensayo de Carga Concentrada.

Los resultados de deflexión máxima y carga máxima para todos los tableros ensayados se presentan en la tabla 4.3.

<b>Specimen Label</b>	<b>Maximum Deflection mm</b>	<b>Ultimate Load kN</b>
m1p1	2.15	2.80
m1p2	2.00	3.56
m1p3	2.29	2.80
m1p4	2.20	3.11
m1p5	2.51	2.62
m1p6	2.43	2.48
m2p1	2.13	3.30
m2p2	1.84	3.94
m2p3	2.18	3.17
m2p4	2.22	2.91
m2p5	2.42	2.51
m2p6	2.27	3.49
m3p1	2.03	3.23
m3p2	2.46	2.70
m3p3	1.87	3.48
m3p4	2.46	3.02
m3p5	2.40	2.93
m3p6	2.13	3.32
<b>mean</b>	2.22	3.08
<b>COV</b>	9.12	12.90
<b>minimum</b>	1.84	2.48
<b>maximum</b>	2.51	3.94

**Tabla 4.3.** Valores de deflexión máxima y carga máxima para los ensayos CSL.

Los valores experimentales de deflexión máxima, presentados en la tabla 4.3, indican que las 18 probetas cumplen con los requisitos especificados para este material. Por otra parte, estos valores no presentan una alta variabilidad (COV=9.12%).

Los resultados de la tabla 4.3 revelan que todas las probetas ensayadas superan la carga mínima requerida para este material. El valor promedio de 3.08-kN es 25.7 % más alto que el valor mínimo requerido por norma. Los resultados muestran una alta variabilidad.

## Análisis de Elementos Finitos

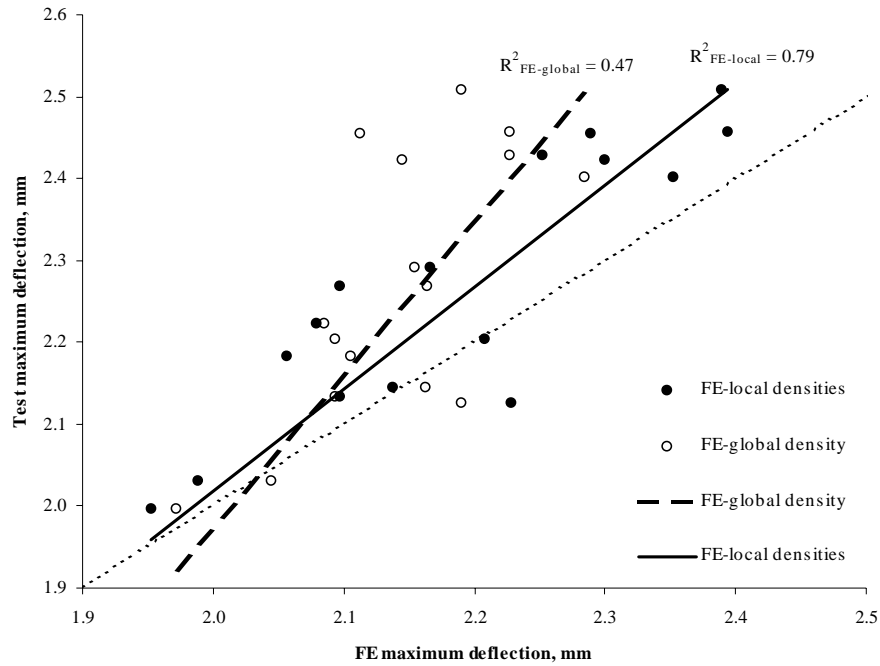
Los resultados y los estadígrafos de la deflexión máxima y la carga máxima simuladas usando análisis de elementos finitos y los valores experimentales se presentan en la tabla 4.4. En general, el modelo de EF predijo exactamente los valores de ensayo para la deflexión máxima y la carga máxima. Sin embargo, los resultados obtenidos usando las densidades locales fueron más exactos que los resultados obtenidos usando las densidades globales. En general, los valores de EF fueron más bajos que los valores de ensayos (promedio) y también presentaron un nivel más bajo de la variación (desviación de estándar y coeficiente de variación).

Probeta	Deflexión máxima mm			Carga máxima kN		
	Global	Local	Ensayo	Global	Local	Ensayo
m1p1	2.16	2.14	2.15	2.80	2.55	2.80
m1p2	1.97	1.95	2.00	2.85	2.73	3.56
m1p3	2.15	2.17	2.29	2.80	2.54	2.80
m1p4	2.09	2.21	2.20	2.95	2.82	3.11
m1p5	2.19	2.39	2.51	2.75	2.53	2.62
m1p6	2.23	2.25	2.43	2.73	2.39	2.48
m2p1	2.09	2.10	2.13	3.13	3.18	3.30
m2p2	2.07	1.98	1.84	3.15	3.22	3.94
m2p3	2.10	2.06	2.18	3.02	3.04	3.17
m2p4	2.09	2.08	2.22	2.91	2.65	2.91
m2p5	2.14	2.30	2.42	2.51	2.05	2.51
m2p6	2.16	2.10	2.27	2.96	3.02	3.49
m3p1	2.04	1.99	2.03	3.07	2.93	3.23
m3p2	2.11	2.29	2.46	2.84	2.48	2.70
m3p3	2.08	1.98	1.87	2.96	2.84	3.48
m3p4	2.23	2.39	2.46	2.87	2.76	3.02
m3p5	2.28	2.35	2.40	2.78	2.37	2.93
m3p6	2.19	2.23	2.13	2.98	3.01	3.32
<b>Promedio</b>	2.13	2.16	2.22	2.89	2.73	3.08
<b>COV</b>	3.52	6.71	9.12	5.42	11.39	12.90
<b>mínimo</b>	1.97	1.95	1.84	2.51	2.05	2.48
<b>máximo</b>	2.28	2.39	2.51	3.15	3.22	3.94

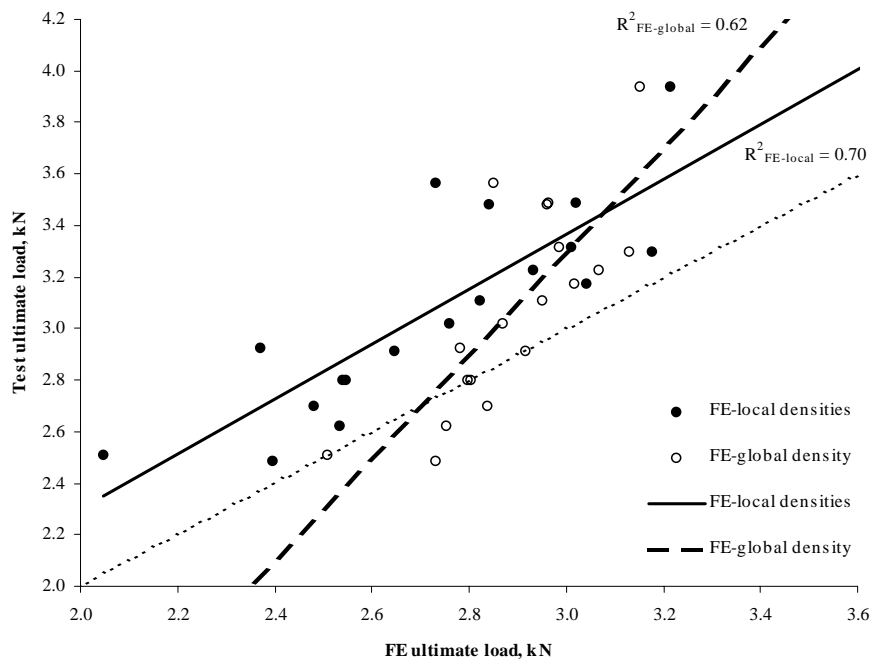
**Tabla 4.4.** Resultados de EF usando densidades globales y locales: Deflexión máxima para carga de 890 N y carga máxima.

La exactitud de la predicción para cada probeta fue comparada en los gráficos de la deflexión máxima y carga máxima presentadas en las Figuras 4.6, y 4.7, respectivamente. En estos gráficos, las líneas continuas (Densidad local-FE) y líneas discontinuas (Densidad global-FE) representan la relación lineal entre los resultados de ensayo y los resultados de elementos finitos usando densidades locales y globales, respectivamente. Los gráficos también muestran que es más exacto predecir los resultados de los ensayos utilizando los valores de densidad local

frente a los valores de densidad global. Esto es reafirmado por los  $r^2$  que son más altos para los valores de densidad local. Observe que la pendiente de la línea de predicción que usa densidades locales es paralelo a la línea de 45 grados. Finalmente, la desviación estándar y los valores de COV fueron bajos cuando se usaron las densidades globales, y estos valores aumentaron al doble en magnitud y más realistas cuando se utilizaron las densidades locales.



**Figura 4.6.** Grafico que muestra los resultados de deflexion maxima. (EF vs. ensayo).



**Figura 4.7.** Grafico de resultados de carga maxima (EF vs. ensayo).

## Conclusiones

Los resultados experimentales de la deflexión máxima y carga máxima del ensayo de carga estática concentrada de los 18 tableros cumplen con los requisitos de la norma. (2.70 mm y 2,45 kN, respectivamente). El valor promedio de la deflexión máxima fue 2.22 mm con un COV de 9.12 %, mientras que el promedio de la carga máxima fue de 3.08 kN con un COV de 12.9 %.

En general, los resultados obtenidos para la deflexión máxima y carga máxima utilizando elementos finito están de acuerdo con los resultados obtenidos experimentalmente, sin embargo los resultados obtenidos utilizando las propiedades locales son mas realistas. Los coeficientes de determinación entre los resultados de elementos finitos y experimentales para la deflexión máxima y carga máxima usando la densidad local fueron 0.79 y 0.70, respectivamente. Consecuentemente, la metodología basada en elementos finitos es recomendada para simular resultados del ensayo de carga estática concentrada usando propiedades locales.

## Referencias

- APA-The Engineered Wood Association. 2000. Oriented Strand Board Product Guide. Tacoma, Washington.
- APA-The Engineered Wood Association. 1994. PRP-108 Performance Standards and Policies for Structural- Use Panels. Tacoma, Washington.
- ASTM 1997. Standard Test Method for Performance of Wood and Wood-Based and Roof Sheathing Under Concentrated Static and Impact Loads. Standard E661-88. American Society of Testing and Materials.
- Bozo, A.M., M.P. Wolcott, and S.M. Miller. 2002(a). Statistical Methodology to Characterize Variability of Wood Composites.
- Bozo, A.M., M.P. Wolcott, and D.A. Bender. 2002(b). Modeling Variation in Wood Composites Properties.
- Chen, S., R. Wellwood, and D. Kenway. 2000. On-Line Infrared Panel Density Measurement. 34<sup>th</sup> International Particleboard/Composite Material Symposium. Washington State University, Pullman, Washington.
- Cook, R., D. Malkus, and M. Plesha. 1989. Concepts and Application of Finite Element Analysis John Wiley and Sons. New York.
- Dong, C.C. 1979. The Mechanical Properties of Flakeboards Related to Flake Orientation. Dissertation. Washington State University. Pullman, Washington.
- Guan, N., Y. Wang, and H. Gu. 2001. Specimen Orientation for the Calibration of Direct Scanning x-ray Wood Densitometers. Wood and Fiber Science, 33(1). Pp 26-30.

- Hoyle, R.J., R.J. Tichy, and R.Y. Itani. 1982. Composite Wood Panel Deflection Under Concentrated Load. Wood Science Vol. 15, No 2
- Laufenberg, T.L. and D.P.Xu. 1989. Concentrate Load and Impact Behavior of Wood-Based Panels. 23d International Particleboard/Composite Material Symposium. Washington State University. Pullman, Washington.
- National Institute of Standards and Technology (NIST). 1992. Voluntary Product Standard PS 2-92, Performance Standard for Wood-Based Structural-Use Panels. U.S. Government Printing Office, Washington, DC.
- Szilard, R. 1974. Theory and Analysis of Plate. Classical and Numerical Methods. Prentice-Hall, INC. Englewood Cliffs, New Jersey.