

ANÁLISIS NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DE UN PROTOTIPO DE SECCIÓN MIXTA DE HORMIGÓN - MADERA LAMINADA

Ing. Federico Solari, Msc. Raúl Astori, Msc. Ricardo Barrios D'Ambra, Ing. Luis Koteski
Instituto de Estabilidad - Departamento de Mecánica Aplicada
Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional del Nordeste

Resumen

El principal objetivo cuando se utiliza una sección mixta de hormigón-madera es lograr un óptimo rendimiento de ambos materiales, combinando sus propiedades favorables (alta resistencia a la compresión y elevado módulo de elasticidad del hormigón y altas resistencias a la flexión y a la tracción paralela al grano en la madera) y minimizando sus características desfavorables (poca resistencia a la tracción en el hormigón y bajo módulo de elasticidad de la madera).

El problema principal a solucionar consiste en lograr una conexión eficiente que garantice el trabajo en conjunto, restringiendo al máximo la deformación relativa en la interfase de hormigón - madera.

Se presenta un estudio numérico – experimental, sometiendo un prototipo de sección mixta de hormigón - madera laminada a cargas estáticas.

La resistencia al corte de los conectores se obtiene previamente mediante ensayos de corte, para determinar el módulo de deformación “k”.

Posteriormente, se realizan los ensayos de flexión, obteniéndose los descensos verticales y desplazamientos relativos entre hormigón y madera.

Los modelados numéricos se realizan utilizando un programa de aplicación del Método de Elementos Finitos.

Luego se comparan los resultados obtenidos experimentalmente con los de los modelados numéricos evaluándose la eficiencia del prototipo presentado

Abstract

The main objective when we use a mixed concrete-timber section is to obtain the highest output of both materials, combining their favourable properties (high resistance to compression and a high module of concrete elasticity , and high resistance to flection and the parallel traction of the grain in the timber) and also minimizing its disadvantages (low resistance to the concrete traction and low module of timber elasticity)

The principal problem to solve out consists of obtaining an efficient connection which guarantees the entire work, avoiding the relative deformation in the concrete-timber inter-phase.

A numerical- experimental study is done, submitting a prototype of mixed concrete-timber laminated to static loading.

The resistance to the cut connectors is previously obtained due to trial cuts to determine the deformation module K.

Afterwards, trials of flection are done, obtaining vertical descensus and also relative displacement between concrete and timber.

The numeric models or patterns are done by applying the Finite Element Method (FEM).

Finally, all the results are experimentally compared with those obtained by the numeric modelling, thus evaluating the efficiency of the proposed prototype.

1. INTRODUCCION

El presente Trabajo se realiza dentro del marco del Proyecto de Investigación “Estructuras Mixtas de Hormigón-Madera para Puentes” PI-67/04, desarrollado en el Instituto de Estabilidad de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Nordeste.

Para la formulación del mencionado Proyecto se han tenido en consideración las siguientes razones:

- El uso de materiales combinados en la resolución de estructuras, para obtener un mejor aprovechamiento de sus cualidades mecánicas.
- En diversos países se están desarrollando y empleando las secciones mixtas de hormigón-madera con excelentes resultados, en razón de las ventajas que presenta frente a otras alternativas tecnológicas, especialmente en la resolución de elementos donde predominan los esfuerzos de flexión.
- En construcciones de puentes y otras estructuras de importancia, la utilización de la madera laminada, amplía las posibilidades de diseño al eliminar las restricciones de luces y secciones de la madera, a la vez que se alcanza un elevado aprovechamiento del material forestal para el uso estructural.
- En el ámbito nacional y regional no están muy divulgadas construcciones de este tipo, constituyendo un posible campo de aplicación de maderas de la región.
- Los factores negativos mas conocidos de la madera (material heterogéneo, anisotrópico y biológicamente perecible) tienden a relativizarse, superados por el papel fundamental que tendrá en un futuro el uso racional de la madera como recurso renovable.

El objetivo que se persigue al utilizar una sección mixta de hormigón-madera es alcanzar un óptimo rendimiento de ambos materiales. El problema principal a solucionar es lograr una conexión eficiente que garantice el trabajo en conjunto, restringiendo al máximo la deformación relativa en la interfase de hormigón - madera.

En la primer parte del trabajo se presentan los ensayos de corte de un prototipo para determinar el módulo de deslizamiento “k”.

En la segunda parte, se presenta un ensayo de flexión, donde se obtienen los descensos verticales máximos y desplazamientos relativos entre hormigón y madera.

Los modelados numéricos se realizan utilizando un programa de aplicación del MEF.

Luego se comparan los resultados obtenidos experimentalmente con los de los modelados numéricos, evaluándose la eficiencia del prototipo presentado.

2. ENSAYOS DE CORTE

2.1. PARTE EXPERIMENTAL

2.1.1. Descripción del ensayo

El trabajo consiste en el análisis teórico-experimental de un modelo de conector que vincula secciones de madera y hormigón sometido a ensayos de corte. Este

modelo está diseñado a partir de experiencias previas, mediante la aplicación de normas y procedimientos utilizados en trabajos de reconocida validez.

Las probetas de ensayo de corte están formadas por placas de hormigón dispuestas a ambos lados de una pieza de madera, vinculadas mediante dos conectores de cada lado. Los conectores son barras de acero de 12mm de diámetro.

En la [Figura 1](#) se pueden observar la probeta. Sus dimensiones se indican en la [Figura 2](#)



Figura 1: Probeta del ensayo de corte

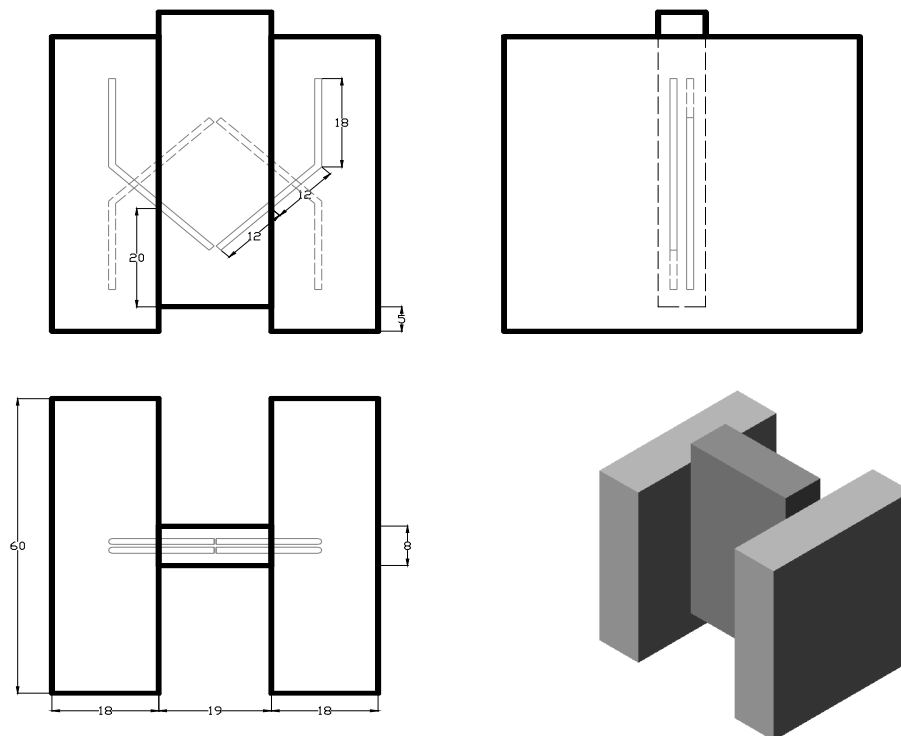


Figura 2 : Esquema de la probeta de ensayo

El programa de ensayo está formado por 3 probetas, cuyas características principales se indican en la [Tabla 1](#).

Las probetas son sometidas a ensayos de corte en el plano de vinculación entre madera y hormigón, obteniéndose en cada caso la curva carga versus desplazamiento relativo.

La aplicación de la carga se realiza mediante una máquina de ensayo universal con capacidad de 1000 KN, de manera continua.

MATERIAL	MADERA	Especie	EUCALYPTUS GRANDIS
		Tipo	Laminada
		Contenido de Humedad	12 %
	HORMIGON	Bcn	20 Mpa
		Cemento pórtland	Normal (Norma IRAM 1503)
		Agregado fino	Arena Silíceas natural del Río Paraná (Mf=1.85)
		Agregado Grueso	Piedra Partida basáltica (6-20)
		Relación agua-cemento	0.6
		Asentamiento	7.5 cm
	CONECTORES	Tipo	Barra de acero DN A-420
		Tensión de Fluencia	420 Mpa
		Diámetro	12 mm
		Anclaje a la Madera	Con adhesivo Epoxi Longitud = 15 cm Inclinación = 45°

Tabla 1: Características de los materiales de la probeta

Las lecturas de los desplazamientos relativos en la interfase madera - hormigón, se realizan a través de un extensímetro mecánico con apreciación de 0,01mm, ubicado según se indica en [Figura 3](#)



Figura 3: Esquema ubicación del extensímetro.

2.1.2 Resultados Experimentales

En la Figura 4 se representan las curvas Carga-Desplazamiento relativo correspondientes a dos probetas de las tres ensayadas y una curva con los valores promedios. Los resultados de la probeta restante se descartan por errores en el procedimiento de ensayo.

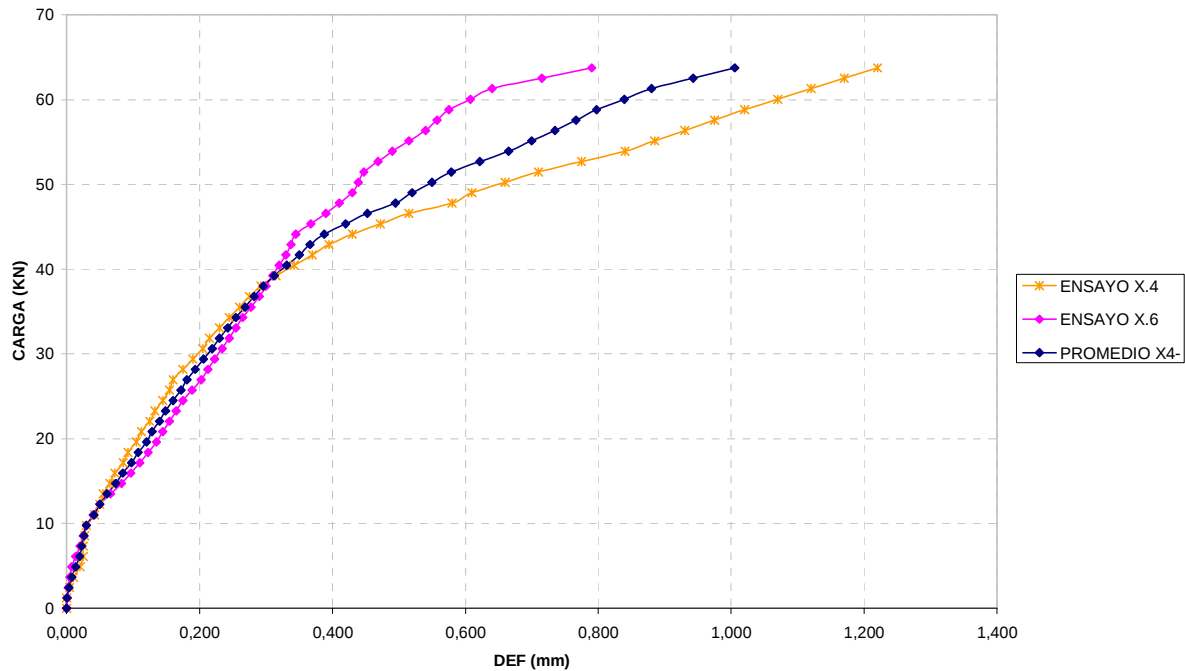


Figura 4: Diagrama Cargas – Desplazamientos relativos

Los resultados obtenidos en la serie de probetas ensayadas muestran un bajo grado de dispersión, excepto para valores próximos a la rotura, donde empieza a manifestarse la falla en el anclaje en la madera.

La carga máxima se produce en todos los casos al agotarse la resistencia del anclaje en la Madera.

Las curvas representadas, manifiestan un comportamiento casi lineal, de la relación carga – desplazamientos, hasta valores de carga cercanos a los 40 KN, a partir del cual se puede considerar un comportamiento no-lineal. El valor del módulo de deformación promedio obtenido es $k = 196 \text{ KN/mm}$.

2.2 MODELADO NUMERICO

Se presenta un análisis tensional de la zona de anclaje de los conectores utilizando un programa de aplicación del MEF. El modelado de los elementos componentes de la probeta se realiza utilizando un denominado Modelado Simplificado, donde se reemplaza el conector real, por elementos del tipo resorte no lineal.

En este modelado (ver Figura 5), el Hormigón y la madera son representados por elementos para el Estado Plano de Tensiones. En cambio, los conectores son representados mediante elementos no lineales tipo Resorte, que pretenden simular el comportamiento de los mismos. Las propiedades de los materiales utilizados

figuran en [Tabla 2](#). En la [Figura 5](#) también se indican nodos representativos, que serán utilizados para el cálculo de desplazamientos relativos.

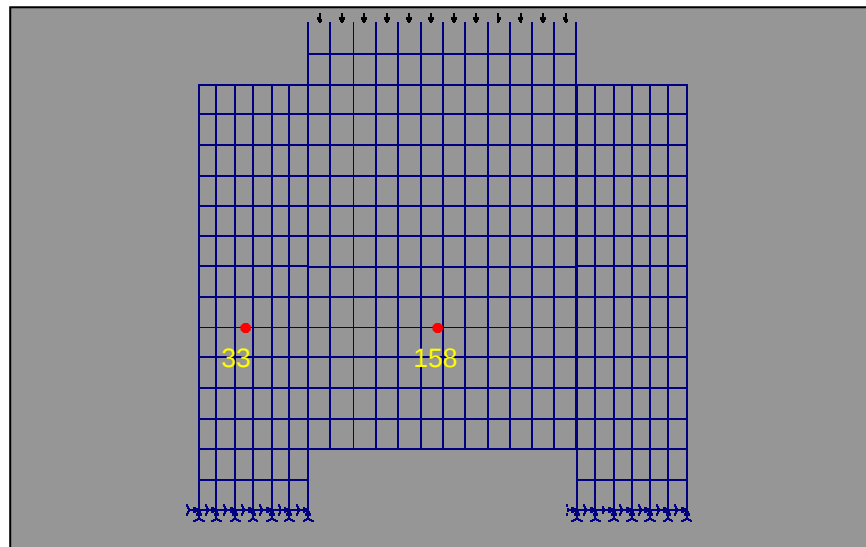


Figura 5: Modelado Simplificado (MS)

Tipo de Elemento	Modulo de Elasticidad (MPa)	Ancho modelado (cm)
PLANO 2D para madera	10000	4
PLANO 2D para Hormigón	27500	16
RESORTE para conector	210000	--

Tabla 2: Propiedades de los Materiales para MS

Para este modelado, se disponen los resortes como se indica esquemáticamente en la [Figura 6](#), representando la disposición que los mismos presentan en el prototipo real.

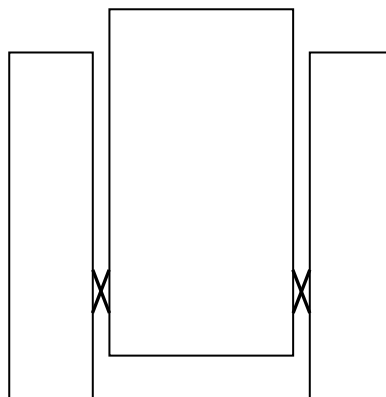


Figura 6: Disposición de los Resortes

Se introduce al elemento Resorte, un comportamiento No Lineal, de manera de reproducir numéricamente, el comportamiento real de los conectores de los

prototipos experimentales observados en los Diagramas Cargas-desplazamientos (ver [Figura 4](#)).

La ley de comportamiento no lineal del elemento Resorte es obtenida calibrando los valores de la Curva Promedio de los ensayos experimentales de cada tipo de Probeta.

Para analizar el comportamiento No Lineal del Modelado se obtienen Curvas Cargas-Desplazamientos ([Figura 7](#)), para la cual se calculan los desplazamientos relativos entre dos nodos representativos, indicados en la [Figura 5](#), ubicados en los centros de las secciones de madera y H^o, geoméricamente coincidentes con la ubicación de los nodos donde se miden los desplazamientos relativos en los ensayos experimentales.

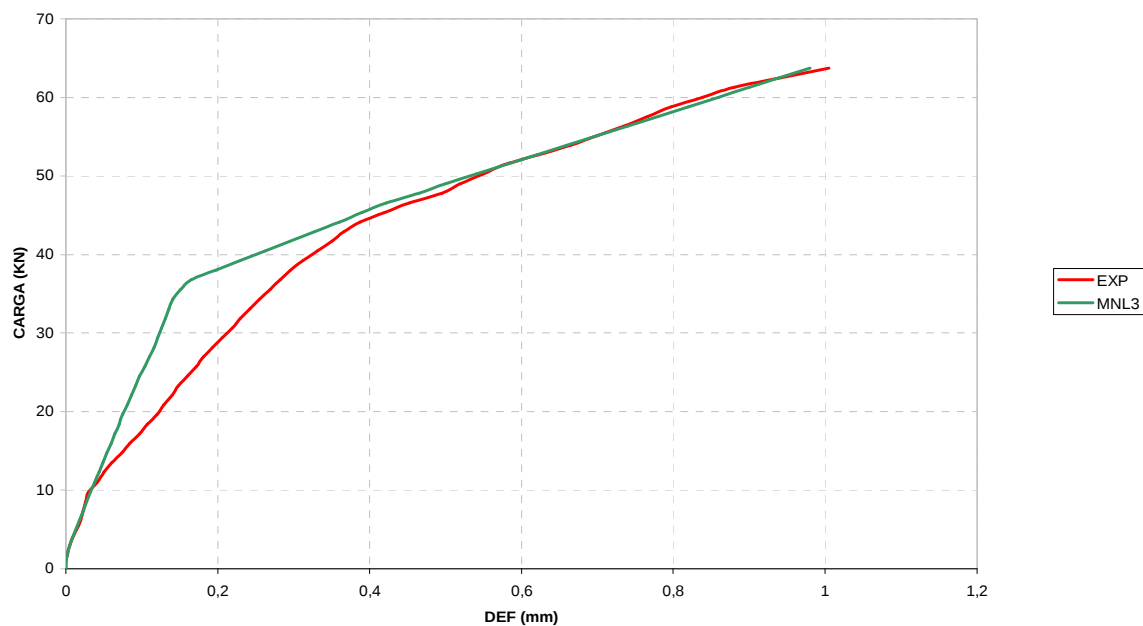


Figura 7: Curvas Cargas-Desplazamientos para MS

En el Diagrama, se puede observar un buen grado de coincidencia entre la curva presentada en el Modelado, con la obtenida en el Ensayo Experimental, excepto en la zona central.

3 ENSAYO DE FLEXION

Se presenta un ensayo de flexión realizado con el objeto de analizar el comportamiento de las estructuras mixtas de hormigón – madera laminada, sometidas a este tipo de esfuerzo, que será el predominante en los modelos de puentes a analizar en el Proyecto de Investigación de referencia.

El desarrollo de la acción compuesta entre la viga de madera y la losa de hormigón depende de la ocurrencia de una deflexión desde la fibra superior del hormigón hasta la parte inferior de la viga de madera. Cuando la interacción se desarrolla en forma completa, no se produce deslizamiento, y existe un solo eje neutro.

Se analiza el comportamiento de cada uno de los materiales que componen el prototipo y específicamente el comportamiento global de la estructura, para determinar si efectivamente se produce la interacción entre hormigón y madera.

3.1 PARTE EXPERIMENTAL

3.1.1 Descripción del ensayo

Se presenta un prototipo de estructura mixta de hormigón - madera, diseñado a escala reducida. En la parte inferior posee dos tirantes de madera de 62mm x 200mm de sección y 5,54m de longitud (5,00m de luz libre), separados por una distancia entre ejes de 650mm. Sobre dichos tirantes se ubica placa de fenólico de 10mm de espesor que sirve como encofrado perdido. Sobre esta, una capa de hormigón de 1250mm de ancho y 55mm de espesor. El detalle y las dimensiones de la sección transversal se indican en la [Figura 8](#). En la dirección transversal se dispone una armadura de repartición mínima.

Como elementos de conexión entre ambos materiales se utilizan barras de acero de 6mm de diámetro, cuyo comportamiento fue presentado en la primer parte de este trabajo. La disposición de los mismos se indica en [Figura 9](#). Las características y propiedades de cada uno de los materiales utilizados se presentan en la [Tabla 3](#).

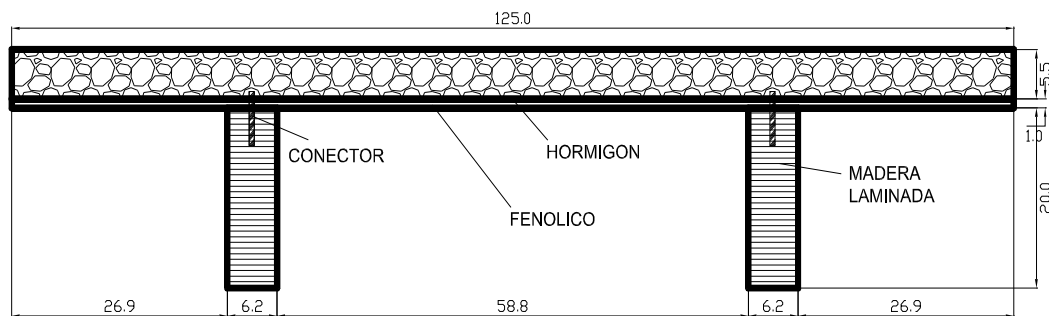


Figura 8: Sección transversal del prototipo

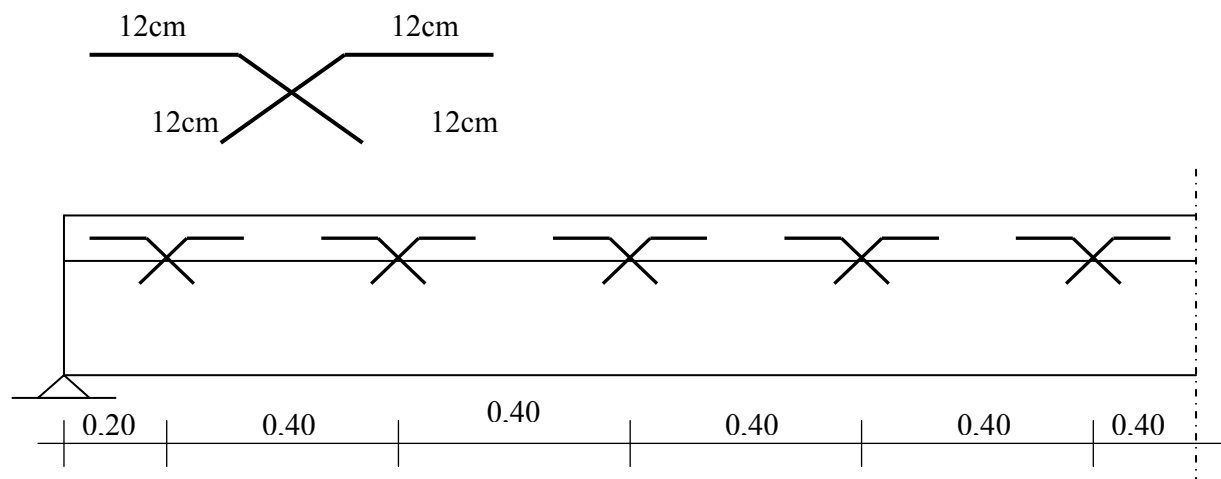


Figura 9: Tipo y Disposición de los conectores de corte

MATERIAL	MADERA	Especie	EUCALYPTUS GRANDIS
		Tipo	Laminada
		Contenido de Humedad	12 %
	HORMIGON	Bcn	20 Mpa
		Cemento Pórtland	Normal (Norma IRAM 1503)
		Agregado fino	Arena Silíceas natural del Río Paraná (Mf=1.85)
		Agregado Grueso	Piedra Partida basáltica (6-20)
		Relación agua-cemento	0.6
		Asentamiento	7.5 cm
	CONECTORES	Tipo	Barra de acero
		Tensión de Fluencia	420 Mpa
		Diámetro	6 mm
	MALLA DE REPARTICION	Tipo	St 37
		Tensión de Fluencia	420 Mpa
		Diámetro	4,2mm
		Separación	25 cm

Tabla 3: Características y propiedades de los materiales

En las Figuras 10 y 11 se presentan dos imágenes de la probeta de ensayo antes de ser hormigonada. La primera es una imagen general, donde se aprecian los tirantes de madera laminada apoyados sobre los caballetes, la placa de fenólico, la disposición de los conectores, la malla transversal y las tablas de encofrado lateral.



Figura 10: Prototipo de Ensayo a la Flexión

En la siguiente figura, se observan en forma mas detallada los conectores y la malla transversal. El agujero realizado a la placa de fenólico, permite la introducción de hormigón, formando un taco que disminuye la concentración de tensiones



Figura 11: Disposición de los conectores

En la [Figura 12](#) se presenta una imagen del hormigonado del prototipo.



Figura 12: Hormigonado del prototipo

3.1.2 Procedimiento

El ensayo se realiza bajo un marco de carga. La misma es aplicada con cilindros hidráulicos a un perfil, que reparte la carga a dos cilindros ubicados transversalmente en los tercios medios de la luz, materializando dos cargas puntuales y generando de esta manera una zona de flexión pura en el tercio central.

En la [Figura 13](#) se presenta una imagen previa al ensayo. Se aprecia la distribución de la carga en los tercios medios, mediante los cilindros de carga. La célula de carga se introduce con el objeto de tomar las lecturas de la misma.



Figura 13: Ensayo a la flexión

Se disponen dos extensímetros en la línea media transversal de la luz: en cada uno de los tirantes de madera laminada, con el objeto de obtener valores medios de la evolución de la deformación en ese punto (flecha máxima) (Figura 14) . Se colocan además en uno de los extremos, dos extensímetros solidarios a la sección de madera, para medir la variación de la deformación longitudinal relativa entre dicha sección y la capa de hormigón (Figura 15)



Figura 14: Flexímetro para medir deflexión máxima



Figura 15: Flexímetros para medir la deformación lateral

La falla se produce al agotarse la resistencia de la Madera a la flexión [Figura 16](#).



Figura 16: Rotura a Flexión

También se observa en la [Figura 17](#) falla en los fingers-joints, al agotarse la resistencia del pegamento.



Figura 17: Finger - joints

Los resultados se presentan en la [Figura 18](#) mediante una curva carga – deformación, donde se representan las lecturas obtenidas en cada uno de los extensómetros y una curva promedio de los descensos verticales.

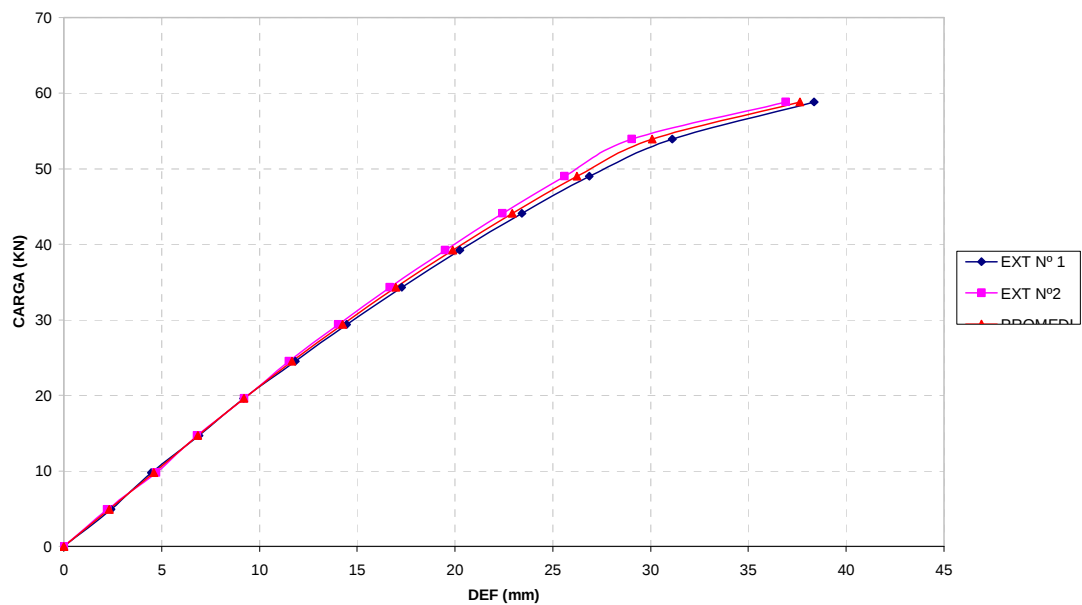


Figura 18: Diagrama Carga – Deformación

3.2 MODELADO NUMERICO

Para analizar numéricamente el comportamiento del prototipo de estructura mixta de hormigón madera sometido a esfuerzos de flexión y verificar los resultados

experimentales, se presentan distintos modelados del prototipo, utilizando un programa de aplicación de MEF.

En una primera instancia se plantea un modelado numérico ML1 ([Figura 19](#)) donde la losa de hormigón, la placa de fenólico y las vigas de madera laminada, se representan utilizando para ello elementos planos y las barras de acero utilizadas como conectores son representados mediante elementos lineales tipo resorte. Las propiedades de los elementos utilizados se indican en la [Tabla 4](#).

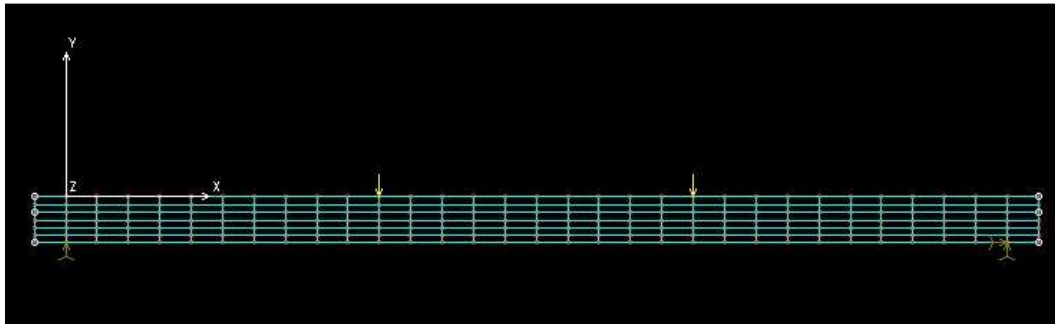


Figura 19: Modelado ML1

Tipo de Elemento	Modulo de Elasticidad (MPa)	Ancho modelado (mm)
PLANO 2D para madera	10000	12,4
PLANO 2D para fenólico	10000	125
PLANO 2D para Hormigón	27500	125
RESORTE para conector	210000	--

Tabla 4: Propiedades de los elementos para ML1

Para este modelo se introduce a los resortes un comportamiento lineal, adoptando un valor de constante de resorte $k = 196 \text{ KN/mm}$, obtenida de la pendiente lineal de la curva promedio de los resultados experimentales de corte.

Los desplazamientos obtenidos a mitad de la luz se representan en la [Figura 20](#).

En dicha Figura se aprecia que el comportamiento de este primer modelado coincide con los resultados experimentales solo en la primer parte de la curva.

Esto muestra que, para esos niveles de carga, la acción compuesta entre madera y hormigón es total. A medida que las cargas aumentan, aumentan las deflexiones y ocurren deslizamientos y el sistema trabaja bajo una acción compuesta parcial.

Para simular este comportamiento, se presenta el modelado MNL2, donde se reemplazan los conectores lineales por otros con comportamiento No Lineal. Para representar este comportamiento, se introducen los valores de la curva promedio obtenida de los resultados de los ensayos de corte (ver [Figura 4](#)), en la curva que representa las propiedades materiales del elemento resorte.

Luego se somete este modelado a un estado de solicitaciones a la flexión, obteniéndose los desplazamientos en la mitad de la luz, los cuales se representan en la [Figura 20](#).

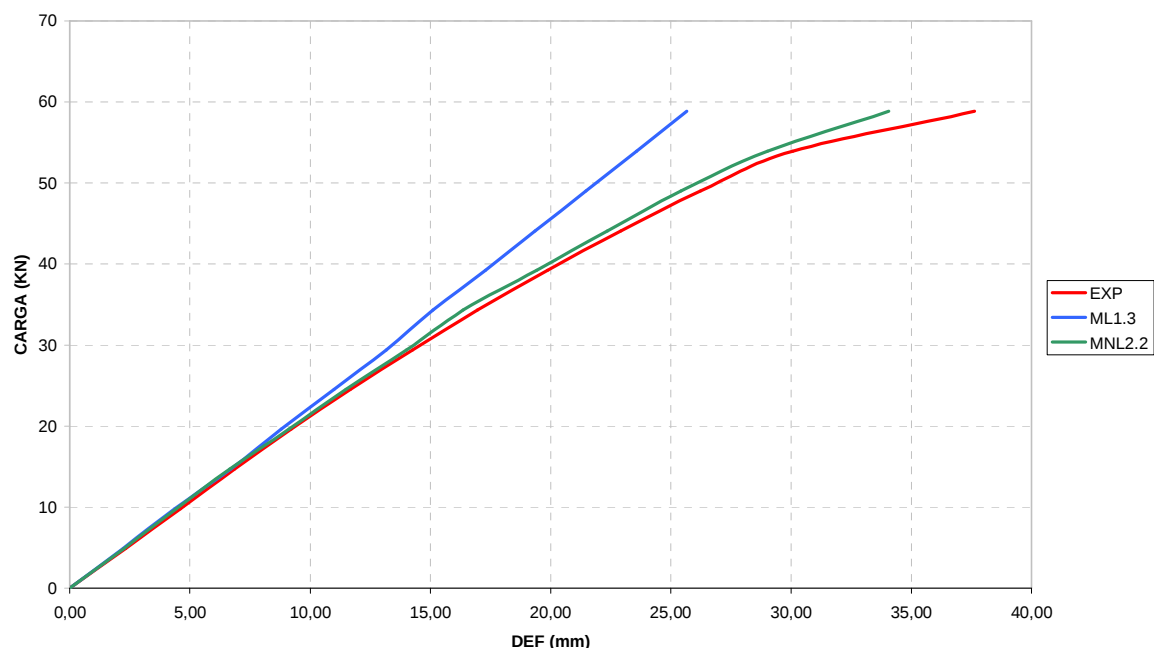


Figura 20: Curvas Carga – Desplazamiento Uy

Se aprecia un alto grado de coincidencia con la curva obtenida en los ensayos experimentales de flexión, verificándose que la relación carga deformación de la estructura mixta de hormigón - madera laminada presentada es No Lineal.

4 CONCLUSIONES

4.1 Sobre el Ensayo de Corte:

Respecto a la parte experimental, la reducida dispersión registrada en los ensayos confiere confiabilidad al método utilizado y a los valores obtenidos.

La no ocurrencia de la rotura en la zona de anclaje en la madera en la totalidad de las probetas ensayadas indica una buena eficiencia del sistema de anclaje de las barras de acero en la madera.

Mediante la consideración del comportamiento no lineal de los resortes, se pudieron ajustar las curvas carga-desplazamiento logrando una buena coincidencia con las curvas experimentales, lo que permite simplificar el modelado numérico en aplicaciones de mayor dificultad como los ensayos de flexión.

4.2 Sobre el Ensayo de Flexión:

Los resultados experimentales indican un buen comportamiento del prototipo de estructura mixta ensayado al ser sometido a solicitaciones de flexión

Para un amplio rango de cargas, los conectores aseguran pequeñas deformaciones relativas en la interfase hormigón-madera, condición fundamental para que ambos materiales trabajen en forma solidaria o mixta.

Respecto a los distintos modelados numéricos, los análisis sucesivos de cada uno de ellos llevan a presentar un alto grado de coincidencia entre el modelado No Lineal con los resultados experimentales. Dicho modelado servirá entonces para trabajar, con los ajustes convenientes, con otros prototipos y estructuras mixtas a analizar dentro del marco del Proyecto de referencia.

5 AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría General de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional del Nordeste.

A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Nordeste, y en especial al Instituto de Estabilidad y al Departamento de Mecánica Aplicada.

6 REFERENCIAS

Astori, R.; Barrios D'Ambra, R.; Solari, F.; Kosteki, L; "Análisis de un modelo de conector para secciones mixtas de hormigón-madera". *Trabajo 039 -XIX JORNADAS AIEA Mar del Plata - 2006* .

Astori, R.; Barrios D'Ambra, R.; Solari, F.; Kosteki, L; "ANALISIS NUMERICO EXPERIMENTAL DE UN PROTOTIPO DE SECCION MIXTA DE HORMIGON-MADERA" MECANICA COMPUTACIONAL Vol.XXVI - I.S.S.N.: 1666-6070 – Pag.111 XVI CONGRESO SOBRE METODOS NUMERICOS Y SUS APLICACIONES (ENIEF 2007). 2007.

Pincus, G. . "Bonded of Wood - Concrete Composite Beam". *J. Str.Div., ASCE, Vol.95, N° ST10, USA. 1970*.

Jutila, Aerne - Möipuro, Ristö - Solokangas, Lauri. "Testing a Wood Concrete Composite Bridge". *Structural Engineering Internacional . S. E. I. Vol. 7 , Number 4. Vol. 26 ,pp 275 - 277. 1997*.

Ahmadi, B.H. - Saka, M.P. "Behaviour of Composite Timber Concrete Floors". *Journal of Structural Engineers, Vol 119, N°11, pp 3111-3130. 1993*.

Linden, M. L.R. van der "Load-sharing in timber-concrete composite floor. Proceeding of PTEC". *Technical University of Karlsruhe. Australia. 1994* .

"Diseño de Estructuras de Madera". EUROCODE 5.

Linden, M. L.R. van der " Research Topic: Timber - Concrete Composite Floors". *INTERNET. University of Karlsruhe. Netherlands.. 1997*.

"Timber concrete composite floor system – a calculation model". *Report N° 25.4.95. 1/ HC-11 . University of Karlsruhe. Netherlands.. 1997*

.Fornons, J. M. “ El Método de los Elementos Finitos en la Ingeniería de Estructuras”
Ed. Universidad Politécnica de Barcelona. ETS Ingenieros Industriales de Barcelona
Barcelona. España. 1982.

Referencia Trayectoria Profesional

Federico Solari: Ingeniero en Construcciones. Egresado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Nordeste (Nov. 1991). Ámbito Académico: Docente de la Facultad de Ingeniería UNNE, Cátedra Estabilidad II (Nov. 1992 a la fecha). Investigador Facultad de Ingeniería UNNE, Instituto de Estabilidad, (Dic.2003 a la fecha). Ámbito Profesional: Ejecución de Obras Particulares (Dic. 1991 a la Fecha). Cálculo de Estructuras de HºAº (Abril 1992 a la Fecha)

Raúl Astori: Ingeniero Civil; Facultad de Ingeniería- UNNE; 1974. Magister en Gestión Ambiental y Ecología. Facultad de Arquitectura y Urbanismo - UNNE. 2000 Ámbito Académico: Docente de la Facultad de Ingeniería UNNE, Cátedra Tecnología y Ensayo de Materiales (Mar. 1980 a la fecha). Tecnología de la Construcción. (Abr. 1993 a la fecha). Investigador Facultad de Ingeniería UNNE, Depto. Mecánica Aplicada, (Mar.1988 a la fecha). Ámbito Profesional: Ejecución de Obras Particulares. Proyecto y Cálculo de Estructuras de HºAº

Ricardo Barrios D'Ambra: Ingeniero en Construcciones; Facultad de Ingeniería- UNNE; 1988. Magister en Mecánica Aplicada al Análisis y al Proyecto en Ingeniería. Facultad de Ingeniería - UNNE. 1998 Ámbito Académico: Docente de la Facultad de Ingeniería UNNE, Cátedra Estabilidad III (Nov. 1991 a la fecha). Estabilidad II (Abr. 1993 a la fecha). Investigador Facultad de Ingeniería UNNE, Depto. Mecánica Aplicada, (Dic.1990 a la fecha). Ámbito Profesional: Ejecución de Obras Particulares Cálculo de Estructuras de HºAº

Luis Ksteski: Ingeniero Civil. Egresado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Nordeste (Jun. 2004). Ámbito Académico: Docente de la Facultad de Ingeniería UNNE, Cátedra Estabilidad III (Abr. 2005 a la fecha). Cátedra Análisis Matemático (May. 2005 a la fecha). Investigador Facultad de Ingeniería UNNE, Depto. Mecánica Aplicada, (Oct.2003 a la fecha).