



Interpretación de gráficos “carpet plot” para prediseño con laminados de material compuesto mediante 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 mostrar la utilidad de los diagramas "*carpet plot*" correspondiente a una lámina de material compuesto para **estimar** las características mecánicas de un laminado de material compuesto y llevar a cabo un **pre-diseño** de la **secuencia de apilamiento** de las capas en un laminado para alcanzar las propiedades deseadas.

2 Introducción

En los últimos años se ha producido un notable crecimiento en la utilización de materiales compuestos en diversos campos de la ingeniería debido a la **excelente combinación** de **propiedades** que aportan en relación a su **bajo peso**. Es por ello, que los compuestos o plásticos reforzados con fibra (PRF) aparecen de forma relevante en **sectores altamente tecnológicos** como sector aeronáutico y aeroespacial, transporte ferroviario y naval, industria de la automoción, sector eléctrico-electrónico, prótesis médicas, etc.¹

Al tratarse de materiales **anisotrópicos** por la naturaleza del elemento de refuerzo (con un comportamiento marcadamente lineal), muchas de las aplicaciones requieren el empleo de **estructuras laminadas** formadas por un apilamiento de capas a láminas en las que el elemento de refuerzo se dispone formando diversos ángulos con el objetivo de alcanzar estructuras "**quasi-isotrópicas**".

Bajo estas premisas, la **teoría clásica de análisis de laminados** (CLT) ofrece una metodología de análisis y cálculo que permite estimar/predecir las propiedades mecánicas que aportará una determinada estructura compuesta. Este aspecto es de vital importancia en el proceso de **pre-diseño** de la secuencia de empaquetamiento de las láminas en el compuesto. Los **diagramas "*carpet plot*"** correspondientes a diferentes propiedades representan una herramienta de gran utilidad en el proceso de **pre-selección** de la secuencia de compactación de laminados y permiten **estimar** de una forma muy sencilla las propiedades de un laminado pre-definido o, incluso, **definir** la estructura de apilamiento de las láminas para obtener un determinado valor en alguna propiedad como el módulo longitudinal, módulo de Poisson, módulo de cortadura, etc.^{2,3}

Los diagramas o gráficos "*carpet plot*" se obtienen de forma numérica a partir de las características mecánicas de una lámina tipo.^{4,5} Si bien existe mucho software basado en la teoría clásica de análisis de laminados, **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:

- **Identificar** las **propiedades mecánicas** de una lámina de material compuesto.
- **Representar** el diagrama "*carpet plot*" correspondiente al módulo longitudinal y **estimar** el módulo longitudinal de un laminado compuesto definido a través de los porcentajes de fibras.
- **Estimar las propiedades mecánicas** de un laminado pre-definido mediante el empleo del gráfico "*carpet plot*" correspondiente.

4 Desarrollo

El empleo de materiales compuestos en ingeniería se enfrenta a una **problemática** de gran relevancia ligada a la naturaleza de este grupo de materiales. Por un lado, el ingeniero puede elegir entre una amplísima gama de **matrices** poliméricas (epoxi, poliéster insaturado, fenólica, etc.) cada una de las cuales posee una serie de propiedades; por otro lado también puede seleccionar diversos tipos de **fibras** (carbono, vidrio, aramida, basalto, etc.) y en diferentes **formas de presentación** (fieltro o mat, tejido bidireccional, tejido multiaxial, fibra unidireccional, etc.). Ello lleva a una infinidad de posibilidades de combinación de matrices, fibras, forma de presentación, ángulos de fibras, secuencia de apilamiento, etc. Ante esta situación **¿cómo se pueden predecir o estimar las propiedades de un laminado para llevar a cabo acciones de diseño y cálculo?** La teoría clásica de análisis de laminados ofrece un marco para el análisis del comportamiento de laminados y es una herramienta de gran utilidad en el pre-diseño / pre-selección de estructuras de laminados.

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

- En primer lugar **seleccionaremos un material** de la base de datos y **analizaremos las características** mecánicas de una lámina de material compuesto.
- Seguidamente, procederemos a **representar el gráfico "*carpet plot*"** para el módulo longitudinal (E_x) y llevaremos a cabo un análisis de la información que ofrecen dichos gráficos.
- A continuación **definiremos la estructura de un laminado** y procederemos al **cálculo/estimación** del módulo longitudinal (E_x), el módulo de cortadura (G_{xy}) y el módulo de Poisson (ν_{xy}).

4.1 Selección de material y análisis de las propiedades de una lámina de material compuesto

En primer lugar vamos a **seleccionar un material** de entre los que están dados de alta en la base de datos de eLamX (materiales ampliamente utilizados en sectores de ingeniería). En el explorador de proyectos de eLamX situado en la parte superior

derecha, pulsamos con el botón derecho en la opción “Materials” y seleccionamos la opción “Database” tal y como se muestra en la Figura 1.

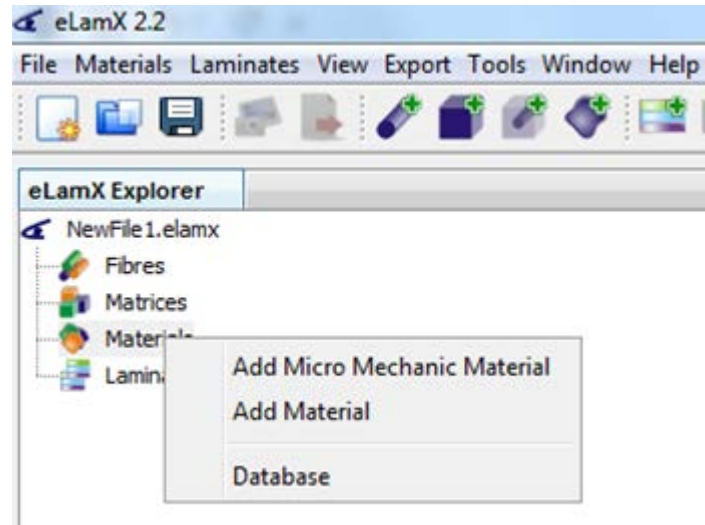


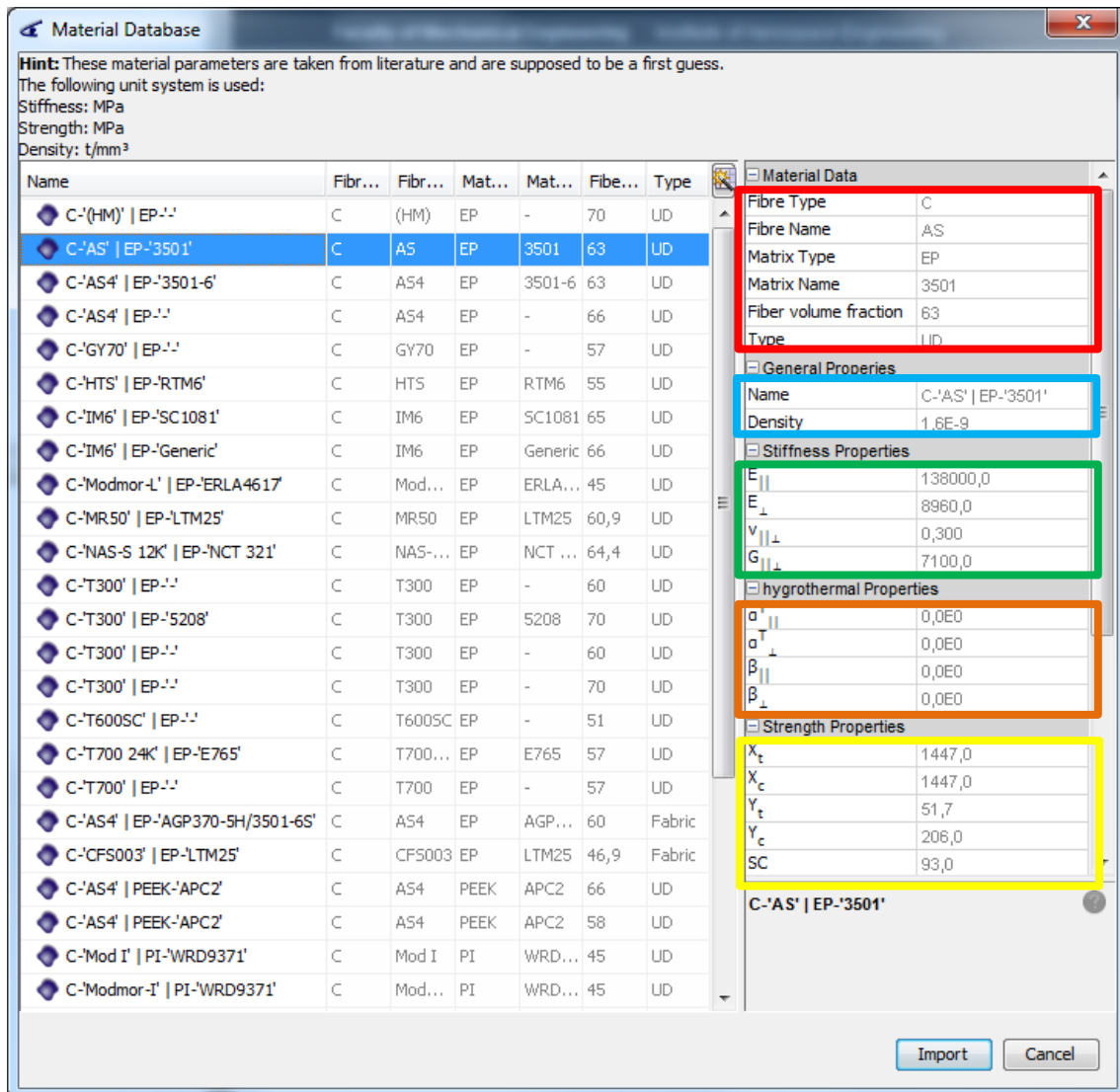
Figura 1. Acceso a la base de datos de materiales de eLamX

Al acceder a la base de datos, aparece una ventana con un conjunto de materiales disponibles para llevar a cabo el diseño de materiales compuestos (Figura 2). En esta base de datos se muestran un conjunto de materiales (fibra+resina) **ampliamente utilizados** en ingeniería de materiales compuestos así como el conjunto de propiedades de las láminas individuales. Así, por ejemplo, si seleccionamos el material **C-‘AS’/ EP-‘3501’**, podemos identificar el conjunto de propiedades y características de esta lámina. En la parte superior de la zona derecha de la base de datos encontramos el conjunto de **propiedades del material**, resaltado con un recuadro de color rojo; así, con la información que aporta la base de datos, podemos saber que este material corresponde a una lámina de resina epoxi 3501 (EP), reforzada con un 63% en volumen de fibra de carbono (C) de tipo AS unidireccional.

En la parte inferior se muestran algunas **propiedades físicas**, resaltadas con un recuadro de color azul y es posible conocer la densidad de este material que estaría en torno a 1,6 t/m³ o 1,6 g/cm³.

Inmediatamente por debajo de las propiedades físicas, puedes encontrar el conjunto de **propiedades de rigidez** de la lámina con las constantes elásticas en las direcciones locales (longitudinal y transversal), resaltado con un cuadro de color verde. Claramente se identifica la **dirección longitudinal** o dirección de las fibras (||) y la **dirección normal** o perpendicular a las fibras (⊥). Así, para este material tenemos las siguientes propiedades:

Módulo longitudinal	$E_{ }$	138.000	MPa
Módulo transversal	E_{\perp}	8.960	MPa
Módulo de Poisson mayor	$\nu_{ \perp}$	0,3	
Módulo de cortadura en el plano	$G_{ \perp}$	7.100	MPa



Material Database

Hint: These material parameters are taken from literature and are supposed to be a first guess.
The following unit system is used:
Stiffness: MPa
Strength: MPa
Density: t/mm³

Name	Fibr...	Fibr...	Mat...	Mat...	Fibe...	Type
C-'(HM)' EP-'-'	C	(HM)	EP	-	70	UD
C-'AS' EP-'3501'	C	AS	EP	3501	63	UD
C-'AS4' EP-'3501-6'	C	AS4	EP	3501-6	63	UD
C-'AS4' EP-'-'	C	AS4	EP	-	66	UD
C-'GY70' EP-'-'	C	GY70	EP	-	57	UD
C-'HTS' EP-'RTM6'	C	HTS	EP	RTM6	55	UD
C-'IM6' EP-'SC1081'	C	IM6	EP	SC1081	65	UD
C-'IM6' EP-'Generic'	C	IM6	EP	Generic	66	UD
C-'Modmor-L' EP-'ERLA4617'	C	Mod...	EP	ERLA...	45	UD
C-'MR50' EP-'LTM25'	C	MR50	EP	LTM25	60,9	UD
C-'NAS-S 12K' EP-'NCT 321'	C	NAS-...	EP	NCT ...	64,4	UD
C-'T300' EP-'-'	C	T300	EP	-	60	UD
C-'T300' EP-'5208'	C	T300	EP	5208	70	UD
C-'T300' EP-'-'	C	T300	EP	-	60	UD
C-'T300' EP-'-'	C	T300	EP	-	70	UD
C-'T600SC' EP-'-'	C	T600SC	EP	-	51	UD
C-'T700 24K' EP-'E765'	C	T700...	EP	E765	57	UD
C-'T700' EP-'-'	C	T700	EP	-	57	UD
C-'AS4' EP-'AGP370-5H/3501-6S'	C	AS4	EP	AGP...	60	Fabric
C-'CFS003' EP-'LTM25'	C	CFS003	EP	LTM25	46,9	Fabric
C-'AS4' PEEK-'APC2'	C	AS4	PEEK	APC2	66	UD
C-'AS4' PEEK-'APC2'	C	AS4	PEEK	APC2	58	UD
C-'Mod I' PI-'WRD9371'	C	Mod I	PI	WRD...	45	UD
C-'Modmor-I' PI-'WRD9371'	C	Mod...	PI	WRD...	45	UD

Material Data

Fibre Type	C
Fibre Name	AS
Matrix Type	EP
Matrix Name	3501
Fiber volume fraction	63
Type	UD

General Properties

Name	C-'AS' EP-'3501'
Density	1.6E-9

Stiffness Properties

E	138000,0
E _⊥	8960,0
ν _⊥	0,300
G _⊥	7100,0

hygrothermal Properties

α	0,0E0
α _⊥	0,0E0
β	0,0E0
β _⊥	0,0E0

Strength Properties

X _t	1447,0
X _c	1447,0
Y _t	51,7
Y _c	206,0
SC	93,0

C-'AS' | EP-'3501'

Import Cancel

Figura 2. Ventana con la base de datos de materiales (láminas individuales) de eLamX

Además de las propiedades y características descritas, la base de datos también aporta información sobre el comportamiento del laminado en **condiciones higrotérmicas**, es decir, por la acción de la temperatura y la humedad. En el recuadro de color naranja se muestran los **coeficientes de dilatación térmica longitudinal y transversal** ($\alpha_{||}$ y α_{\perp}) así como los **coeficientes de dilatación por humedad**, tanto en la dirección longitudinal como transversal ($\beta_{||}$ y β_{\perp}). En este caso, los valores no están disponibles. Finalmente, en el recuadro de color amarillo se muestran las **propiedades de resistencia** para poder estimar el fallo de los materiales. En este caso se identifican los siguientes valores:

Resistencia a tracción longitudinal	X _t	1447	MPa
Resistencia a compresión longitudinal	X _c	1447	MPa
Resistencia a tracción transversal	Y _t	51,7	MPa
Resistencia a compresión transversal	Y _c	206	MPa
Resistencia a cortadura	SC	93	MPa

Una vez analizadas las diferentes propiedades que aparecen en la base de datos, procedemos a "Importar" el material y ya estará disponible en el explorador de proyectos de eLamX.

4.2 Representación gráfica e interpretación de gráficos "carpet plot"

Ahora que ya sabemos cómo acceder a la base de datos, seleccionar un material e identificar sus principales propiedades, ya podemos proceder a **representar el diagrama "carpet plot"** correspondiente a diferentes propiedades tales como el módulo longitudinal (E_x), módulo de Poisson (ν_{xy}) y módulo de cortadura en el plano (G_{xy}). Para ello, basta con pulsar con el botón derecho en el material desplegable dentro de la lista de materiales del explorador de proyectos y seleccionar la opción "Open Carpet Plot" tal y como se muestra en la Figura 3.

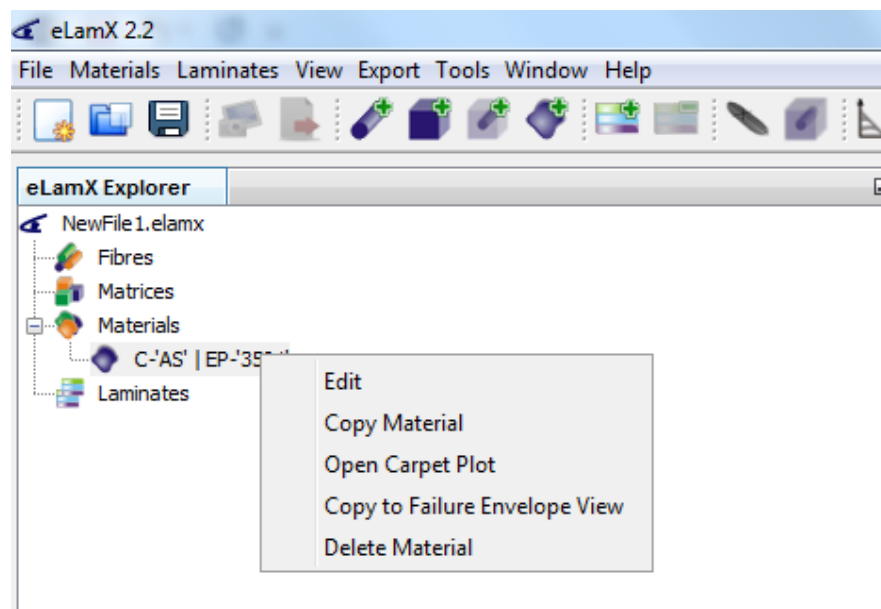


Figura 3. Acceso a la representación de diagramas "carpet plot" para el material seleccionado mediante eLamX

Después de pulsar dicha opción, aparece en la zona derecha un gráfico "carpet plot" correspondiente al módulo longitudinal (E_x), pudiendo cambiar la representación al seleccionar la propiedad correspondiente que aparece en el recuadro de color azul en dicho gráfico. En la Figura 4 se muestra el gráfico "carpet plot" correspondiente al módulo longitudinal (E_x). Estos gráficos representan la variación de una determinada propiedad (E_x , ν_{xy} , G_{xy}) de la familia de laminados del tipo $[0_n / \pm 45_m / 90_p]$; es decir, laminados **simétricos** que contienen diversos porcentajes (%) de capas o láminas con fibras orientadas a 0° , $+45^\circ$, -45° y 90° ya que es una disposición bastante habitual en ingeniería de materiales compuestos.

En este gráfico, en el **eje y** 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 muestra el porcentaje de capas con orientación $\pm 45^\circ$ en el total de láminas del compuesto. Las líneas que aparecen en

el interior del gráfico se corresponden con los valores del módulo longitudinal (o la propiedad seleccionada) para diferentes porcentajes constantes de capas orientadas a 0° .

Pongamos en práctica el manejo de estos gráficos. Por ejemplo, si tenemos un laminado compuesto formado por un 30% de capas orientadas a $\pm 45^\circ$ y un 40% de capas con orientación 0° (lógicamente, el resto son capas a 90°), el módulo estimado se puede obtener de la siguiente manera. Trazamos una línea perpendicular (flecha azul) al eje x en el punto correspondiente al % de capas a $\pm 45^\circ$ (40%) y prolongamos la línea hasta que corta con la curva correspondiente a los módulos del laminado para un % constante de capas orientadas a 0° del 30%. Por el punto de intersección, trazamos una línea horizontal (flecha roja) hasta cortar con el eje x, y el valor numérico que se obtiene indica el valor del módulo en la dirección longitudinal (E_x), en este caso, aproximadamente 70.000 MPa.

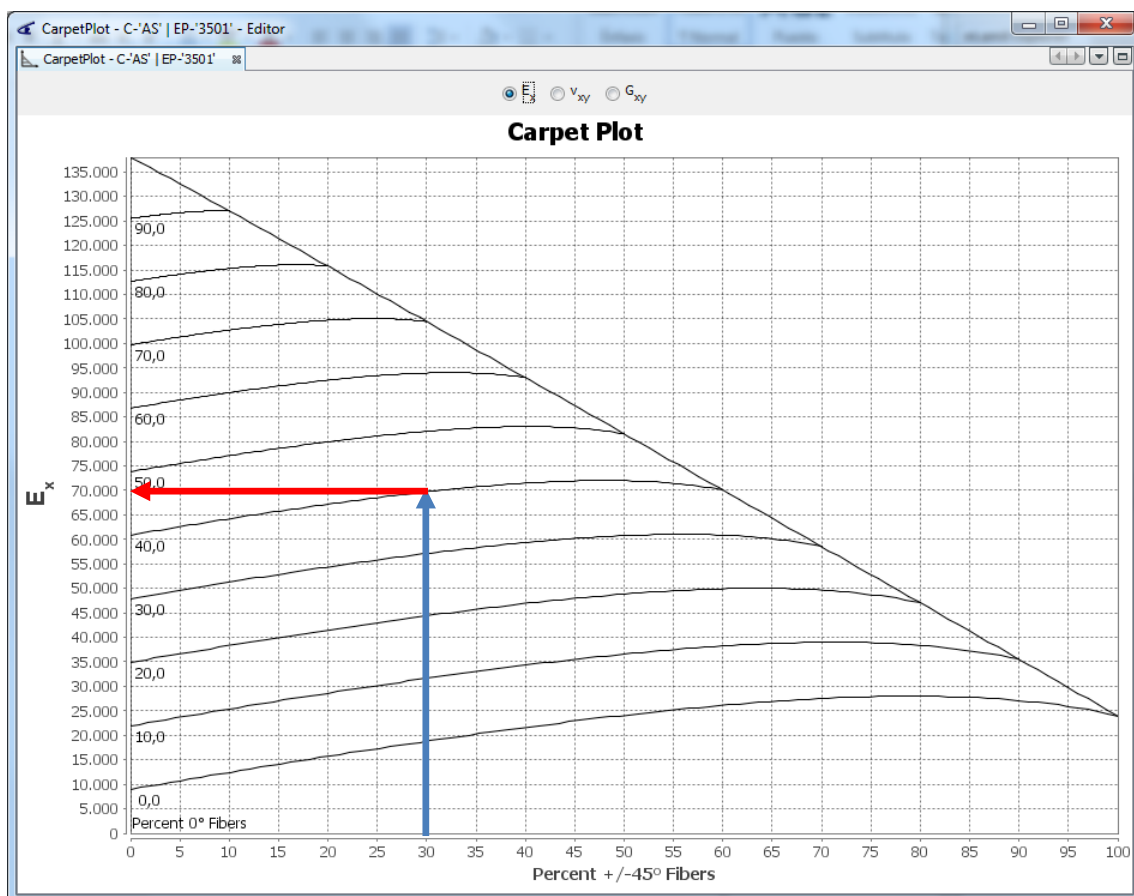


Figura 4. Gráfico "carpet plot" correspondiente al módulo longitudinal (E_x) del conjunto de familias de laminados del tipo $[0_n / \pm 45_m / 90_p]_s$ para el material C-'AS'/EP-'3501' de la base de datos de eLamX.

4.2. Estimación de las propiedades mecánicas de un laminado definido según secuencia de apilamiento de capas

Una vez tenemos claros los elementos que intervienen en un gráfico "carpet plot", podemos abordar la **estimación de las propiedades mecánicas** del siguiente laminado, definido según secuencia de apilamiento de capas formadas por con el material C-'AS'/EP-'3501' del tipo $[\pm 45 / 90_2 / 0_4]_s$. Este laminado es simétrico, tal y como indica el subíndice "S" al final de la secuencia y consta de 16 láminas con la siguiente disposición expandida:

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

El porcentaje de capas a 0° , $\pm 45^\circ$ y 90° es el siguiente:

Porcentaje de capas a 0° :	8/16	50%
Porcentaje de capas a $\pm 45^\circ$:	4/16	25%
Porcentaje de capas a 90° :	4/16	25%

Con esta información, procedemos a representar el gráfico "carpet plot" para el módulo longitudinal (E_x), el módulo de cortadura (G_{xy}) y el módulo de Poisson (ν_{xy}), tal y como se muestra en las Figuras 5, 6 y 7, respectivamente.

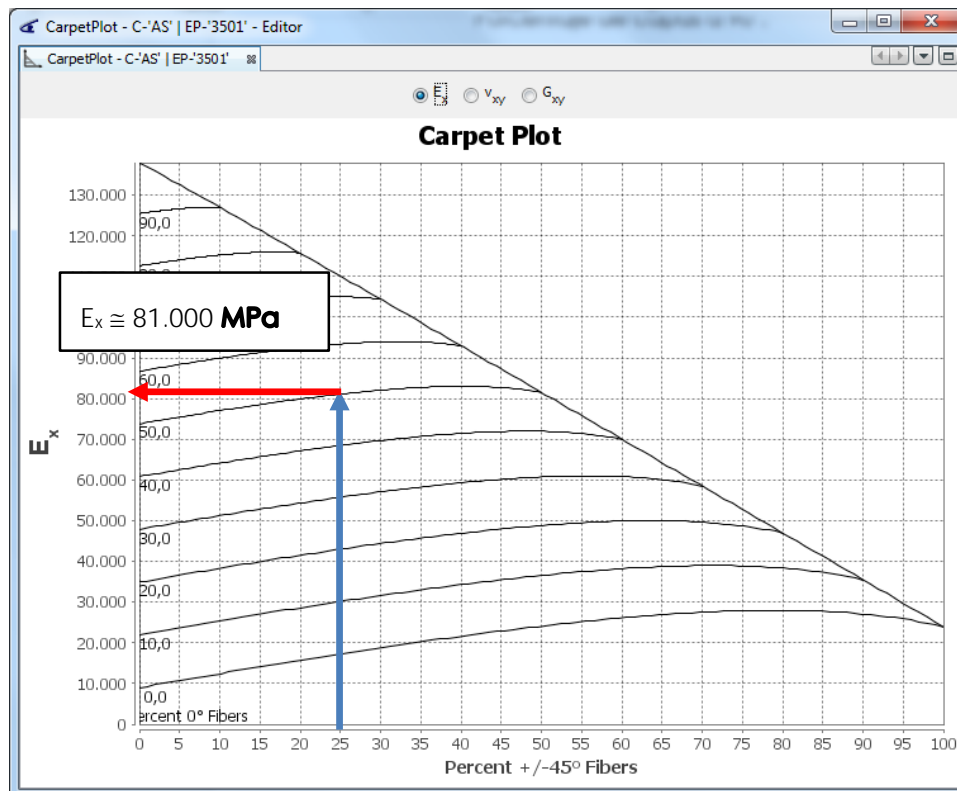


Figura 5. Estimación del módulo longitudinal (E_x) de un laminado $[\pm 45 / 90_2 / 0_4]_s$ a partir del gráfico "carpet plot" correspondiente al material C-'AS'/EP-'3501'

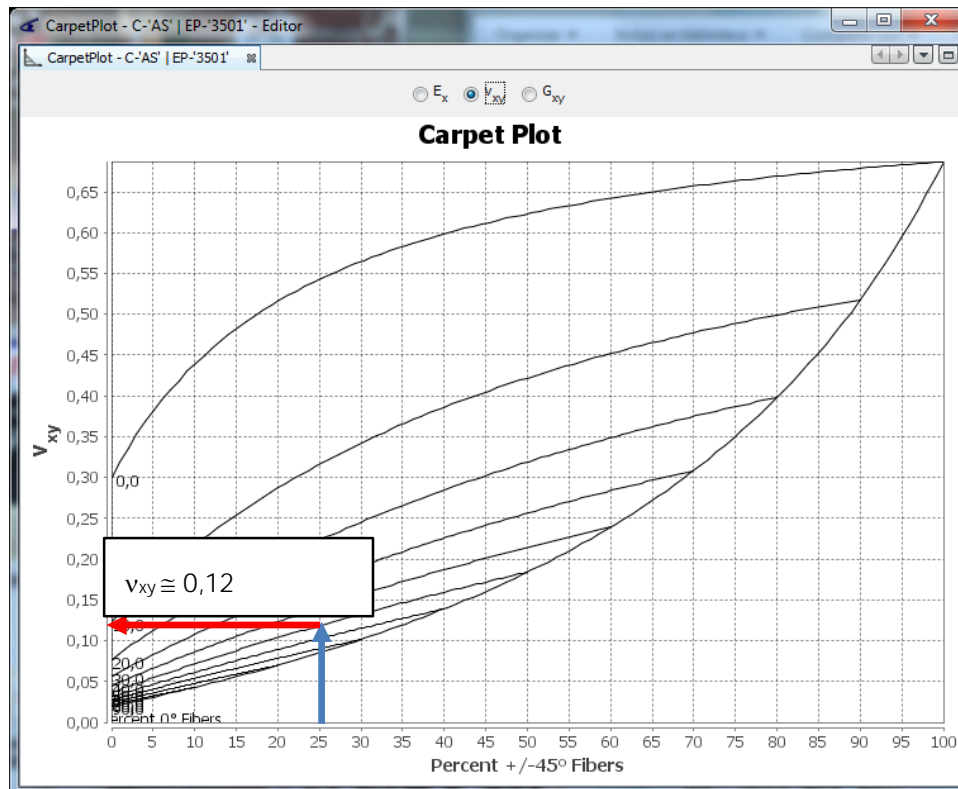


Figura 6. Estimación del módulo de Poisson (ν_{xy}) de un laminado $[\pm 45 / 90_2 / 0_4]_s$ a partir del gráfico "carpet plot" correspondiente al material C-'AS'/EP-'3501'

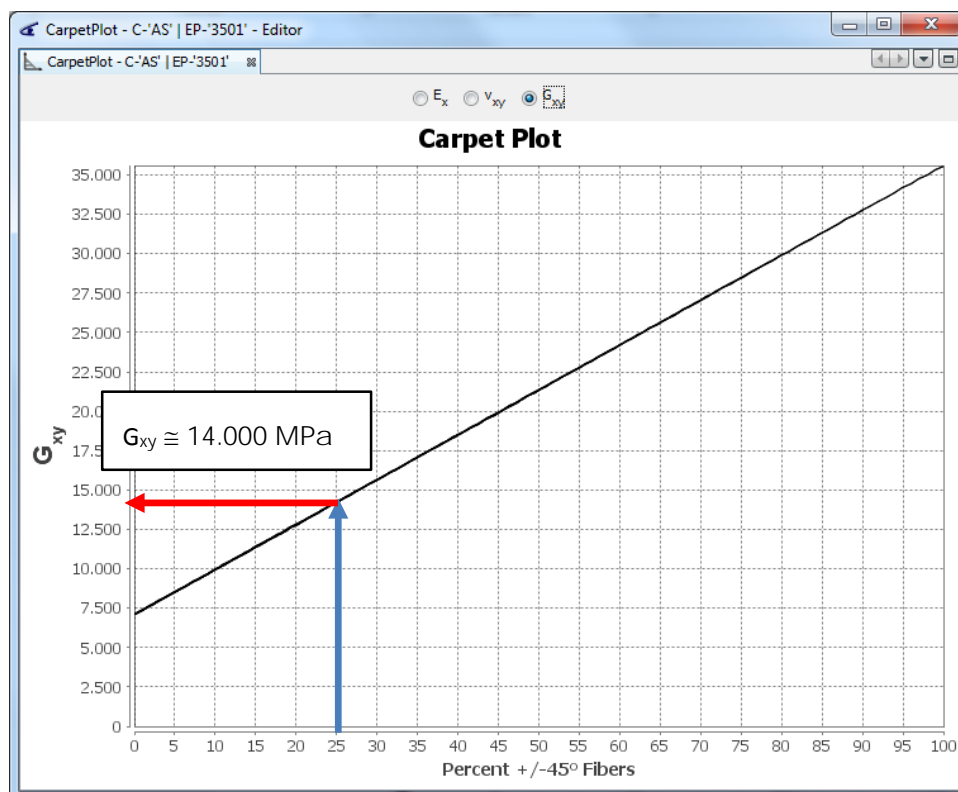


Figura 7. Estimación del módulo de cortadura (G_{xy}) de un laminado $[\pm 45 / 90_2 / 0_4]_s$ a partir del gráfico "carpet plot" correspondiente al material C-'AS'/EP-'3501'

5 Cierre

Para finalizar, resaltar la **utilidad de los diagramas "carpet plot"** para el pre-diseño de secuencia de apilamiento de capas o láminas en materiales compuesto. Esta etapa es de vital importancia a nivel industrial para poder **diseñar estructuras** de materiales compuestos capaces de satisfacer una serie de especificaciones técnicas tal y como se muestra en la siguiente figura. La información que se obtiene en la fase de pre-diseño es de gran utilidad para diseños avanzados con herramientas basadas en el método de elementos finitos tales como ANSYS, Nastran, entre otras permitiendo optimizar el dimensionamiento de los componentes y simular el comportamiento real.

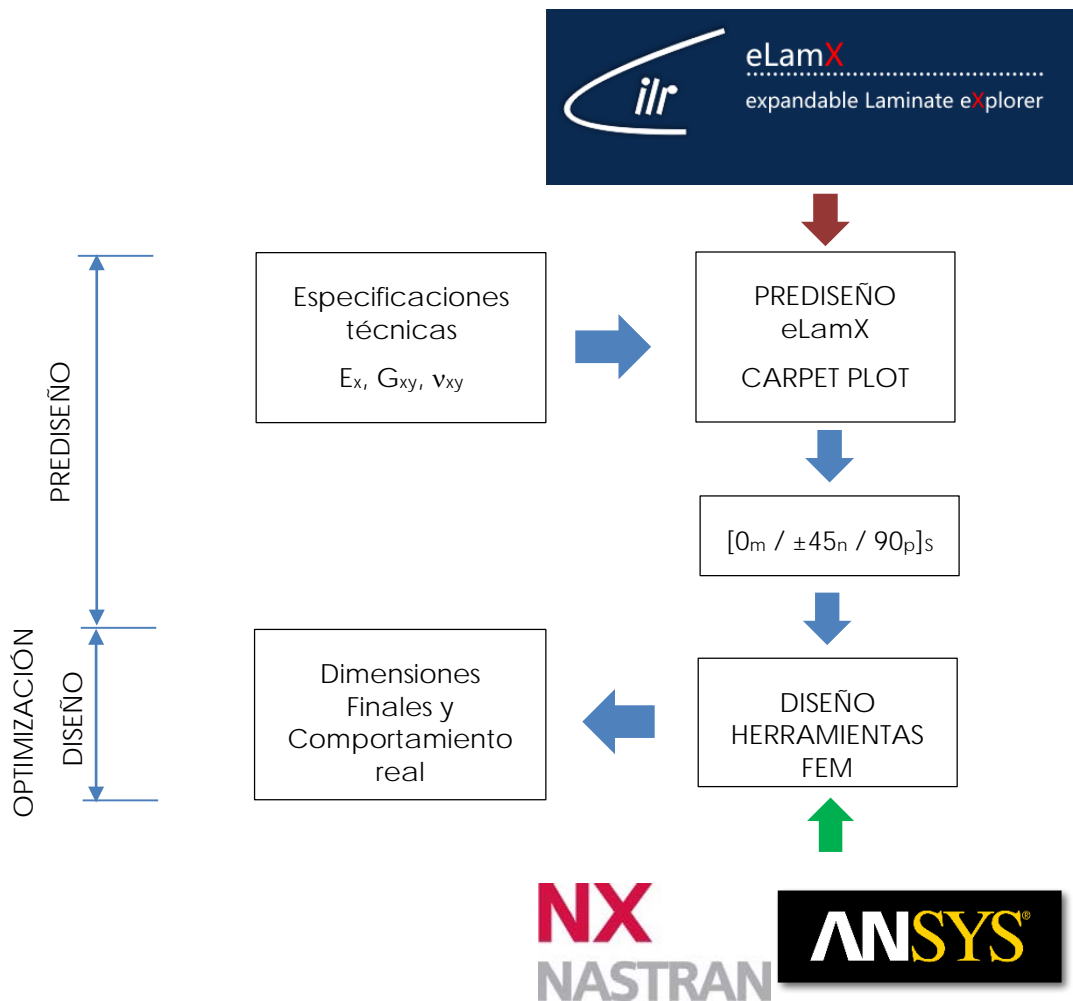


Figura 8. Esquema de las etapas que intervienen en el diseño y optimización de partes y componentes de materiales compuestos



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