

SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE VIGAS DE ARAUCARIA ANGUSTIFOLIA (PINO PARANÁ)

**Diab Jacinto^a, Guillaumet Alfredo^a, Armas Alberto^a, Filippetti Cecilia^a and Manavella
Roberto^a**

^a*Grupo CIDECA, Facultad Regional Venado Tuerto de la Universidad Tecnológica Nacional,
Laprida 651, 2600 Venado Tuerto, Argentina, jacintodiab@hotmail.com*

Palabras claves: Araucaria angustifolia, viga, defectos, resistencia, simulación numérica

Resumen: La madera es un material que presenta diferentes propiedades mecánicas en distintas direcciones (material ortotrópico), presentando distintos módulos de elasticidad y coeficiente de Poisson, según si la dirección considerada coincide o no con la dirección de las fibras, por lo que la mecánica de estos materiales es más compleja que la de un material isótropo. El objetivo de este trabajo consiste en simular numéricamente a través del método de elementos finitos el comportamiento de vigas aserradas de Araucaria angustifolia (pino paraná) con defectos diversos, y establecer una relación con el comportamiento mecánico observado de las mismas en ensayos de flexión realizados según normas europeas.

Se utilizaron los datos empíricos de 256 vigas de distinta escuadría de Araucaria angustifolia, ensayadas a flexión en el laboratorio de la UTN Facultad Regional Venado Tuerto. De todos ellos se tomaron los 50 casos más representativos. Esas 50 vigas fueron modeladas mediante un software de cad en 3D (Se utilizó el software Solid Works), reproduciéndolas totalmente con sus defectos (nudos, médula, grietas). Para este caso, se consideró a la médula y los nudos como huecos, poniéndose especial cuidado en el modelado de la unión entre médula y nudos. Los resultados posteriores confirmarían la bondad de esta hipótesis.

Se simuló mediante un programa comercial (Cosmos) para cada caso las condiciones de ensayo, modelizando los apoyos, los sitios de aplicación de las cargas y la forma de aplicación de las mismas. Se obtuvieron los valores de rotura en cada caso. De las comparaciones con los ensayos se concluye que en el 90% de los casos, los valores empíricos y teóricos coinciden dentro de un margen de error del 10%, observándose que en la mayoría de los casos, los segundos son superiores a los primeros.

1 INTRODUCCIÓN

En nuestro país la utilización de la madera para la ejecución de estructuras no presenta un amplio desarrollo. Esta limitación se debe fundamentalmente a aspectos culturales y el desconocimiento de las propiedades del material.

Las especies nativas de madera dura o semiduras se presentan como las elegidas a la hora de proyectar una estructura y si bien sus propiedades físicas y mecánicas no están profundamente analizadas su alta prestación satisface los requerimientos de los estructuralistas.

La necesidad de avanzar con la protección del bosque nativo y la escasez de piezas de escuadarias y largos importantes, lleva a orientar la demanda a vigas de madera laminada encolada. Como la construcción de estos elementos es realizada a partir de madera de especies de reforestación con una técnica de fabricación especializada, aparece la necesidad de conocer con un poco más de precisión las propiedades físicas y mecánicas de este material, además de la normalización del proceso constructivo.

La madera es un material ortotrópico con propiedades que varían con la especie, el lugar de cultivo, la edad, la humedad, la densidad y los defectos que presente cada elemento (presencia de nudos, médula, madera juvenil, desviación de la fibra, etc.).

Para la determinación de las propiedades mecánicas, las Normas IRAM tradicionalmente prescriben los ensayos sobre piezas libres de defectos. Los últimos trabajos de investigación realizados en base a las prescripciones las Normas Europeas sobre elementos de dimensiones estructurales y con defectos, originó la Norma IRAM 9670 de clasificación en grados de resistencia para la madera aserrada de pinos resinosos (Pino elliottis y Pino taeda) del noreste argentino mediante una evaluación visual; y las normas IRAM 9662-1/2/3 de clasificación de tablas (Araucaria angustifolia, Pino elliottis y Eucalyptus grandis) para la fabricación de vigas laminadas.

Entre otros defectos, la nudosidad pasó a ser de capital importancia a la hora de clasificar en forma visual un elemento de madera aserrada. El nudo dificulta la trabajabilidad, genera particularidades de orden estético y provoca inconvenientes en el comportamiento mecánico, fundamentalmente a tracción y flexión.

Como nuestro trabajo está orientado a describir las propiedades mecánicas de las vigas aserradas con defectos nos orientaremos a la evaluación de la incidencia del nudo en el comportamiento mecánico.

En la publicación “Diseño de un método de clasificación visual de madera a utilizar en la fabricación de vigas laminadas” (RITIM) se establecen criterios de clasificación para determinar dos clases resistentes en tablas de Araucaria angustifolia destinadas a la fabricación de vigas de madera laminada. Se consideran dos parámetros, primero la presencia de médula que se admite solo en la clase 2, y después se limita la dimensión de la nudosidad, hasta 1/3 de la dimensión de la cara donde se manifiesta para la clase 1 y entre 1/3 y 2/3 para la clase 2. La publicación presenta los valores característicos de resistencia de la madera de esta especie para cada clase resistente.

En cuanto a la clasificación de vigas aserradas tomaremos como base la publicación realizada en el III Congreso Forestal Iberoamericano en Junio de 2007 “Clasificación Visual Resistente de la Araucaria angustifolia procedente de Eldorado, Misiones, Argentina” (Guillaumet et al., 2007). La misma presenta los criterios para establecer tres clases resistentes. Nuevamente aparecen la médula y la nudosidad como los parámetros determinantes para establecer los límites entre clases.

“La presencia de nudos disminuye de forma notable la resistencia de la madera, sobre todo

a los esfuerzos de tracción y flexión, haciendo el efecto que si de un agujero de la madera se tratara. La posición del nudo en la pieza también influye en pérdida de resistencia” Vignote Peña S. et al (2000).

En el trabajo “Relación entre la nudosidad y las características resistentes de la Araucaria angustifolia” (Guillaumet et al., 2008) presentado en las XX Jornadas de Ingeniería en el año 2008 se presentaban las siguientes conclusiones:

“# Se aprecia que la correlación con las propiedades resistentes de una viga de madera aserrada de Araucaria angustifolia es sensiblemente mayor si se consideran los nudos en la sección transversal completa y no solamente en los cuartos extremos de la misma.....

Evaluar a los nudos como vacíos, para determinar los momentos de inercia, representa acertadamente el comportamiento observado en los ensayos realizados.

Con las consideraciones vertidas precedentemente sobre la clasificación visual resistente de la araucaria angustifolia y el análisis del comportamiento de los nudos en la sección nos proponemos verificar su validez analizando 50 de vigas ensayadas por el método de los elementos finitos.

2 OBTENCIÓN PREVIA DE LOS DATOS EMPÍRICOS:

Los datos empíricos provienen de ensayos realizados en el Laboratorio de Estructuras de la Facultad Regional Venado Tuerto de la U.T.N. y se publicaron completos en el III Congreso Forestal Iberoamericano. En los próximos párrafos presentaremos una apretada síntesis de los mismos para facilitar la comprensión del trabajo de simulación numérica.

Para todos los ensayos se siguieron las prescripciones de las Normas Europeas Serie Construcción.

La especie forestal de la que se estudió el comportamiento estructural es el Pino Paraná (*Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze), procedente de Eldorado, Provincia de Misiones, Argentina.

Se realizó el ensayo de 256 vigas de madera aserrada, divididas en 5 series de distinta escuadría (2" x 3", 2" x 4", 2" x 5", 2" x 6" y 3" x 6"). Los ensayos se realizaron de acuerdo a las prescripciones de la Norma Europea EN 408: 1995. La figura 1 esquematiza el modelo de ensayo.

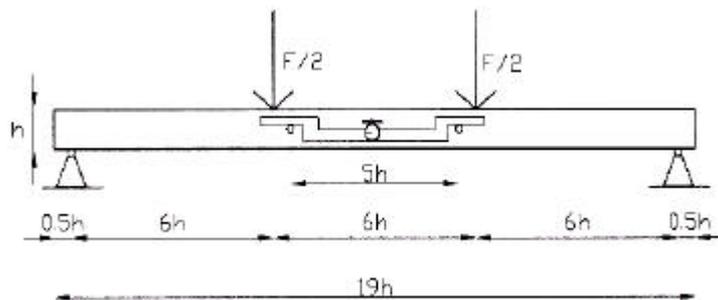


Figura 1: esquema de cargas para ensayo a flexión

La expresión para determinar la resistencia a flexión es:

$$f_m = \frac{aF_{m\acute{a}x}}{2W} \quad (1)$$

- f_m Resistencia a flexión en N / mm² (Tensión de rotura a flexión)
 a Distancia entre un punto de carga y el apoyo más próximo en el ensayo de flexión, en milímetros
 $F_{m\acute{a}x}$ Carga máxima, en Newton
 W Módulo resistente de la sección, en milímetros elevados a la tercera potencia

El módulo de elasticidad se obtiene de la medición de deformaciones en una luz de 5h en el centro de la viga y la expresión para determinarlo es:

$$E_m = \frac{al_1^2 (F_2 - F_1)}{16 I (w_2 - w_1)} \quad (2)$$

- E_m Módulo de elasticidad en flexión en N/mm²
 $F_2 - F_1$ incremento de carga en la parte recta de la curva carga-deformación, en newton
 $w_2 - w_1$ Incremento de la deformación correspondiente a $F_2 - F_1$, en milímetros
 a Distancia entre un punto de carga y el apoyo más próximo en el ensayo de flexión, en milímetros
 l_1 Longitud base de medida utilizada para la determinación del módulo de elasticidad, en milímetros
 I Momento de inercia, en milímetros elevados a la cuarta potencia

Las piezas son ensayadas con los defectos en la posición más desfavorable, por ello la resistencia a flexión y el módulo de elasticidad están influenciados por su presencia, esta es la base sobre la que se propuso la clasificación en clases resistentes.

La especie forestal presenta agrupamiento de nudos a intervalos regulares, lo que presenta una repetición del defecto y una modificación de la sección transversal. Previo a cada ensayo se efectuó un relevamiento de los mismos de acuerdo a lo ejemplificado en la figura 2:



Figura 2 – Relevamiento de nudos

La figura 3 ilustra la desviación de las fibras que se producen en la zona cercana al nudo



Figura 3 – Agrupamiento de nudos con desviación de fibras

Los agrupamientos de nudos presentan una distribución aleatoria en la sección, pudiendo transformar una flexión recta en oblicua por modificación de los ejes principales de inercia. La figura 4 ilustra esta situación:



Figura 4 – Fotografía de secciones transversales con agrupamiento de nudos

A los efectos de avanzar en establecer los límites para una clasificación visual resistente se utilizaron tres criterios para analizar la relación entre la nudosidad y la resistencia a la flexión ofrecida por el elemento, La figura 5 ilustra los mismos:

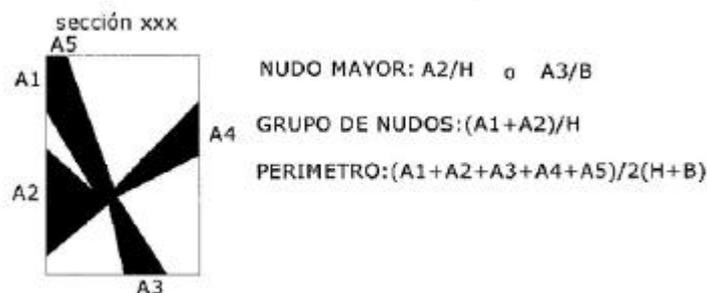


Figura 5 – Sección con nudosidad típica para explicar los criterios de evaluación de la nudosidad

Criterio de nudosidad N1 (Nudo mayor): relación entre la dimensión del nudo mayor y el de la superficie externa donde se manifiesta.

Criterio de nudosidad N2 (Grupo de nudos): relación entre la dimensión del nudo o grupo de nudos ubicados en un largo igual al canto de la viga, lo que resulte mayor, y el de la superficie externa donde se manifiesta.

Criterio de nudosidad N3 (Perímetro): relación entre la sumatoria de las dimensiones de todos los nudos que se manifiestan en un largo igual al canto de la viga (grupo de nudos en todas las caras de la sección estudiada) y el perímetro de ésta en la sección en estudio.

El trabajo concluyó con los parámetros mecánicos esperables para cada clase y con una propuesta de clasificación visual resistente, las tablas 1 y 2 presentan respectivamente estas conclusiones:

		CLASE 1	CLASE 2	CLASE 3
PROPIEDADES RESISTENTES en N/mm²				
Flexión (1)	$f_{m,k}$	43,60	24,32	20,06
Tracción paralela (2)	$f_{t,0,k}$	26,16	14,59	12,04
Tracción perpendicular (2)	$f_{t,90,k}$	0,44	0,39	0,39
Compresión paralela (2)	$f_{c,0,k}$	27,34	21,02	19,28
Compresión perpendicular (2)	$f_{c,90,k}$	6,64	5,85	5,81
Cortante (2)	$f_{v,k}$	4,10	2,57	2,20
PROPIEDADES DE RIGIDEZ en kN/mm²				
Módulo de Elasticidad paralelo medio (1)	$E_{0,medio}$	15,51	13,28	11,63
Módulo de Elasticidad paralelo 5° percentil (1)	$E_{0,05}$	10,39	8,89	7,79
Módulo de Elasticidad perpendicular medio (2)	$E_{90,medio}$	0,52	0,44	0,39
Módulo cortante medio (2)	G_{medio}	0,97	0,83	0,73
DENSIDAD (Humedad 12%) en Kg/m³				
Densidad (1)	ρ_k	443	390	387
Densidad media (1)	ρ_{medio}	529	483	472
(1) Valores obtenidos directamente de los ensayos				
(2) Valores obtenidos de acuerdo a las prescripciones de la Norma UNE-EN 384:1995				
CLASE RESISTENTE SEGÚN UNE-EN 338:1995		C40	C24	C18

Tabla 1 -: Propiedades mecánicas para vigas de madera aserrada de Araucaria angustifolia.

DEFECTOS ADMISIBLES	CLASE RESISTENTE DE ACUERDO A NORMA UNE-EN 338:1995		
	C40	C24	C18
Médula	No se admite	Se admite	Se admite
Grupo de nudos (1)	Menor a 40%	Menor a 60 %	Mayor a 60%
Longitud máxima de fisuras que no atraviesan la pieza (2)	Se admiten fisuras con una profundidad menor al 50 % del grosor de la pieza		
	Se admite hasta 1 metro o $\frac{1}{4}$ de la longitud de la pieza, lo que resulte menor		Se admite hasta 1,5 metros o $\frac{1}{2}$ de la longitud de la pieza, lo que resulte menor
Longitud máxima de fisuras que atraviesan la pieza (2)	Solo se admiten en los extremos de la pieza y con una longitud menor a la anchura de la misma.		Se admite hasta 1 metro o $\frac{1}{4}$ de la longitud de la pieza, lo que resulte menor. En los extremos de la pieza se admiten con longitud menor a dos veces la anchura.
Deformación previa de curvatura longitudinal de cara	10 mm / 2000 mm		20 mm / 2000 mm
Deformación previa de curvatura longitudinal de canto	8 mm / 2000 mm		12 mm / 2000 mm
Deformación previa de alabeo	1 mm / 25 mm de anchura		2 mm / 25 mm de anchura
Deformación previa de curvatura transversal	Sin restricciones		
Ataque activo de insecto	No se admite		
Arista faltante	No debe reducir la anchura ni el grosor a menos de $\frac{2}{3}$ de su dimensión básica.		
(1) En porcentaje de la dimensión que ocupa en la cara donde se manifiesta.			
(2) Los límites establecidos se refieren a la suma de las fisuras que presenta la viga.			

Tabla 2: Propuesta de límites entre clases resistentes para vigas de madera aserrada de *Araucaria angustifolia*

3 CALCULO DE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN POR MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

A fin de comparar los valores obtenidos empíricamente de acuerdo a lo explicado precedentemente, con valores teóricos obtenidos numéricamente, se procedió a calcular las tensiones mediante el método de los elementos finitos.

Para ello se modelaron los 50 casos más representativos con un software de modelado en 3D, repitiendo exactamente los nudos, médula y otras imperfecciones que tenían las vigas ensayadas (se seleccionaron vigas que representaran a las tres clases resistentes propuestas precedentemente). En la figura 6 puede observarse como ejemplo, una imagen renderizada de una de ellas, y en la figura 7, una imagen “tipo alambre” de la misma viga con sus nudos y médula.

Para los fines del cálculo se adoptó la hipótesis de que los nudos se comportarían como huecos. Los resultados demostrarían posteriormente la bondad de esta hipótesis.

A cada viga se le asignó el módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson calculados empíricamente para cada una de ellas de acuerdo al método descrito en la sección 2, según las prescripciones de las Normas Europeas EN 408.

La madera es un material ortotrópico con propiedades mecánicas distintas según direcciones perpendiculares entre sí, pero como en este caso las tensiones actuantes están únicamente en la dirección de las fibras (eje de la pieza), no hubo necesidad de considerar tensiones en sentido perpendicular a las fibras, utilizándose un único valor de módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson para cada viga. Para este último, los valores calculados empíricamente para este tipo de madera, diferían muy poco entre sí, por lo que se tomó un único valor igual a 0,3 para todas las vigas. Por lo dicho, a pesar de estar tratando con un material ortotrópico, debido a la naturaleza y geometría de las cargas, utilizamos la ley de Hooke generalizada para un material isótropo en este caso.

Una vez dibujada la viga con todos sus defectos, se procedió a vincularla, de igual manera que estaba dispuesta la viga en el ensayo en el laboratorio. Para ello se dispuso que la misma estaría simplemente apoyada (un apoyo fijo y otro móvil) y cargada en el tercio central, de manera que en el mismo tenemos flexión pura sin corte.

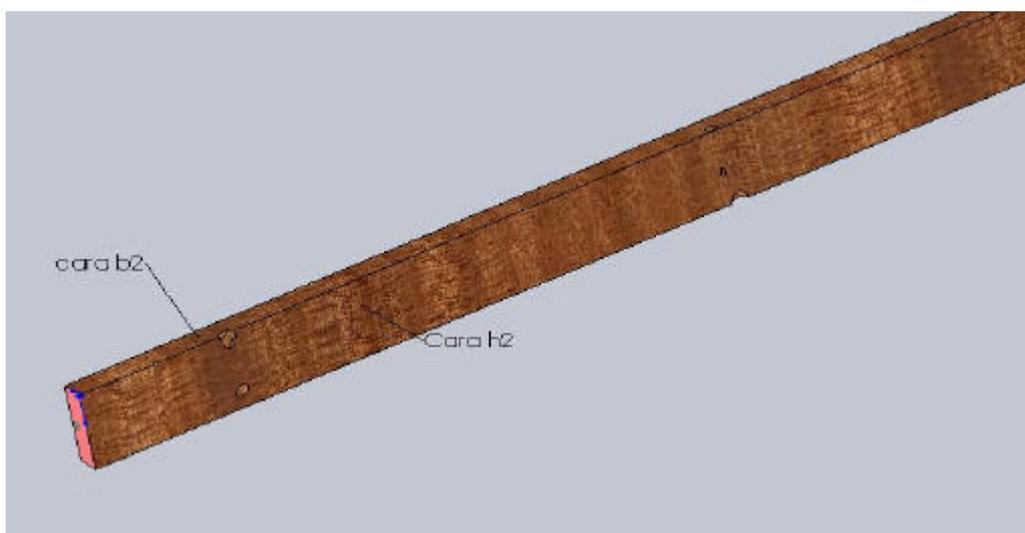


Figura 6 – Vista renderizada de una viga con defectos

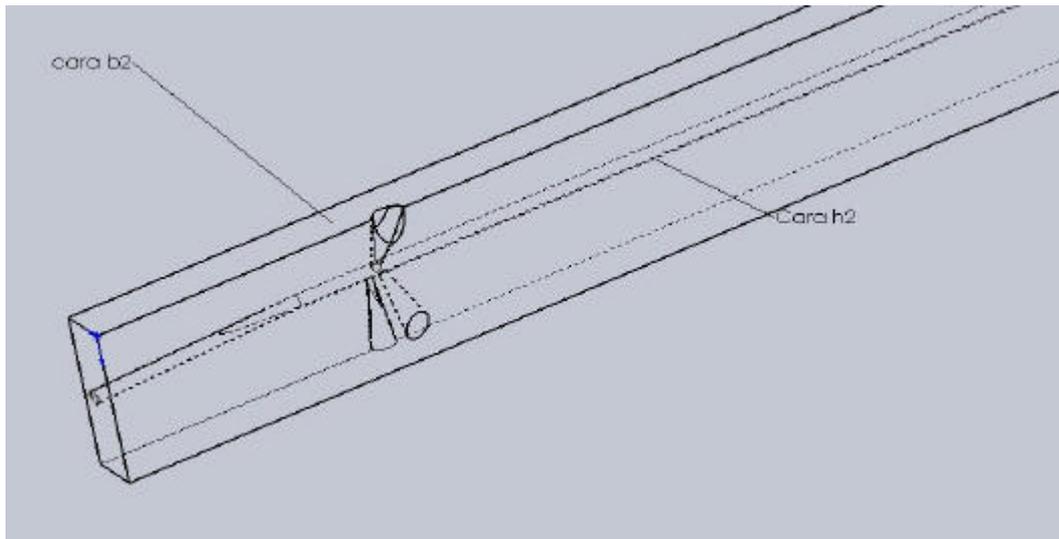


Figura 7- Vista de una viga con médula y nudos

En la figura 8, puede observarse una viga modelada en el software de cálculo, simulando estar simplemente apoyada y cargada en su tercio central.

Se procedió luego a mallar cada una de las vigas con un elemento tetraédrico, refinando la malla en los lugares con nudos, donde se registraría una concentración de tensiones, como puede observarse en la figura 9.

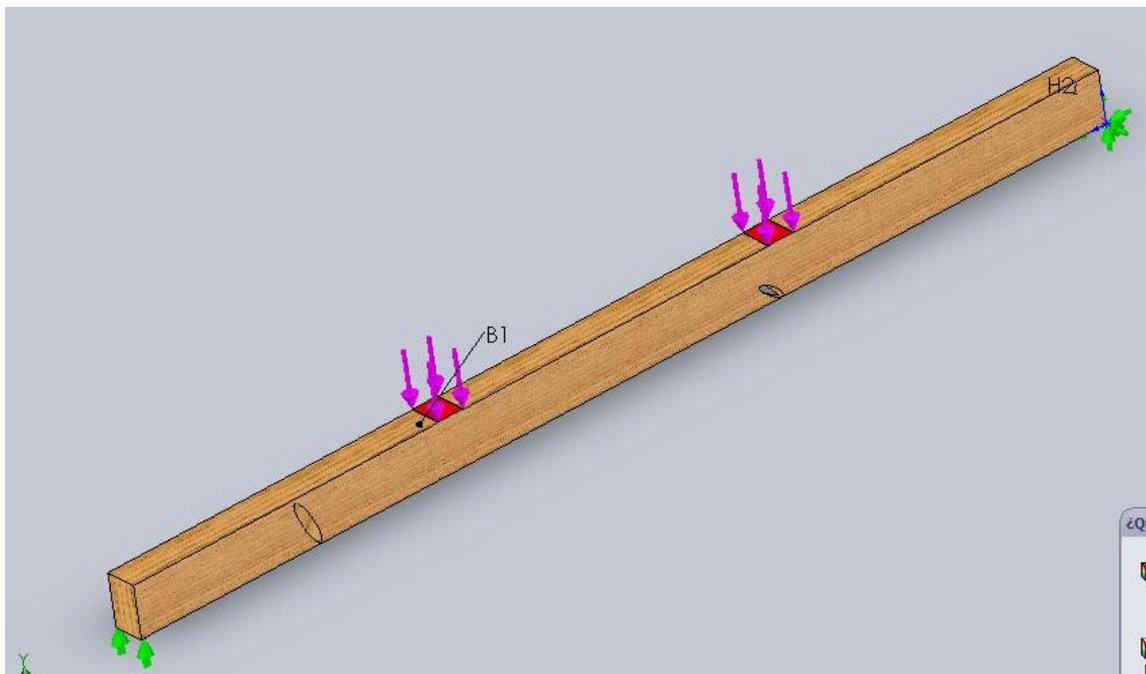


Figura 8 – Apoyos y cargas

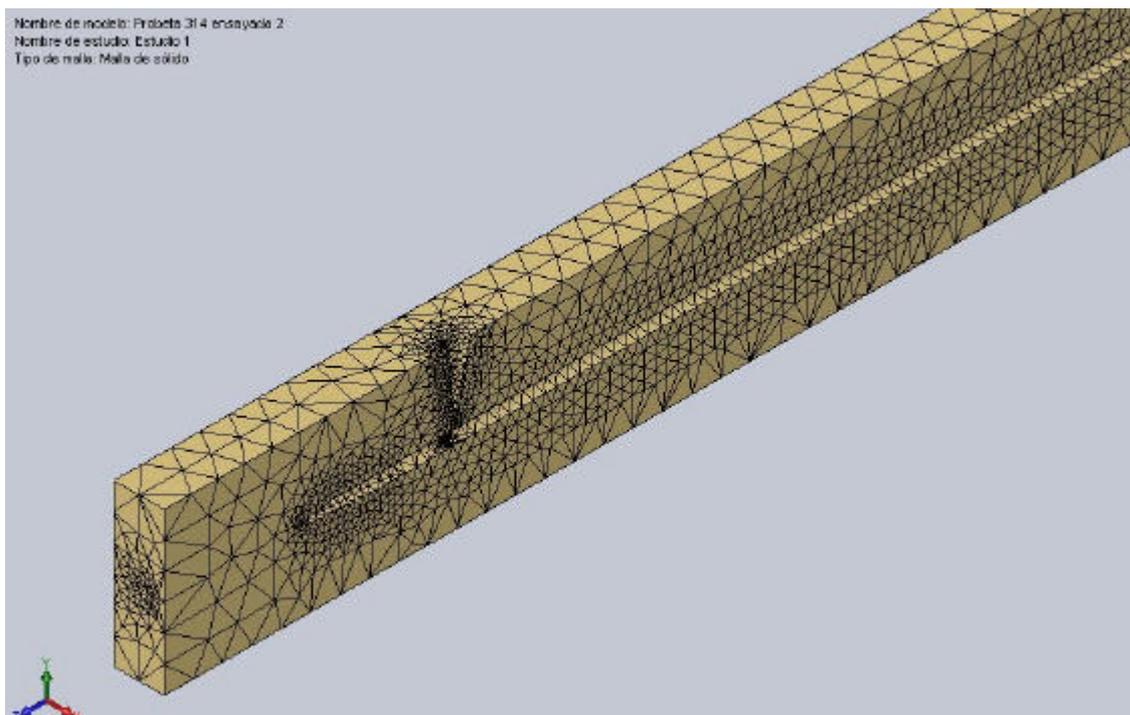


Figura 9 – Malla de elementos refinados en torno a los defectos

4 COMPARACIÓN DE RESULTADOS POR CLASES

Una vez solicitadas las vigas con las cargas de rotura empíricas (Ver Sección 2) y determinadas las tensiones normales (resistencia a la flexión) por el método de los elementos finitos, se tomaron para la comparación los valores máximos de tensión en el tercio central de cada una de ellas, para las fibras más alejadas del eje neutro, (se excluyeron los picos observados en los puntos de concentración de tensiones) y se tabularon, agrupando las vigas por clases resistentes, para poder compararlos con los valores experimentales.

Se calculó la diferencia entre los valores de tensiones empíricos y numéricos, llamándose “Error neto” a la misma. Dividiendo luego éstos, por los correspondientes valores empíricos, se determinaron los errores porcentuales (Error %), que se ven reflejados para la clase resistente 1, en la tabla 3.

VIGAS CLASE RESISTENTE 1						
Nro.	Probeta Nro	Resultados Empíricos		Valores Numericos	ERRORES	
		Módulo de Elasticidad E [N/mm ²]	Tensión de rotura [N/mm ²]	Tensión de rotura [N/mm ²]	Neto [N/mm ²]	Error %
1	205	15.794,10	66,83	67,00	-0,17	0,25
2	3	12.643,10	52,59	55,47	-2,88	5,48
3	14	14.348,90	86,46	86,68	-0,22	0,25
4	9	14.835,20	88,90	90,10	-1,20	1,35
5	7	17.881,30	92,05	93,45	-1,40	1,52
6	138	19.503,60	76,30	80,00	-3,70	4,85
7	230	17.763,10	89,94	88,43	1,51	1,68
8	321	17.763,70	62,64	68,00	-5,36	8,56
9	431	13.464,20	50,40	55,06	-4,66	9,25
10	302	15.038,90	56,52	54,05	2,47	4,37
11	338	16.051,10	49,25	47,64	1,61	3,27
12	339	16.007,40	43,55	49,40	-5,85	13,43
13	341	11.983,10	29,08	20,96	8,12	27,92
14	335	13.369,40	35,65	37,96	-2,31	6,48
15	29	15.335,10	54,32	57,77	-3,45	6,35
16	105	13.401,80	66,35	69,88	-3,53	5,32
17	241	14.398,80	34,55	36,99	-2,44	7,05
Error % promedio						6,32

Tabla 3 – Errores de las probetas clase 1

En la figura 10 puede observarse en una gráfica de barras el error porcentual de cada probeta, comparado con el error promedio de la clase 1

En la figura 11, puede verse también en gráfico de barras los valores empíricos y numéricos, observándose que en general, los valores numéricos son mayores a los empíricos.

En la tabla 4 pueden observarse los valores obtenidos para las probetas clase 2.

En la figura 12 puede observarse en una gráfica de barras el error porcentual de cada probeta, comparado con el error promedio de la clase 2

En la figura 13, puede verse también en gráfico de barras los valores empíricos y numéricos, observándose también en este caso que en general, los valores numéricos son mayores a los empíricos.

Es de destacar que el error promedio, es prácticamente igual para la clase 2, que para la clase 1

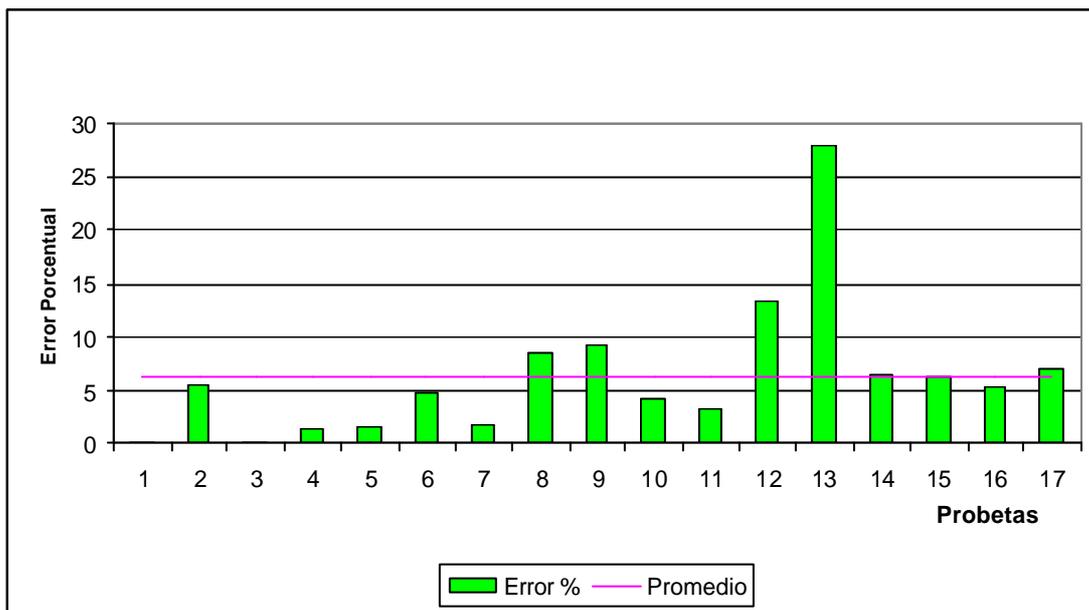


Figura 10 – Errores porcentuales de las probetas clase 1

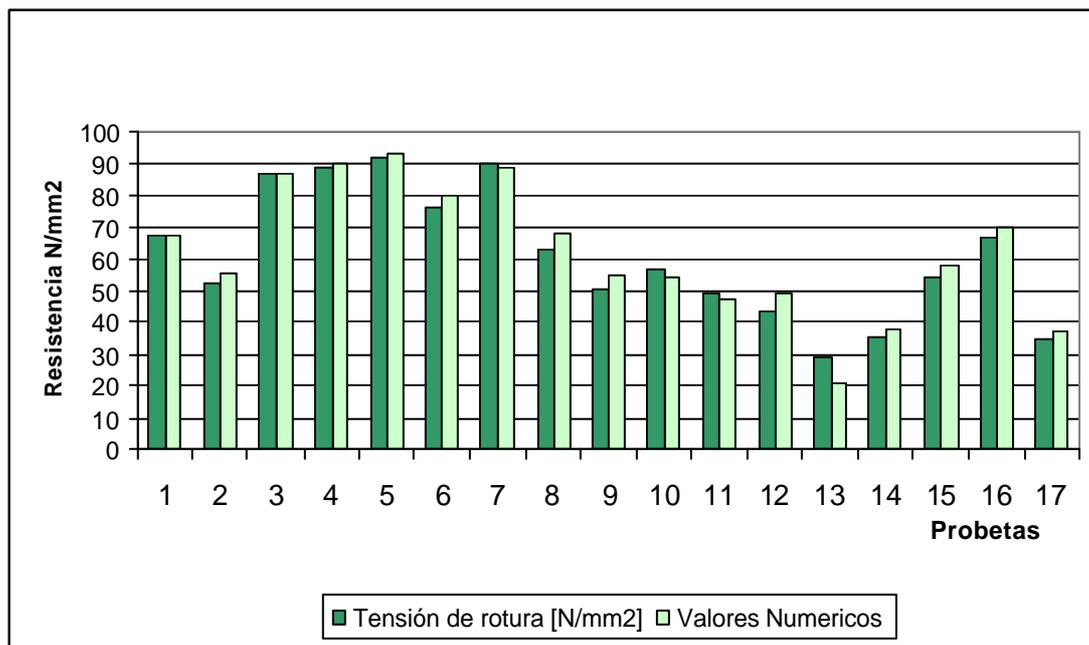


Figura 11 – Comparación de los valores empíricos y numéricos en la clase 1

VIGAS CLASE RESISTENTE 2						
Nro.	Probeta Nro	Resultados Empíricos		Valores Numericos	ERRORES	
		Módulo de Elasticidad E [N/mm ²]	Tensión de rotura [N/mm ²]	Tensión de rotura [N/mm ²]	Neto [N/mm ²]	Error %
1	303	16.314,30	55,48	66,10	-10,62	19,14
2	314	7.909,70	16,57	17,40	-0,83	5,01
3	326	13.549,90	42,98	43,00	-0,02	0,05
4	334	17.321,90	54,84	59,23	-4,39	8,01
5	210	15.796,50	56,49	55,71	0,78	1,38
6	209	11.959,10	49,83	50,28	-0,45	0,90
7	1	6.437,90	42,80	45,17	-2,37	5,54
8	413	11.312,90	22,03	24,71	-2,68	12,17
9	423	13.299,30	50,53	55,75	-5,22	10,33
10	220	12.986,90	51,33	52,56	-1,23	2,39
11	419	14.169,80	54,66	58,26	-3,60	6,59
12	341	11.983,10	25,33	27,27	-1,94	7,66
13	52	12.287,30	48,65	52,81	-4,16	8,56
14	1	6.437,90	41,32	43,14	-1,82	4,41
15	119	7.562,70	20,35	21,07	-0,72	3,56
16	433	10.259,70	18,98	21,00	-2,02	10,66
17	114	14.218,40	32,22	36,03	-3,81	11,84
Error % promedio						6,95

Tabla 4 – Errores de las probetas clase 2

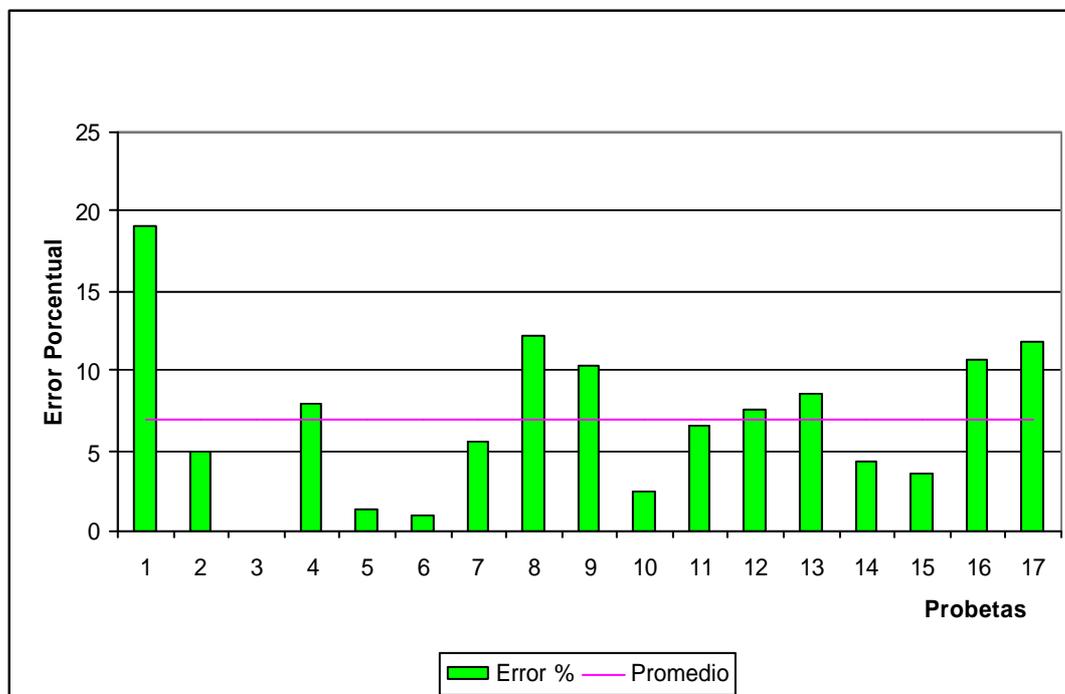


Figura 12- Error probetas clase 2

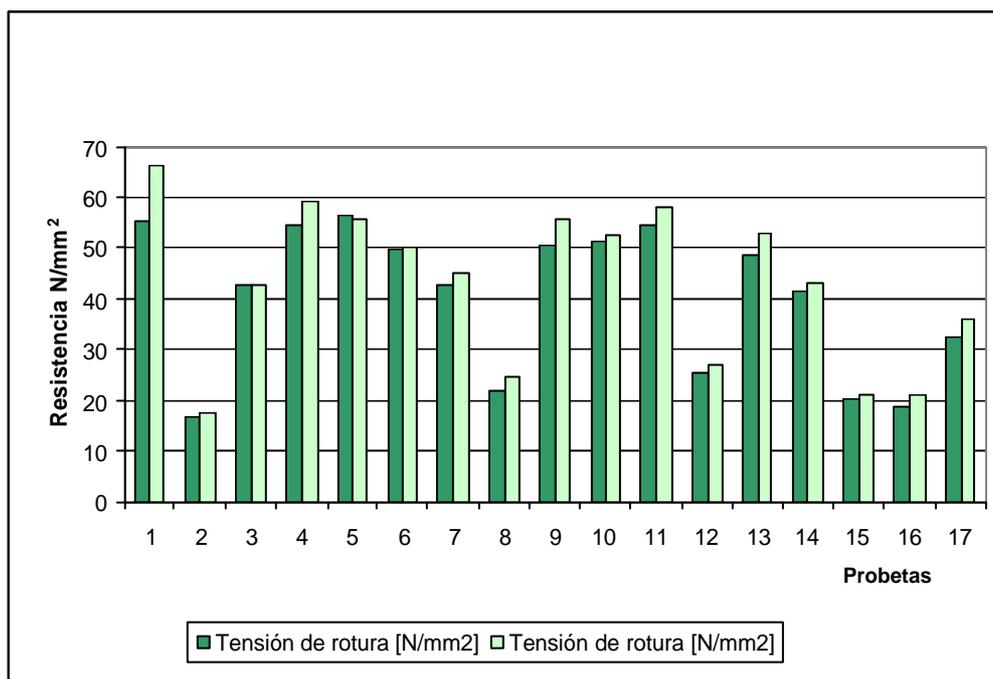


Figura 13- Comparación de los valores empíricos y numéricos de clase 2

En la tabla 5 pueden verse los valores obtenidos para las probetas de clase 3

VIGAS CLASE RESISTENTE 3						
Nro.	Probeta Nro	Resultados Empíricos		Valores Numericos	ERRORES	
		Módulo de Elasticidad E [N/mm ²]	Tensión de rotura [N/mm ²]	Tensión de rotura [N/mm ²]	Neto [N/mm ²]	Error %
1	318	12.321,60	29,23	30,94	-1,71	0,49
2	201	10.041,30	34,11	34,00	0,11	0,32
3	128	11.775,60	36,40	38,00	-1,60	4,40
4	127	14.930,70	60,08	62,10	-2,02	3,36
5	12	8.213,30	37,30	38,04	-0,74	1,98
6	8	7.510,70	12,97	13,53	-0,56	4,32
7	226	16.394,60	48,58	46,18	2,40	4,94
8	408	9.079,20	25,72	27,38	-1,66	6,45
9	416	6.823,90	29,93	32,21	-2,28	7,62
10	424	12.034,10	36,56	40,36	-3,80	10,39
11	433	10.259,70	17,65	19,07	-1,42	8,05
12	211	10.998,60	33,25	35,06	-1,81	5,45
13	228	14.404,90	23,65	24,46	-0,81	3,42
14	346	7.741,10	16,32	18,04	-1,72	10,56
15	13	8.142,60	19,88	20,12	-0,24	1,22
16	128	11.775,60	35,62	36,75	-1,13	3,16
Error % promedio						4,76

Tabla 5 – Errores de las probetas clase 3

En este caso, el promedio de los errores porcentuales es ligeramente menor que para las clases

anteriores.

En la figura 14 puede observarse en una gráfica de barras el error porcentual de cada probeta, comparado con el error promedio de la clase 3

En la figura 15, puede verse también en gráfico de barras los valores empíricos y numéricos, observándose también en este caso que en general, los valores numéricos son mayores a los empíricos

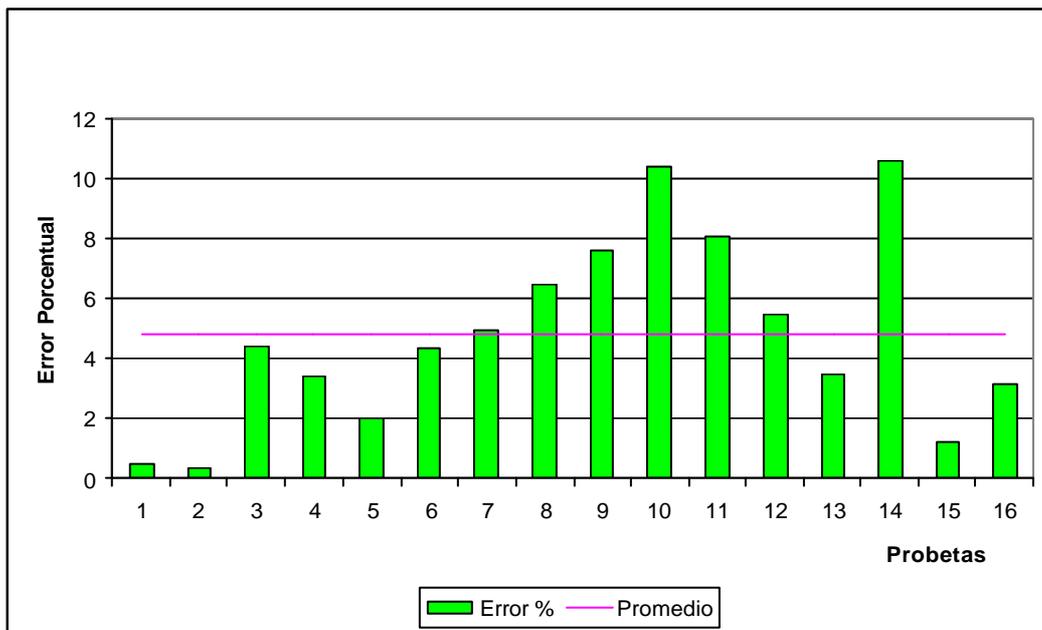


Figura 14- Error porcentual en probetas clase 3

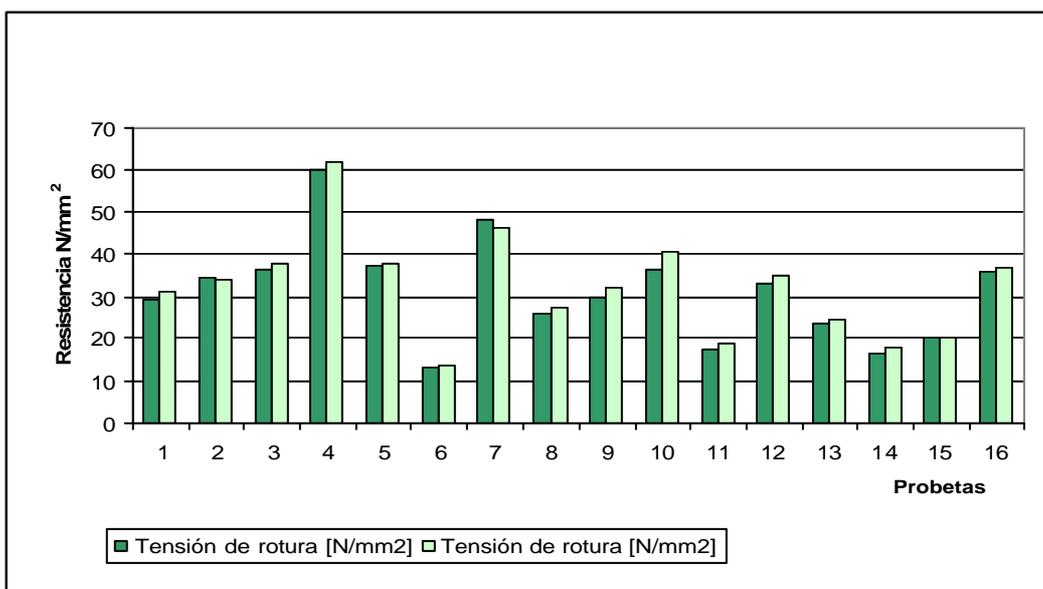


Figura 15- Comparación de los valores empíricos y numéricos en la clase 3

Del análisis de las 50 vigas, surge que el error porcentual es inferior al 14 % a excepción de dos de ellas, con lo que estaríamos dentro del percentilo 95, observándose que en general los valores numéricos están ligeramente por encima de los empíricos. También vemos que el error no depende

de la clase, ya que se obtuvieron errores porcentuales similares en las tres clasificaciones.

5 COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON LA DENSIDAD DE LA MADERA

Como algunas propiedades mecánicas de la madera están íntimamente relacionadas con la densidad, se tomaron los valores de las 50 vigas (de distintas clases resistentes) y se analizó la relación existente entre el error porcentual (la diferencia entre los valores de resistencia a la flexión obtenidos numéricamente y experimentalmente) y la densidad de la madera, no encontrándose correlación entre ambas magnitudes, ya que como puede apreciarse en el gráfico, el coeficiente de correlación es muy bajo. Su valor negativo, indicaría que el error tendería a bajar al aumentar la densidad, pero sin seguir una tendencia clara. Los valores analizados, pueden observarse en el gráfico de la figura 16

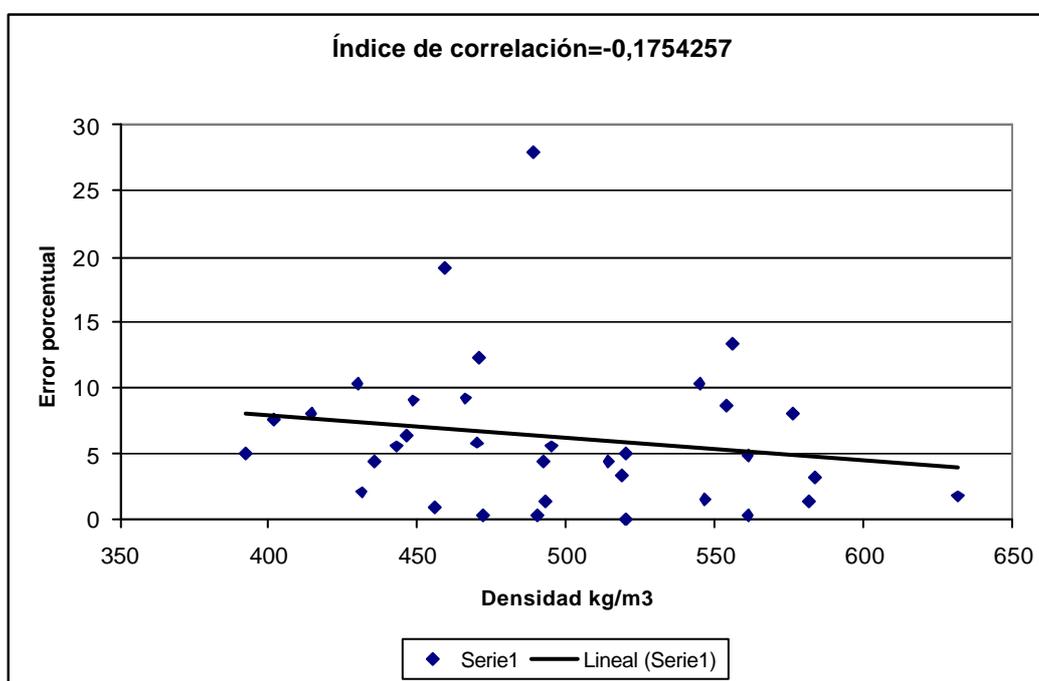


Figura 16 – Densidad versus error porcentual

6 CONCLUSIONES

Podemos extraer las siguientes conclusiones

- Considerar a los nudos como vacíos permitió alcanzar en la simulación numérica valores de tensiones similares a los hallados experimentalmente.
- El error cometido, no depende de la clase de viga (cantidad y calidad de los nudos), ya que se mantuvo dentro de los valores aceptables para los tres tipos de clases considerados.
- No se observa una relación entre la densidad y la diferencia entre resultados experimentales y numéricos
- Con los resultados obtenidos numéricamente, se confirma que los valores propuestos en la clasificación visual resistente considerando sección bruta, son perfectamente compatibles con las tensiones reales alcanzadas considerando secciones netas, por lo que el método de

clasificación resulta confiable y práctico para su utilización en el cálculo de estructuras.

- El método de los elementos finitos se adapta correctamente para representar el comportamiento de una viga de madera aserrada con sus defectos.

7 REFERENCIAS

- Comité Europeo de Normalización UNE-EN 408, Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. *AENOR, Madrid*, 1995.
- Guillaumet A.A. et al. Relación entre la nudosidad y las características resistentes de la *Araucaria angustifolia* (Pino Paraná). *XX Jornadas de Ingeniería estructural. Buenos Aires, G-101-2008*.
- Guillaumet AA. et al., “Clasificación Visual Resistente de la *Araucaria angustifolia* procedente de Eldorado, Misiones, Argentina”, *III Congreso Forestal de Iberoamerica. Buenos Aires. www.edutecne.utn.edu.ar/pino-parana/pino-parana.html*, ISSN 1851-0973, 2007
- Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, *IRAM 9670 de clasificación en grados de resistencia para la madera aserrada de pinos resinosos (Pino elliotti y Pino taeda) del noreste argentino mediante una evaluación visual*. IRAM, Buenos Aires, 2002.
- Instituto Argentino de Racionalización de Materiales IRAM 9662-1, *Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por resistencia. Parte 1: Tablas de pino Paraná (Araucaria angustifolia)*. IRAM, Buenos Aires, 2005.
- Instituto Argentino de Racionalización de Materiales IRAM 9662-2, *Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por resistencia. Parte 1: Tablas de Eucalyptus grandis*. IRAM, Buenos Aires, 2005
- Instituto Argentino de Racionalización de Materiales IRAM 9662-3, *Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por resistencia. Parte 1: Tablas de pino Tadea y Elliotis*. IRAM, Buenos Aires, 2005
- RITIM Clasificación visual de madera de pinos resinosos (*Pinus taeda* y *elliotti*) para uso estructural. *Novenas Jornadas Técnicas Forestales*. INTA-FCF-MEYRNRYT-Eldorado, Misiones, Argentina, 2002
- Vignote Peña S. et al., *Tecnología de la madera en la construcción arquitectónica*. Editorial Mundi-Prensa. España, 2000