



Estimación del punto “*quasi isotrópico*” de laminados de material compuesto a través de gráficos “*carpet plot*” con eLamX

Apellidos, nombre	Balart Gimeno, Rafael Antonio (rbalart@mcm.upv.es)
Departamento	Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales (DIMM)
Centro	Escuela Politécnica Superior de Alcoy (EPSA) Universitat Politècnica de València (UPV)

1 Resumen de las ideas clave

En este artículo vamos a explicar la **utilidad de los gráficos "carpet plot"** en la etapa de **pre-diseño** de secuencias de apilamiento de materiales compuestos con el fin de obtener un **comportamiento "quasi isotrópico"** en el plano. Para ello, vamos a utilizar un método gráfico basado en el empleo de gráficos o diagramas "carpet plot" para el conjunto de familias de laminados del tipo $[0_m / \pm 45_n / 90_p]_s$. El punto "quasi isotrópico" en una familia de laminados es de gran relevancia para la obtención de secuencias de apilamiento que ofrezcan un comportamiento lo más cercano a la isotropía en el plano, de tal manera que el laminado diseñado ofrecerá "casi" el **mismo comportamiento en todas las direcciones**.

2 Introducción

En las últimas décadas, los materiales compuestos se han ido incorporando a diversas aplicaciones industriales debido a la **excelente combinación de propiedades** que ofrecen junto con una **alta ligereza y facilidad de transformación** y moldeo. Es por ello que este tipo de materiales encuentran numerosas aplicaciones en **sectores tecnológicos** como aeronáutico, aeroespacial, naval, deporte de alta competición, sector médico, sector eléctrico-electrónico, etc. En este sentido, las perspectivas de futuro de estos materiales son muy prometedoras en tanto en cuanto permiten al ingeniero disponer de una serie de materiales con unas propiedades mecánicas excelentes y muy bajo peso.¹

Los materiales compuestos abarcan una amplia gama de estructuras formadas por diversos componentes para conseguir un efecto sinérgico. Dentro de este amplio grupo de materiales, **los plásticos reforzados con fibra** (PRF) o **materiales compuestos de matriz polimérica** (PMC - "polymer matrix composites") ofrecen amplia **versatilidad** al ingeniero. La combinación de un **elemento de refuerzo** tipo fibra con una **matriz polimérica** (generalmente termoestable) ofrece un conjunto de materiales de gran versatilidad para el ingeniero ya que se obtienen materiales con prestaciones muy elevadas, bajo peso y facilidad de moldeo. La fibra actúa como elemento resistente mientras que la matriz polimérica aporta moldeabilidad, mantiene las fibras en las posiciones (ángulos) definidas, soporta los esfuerzos de compresión, transfiere esfuerzos a las fibras mediante cortadura, protege las fibras frente a los agentes externos, etc.^{2,3}

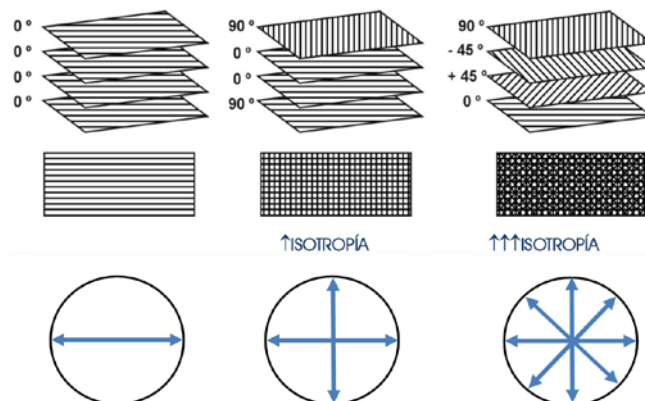


Figura 1. Representación esquemática de la naturaleza anisotrópica de laminados de material compuesto

No obstante, la marcada direccionalidad del elemento de refuerzo, de naturaleza fibrilar, da lugar a la obtención de materiales con un marcado comportamiento **anisotrópico**; este aspecto no es deseable desde el punto de vista de ingeniería ya que la anisotropía implica comportamientos muy distintos según la dirección que se considere tal y como se aprecia en la Figura 1. Es por ello que en el campo de la ingeniería de materiales compuestos se suele trabajar con estructuras de laminados definidos a través del apilamiento de diversas capas con las fibras **orientadas en diferentes ángulos** para intentar alcanzar un comportamiento lo más cercano a la isotropía. En los laminados de material compuesto, esta situación se alcanza cuando está formado por igual número de capas con fibras orientadas en ángulos que cubren toda la circunferencia de forma equilibrada. Cuando el laminado cumple con estas condiciones se dice que presenta un comportamiento "**quasi isotrópico**" en el plano.

El proceso de diseño y cálculo con materiales compuestos o laminados es un proceso complejo que abarca diversas etapas: análisis micromecánico, macromecánica (pre-diseño) de la lámina y laminado, dimensionamiento y optimización de partes en ingeniería. La etapa de pre-diseño de la secuencia de apilamiento de las láminas en un laminado es de vital importancia para reducir los tiempos de desarrollo y partir de estructuras de laminados aptas para el diseño final y optimización (Figura 2).

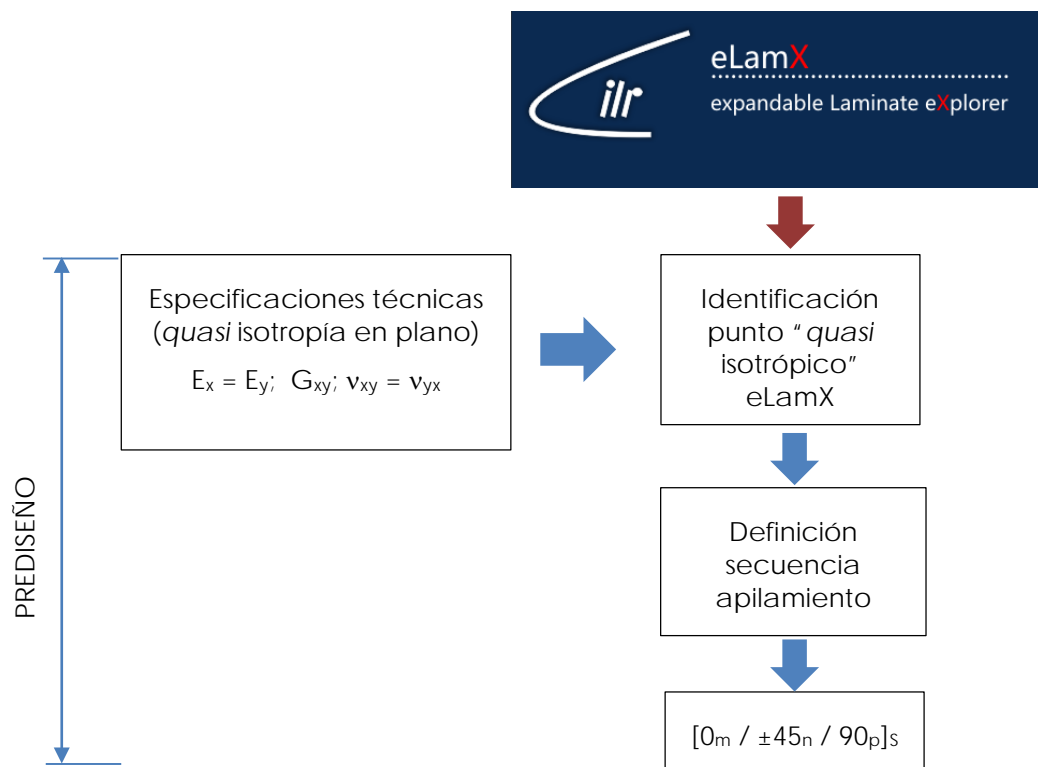


Figura 2. Esquema de las etapas que intervienen en pre-diseño de la secuencia de apilamiento de láminas en un laminado

En la etapa de pre-diseño, adquieren gran relevancia los gráficos "**carpet plot**" en tanto en cuanto permiten realizar un pre-diseño de la secuencia de apilamiento de un laminado. Estos gráficos se pueden obtener de forma sencilla a partir de la información de una sola lámina, aplicando los fundamentos de la **teoría clásica de análisis de laminados (CLT)**.^{4,5} Si bien existe mucho software basado en la CLT, eLamX es un software de naturaleza *freeware*, muy completo, desarrollado en el Instituto de

Ingeniería Aeroespacial de la Universidad de Dresden para llevar a cabo la pre-selección de estructuras de laminados.⁶

El software se puede descargar en:

http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_maschinenwesen/llr/aero/download/laminatetheory/index_html



3 Objetivos

Una vez que el alumno lea con detenimiento este artículo, será capaz de:

- **Obtener y representar** el diagrama "*carpet plot*" característico de una lámina de material compuesto.
- **Identificar** el punto "*quasi isotrópico*" de los laminados de la familia $[0_m / \pm 45_n / 90_p]_s$.
- **Estimar** las propiedades mecánicas de la familia de laminados.
- **Validar** el comportamiento "*quasi isotrópico*"

4 Desarrollo

La marcada direccionalidad del elemento de refuerzo en los compuestos de matriz polimérica conlleva un marcado carácter anisotrópico en el comportamiento de los materiales compuestos. Ante esta situación, **¿Cómo se puede solucionar este problema?**; la tecnología de materiales compuestos da solución a esta situación a través de definición de "**laminados**" de material compuesto formados por el apilamiento de capas o láminas con las fibras orientadas en diferentes ángulos, pero, dada la enorme variedad de configuraciones que puede adoptar un laminado con diferentes matrices, fibras de refuerzo y tipologías, etc, **¿cómo se puede abordar el problema del pre-diseño de la secuencia de apilamiento de las láminas y el ángulo de orientación de las mismas para conseguir un comportamiento lo más cercano a la isotropía?** Bien, pues precisamente a lo largo de este artículo vamos a describir el procedimiento que se puede emplear para, de una manera sencilla, identificar el punto "*quasi isotrópico*" de los laminados, definir secuencias de laminados que cumplan con el "*punto isotrópico*" y estimar las propiedades de estos materiales mediante el empleo de un método gráfico basado en la utilización de los gráficos "*carpet plot*".

Teniendo claro el análisis que proporciona la teoría clásica de análisis de laminados, en este artículo vamos a desarrollar los siguientes apartados:

- En primer lugar **seleccionaremos un material** de la base de datos.
- Seguidamente, procederemos a **representar el gráfico "*carpet plot*"**, definiremos las **características** del punto "*quasi isotrópico*" e **identificaremos** dicho punto en el gráfico.

- A continuación **definiremos la secuencia de apilamiento** de un laminado que cumple con las condiciones de “*quasi*” isotropía y procederemos a estimar las características mecánicas
- Finalmente realizaremos un **cálculo** de las **propiedades** finales del laminado mediante teoría clásica y procederemos a representar un **gráfico polar** de la variación de las propiedades con el ángulo para así, validar las **premisas** sobre el punto “*quasi* isotrópico”.

4.1 Selección de material y representación del gráfico “carpet plot”

En el **explorador** de proyectos de eLamX situado en la zona superior derecha, pulsamos con botón derecho en la opción “Materials” y seleccionamos la opción “Database” tal y como se muestra en la Figura 3a. En dicha base de datos seleccionamos uno de los materiales disponibles, con un refuerzo unidireccional, que se puede identificar claramente en la columna correspondiente al tipo de fibra (“Type”) con las siglas UD (**unidireccional**). En la ventana de la base de datos podemos observar las características de la lámina y procedemos a “Importar” el material al proyecto, apareciendo este material como un elemento desplegable en la pestaña de “Materiales” del explorador de proyectos de eLamX. Para este ejemplo, vamos a seleccionar el material designado como **C-‘IM6’/EP-‘SC1081’**, correspondiente a una lámina de resina epoxi (tipo SC1081) con un 65% en volumen de fibras de carbono unidireccionales (tipo IM6) tal y como se muestra en la Figura 3b.

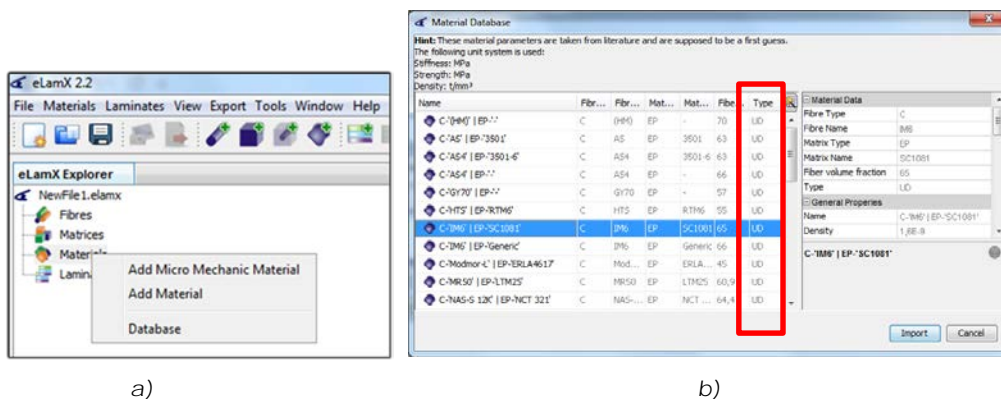


Figura 3. a) Acceso a la base de datos de materiales de eLamX; b) Selección de material desde la base de datos de eLamX

4.2 Representación del gráfico “carpet plot” e identificación del punto “quasi isotrópico”

Si bien las posibilidades de trabajar con materiales “*quasi* isotrópicos” es muy variada, teniendo en cuenta que podemos jugar con los ángulos, lo cierto es que a nivel industrial, los laminados formados por láminas orientadas a 0°, 90°, +45° y -45° son bastante habituales por la facilidad de implementación en el proceso de fabricación ya que son ángulos muy sencillos de medir. Es por ello que la mayoría de los gráficos “*carpet plot*” se representan para la familia de laminados del tipo [0_m / ±45_n / 90_p]_s, que indica el conjunto de compuestos simétrico (subíndice “S”), equilibrado (el mismo número de capas a +45° y -45°) y con una distribución angular que cubre

simétricamente toda la circunferència ($90^\circ / -45^\circ / 0^\circ / 45^\circ$). Para acceder a la representación gráfica del diagrama "carpet plot" correspondiente al conjunto de laminados compuestos del tipo $[0_m / \pm 45_n / 90_p]_s$, pulsamos con el botón derecho del ratón, en el material C-'IM6'/EP-'SC1081' y a continuación se muestra al gráfico "carpet plot" en la zona derecha de la aplicación. Concretamente, se muestra el gráfico para la propiedad de módulo longitudinal (E_x) aunque seleccionando la opción correspondiente que se muestran en el recuadro de color rojo de la Figura 4, se puede acceder a los correspondientes gráficos para otras propiedades.

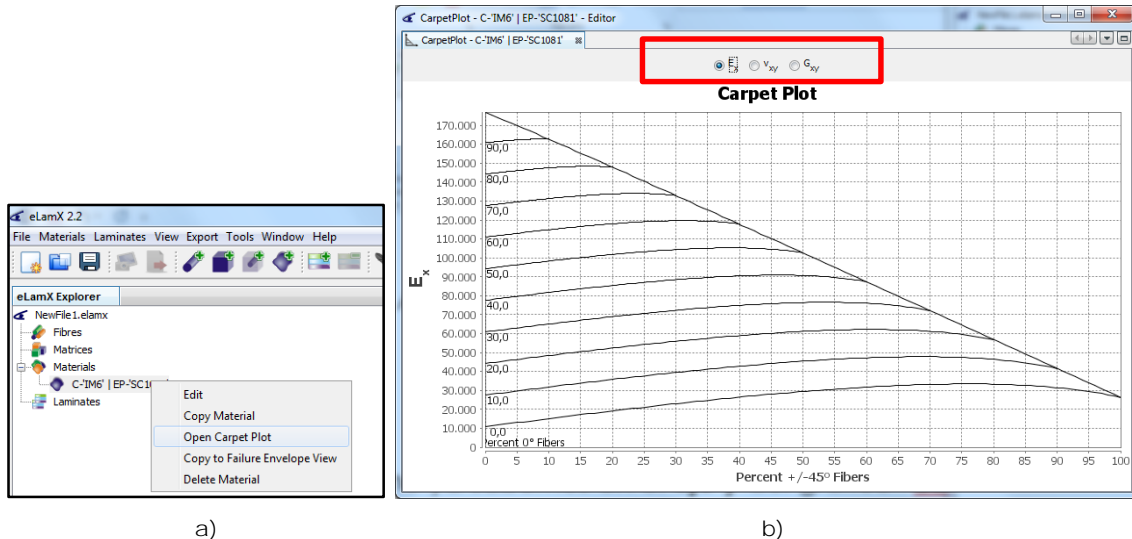


Figura 4. a) Acceso a la representación de diagramas "carpet plot" para el material seleccionado mediante eLamX y b) Representación del gráfico "carpet plot" para el módulo longitudinal (E_x) de la familia de laminados del tipo $[0_m / \pm 45_n / 90_p]_s$

Una vez disponemos de la representación del gráfico "carpet plot", veamos cuáles deben ser las características del punto "quasi isotrópico". En este punto se debe cumplir que la estructura del laminado **posea el mismo número de capas o láminas** (con la misma matriz, fibra, volumen de fibra, etc.) **orientadas en ángulos** que cumplan la relación **$180/N+\theta_0$ con $N>3$** . Si $N = 4$, entonces la separación de ángulos será $180/4 = 45^\circ$. Así pues, para alcanzar comportamiento "quasi isotrópico" con $N = 4$ y considerando el ángulo inicial $\theta_0 = 0^\circ$, los ángulos que deben cubrirse son:

$$0^\circ, +45^\circ, 90^\circ \text{ y } 135^\circ (-45^\circ)$$

Además, debe cumplirse que el laminado **tenga las mismas capas con el conjunto de ángulos mencionados**. Así, por ejemplo, un laminado con la siguiente disposición $[0 / \pm 45 / 90]_s$, se caracteriza por ser simétrico y el desglose total de capas es:

$$[0 / +45 / -45 / 90 / 90 / -45 / +45 / 0]$$

Como se puede apreciar en el desglose del laminado:

Nº capas orientadas a 0° :	2	[25%]
Nº capas orientadas a $+45^\circ$:	2	[25%]
Nº capas orientadas a -45° :	2	[25%]
Nº capas orientadas a 90° :	2	[25%]

Por lo tanto para los laminados de la familia $[0_m / \pm 45_n / 90_p]_s$, el punto isotrópico se encuentra localizado en el punto correspondiente a los siguientes porcentajes:

% capas orientadas a 0° :	[25%]
% capas orientadas a $\pm 45^\circ$:	[50%] = [25% a $+45^\circ$ y 25% a -45°]
% capas orientadas a 90° :	[25%]

Como ya sabemos en el **eje y** del gráfico "carpet plot" se muestran los valores numéricos correspondientes a la propiedad representada (en este caso, los valores numéricos que puede adoptar el módulo longitudinal de un laminado). En el **eje x** se representa el % de capas o láminas orientadas a $\pm 45^\circ$ y las líneas que aparecen en el interior del gráfico corresponden a los valores de la propiedad representada en el gráfico "carpet plot" para diversos porcentajes constantes de capas orientadas a 0° (abarca un rango desde 0 hasta 100%). Con esta información, si deseamos localizar el punto "quasi isotrópico" para el laminado descrito previamente, basta con levantar una línea vertical (flecha azul) hasta que intercepte la línea correspondiente a 25% de capas orientadas 0° (esta curva no aparece en el gráfico pero se puede estimar o bien interpolar; lógicamente la podemos situar en el punto medio de las curvas correspondientes al 20% y 30%; línea discontinua de color negro) tal y como se muestra en la Figura 5. El punto "quasi isotrópico" aparece representado como un punto de color rojo para los porcentajes de capas descritos previamente.

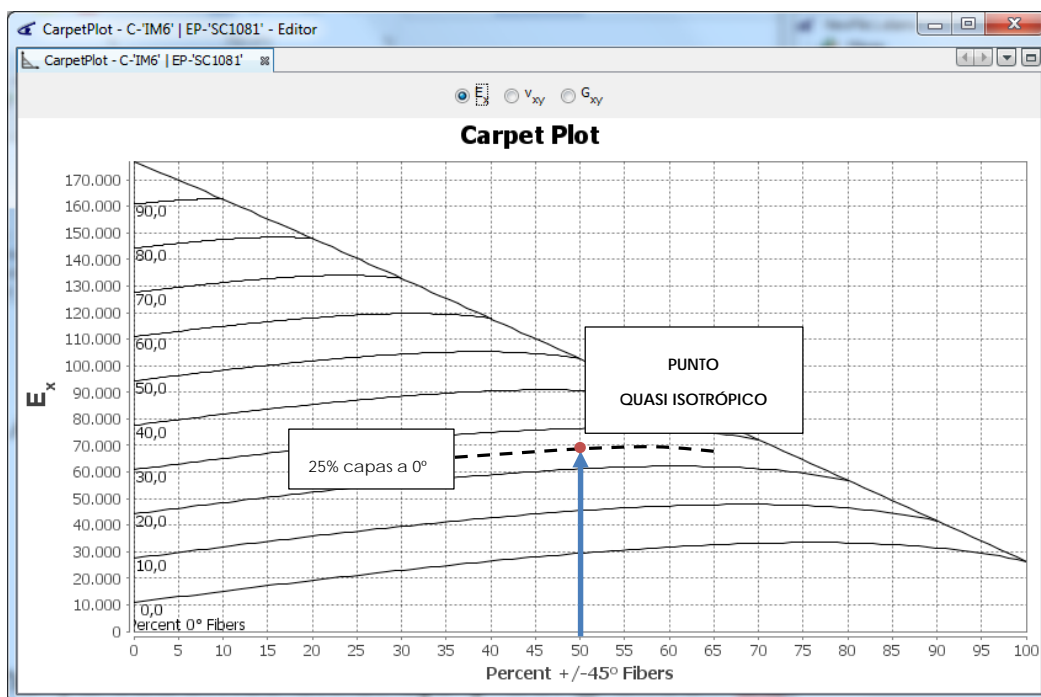


Figura 5. Localización del punto "quasi isotrópico" en el diagrama "carpet plot" correspondiente al módulo longitudinal (E_x) de la familia de laminados del tipo $[0_m / \pm 45_n / 90_p]_s$

4.3. Obtención de las propiedades mecánicas de laminados con comportamiento "quasi isotrópico" mediante gráficos "carpet plot"

Bien, una vez entendido el concepto de punto "quasi isotrópico" y cómo identificarlo, vamos a **poner en práctica** estos conceptos con la estimación de las propiedades de un laminado (E_x , E_y , G_{xy} , ν_{xy} , ν_{yx}) con la láminas de material C-'IM6'/EP-'SC1081' con la secuencia de apilamiento $\{\pm 45_2 / [0 / 90]_2\}_s$, mediante el empleo de los gráficos "carpet plot" correspondientes. Seguidamente calcularemos las propiedades mecánicas según la teoría clásica y representaremos el gráfico polar para ver cómo varían las propiedades en función del ángulo; todo ello, con el fin de corroborar las premisas que hemos definido en el punto "quasi isotrópico".

Si desglosamos este laminado, obtenemos la siguiente disposición:

$[+45 / -45 / +45 / -45 / 0 / 90 / 0 / 90 / 90 / 0 / 90 / 0 / -45 / +45 / -45 / +45]$

Con un total de 16 capas, el número total (y porcentaje) de capas para cada uno de los ángulos es:

Capas orientadas a 0° : 4 [25%]

Capas orientadas a $\pm 45^\circ$: 8 [50%]

Capas orientadas a 90° : 4 [25%]

Como este laminado es **simétrico**, los **ángulos están distribuidos** de forma homogénea a lo largo de la circunferencia y los **porcentajes** cumplen con los criterios definidos para el punto "quasi isotrópico", podemos afirmar que este laminado posee propiedades "quasi isotrópicas". En las Figuras 6, 7 y 8 se muestra la estimación de forma gráfica del módulo longitudinal (E_x), el módulo de cortadura (G_{xy}) y el módulo de Poisson (ν_{xy}). Al tratarse de un material "quasi isotrópico" el módulo longitudinal es equivalente al transversal ($E_x = E_y$) y los módulos de Poisson también son idénticos ($\nu_{xy} = \nu_{yx}$).

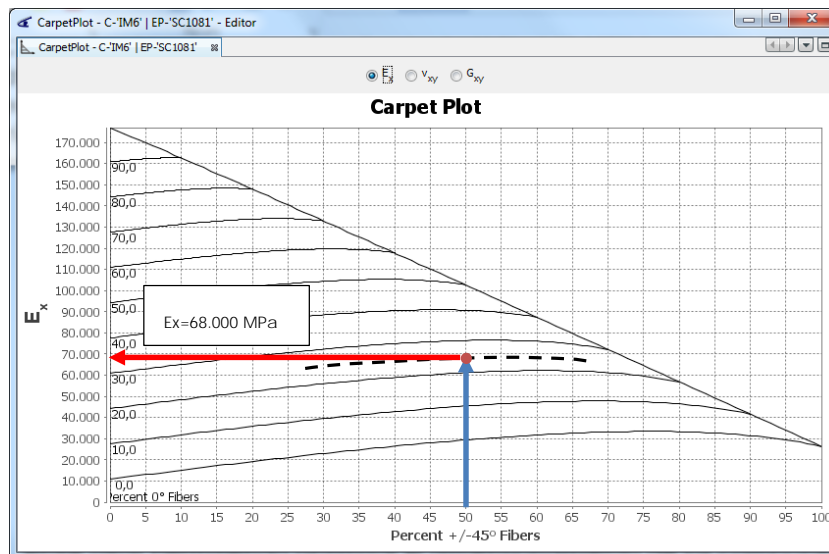


Figura 5. Estimación del módulo longitudinal (E_x) para laminado $\{\pm 45_2 / [0 / 90]_2\}_s$ a partir del gráfico "carpet plot" correspondiente al material C-'IM6'/EP-'SC1081'

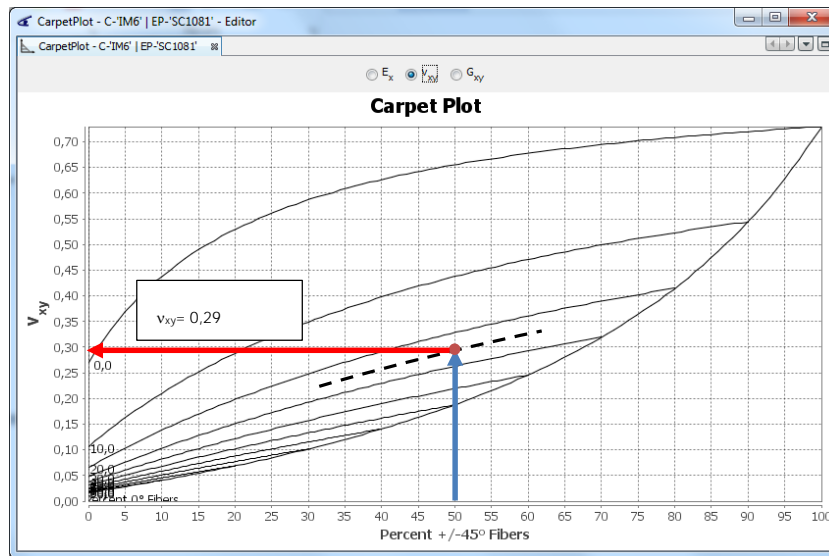


Figura 7. Estimación del módulo de Poisson (ν_{xy}) para laminado $\{\pm 45_2 / [0 / 90]_2\}_s$ a partir del gráfico "carpet plot" correspondiente al material C-'IM6'/EP-'SC1081'

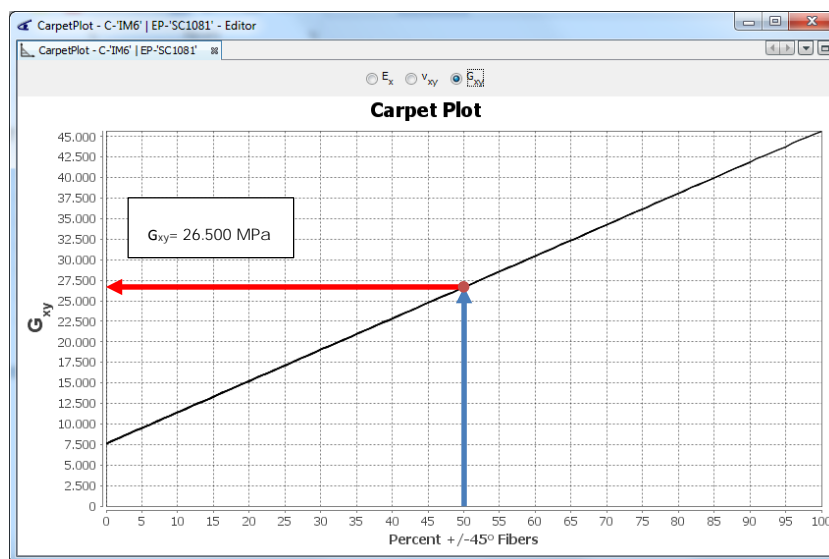


Figura 8. Estimación del módulo de cortadura (G_{xy}) para laminado $\{\pm 45_2 / [0 / 90]_2\}_s$ a partir del gráfico "carpet plot" correspondiente al material C-'IM6'/EP-'SC1081'

A partir de los gráficos anteriores y considerando el punto de intersección entre la línea vertical (flecha azul) correspondiente al 50% de capas orientadas a $\pm 45^\circ$ y la línea correspondiente al 25% de capas orientadas a 0° (línea discontinua negra), obtenemos el punto "quasi isotrópico" y trazando una línea horizontal hasta cortar con el eje y (flecha roja), obtenemos la propiedad correspondiente, resultando ser:

$$E_x = E_y = 68.000 \text{ MPa}; \nu_{xy} = \nu_{yx} = 0,29; G_{xy} = 26.500 \text{ MPa}$$

El software eLamX también nos permite validar la naturaleza "quasi isotrópica" del laminado que hemos definido previamente. Aplicando la teoría clásica de

laminados, es posible obtener los **valores numéricos** de las características del laminado, así como un **gráfico polar** sobre variación de las propiedades mecánicas con el ángulo.

Para obtener los valores numéricos correspondientes a las **constantes ingenieriles** del laminado, basta con añadir la secuencia de apilamiento de las distintas capas seleccionando "Add" en la opción "Laminate" del explorador de proyectos. A continuación ya puedes añadir la secuencia de apilamiento con los ángulos considerados. Una vez definido el laminado, basta con pulsar el botón derecho sobre dicho laminado en el explorador de proyectos y seleccionar la opción "Engineering Constants" (recuadro rojo en la Figura 9a) que nos lleva a una ventana que muestra las propiedades del laminado según la teoría clásica.

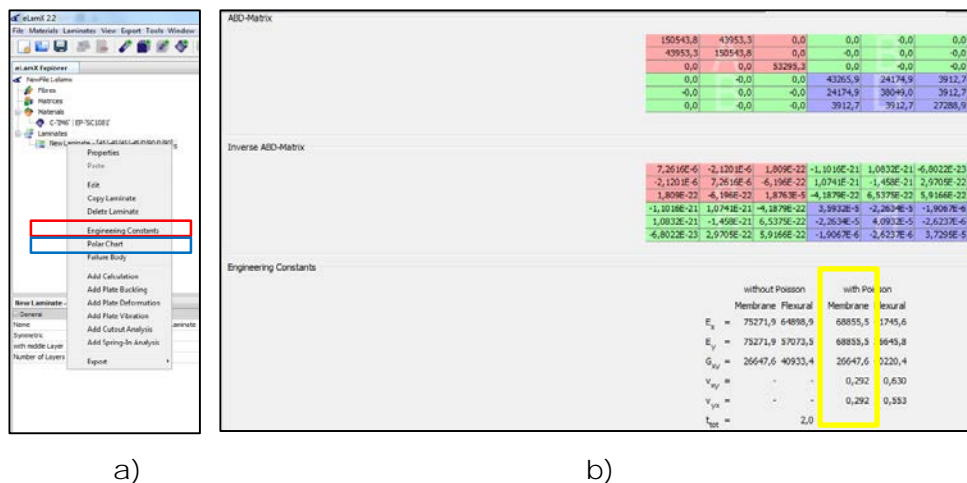


Figura 9. a) Selección de cálculo de Constantes Ingenieriles mediante eLamX y b) Ventana donde se muestran las constantes ingenieriles para laminado $\{\pm 45 / [0 / 90]_2\}_s$ aplicando teoría clásica de laminados con eLamX

Como puede comprobarse los valores de los módulos calculados (Figura 9b; recuadro amarillo) coinciden en gran medida con los estimados de forma gráfica; las ligeras diferencias se deben a la **naturaleza gráfica** del método empleado para la estimación de dichos parámetros mediante gráficos "carpet plot".

Este software también permite representar un **gráfico polar** de la variación de algunos parámetros de la matriz A (o matriz extensional) ya que están directamente ligados con las constantes ingenieriles. Para ello, seleccionamos la opción "Polar Chart" del menú desplegable del laminado definido. Concretamente se representa A_{11} que es equivalente a E_x , A_{22} que es equivalente a E_y , A_{66} que es equivalente a G_{xy} y A_{12} que está íntimamente ligado con ν_{xy} .

Tal y como puede apreciarse en la Figura 10, la variación de A_{11} (E_x), A_{12} (equiv. ν_{xy}), A_{22} (E_y) y A_{66} (G_{xy}) en función del ángulo es **INEXSITENTE**, con lo cual, podemos validar las hipótesis realizadas sobre características del punto "quasi isotrópico", de tal manera que el método gráfico basado en los gráficos "carpet plot" se consolida como un método **sencillo** y de gran **precisión** para estimar los valores de las propiedades de laminados con comportamiento lo más cercano a la isotropía en el plano.

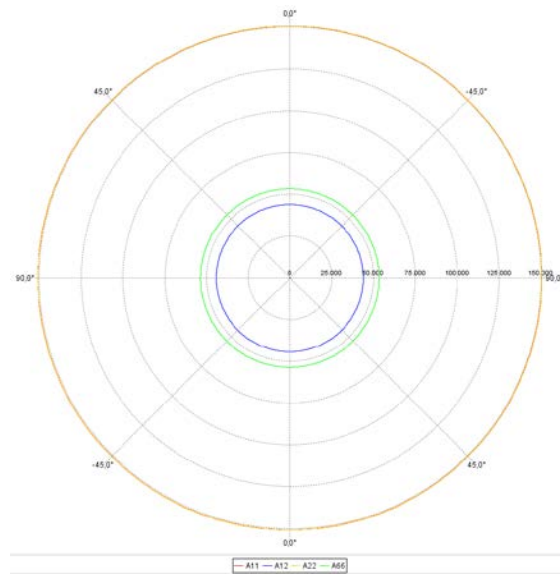


Figura 10. a) Gráfico polar de variación de las constantes ingenieriles para laminado $\{\pm 45_2 / [0 / 90]_2\}_s$ aplicando teoría clásica de laminados con eLamX

5 Cierre

Para finalizar, resaltar la **importancia** de obtener **laminados** con comportamiento "**quasi isotrópico**" para disponer de materiales con propiedades prácticamente iguales en cualquiera de las direcciones consideradas, aspecto de gran relevancia desde el punto de vista del **diseño en ingeniería**.

Destacar también la relevancia de los laminados de la **familia** $[0_m / \pm 45_n / 90_p]_s$ en los diseños de componentes para ingeniería ya que se trata de laminados **simétricos** (que evitan el alabeo o "warping") y **equilibrados** y, si además, si el ratio entre los subíndices "m", "n" y "p" cumplen que **n:m:p** igual a **0,25:0,50:0,25**, además de simetría y equilibrio, el laminado poseerá un comportamiento "**quasi isotrópico**".

6 Bibliografía

- [1] Nicolais, L; Meo, M; Milella, E: "Composite materials: a visión for the future", Ed. Springer, (2011).
- [2] Miravete, A: "Materiales compuestos. Tomo I", Ed. Autor-editor, Zaragoza (2000).
- [3] Miravete, A: "Materiales compuestos. Tomo II", Ed. Autor-editor, Zaragoza (2000).
- [4] Gibson, R: "Principles of composite material mechanics", Ed. Taylor&Francis (2012).
- [5] Gay, D: "Composite materials: design and applications", Ed. CRC Press (2007).
- [6] Instituto de Ingeniería Aeroespacial, Universidad Tecnológica de Dresden. Sitio web software eLamX, tutorials, videotutoriales e información general. http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_maschinenwesen/ilr/aero/download/laminatetheory/index_html