

Asociación Argentina

de Mecánica Computacional



Mecánica Computacional Vol XXIX, págs. 1975-1989 (artículo completo)

DETERMINACIÓN DE MÓDULO ELÁSTICO DE MATERIALES
HOMOGENEOS Y COMPUESTOS, EN BASE A ENSAYOS SOBRE
TUBERÍAS CIRCULARES

Héctor R. Zaradnik, Silvia Raichman, Aníbal Mirasso y Daniel E. López

IMERIS, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo
rzaradnik@fing.uncu.edu.ar, sraichman@uncu.edu.ar, aemirasso@uncu.edu.ar,
dlopez@fing.uncu.edu.ar

<http://www.fing.uncu.edu.ar>

Palabras clave: Módulo de elasticidad, material compuesto, tuberías circulares.

Resumen: Existen básicamente dos técnicas para la determinación de los módulos de deformación elástica de los materiales constituyentes de tuberías: la primera consiste en tallar probetas cuasi-planas del propio caño y realizar sobre ellas ensayos de tracción simple y la segunda es realizar ensayos sobre trozos de caños de dimensiones ya sean normalizadas, o bien, acordes a los equipos de ensayo empleados, realizando un ensayo de aplastamiento parcial o uno de alargamiento parcial, con medición de la deformación del diámetro.

Las diferencias de los valores reportados según la técnica de ensayo suelen ser atribuidas a una incursión en el comportamiento no lineal del material como consecuencia de un exceso de aplastamiento o de alargamiento.

En este trabajo se muestra como, aún en rango elástico, la influencia de las deformaciones geoméricamente no lineales, induce a estimar valores equivocados del módulo de deformación longitudinal. Por medio del método de los elementos finitos se han realizado ensayos numéricos que permiten visualizar la influencia de las deformaciones geoméricamente no lineales en simulaciones del ensayo de compresión de caños, tanto de materiales homogéneos como laminados. Se pone en evidencia que según sea la técnica de ensayo empleada, el módulo de deformación longitudinal puede ser estimado por defecto o por exceso.

Especialmente, para los tubos de material compuesto con laminados simétricos, se estudia tanto la influencia de los ángulos de laminados como la incidencia de laminados con módulos de deformación longitudinal diferentes, orientados bajo ángulos de laminados diferentes.

Se concluye con recomendaciones sobre los métodos de ensayos y la forma de extraer datos de interés de gráficas propias de laboratorio.

INTRODUCCIÓN

Una de las técnicas más empleadas para la determinación del módulo de deformación elástica de los materiales constituyentes de tuberías consiste en tallar probetas cuasi-planas del propio caño y realizar sobre ellas ensayos de tracción simple con baja velocidad de aplicación de carga, midiendo en cada momento la carga aplicada sobre la probeta y la deformación. Como principales inconvenientes de esta estrategia, se pueden citar la confección de las probetas (las cuales deben cumplir con normas IRAM), y la aplicabilidad del ensayo casi exclusivamente a materiales homogéneos.

Un método alternativo, que va teniendo cada días más adeptos es realizar ensayos de carga sobre trozos de caños de dimensiones adecuadas., ya sean las normalizadas cuando en el país aplica una norma específica, o bien, acordes a los equipos de ensayo empleados. Se trata de realizar un ensayo ya sea de aplastamiento parcial o de alargamiento parcial, con medición de la deformación del diámetro. En esta estrategia se pueden citar los ensayos normalizados bajo norma internacional [ISO 9969](#) o la norma chilena [Nch 2835](#) aplicable a caños de PVC. En la [Figura 1](#) se puede observar la ejecución del ensayo siguiendo la norma



internacional [ISO 9969](#).

Figura 1: Ensayo de tubería industrial de 300mm de diámetro¹

Se ha observado que los resultados reportados según la técnica de ensayo presentan diferencias que normalmente suelen ser atribuidas a una incursión en el comportamiento no lineal del material como consecuencia de un exceso de aplastamiento o de alargamiento.

Sin embargo, no se ha encontrado ningún trabajo en el cual se mencione la influencia que ejercen las deformaciones geoméricamente no lineales en el comportamiento del tubo bajo ensayo, aún en rango elástico.

Por otro lado, el uso cada día más generalizado de los materiales laminados, especialmente los materiales compuestos en base a resinas con fibras, hace

¹ Imagen perteneciente al ensayo de tubo PETROPIPE tubería Estructurada HDPE ®

necesario investigar y fundamentar los modelos numéricos utilizados para comprender el comportamiento de los mismos. Dada la flexibilidad de todos los componentes estructurales de material compuesto es importante considerar la incidencia de esfuerzos membranales en la rigidez de la estructura ([Neto et al., 2004](#); Zaradnik et al; [2006, 2007](#)) ya que de lo contrario se estaría introduciendo una rigidez ficticia en el modelo.

En este trabajo se analiza mediante modelos de elementos finitos la influencia que las deformaciones geométricamente no lineales en las estimaciones de los valores del módulo de deformación longitudinal, tanto de materiales homogéneos como laminados, en el ensayo de compresión de caños. Se usan modelos de elementos finitos basados en las hipótesis de Mindlin y ecuaciones cinemáticas no lineales desarrollados por [Hinton y Owen \(1984\)](#); y extendidos por ([Zaradnik et al., 2006](#)).

Se pone en evidencia que según sea la técnica de ensayo empleada, el módulo de deformación longitudinal puede ser estimado por defecto o por exceso.

Para los tubos de material compuesto con laminados simétricos, se estudia tanto la influencia de los ángulos de laminados como la incidencia de laminados con módulos de deformación longitudinal diferentes, orientados bajo ángulos de laminados diferentes.

1 CRITERIOS DE ENSAYO

1.1. Norma internacional ISO 9969

La norma [ISO 9969](#)² indica la realización de un ensayo de compresión diametral para determinar la llamada rigidez anular o circunferencial que corresponde a la resistencia que presentan las tuberías frente a las fuerzas externas que le provocan una deformación diametral del 3% respecto al valor del diámetro medio de la tubería y a corto plazo. La expresión matemática que emplea la norma es:

$$E = S_N \frac{D^3}{J} \quad (1)$$

En la cual

E : Módulo de deformación longitudinal del material de la tubería, en [kN/m²]

S_N : Rigidez circunferencial, en [kN/m²]. Es la carga necesaria para que un metro de tubería se deforme $\delta = 0.03 D$.

D : Diámetro medio de la tubería, en [m]

J : Momento de inercia, en [m⁴/m]

1.2. Norma Nch 2835

En una forma simple, la norma chilena [Nch 2835/2003](#) exige el cálculo mediante:

$$E = 1.462 \frac{P R^3}{\delta J} = 149.0 \frac{P_{SI} R^3}{\delta J} \quad (2)$$

En la cual:

E : Módulo de deformación longitudinal del material, en [MPa].

P/δ : Representa la rigidez anular del caño para un largo aproximado a los 30

² Definida para a determinación de rigidez en tuberías de material termoplástico

mm y sus unidades son [kgf/mm] (observe que las unidades son del sistema técnico).

P_s / δ : Representa la rigidez anular del caño, cuando la carga se introduce en unidades del SI, resultando la rigidez en [kN/mm].

R : Radio medio del caño, en [mm].

J : Momento de inercia del caño, en [mm⁴], calculable con:

$$J = \frac{a e^3}{12} \quad (3)$$

en la cual:

a : Largo del trozo bajo ensayo, en mm. Se recomienda no mayor a 30 mm, y

e : Espesor medio del caño, en [mm], que debe cumplir con:

$$e \leq \frac{R}{10} \quad (4)$$

1.3. Otra aproximación

Consultando los textos de resistencia de materiales ([Pizarenko, 1974](#)) es posible encontrar expresiones simples del tipo:

$$E = 0.149 \frac{P_y R^3}{\delta_y J} \quad (5)$$

$$E = -0.137 \frac{P_y R^3}{\delta_x J} \quad (6)$$

Cuyos componentes tienen el mismo significado que en las anteriores, con la aclaración que, P_y es la carga deformante, aplicada en el sentido vertical y las deformaciones diametrales δ_y en la misma dirección de la carga y δ_x es la deformación diametral en la dirección perpendicular a la carga. A los efectos prácticos sólo se emplea la ecuación 5.

2 FORMULACIÓN BÁSICA DEL PROBLEMA

En trabajos anteriores (Zaradnik et al., [2006](#), [2007](#)) se han presentado la extensión del elemento finito basado en las hipótesis de Mindlin y ecuaciones cinemáticas no lineales desarrollado por [Hinton y Owen \(1984\)](#). A los fines del presente trabajo, a continuación se presenta una síntesis de la formulación. La condición de equilibrio estático esta dada en la forma:

$$K_T \{a\} = [K_0 + K_L + K_\sigma] \{a\} = \{P\} \quad (7)$$

$$K_0 = \left(\int_V B_0^T D B_0 dV \right) \quad (8)$$

$$K_L = \int_V B_0^T D B_1 dV \quad (9)$$

$$K_{\sigma} = \int_V (G_u^T \hat{S} G_u + G_v^T \hat{S} G_v + G_w^T \hat{S} G_w) dV \quad (10)$$

En la cual:

K_0 : Es la matriz de rigidez de pequeños desplazamientos;

K_L : Es la matriz de rigidez de grandes desplazamientos;

K_G : Es la matriz de rigidez geométrica o de carga-geometría, la cual funcionalmente depende del estado tensional expresado por \hat{S} ;

$\{a\}$: Vector de desplazamientos nodales, del cual sólo importan para el presente trabajo los desplazamientos que implican un acortamiento o alargamiento del diámetro en correspondencia con la dirección del vector de las cargas.

2.1. Análisis de las deformaciones de tubos homogéneos

Con la única finalidad de realizar una comparación de los resultados de las expresiones impuestas por las normas o por la teoría elástica (ecuaciones [1](#) a [5](#), que son todas versiones de una misma) con los resultados del modelo numérico elástico no lineal, se realiza un análisis sobre un tubo metálico con los parámetros y dimensiones presentados en la [Tabla 1](#):

Parámetro	Valor	Unidad
Módulo de elasticidad longitudinal (E)	205.94	GPa
Coefficiente de Poisson	0.30	Adim.
Diámetro medio (D)	0.250	m
Espesor (e)	0.011	m
Ancho (a)	0.10	m
Densidad (ρ)	8 750	Kg/m ³

Tabla 1: Propiedades del tubo homogéneo

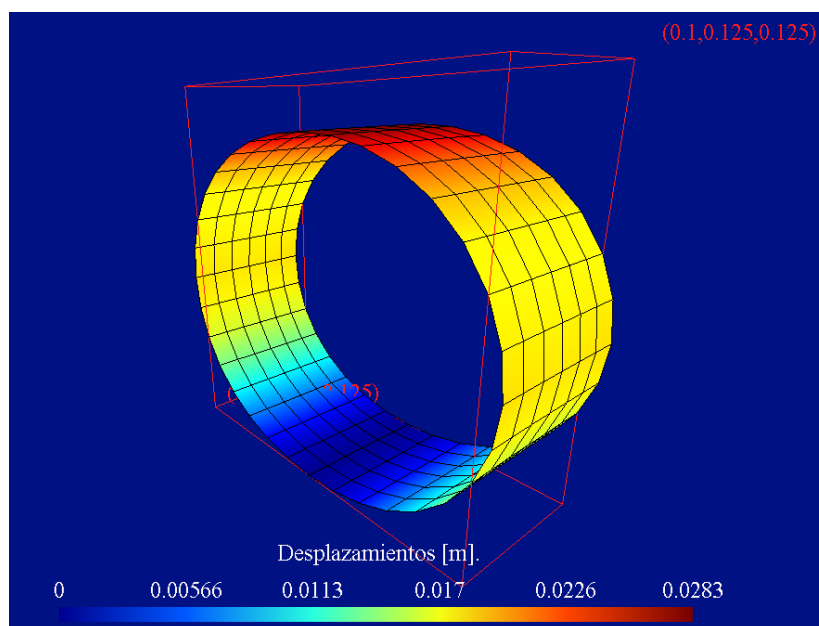


Figura 2: Segmento de tubo como ejemplo del salida del desplazamiento para un ensayo numérico

En la [Tabla 2](#) se resumen las deformaciones diametrales para el tubo homogéneo del ejemplo. Como puede apreciarse (y es inmediato por ser un modelo homogéneo) no importa el valor del supuesto ángulo del "laminado".

En la [Figura 3](#) se presenta la curva carga diametral y desplazamiento diametral que caracteriza el comportamiento del trozo de tubo. Se puede apreciar el proceso de rigidización bajo un ensayo de tracción y una importante flexibilización bajo el ensayo de compresión. Se debe destacar que se han resuelto las ecuaciones de equilibrio con cinemática no lineal.

Deformación diametral del segmento de tubo homogéneo (m)					
Carga (kN)	Angulo del laminado (supuesto)				
	0°	30°	45°	60°	90°
-800	-0.1940	-0.1940	-0.1940	-0.1940	-0.1940
-400	-0.0671	-0.0671	-0.0671	-0.0671	-0.0671
-200	-0.0282	-0.0282	-0.0282	-0.0282	-0.0282
-100	-0.0130	-0.0130	-0.0130	-0.0130	-0.0130
-50	-0.0062	-0.0062	-0.0062	-0.0062	-0.0062
-25	-0.0031	-0.0031	-0.0031	-0.0031	-0.0031
-15	-0.0018	-0.0018	-0.0018	-0.0018	-0.0018
-10	-0.0012	-0.0012	-0.0012	-0.0012	-0.0012
-5	-0.0006	-0.0006	-0.0006	-0.0006	-0.0006
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006
10	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012
15	0.0018	0.0018	0.0018	0.0018	0.0018
25	0.0030	0.0030	0.0030	0.0030	0.0030
50	0.0058	0.0058	0.0058	0.0058	0.0058
100	0.0112	0.0112	0.0112	0.0112	0.0112
200	0.0210	0.0210	0.0210	0.0210	0.0210
400	0.0371	0.0371	0.0371	0.0371	0.0371
800	0.0601	0.0601	0.0601	0.0601	0.0601

Tabla 2: Deformación diametral para tubo homogéneo

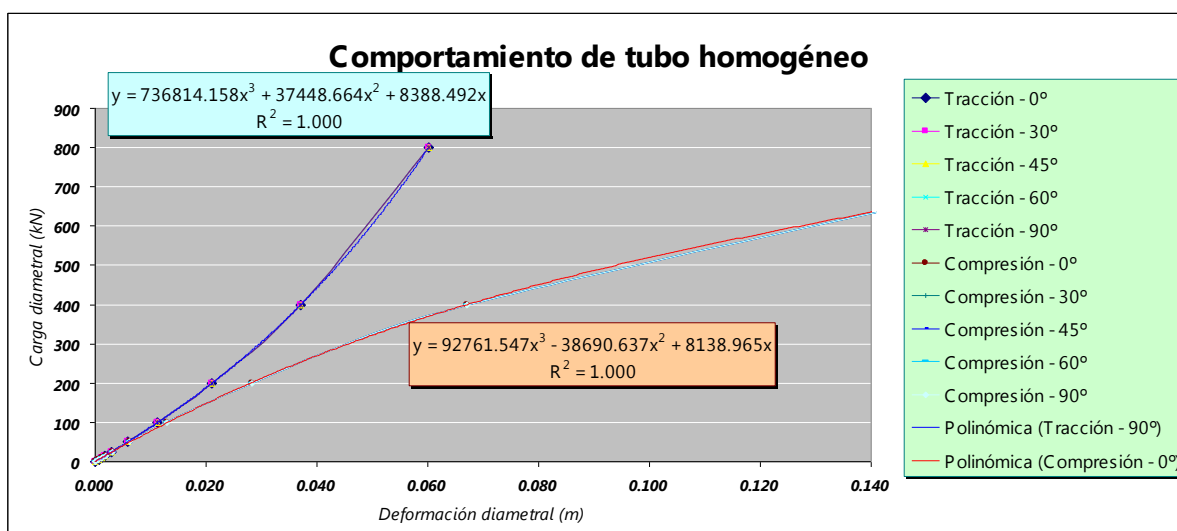


Figura 3: Deformación diametral de tubos homogéneos

En la [Figura 4](#) se pueden comparar la respuesta no lineal del modelo de elementos finitos y el comportamiento teórico determinado por las ecuaciones de las normas o de la teoría lineal elástica. En la [Figura 5](#), se presenta un detalle de la curva carga diametral desplazamiento cercano al origen de coordenadas, e indicado con un círculo en la [Figura 4](#). De la observación de la [Figura 5](#), se puede comprobar que los límites impuestos por las normas establecen una apropiada determinación del módulo siempre que el ensayo se realice en compresión diametral, ya que la diferencia es máxima si se pretende determinar el mismo módulo por medio de tracción diametral.

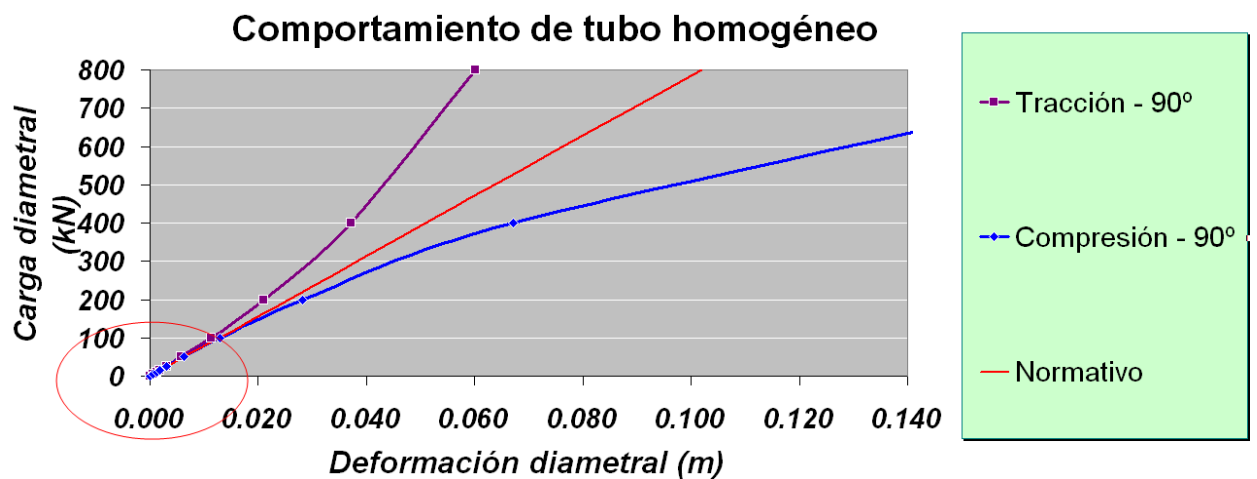


Figura 4: Comparación entre valores de ensayos numéricos y normativos

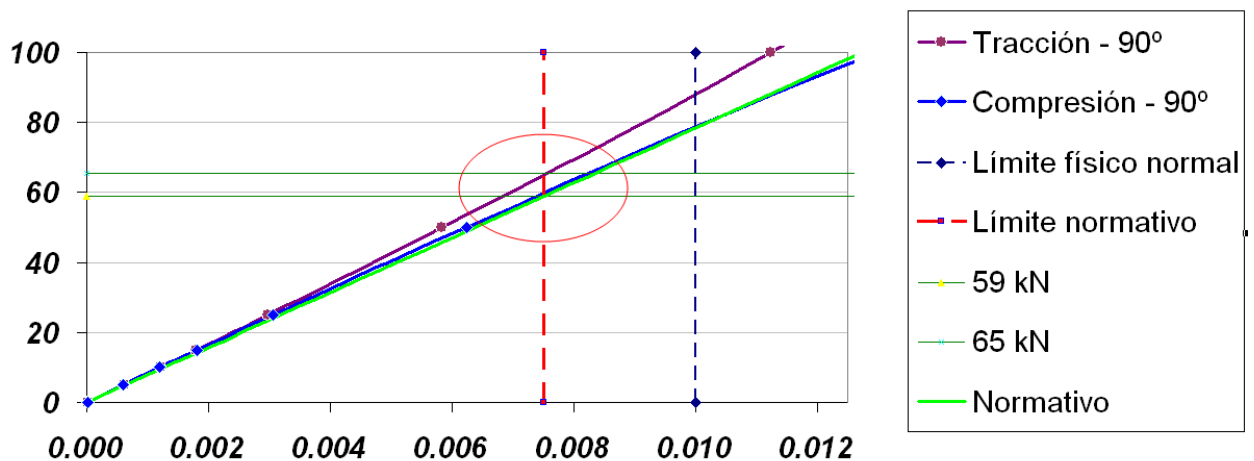


Figura 5: Detalle de la figura anterior

2.2. Análisis de las deformaciones de tubos laminados

En este trabajo se han realizado análisis numéricos considerando un modelo de laminación de láminas superpuestas, cada una con propiedades y direcciones principales conocidas. Es el modelo de laminados clásico ([Agarwall et al., 1990](#)) en el cual las propiedades del laminado se reducen a las llamadas matrices de rigidez local [A] y [D], que relacionan respectivamente a las deformaciones longitudinales con los esfuerzos normales y a las rotaciones con los momentos flectores en el plano medio. Ambas matrices son acompañadas por la matriz de acoplamiento [B],

que para los casos tratados es nula.

En la [Tabla 3](#) se presenta un resumen de las propiedades consideradas para el conjunto inicial (ó 1) de ensayos numéricos de los tubos laminados, correspondiente a E-glass embebido en matriz polimérica (A130 del trabajo de [McKittrick et al., 2001](#)). En la [Tabla 4](#) se presentan en forma resumida los resultados obtenidos de los modelos de elementos finitos desarrollados.

En la [Figura 6](#) se puede observar la orientación general del laminado (dirección de evaluación del módulo de Young longitudinal E_1). El denominado "ángulo del laminado" es el formado entre las proyecciones de los ejes "X General" y "1 Local". Así pues, una inclinación de 0° implica que las fibras de refuerzo se encuentran orientadas (en todas las capas) en la misma dirección del eje de la tubería y un ángulo de inclinación de 90° , en la dirección circunferencial. Para los ángulos intermedios, unas capas tienen una inclinación θ y las otras una inclinación $-\theta$, en forma alterna.

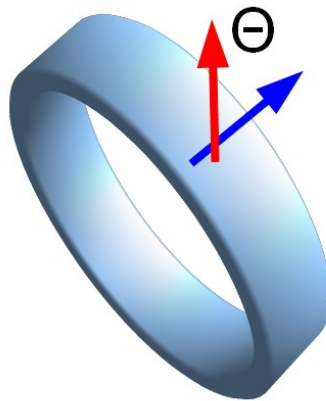


Figura 6: Orientación general del laminado.

Parámetro	Valor	Unidad
Módulo de Young longitudinal E_1	31.7	GPa
Módulo de Young transversal E_2	7.58	GPa
Módulo de corte, G_{12}	3.45	GPa
Módulos de corte, G_{13} y G_{23}	3.10	GPa
Coefficiente de Poisson	0.32	Adim.
Número de laminas	11	Adim
Código de laminado	$+\theta; -\theta; +\theta; -\theta; +\theta; -\theta; +\theta; -\theta; +\theta; -\theta; +\theta$	
Diámetro medio (D)	0.250	m
Espesor (e)	0.011	m
Ancho (a)	0.10	m
Densidad (ρ)	1 714	Kg/m ³

Tabla 3: Propiedades del tubo laminado

Deformación diametral del segmento de tubo laminado (m)					
Carga (kN)	Angulo del laminado				
	0°	30°	45°	60°	90°
-50	-0.277	-0.219	-0.137	-0.079	-0.049
-25	-0.085	-0.073	-0.051	-0.033	-0.021
-15	-0.043	-0.038	-0.027	-0.018	-0.012
-10	-0.026	-0.023	-0.017	-0.012	-0.008
-5	-0.012	-0.011	-0.008	-0.006	-0.004
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.011	0.010	0.008	0.005	0.004
10	0.021	0.019	0.015	0.010	0.007
15	0.029	0.027	0.021	0.015	0.011
25	0.043	0.040	0.032	0.024	0.017
50	0.069	0.064	0.054	0.041	0.031
100	0.100	0.094	0.081	0.066	0.052
200	0.131	0.124	0.111	0.096	0.080
400	0.159	0.153	0.141	0.126	0.111
800	0.170	0.170	0.166	0.155	0.142

Tabla 4: Deformación diametral para tubo laminado

En la [Figura 7](#) se presenta la curva carga - desplazamientos que caracteriza el comportamiento general de los tubos laminados del conjunto 1.

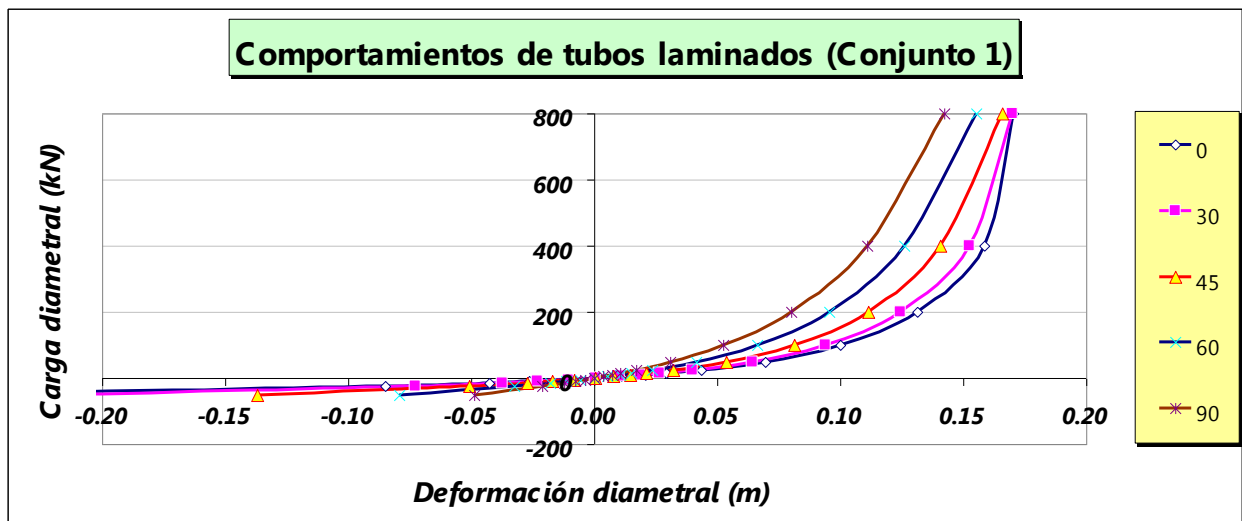


Figura 7: Comportamiento de los tubos laminados

En la [Figura 8](#) se puede observar sólo el comportamiento bajo compresión. Todas las curvas obtenidas (tal como pasaba con el tubo homogéneo) responden a regresiones de polinómicas de tercer grado³.

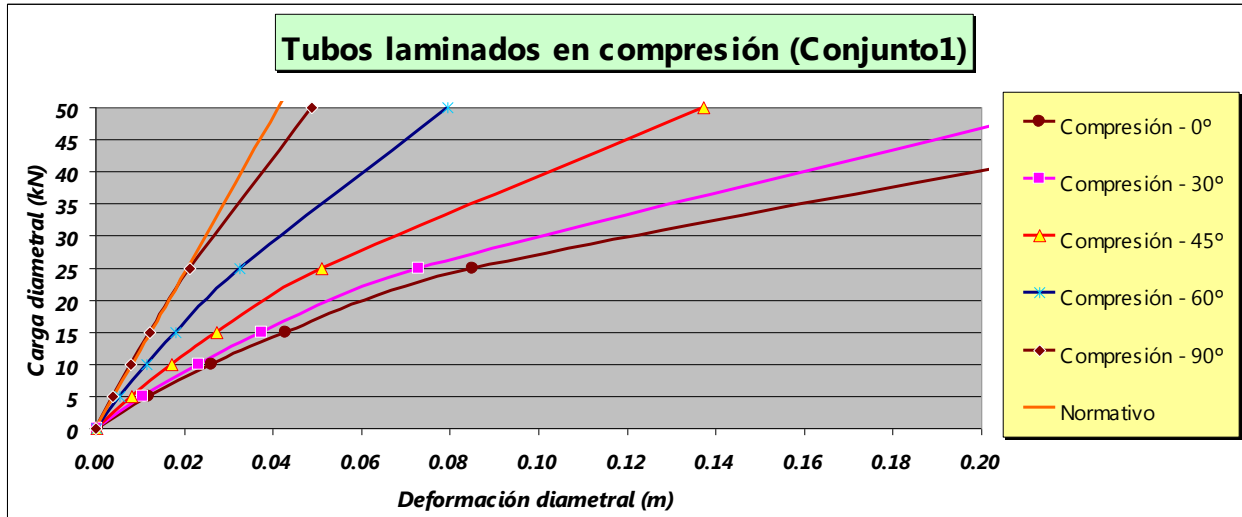


Figura 8: Comportamiento de los tubos laminados

En la [Tabla 5](#) se presentan las propiedades para el segundo conjunto de ensayos numéricos de los tubos laminados (identificado simplemente como 2), correspondiente a un material laminado de epoxy y grafito ([Jung et al., 2001](#)). En la [Tabla 6](#) se presentan en forma resumida los resultados obtenidos de los mismos ensayos numéricos. En la [Figura 9](#) se aprecia el comportamiento general de los tubos laminados del conjunto 2 de ensayos numéricos.

Parámetro	Valor	Unidad
Módulo de Young longitudinal E_1	129.1	GPa
Módulo de Young transversal E_2	9.408	GPa
Módulo de corte, G_{12}	5.157	GPa
Módulo de corte, G_{13}	4.304	GPa
Módulo de corte, G_{23}	2.541	GPa
Coefficiente de Poisson	0.30	Adim.
Densidad (ρ)	1 551	Kg/m ³

Tabla 5: Propiedades del tubo laminado del segundo conjunto

³ No presentadas en la figura por cuestiones de tamaño.

Deformación diametral del segmento de tubo laminado (m)					
Carga (kN)	Angulo del laminado				
	0°	30°	45°	60°	90°
-50	-0.212	-0.126	-0.051	-0.022	-0.012
-25	-0.070	-0.048	-0.022	-0.010	-0.006
-15	-0.036	-0.026	-0.013	-0.006	-0.003
-10	-0.022	-0.016	-0.008	-0.004	-0.002
-5	-0.010	-0.008	-0.004	-0.002	-0.001
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.010	0.007	0.004	0.002	0.001
10	0.018	0.014	0.008	0.004	0.002
15	0.026	0.020	0.011	0.006	0.003
25	0.039	0.031	0.018	0.009	0.005
50	0.063	0.051	0.032	0.018	0.010
100	0.093	0.078	0.053	0.032	0.020
200	0.125	0.107	0.080	0.054	0.035
400	0.154	0.136	0.109	0.082	0.059
800	0.173	0.161	0.138	0.113	0.089

Tabla 6: Deformación diametral para tubo laminado del conjunto 2

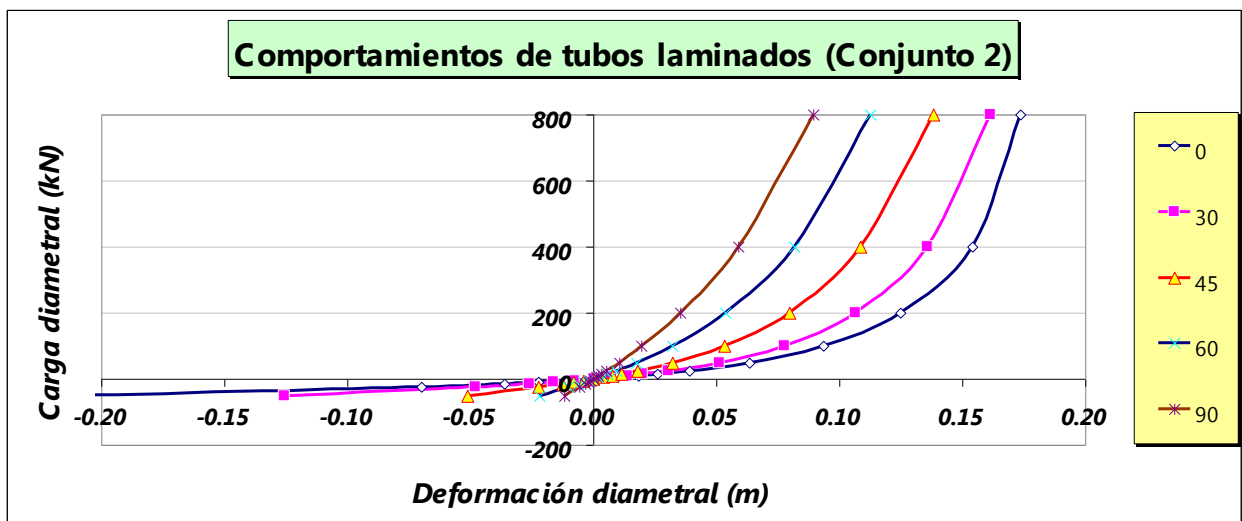


Figura 9: Comportamiento de los tubos laminados del segundo conjunto

Finalmente, en la [Figura 10](#) se presenta sólo el comportamiento bajo compresión. Nuevamente, todas las curvas obtenidas responden a regresiones de polinómicas de tercer grado.

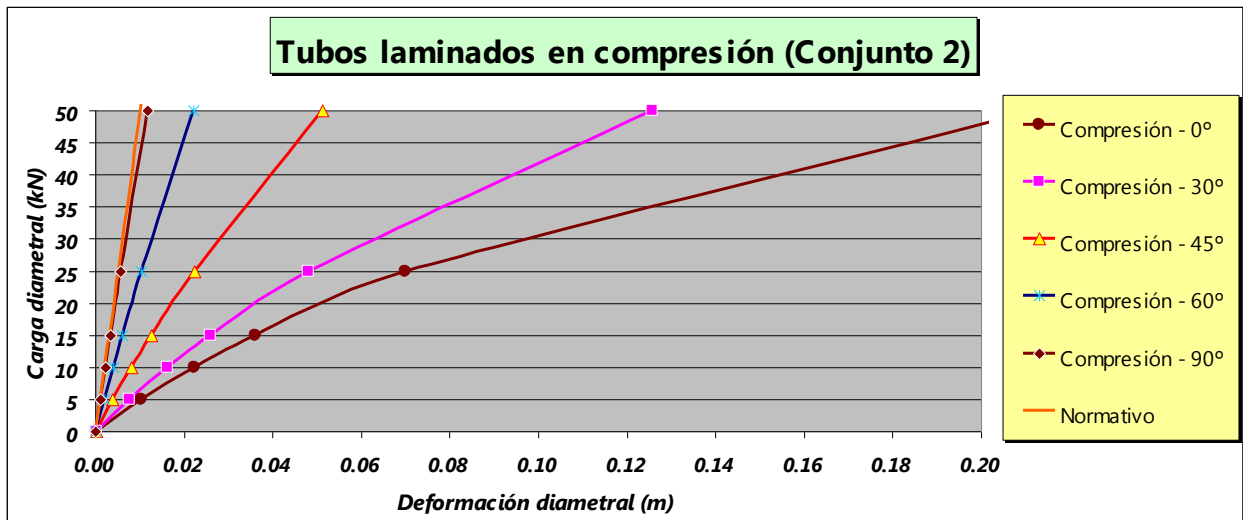


Figura 10: Comportamiento bajo compresión de los tubos laminados del segundo conjunto

2.3. Determinación de los módulos de deformación empleando las ecuaciones de normas

El planteo de determinar el módulo de deformación longitudinal empleando cualquiera de las ecuaciones [1](#), [2](#) ó [5](#); sobre probetas de tubos laminados conduce a valores del mismo comprendidos entre los definidos E_1 y E_2 para cada conjunto ensayado.

En la [Tabla 7](#) se presentan los valores de los módulos obtenidos para cada modelo numérico, en función del ángulo del laminado.

Modelo	Angulo del laminado				
	90	60	45	30	0
Modelo laminado 1 en compresión	33.4	23.2	16.0	12.1	10.8
Modelo laminado 1 en tracción	33.8	24.5	16.6	12.6	11.3
Modelo laminado 2 en compresión	113.6	64.6	32.0	16.9	12.5
Modelo laminado 2 en tracción	123.0	69.4	33.6	17.6	13.2
Homogéneo en compresión	206.1	206.1	206.1	206.1	206.1
Homogéneo en tracción	228.5	228.5	228.5	228.5	228.5

Tabla 7: Módulo de deformación en relación al ángulo de laminado, en GPa

La diferencia relativa de la determinación de módulo en tracción respecto al obtenido en compresión puede determinarse ahora empleando la ecuación siguiente:

$$\varepsilon\% = \frac{E_t - E_c}{E_c} 100\% \quad (11)$$

Los resultados obtenidos con la ecuación anterior se pueden observar en la [Tabla 8](#), en la cual se aprecia que la diferencia relativa entre las determinaciones

cambia con el ángulo del laminado pero no puede asegurarse una tendencia con el mismo⁴.

Modelo	Angulo del laminado				
	90	60	45	30	0
Modelo laminado 1	1.2%	5.5%	3.7%	4.1%	4.2%
Modelo laminado 2	8.3%	7.5%	4.8%	4.4%	5.2%
Homogéneo	10.9%	10.9%	10.9%	10.9%	10.9%

Tabla 8: Diferencias relativas de módulo de deformación en relación al ángulo de laminado.

Si se calcula la relación entre el módulo de deformación longitudinal obtenido según las normas y un módulo ponderado como la media geométrica de los módulos principales, empleando la siguiente ecuación, el resultado que se obtiene se presenta en la [Tabla 9](#).

$$r_E = \frac{E_i}{\sqrt{E_1 E_2}} \quad (12)$$

Muchas de las tuberías laminadas industriales tienen un paquete de laminado simétrico bajo un ángulo de $\pm 45^\circ$. En tal situación, si se realiza la evaluación del módulo de deformación longitudinal mediante el ensayo de compresión diametral, el resultado es un módulo muy cercano a la media geométrica de los módulos principales, tal como se aprecia en la misma [Tabla 9](#) y en la [Figura 11](#).

Modelo	Angulo del laminado				
	90	60	45	30	0
Modelo laminado 1 en compresión	2.157	1.497	1.034	0.782	0.698
Modelo laminado 1 en tracción	2.182	1.580	1.073	0.814	0.727
Modelo laminado 2 en compresión	3.260	1.853	0.919	0.484	0.359
Modelo laminado 2 en tracción	3.530	1.993	0.963	0.505	0.378
Homogéneo en compresión	1.001	1.001	1.001	1.001	1.001
Homogéneo en tracción	1.110	1.110	1.110	1.110	1.110

Tabla 9: Tabulado de la ecuación 12 para los diferentes modelos numéricos.

⁴ Para el modelo homogéneo, la representación respecto al ángulo del laminado es meramente formal

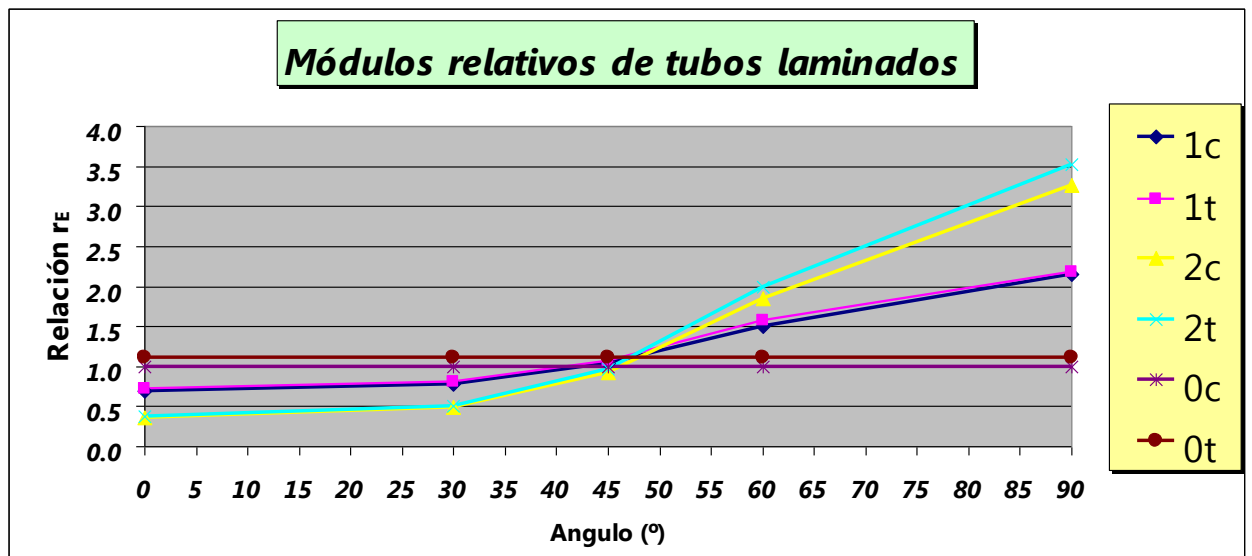


Figura 11: Módulo relativo en tubos laminados según ecuación 12

3 CONCLUSIONES

Se han realizado varios ensayos numéricos con modelos de elementos finitos con cinemática no lineal, sobre modelos de tubos constituidos tanto por material homogéneo como con material compuesto. Para los modelos de tubos con material compuesto multilaminado ([Agarwall et al., 1990](#)), la disposición simétrica del laminado asegura que no existe acoplamiento entre los esfuerzos normales de plano medio del laminado con los momentos flectores del mismo plano medio, consecuencia directa de la nulidad de la matriz de acoplamiento en el modelo multilaminado.

Los resultados reafirman que el ángulo del laminado influye fuertemente en la determinación del módulo de deformación de tubos laminados. Esta es una consecuencia directa de los valores que adoptan las matrices de rigidez locales del laminado, variables con el mencionado ángulo de laminado.

Los resultados también manifiestan que el ensayo de compresión diametral no resulta ser un método idóneo para la determinación del módulo de deformación en tubos laminados; pero comparativamente, es preferible al ensayo de tracción diametral.

Los ensayos numéricos han demostrado que, aún en valores tan bajos de deformación diametral como el impuesto por la [ISO 9969](#) (3% del diámetro), la influencia del comportamiento elástico geoméricamente no lineal es apreciable, independientemente que se trate de una tubería laminada o de una tubería de material homogéneo.

Finalmente, para tubos multilaminados con paquete simétrico bajo ángulos de laminado de $\pm 45^\circ$, el módulo de deformación longitudinal resultante de la aplicación de las normas internacionales se aproxima a la media geométrica de los módulos elásticos principales.

REFERENCIAS

- Agarwall, B; Broutman, L.; "Analysis and Performance of Fiber Composites", Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., 1990.
- Hinton, E. & Owen, D.; "Finite Element Software for Plates and Shells", Pineridge Press Limited, 1984.
- McKittrick, L.R.; Cairns, D.S.; Mandell, J. ; Combs, D.C.; Rabern, D.A.; y Van Luchene, D.: "Analysis of a Composite Blade Design for the AOC 15/50 Wind Turbine Using a Finite Element Model", SANDIA REPORT, SAND2001-1441, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico 87185 and Livermore, California 94550, May 2001.
- ISO 9969: Thermoplastics pipes — Determination of ring stiffness (ISO 9969:2007)
- Jung S.; Nagaraj V.; Chopra I.; "Refined Structural Model for Composite Rotor Blades", Paper of AIAA Journal, 2001, Vol 39, N° 2, Febrero 2001.
- NCh 2835: Norma Chilena NCH 2835 "Tuberías perfiladas de poli(cloruro de vinilo) (PVC) rígido- Requisitos y métodos de ensayo".
- Neto M.; Ambrósio J.; Leal R., "Composite Materials In Flexible Multibody Systems", European Congress of Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, ECCOMAS , 2004.
- Pisarenko, G.; Yákovlev A y Matvéev V., "Manual de resistencia de materiales", Editorial MIR, 1979,
- Zaradnik, R.; Raichman, S: & Mirasso, A.; "Formulación de matrices de masas concentradas para análisis dinámico de estructuras de materiales compuestos", II Encuentro de Investigadores y Docentes de Ingeniería (EnIDI 2006), Mendoza, 2006. En: Desarrollos e Investigaciones Científico Tecnológicas en Ingeniería, pp. 267 a 273, ISBN 987-05-1360-3, Mendoza, 2006
- Zaradnik, R.; Raichman, S. & Mirasso, A.; "Vibraciones Libres de Palas de Turbinas Eólicas de Materiales Compuestos Considerando Cinemática No Lineal Mediante Modelos de Elementos Finitos". XVI Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones (ENIEF 2007). En: Mecánica Computacional Vol. XXVI, pp. 419-438, ISSN 1666-6070, AMCA, Córdoba, Argentina, 2007.