



MÁSTER UNIVERSITARIO EN SISTEMAS ESPACIALES  
POR LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



POLITÉCNICA

# Fabricación de estructuras ISOGRID, Cálculo de admisibles y ejercicio 2021

## **MUSE 2021**

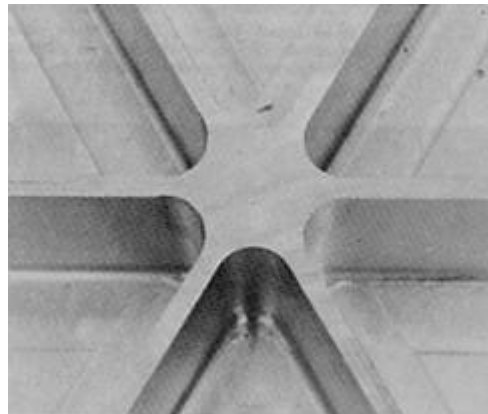
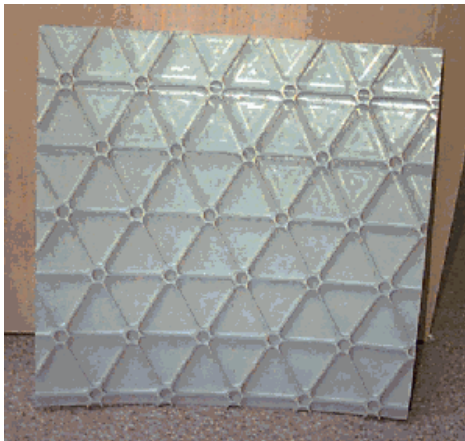


MÁSTER UNIVERSITARIO EN SISTEMAS ESPACIALES  
POR LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



## Fabricación de estructuras ISOGRID

- Aunque el diseño de estructuras isogrid metálicas data del programa Apolo, su uso es limitado debido a múltiples factores:
  - Problemas de fatiga debidos al fresado químico (microgrietas)
  - Costes de fabricación muy altos respecto a otras estrategias de rigidización
  - Capacidad/coste de fabricación de grandes tamaños limitada.
  - Costes de inspección no destructiva muy altos



Aluminum isogrid used in McDonnell-Douglas launch vehicle components



SpaceX Dragon 2



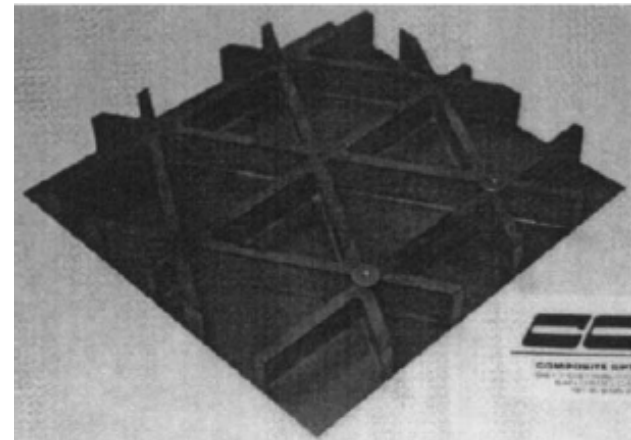
MÁSTER UNIVERSITARIO EN SISTEMAS ESPACIALES  
POR LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



POLITÉCNICA

- La fabricación de estructuras isogrid en material compuesto presenta diferencias sustanciales respecto al material metálico:
- Fabricación aditiva vs sustractiva ➡ ahorro de material
  - Problemas de fatiga vs despegue rigidizadores ➡ tolerancia al daño y diseño
  - Problemas de mecanizado vs problemas laminado de cruces ➡ Requiere métodos alternativos de fabricación de los elementos rigidizadores
    - Laminado
    - Curado

**Stanford's TRIG structure**





MÁSTER UNIVERSITARIO EN SISTEMAS ESPACIALES  
POR LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



POLITÉCNICA

# Fabricación de estructuras isogrid-lattice mediante Filament Winding

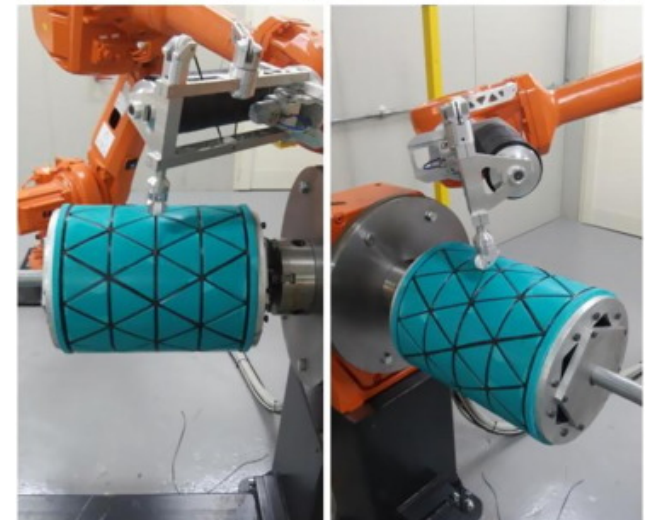
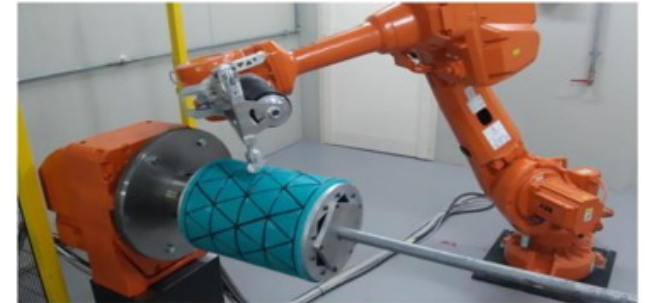


## Ventajas

- Laminación sencilla y automática

## Desventajas

- Proporción fibra-resina no uniforme
- Tensión inducida en las fibras durante la laminación
- Distribución no uniforme del material a lo largo del nervio
- Torsión de las mechas que redunda en una falta de uniformidad





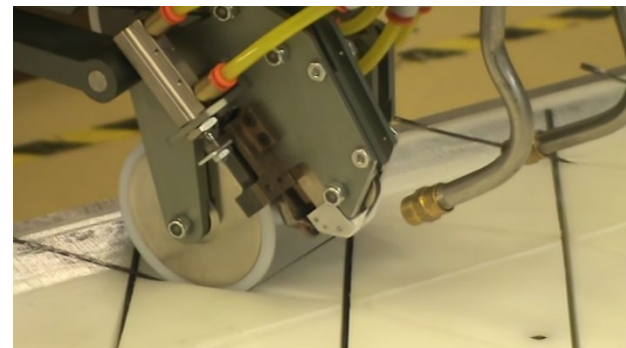


MÁSTER UNIVERSITARIO EN SISTEMAS ESPACIALES  
POR LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



# Fabricación de estructuras isogrid-lattice mediante Fiber Placement

- Minimiza las desventajas de la fabricación por FW
- Se han realizado desarrollos adaptados para este tipo de estructuras
- Problemas en cruces: diferentes estrategias de laminación
  - Cortes
  - Steering





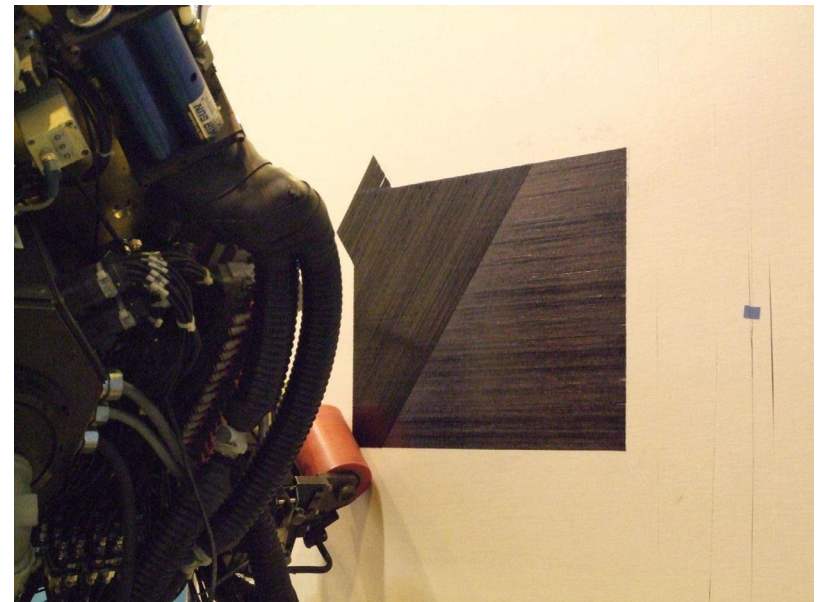
# MUSE

MÁSTER UNIVERSITARIO EN SISTEMAS ESPACIALES  
POR LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



POLITÉCNICA

- Comparación de las diferentes estrategias de laminación





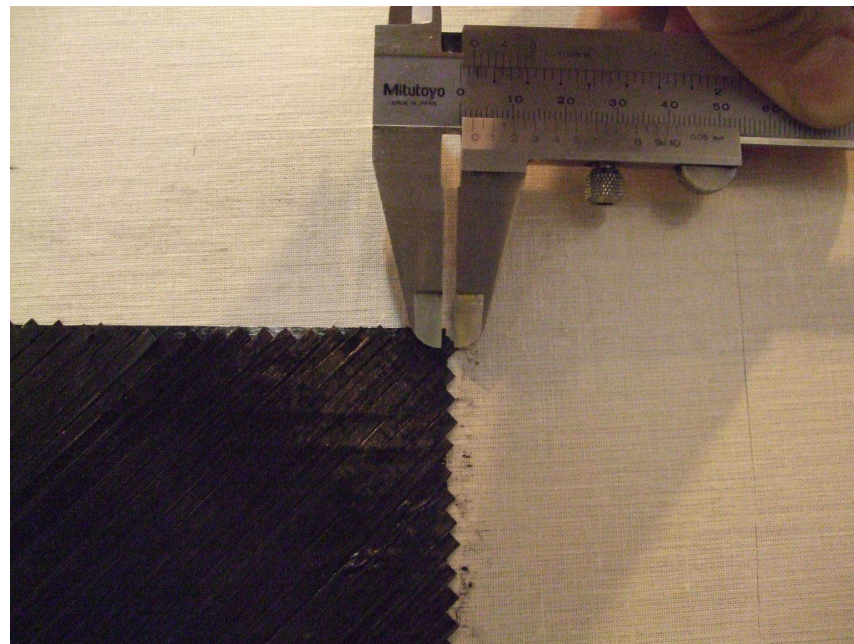
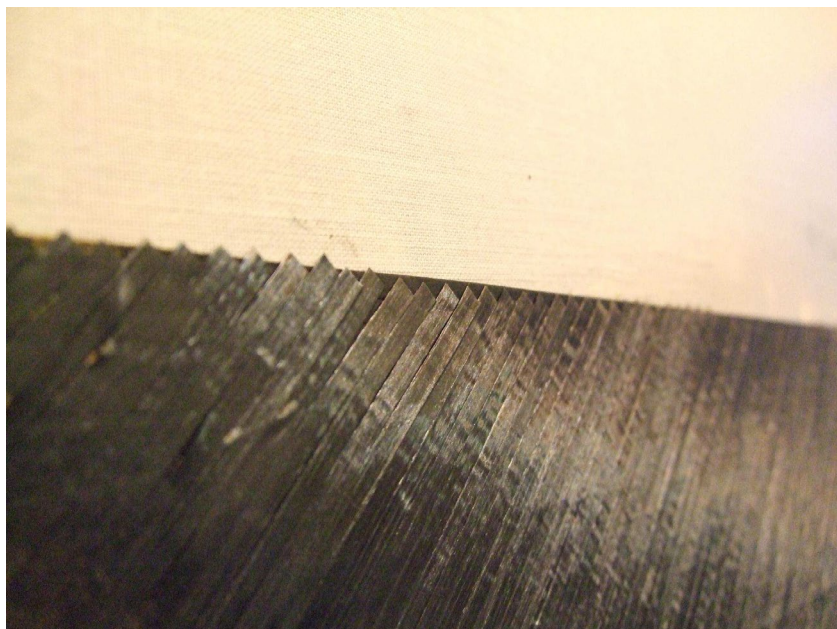


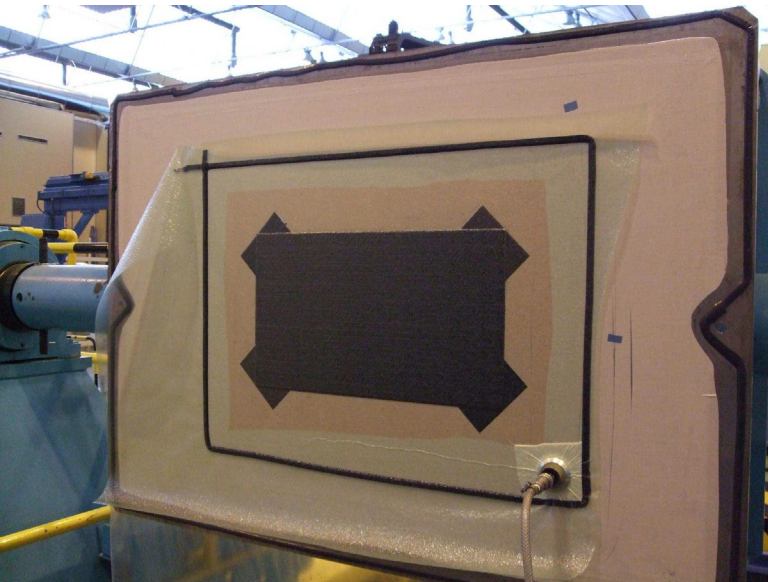
# MUSE

MÁSTER UNIVERSITARIO EN SISTEMAS ESPACIALES  
POR LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



POLITÉCNICA









# MUSE

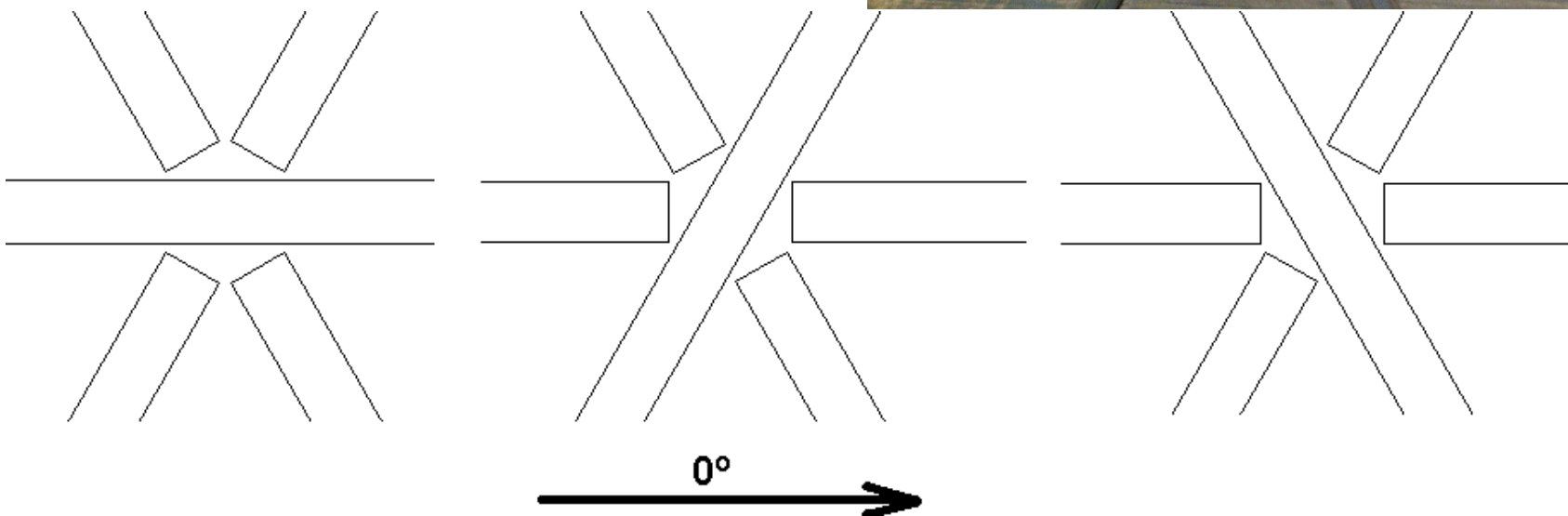
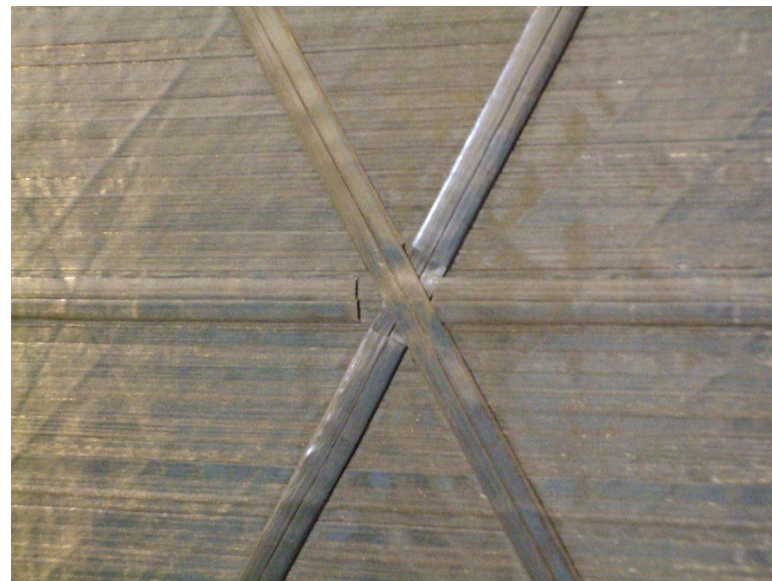
MÁSTER UNIVERSITARIO EN SISTEMAS ESPACIALES  
POR LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



POLITÉCNICA

## Estrategia de laminación con cortes en el cruce de nervios

- Pérdida de continuidad de las fibras en los elementos rigidizadores





# MUSE

MÁSTER UNIVERSITARIO EN SISTEMAS ESPACIALES  
POR LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



POLITÉCNICA

## Estrategia de laminación con steering en el cruce de nervios

- Geometría del cruce modificada





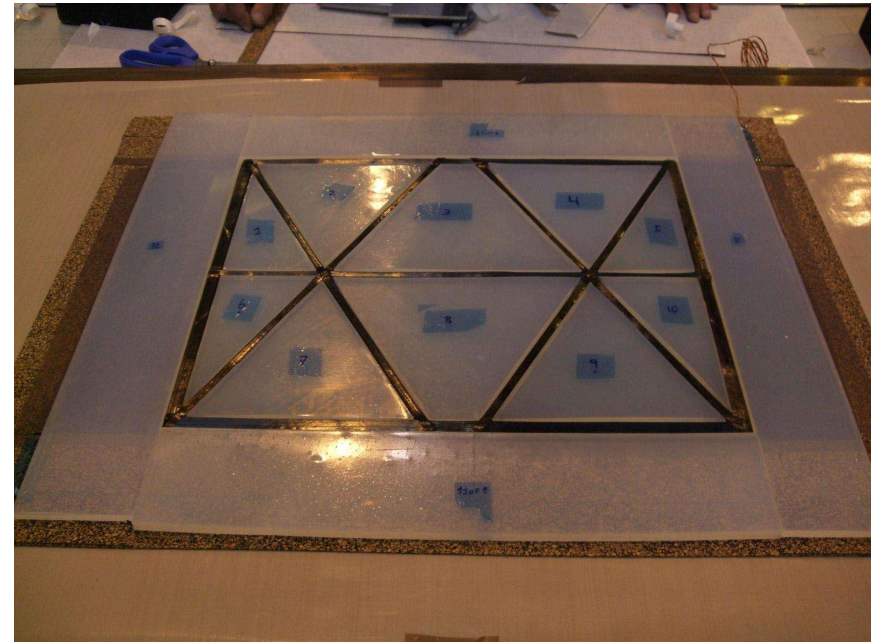
# MUSE

MÁSTER UNIVERSITARIO EN SISTEMAS ESPACIALES  
POR LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



POLITÉCNICA

## Compactación mediante módulos de silicona (sistema modular)



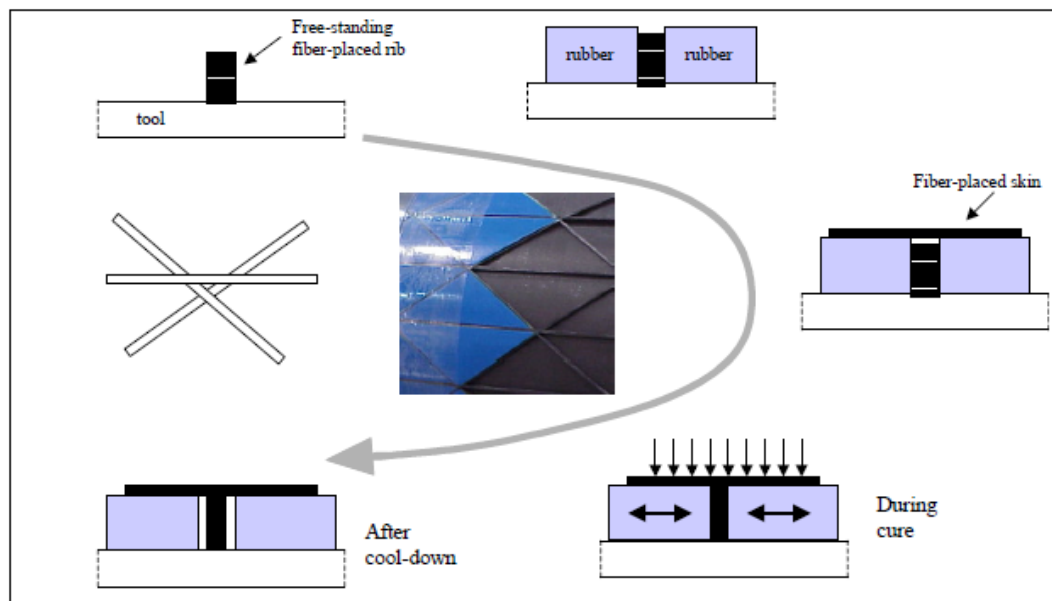




MÁSTER UNIVERSITARIO EN SISTEMAS ESPACIALES  
POR LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



POLITÉCNICA





MÁSTER UNIVERSITARIO EN SISTEMAS ESPACIALES  
POR LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



POLITÉCNICA

# Cálculo de Admisibles y valores de diseño



MÁSTER UNIVERSITARIO EN SISTEMAS ESPACIALES  
POR LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



POLITÉCNICA

# **“REGLA GENERAL” para las propiedades mecánicas del material:**

- ✓ **“Valores Diseño” módulos**  **Valor medio**
- ✓ **“Valores Diseño” resistencias**  **Valor base**
- ✓ **Propiedades dominadas fibra**  **Normalizadas**
- ✓ **Propiedades dominadas matriz**  **No-normalizadas**

**Normalizar:** *convertir o ajustar a un contenido volumétrico en fibra dado (de referencia para diseño), usualmente el 60%.*





MÁSTER UNIVERSITARIO EN SISTEMAS ESPACIALES  
POR LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



- Los valores admisibles de diseño (design allowables) son los valores que garantizan la respuesta mecánica del material en las condiciones críticas de servicio previstas en el diseño. Para ello es necesario conocer la distribución estadística de una propiedad, para lo que se debe de disponer de ensayos de una población de “n” valores
- Existen dos bases para calcular estos valores:
  - Valor de diseño “base A”, es aquel valor de la propiedad considerada tal que al menos el 99% de la población de valores sea igual o superior a él con un nivel de confianza del 95%.
  - Valor de diseño “base B”, es aquel valor de la propiedad considerada tal que al menos el 90% de la población de valores sea igual o superior a él con un nivel de confianza del 95%.

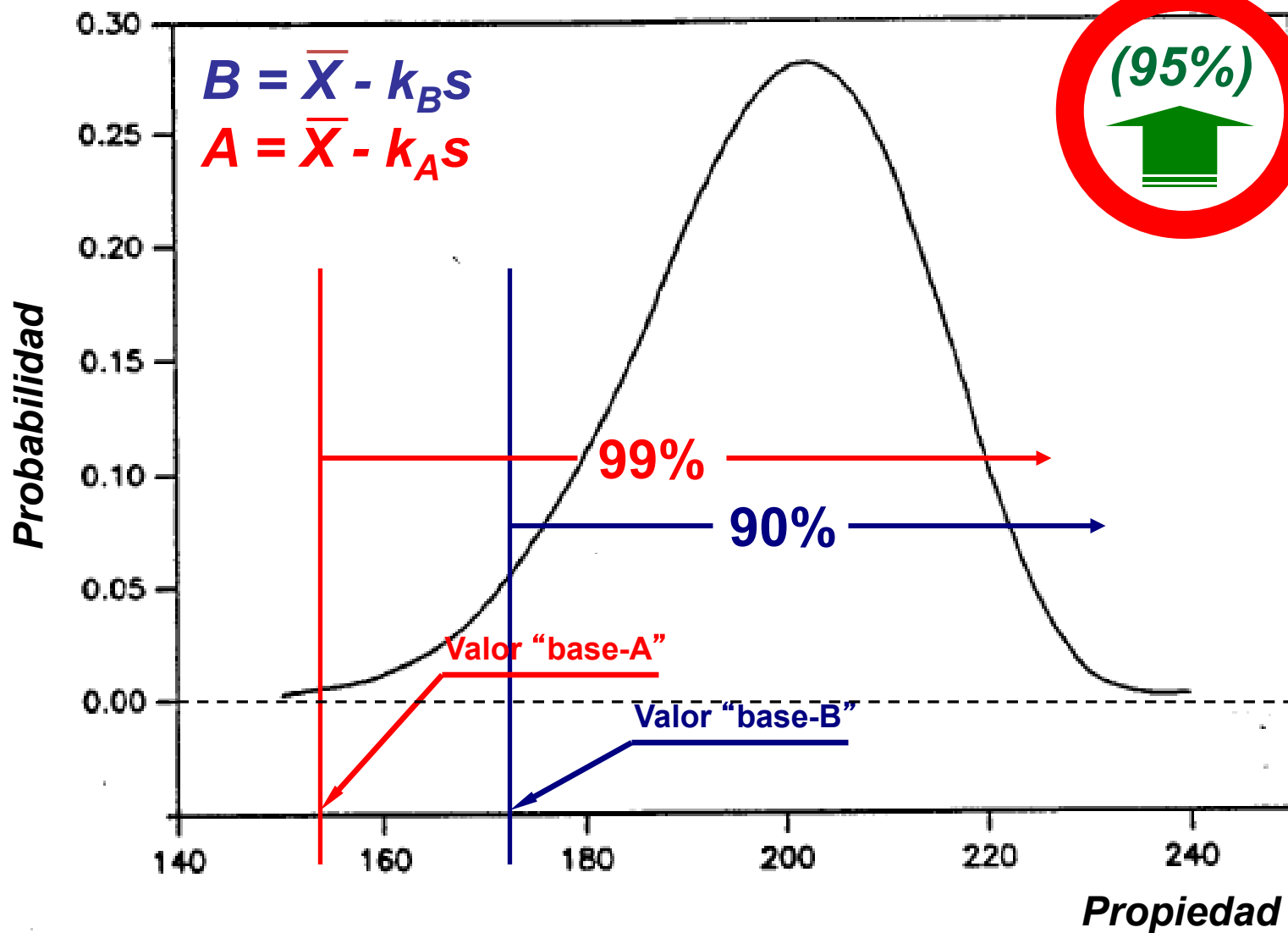


# MUSE

MÁSTER UNIVERSITARIO EN SISTEMAS ESPACIALES  
POR LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



POLITÉCNICA

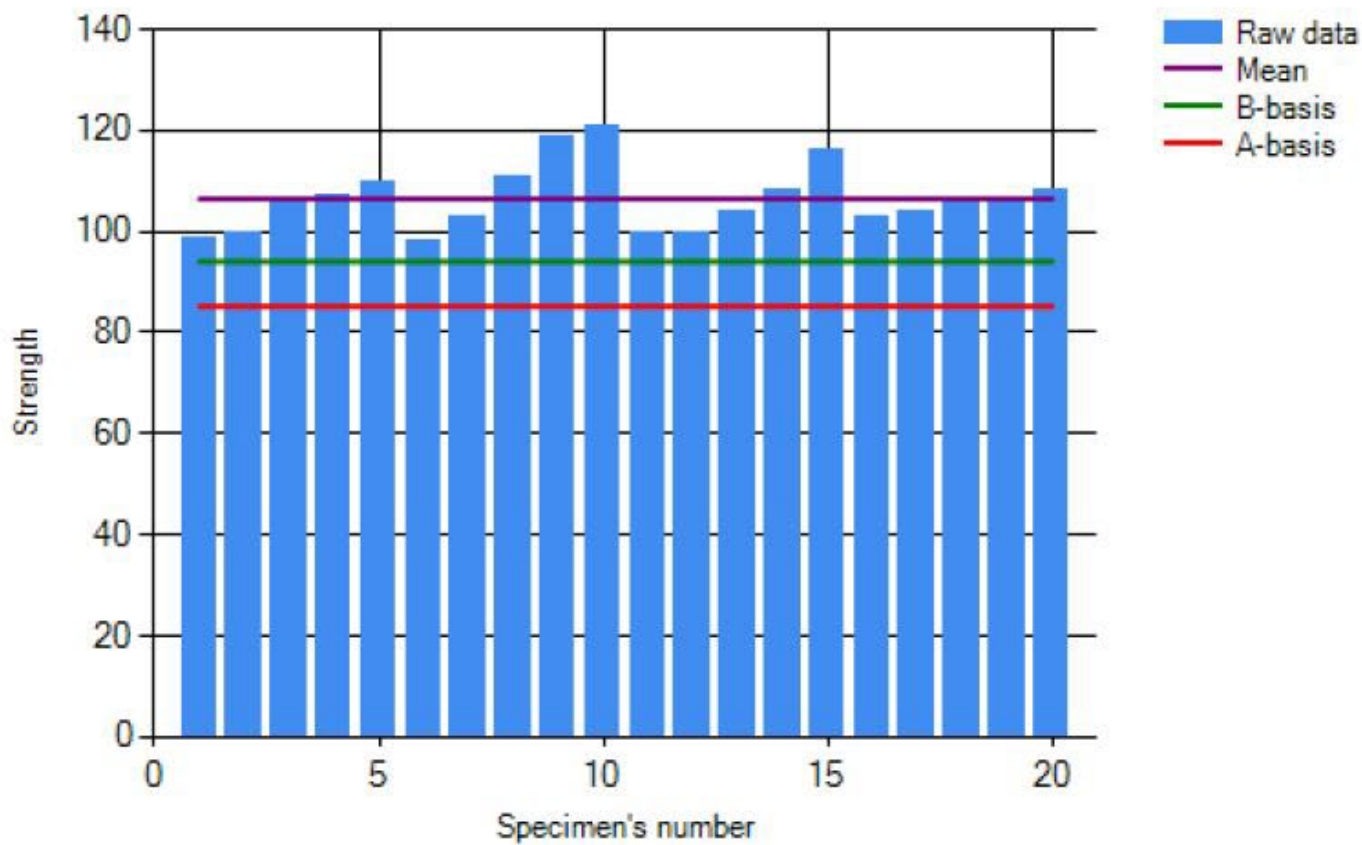




MÁSTER UNIVERSITARIO EN SISTEMAS ESPACIALES  
POR LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



POLITÉCNICA



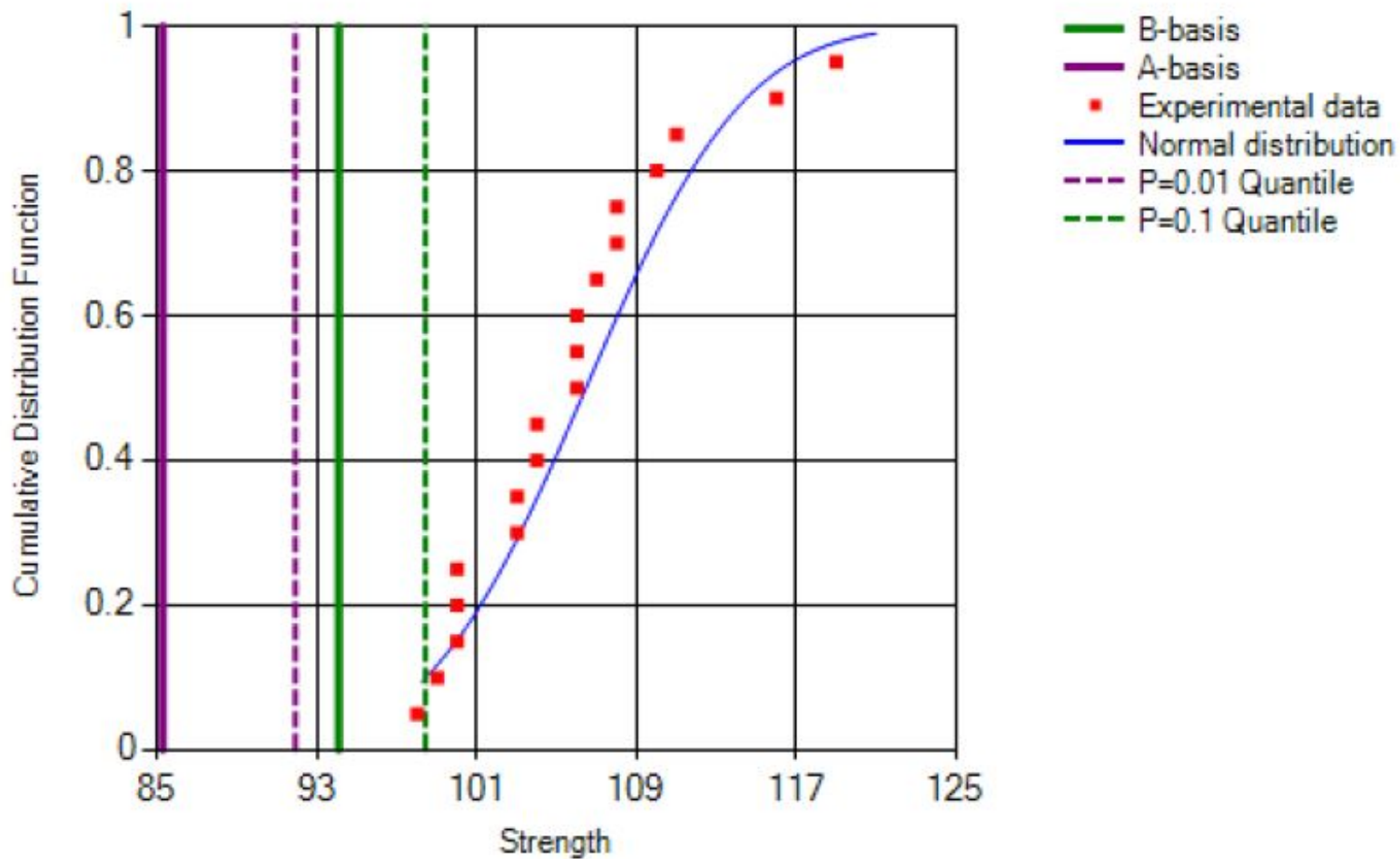




MÁSTER UNIVERSITARIO EN SISTEMAS ESPACIALES  
POR LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



POLITÉCNICA





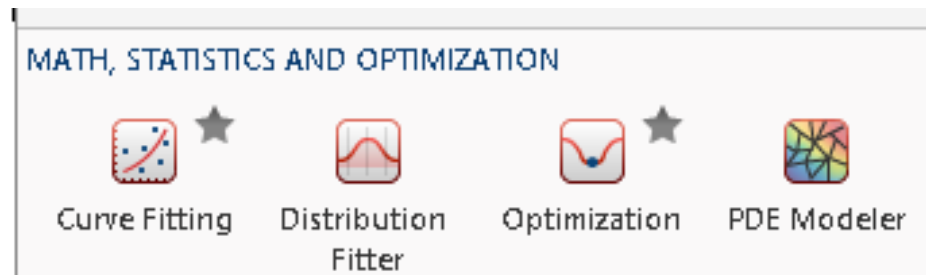
MÁSTER UNIVERSITARIO EN SISTEMAS ESPACIALES  
POR LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



POLITÉCNICA

## ¿Cómo hacemos esto en la práctica?

- Aplicaciones
- Excel
- MATLAB – Apps Distribution Fitter





MÁSTER UNIVERSITARIO EN SISTEMAS ESPACIALES  
POR LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



POLITÉCNICA

- Introducir los datos de los valores cuya distribución se quiere conocer y ver cual es la distribución que mejor se ajusta
  - Valorar la Weibull, normal y lognormal solo...aunque otras se puedan ajustar mejor.  
Hacer los cálculos solo para la que mejor se ajuste

Birnbaum-Saunders  
Burr  
EpsilonSkewNormal  
Exponential  
Extreme Value  
Gamma  
Generalized Extreme Value  
Generalized Pareto  
Half Normal  
Inverse Gaussian  
Log-Logistic  
Logistic  
Lognormal  
Nakagami  
Non-parametric  
Normal  
Rayleigh  
Rician  
Stable  
t Location-Scale



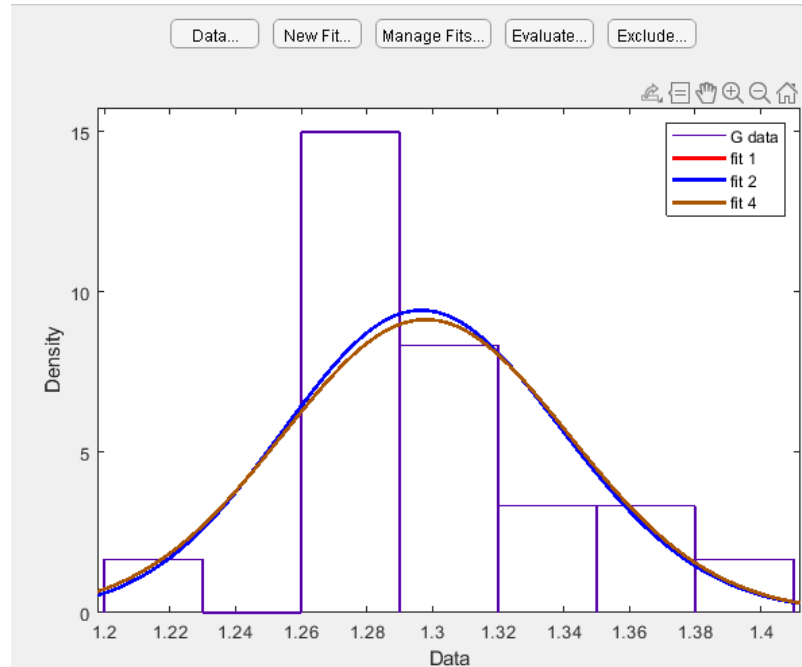


# MUSE

MÁSTER UNIVERSITARIO EN SISTEMAS ESPACIALES  
POR LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



POLITÉCNICA



Distribution: Normal  
Log likelihood: 34.7617  
Domain:  $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$   
Mean: 1.29795  
Variance: 0.00190352

Parameter	Estimate	Std. Err.
mu	1.29795	0.00975583
sigma	0.0436294	0.00717263

Estimated covariance of parameter estimates:

	mu	sigma
mu	9.51762e-05	-6.31145e-19
sigma	-6.31145e-19	5.14468e-05

- Dos metodologías para el cálculo del admisible
  - Numérica: Por medio de integración de la curva de distribución que se obtiene directamente de Matlab
  - Analítica: Por medio de los parámetros de la distribución elegida



MÁSTER UNIVERSITARIO EN SISTEMAS ESPACIALES  
POR LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



POLITÉCNICA

Todos los documentos de propiedades del material están disponibles en el NIAR:

- [https://www.wichita.edu/industry\\_and\\_defense/NIAR/Research/hexcel8552.php](https://www.wichita.edu/industry_and_defense/NIAR/Research/hexcel8552.php)
  - 8552 NCAMP Process Specification y 8552 NCAMP Material Base Specification: Documentos que definen los detalles del proceso en base a los que se obtienen las propiedades del material
  - Material Specification: Especificaciones comerciales del material
  - Material Property Data Report: Datos de los ensayos “en crudo”
  - Statistical Analysis Report: Cálculo de las propiedades basadas en los datos de los ensayos

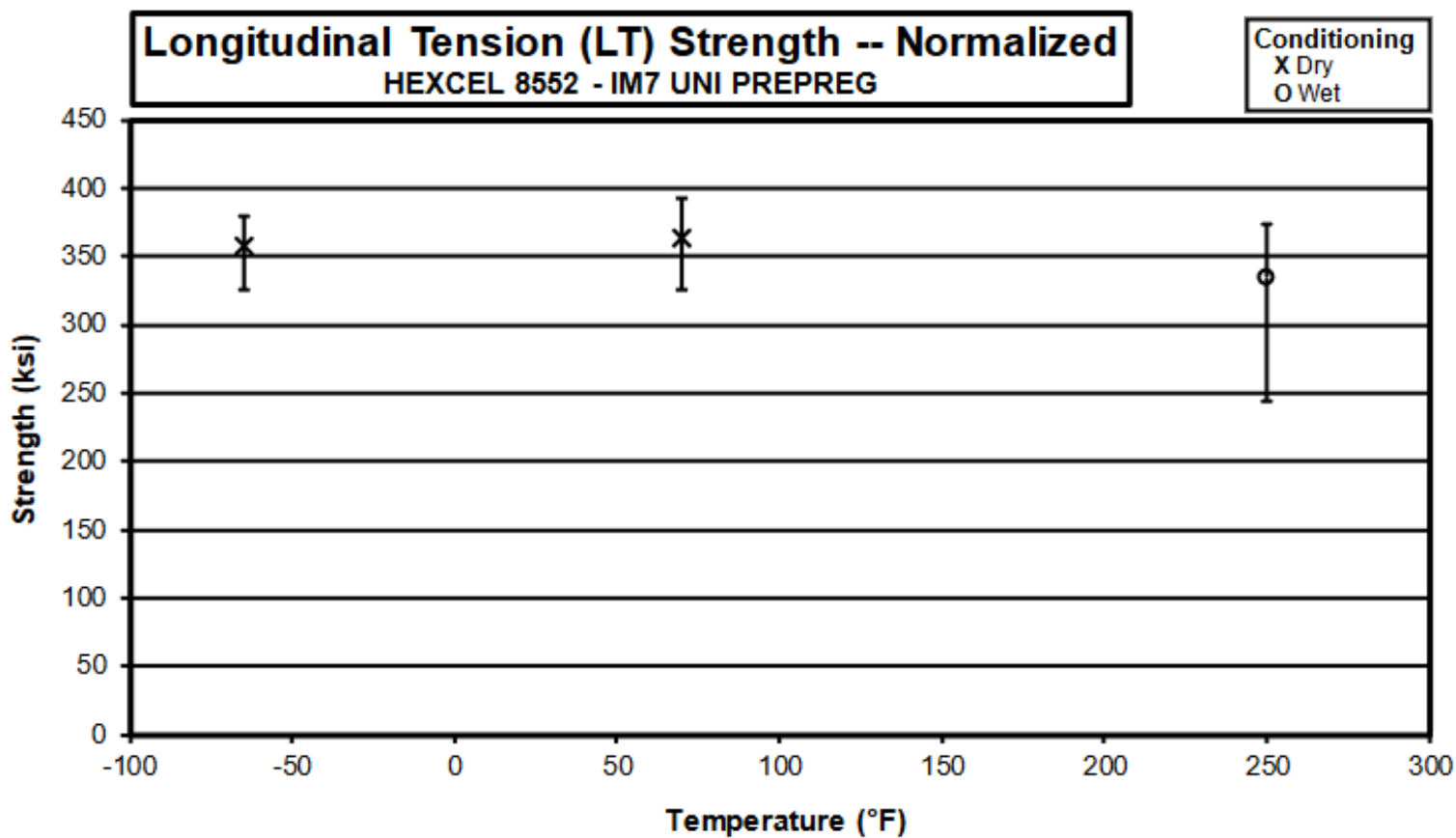




MÁSTER UNIVERSITARIO EN SISTEMAS ESPACIALES  
POR LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



POLITÉCNICA







MÁSTER UNIVERSITARIO EN SISTEMAS ESPACIALES  
POR LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



POLITÉCNICA

### Longitudinal Tension Properties (LT) -- (CTD)

#### Strength & Modulus

HEXCEL 8552 - IM7 UNI PREPREG

normalizing  $t_{ply}$

[in]

0.0072

Specimen Number	Hexcel Batch #	Hexcel Cure Cycle	Prepreg Lot #	Cure Cycle #	Strength [ksi]	Modulus [Msi]	Poisson's Ratio	Avg. Specimen Thckn. [in]	# Plies in Laminate	Failure Mode	Avg. $t_{ply}$ [in]	Strength <sub>norm</sub> [ksi]	Modulus <sub>norm</sub> [Msi]
HF1JA116B	A	M1	1	1	322.580	22.211	0.213	0.044	6	LGM/SGM	0.0073	325.692	22.425
HF1JA117B	A	M1	1	1	344.115	21.742	0.260	0.044	6	LGM/SGM	0.0073	349.426	22.078
HF1JA118B	A	M1	1	1	347.430	22.315	0.223	0.044	6	XGM	0.0073	351.451	22.573
HF1JA119B	A	M1	1	1	357.922	22.822	0.241	0.043	6	XGM	0.0072	359.717	22.937
HF1JA11AB	A	M1	1	1	340.005	21.777	0.271	0.043	6	LGM/SGM	0.0072	341.186	21.852
HF1JA216B	A	M2	1	2	345.794	22.348	0.292	0.044	6	LGM/SGM	0.0073	350.730	22.667
HF1JA217B	A	M2	1	2	357.079	21.911	0.270	0.044	6	LGM/SGM	0.0073	384.105	22.342
HF1JA218B	A	M2	1	2	362.177	22.309	0.260	0.044	6	LGM/SGM	0.0073	385.950	22.541
HF1JB116B	B	M1	2	1	372.292	22.689	0.249	0.043	6	XGM	0.0072	389.851	22.540
HF1JB117B	B	M1	2	1	383.978	22.690	0.270	0.043	6	XGM	0.0071	359.906	22.436
HF1JB118B	B	M1	2	1	372.635	22.583	0.273	0.044	6	XGM	0.0073	376.229	22.801
HF1JB119B	B	M1	2	1	381.972	22.914	0.287	0.044	6	XGM	0.0073	384.904	23.099
HF1JB11AB	B	M1	2	1	336.611	21.767	0.263	0.044	6	LGM/SGM	0.0073	341.805	22.103
HF1JB216B	B	M2	2	2	356.433	22.119	0.282	0.043	6	XGM	0.0072	355.058	22.034
HF1JB217B	B	M2	2	2	378.947	22.968	0.260	0.043	6	LGM/SGM	0.0072	379.970	23.030
HF1JB218B	B	M2	2	2	357.856	21.870	0.259	0.044	6	XGM	0.0073	380.617	22.039
HF1JC116B	C	M1	3	1	351.051	22.324	0.265	0.044	6	XGM	0.0073	356.197	22.651
HF1JC117B	C	M1	3	1	350.530	22.293	0.299	0.045	6	XGM	0.0075	383.513	23.119
HF1JC118B	C	M1	3	1	383.478	22.583	0.297	0.044	6	XGM	0.0074	373.715	23.219
HF1JC216B	C	M2	3	2	342.104	22.203	0.316	0.044	6	SGM/LGM	0.0073	346.196	22.468
HF1JC217B	C	M2	3	2	346.534	22.476	0.299	0.044	6	XGM	0.0073	352.015	22.832
HF1JC218B	C	M2	3	2	349.867	22.421	0.295	0.044	6	XGM	0.0073	354.321	22.706

Average 353.700 22.333 0.270  
Standard Dev. 13.087 0.368 0.025  
Coeff. of Var. [%] 3.700 1.646 9.317  
Min. 322.580 21.742 0.213  
Max. 378.947 22.968 0.316  
Number of Spec. 22 22 22

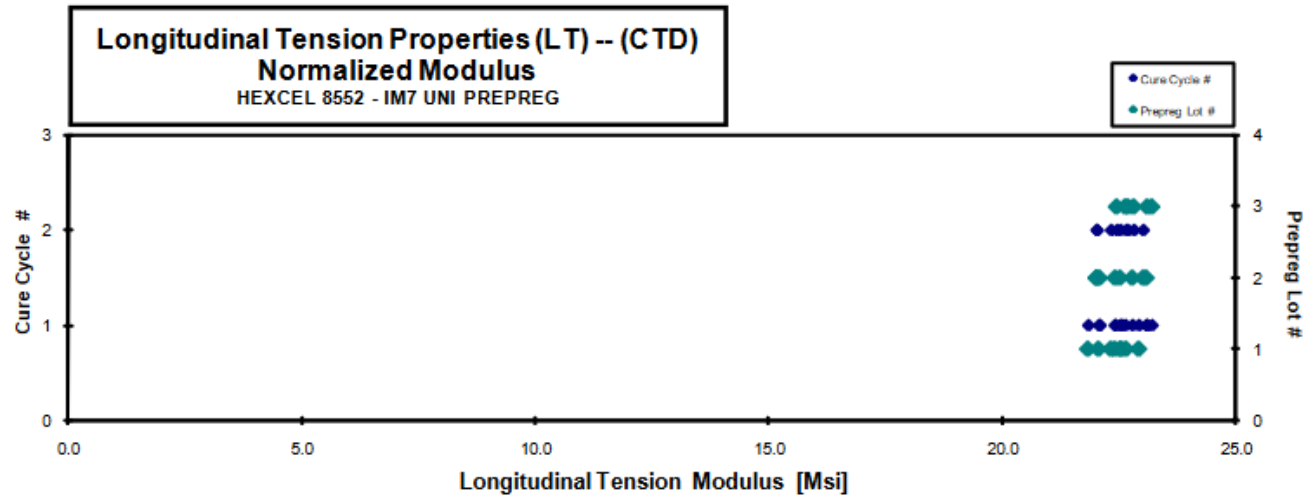
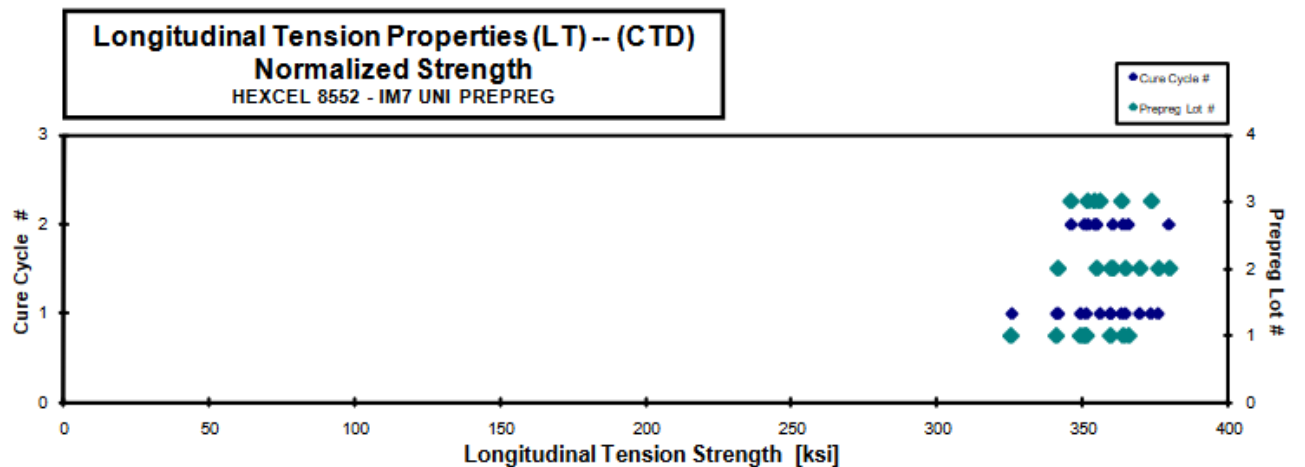
Average<sub>norm</sub> 0.0073 357.389 22.568  
Standard Dev.<sub>norm</sub> 12.620 0.387  
Coeff. of Var. [%]<sub>norm</sub> 3.531 1.717  
Min. 0.0071 325.692 21.852  
Max. 0.0075 379.970 23.219  
Number of Spec. 22 22 22



MÁSTER UNIVERSITARIO EN SISTEMAS ESPACIALES  
POR LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



POLITÉCNICA



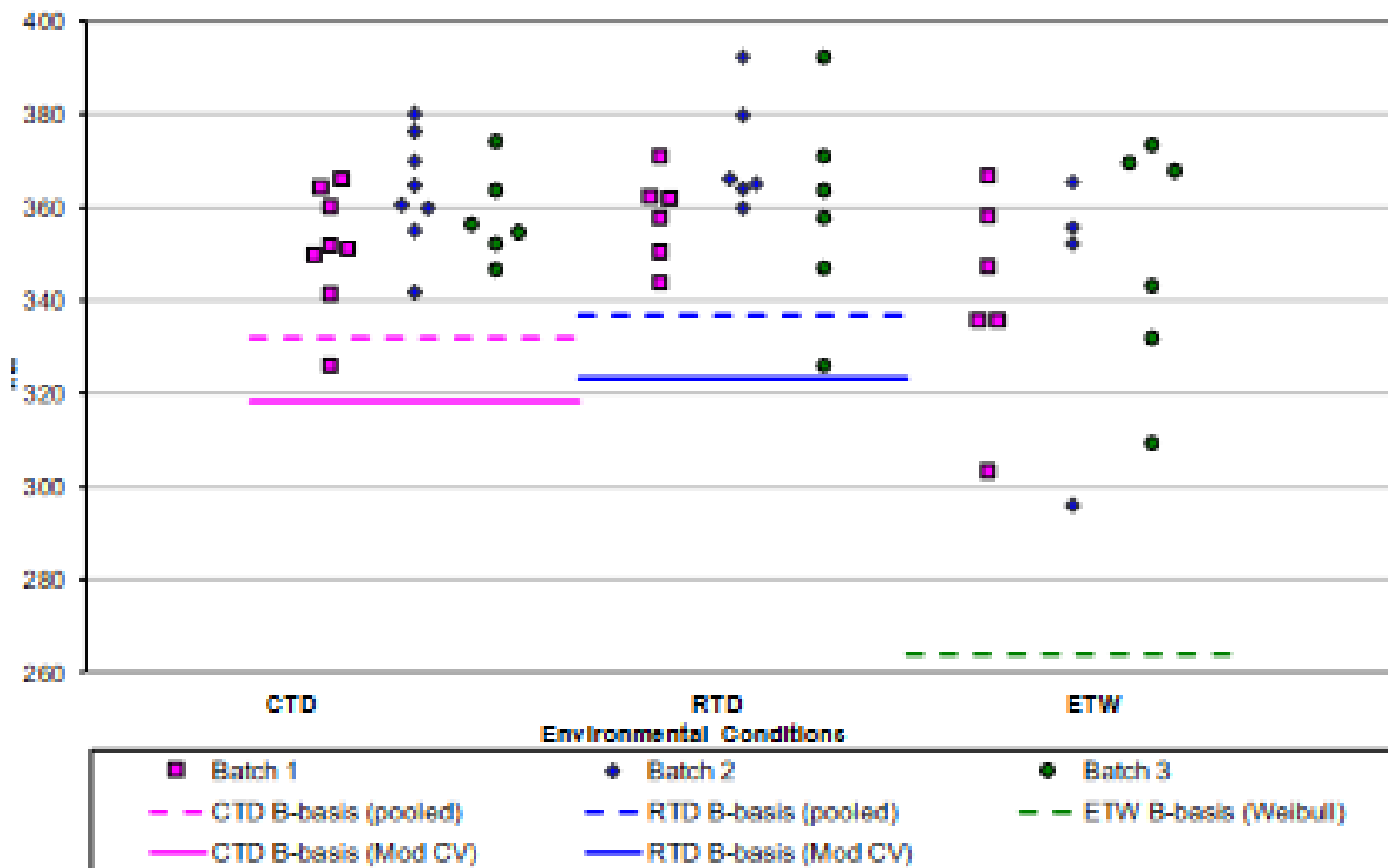


MÁSTER UNIVERSITARIO EN SISTEMAS ESPACIALES  
POR LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



POLITÉCNICA

## Hexcel 8552 IM7 Unidirectional Tape $F_1^b$ Strength From LT Normalized





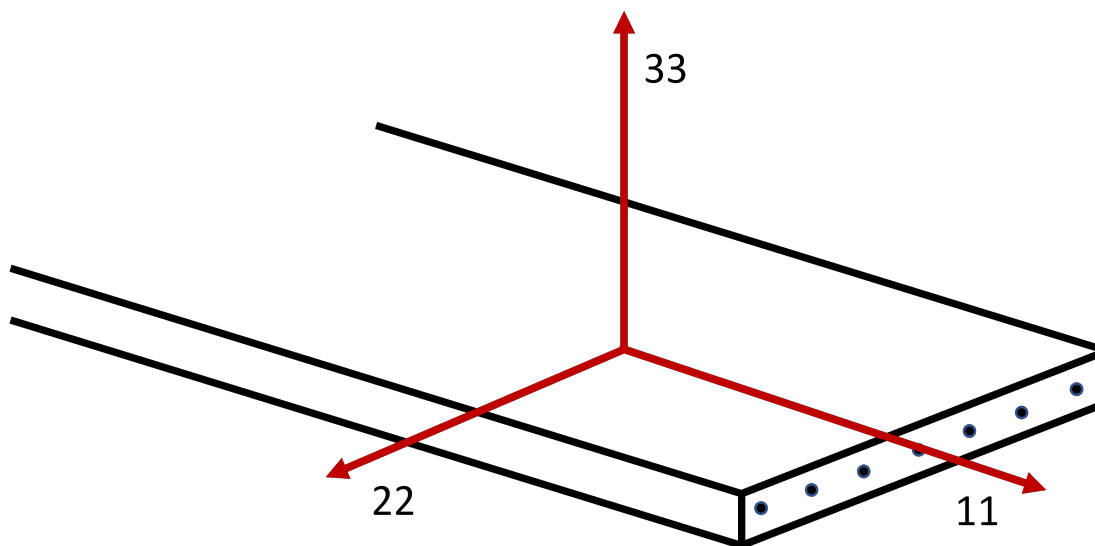
# MUSE

MÁSTER UNIVERSITARIO EN SISTEMAS ESPACIALES  
POR LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



POLITÉCNICA

## Ejercicio MUSE 2021





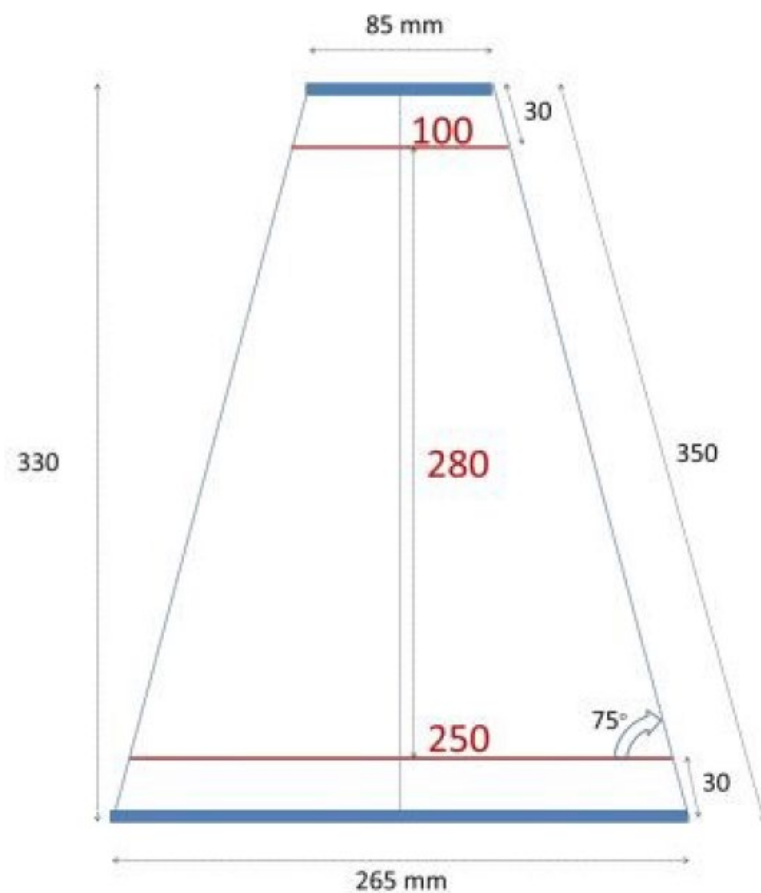
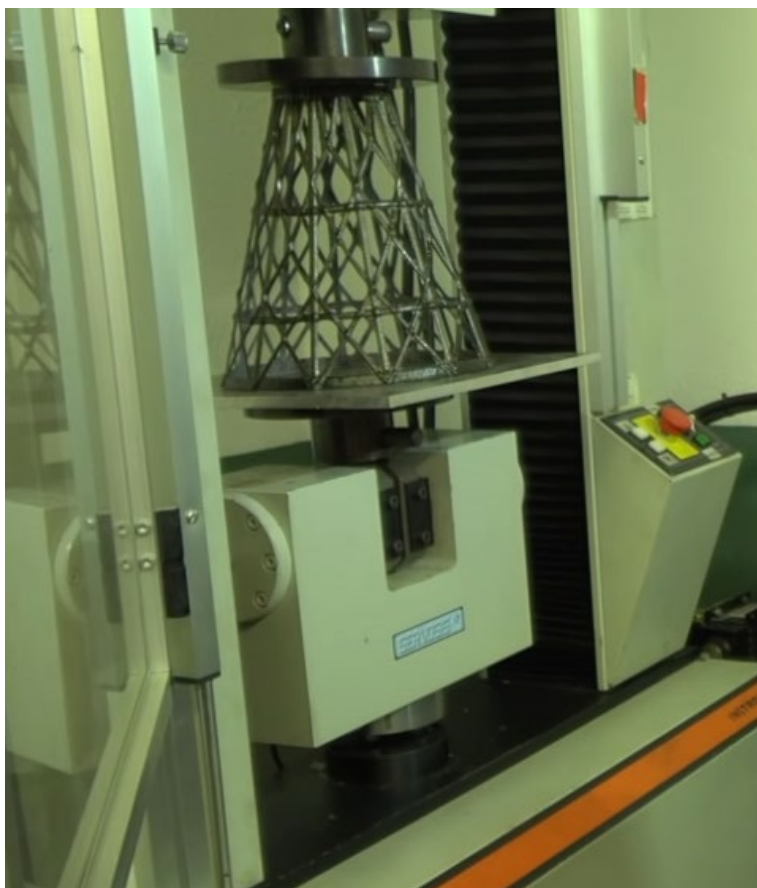


# MUSE

MÁSTER UNIVERSITARIO EN SISTEMAS ESPACIALES  
POR LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



POLITÉCNICA





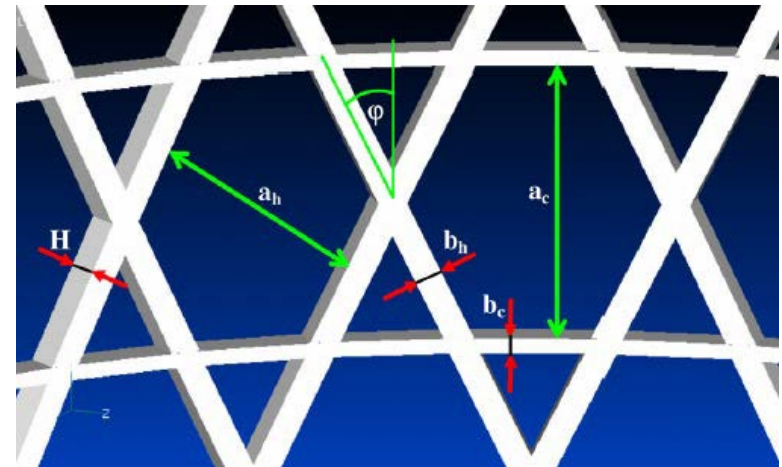
MÁSTER UNIVERSITARIO EN SISTEMAS ESPACIALES  
POR LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



POLITÉCNICA

- Geometría: refuerzos verticales, horizontales y helicoidales con el siguiente ancho

- $b_h = 3\text{mm}$
- $b_v = 5\text{mm}$
- $b_c = 5\text{mm}$ ),



- Los refuerzos helicoidales formarán  $\gamma = 55^\circ$  respecto a la base inferior y serán perpendiculares respecto a la base superior  $\gamma = 0^\circ$



MÁSTER UNIVERSITARIO EN SISTEMAS ESPACIALES  
POR LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



POLITÉCNICA

## LATTICE (CELOSIA)

Grupo 1: María Elena Piqueras, Daniel del Rio, Andrés Pedraza, David Estébanez, Anabel Soria: 15kN con un desplazamiento máximo de 0,5mm

Grupo 2: Andrea Bravo, Laura García, Diego Mataix, Marina Merchán, Siro Muela: 15kN con un desplazamiento máximo de 0,5mm

## ISOGRID

Grupo 3: David Huergo, Noelia Martínez, Miguel Ramiro, Pablo Romero, José María Vergara: 30kN con un desplazamiento máximo de 0,5mm

Grupo 4: Maria Alonso, Daniel Navajas, Pablo Zapatero, Javier Vega, Rafael Luque, Gonzalo Moreno: 30kN con un desplazamiento máximo de 2mm



**MÁSTER UNIVERSITARIO EN SISTEMAS ESPACIALES  
POR LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID**



**POLITÉCNICA**

#### CQUAD4

#### Quadrilateral Plate Element Connection

Defines an isoparametric membrane-bending or plane strain quadrilateral plate element.

**Format:**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CQUAD4	EID	PID	G1	G2	G3	G4	THETA or MCID	ZOFFS	
		TFLAG	T1	T2	T3	T4			

**Example:**

CQUAD4	111	203	31	74	75	32	2.6	0.3	
			1.77	2.04	2.09	1.80			

Field	Contents
EID	Element identification number. (0 < Integer < 100,000,000)
PID	Property identification number of a PSHELL, PCOMP, PCOMPG or PLPLANE entry. (Integer > 0; Default = EID)
Gi	Grid point identification numbers of connection points. (Integers > 0, all unique.)
THETA	Material property orientation angle in degrees. THETA is ignored for hyperelastic elements. See Figure 8-53. See Remark 10. (Real; Default = 0.0)
MCID	Material coordinate system identification number. The x-axis of the material coordinate system is determined by projecting the T1-axis of the MCID coordinate system onto the surface of the shell element as follows: CORD1R, x-axis of MCID the coordinate is projected onto shell surface and the material angle is measured from the G1-G2 line to the projected x-axis CORD2R, r-axis of MCID the coordinate is projected onto shell surface through the element center and the material angle is measured from the G1-G2 line to the projected r-axis CORD1C, CORD2C, CORD1S, CORD2S Use DIAG 38 to print the computed THETA values. MCID is ignored for hyperelastic elements. For SOL 600, only CORD2R is allowed. See Remark 10. (Integer ≥ 0; If blank, then THETA = 0.0 is assumed.)

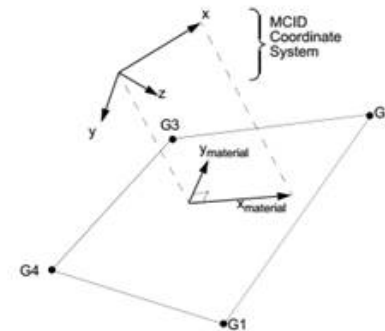


Figure 8-52 MCID Coordinate System Definition

## Visualización en Patran

Utilities > Display > Plot Material Orientation

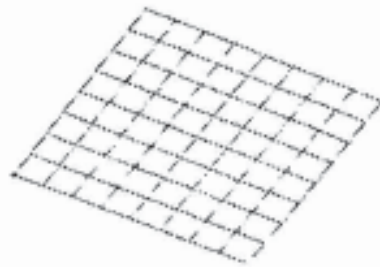




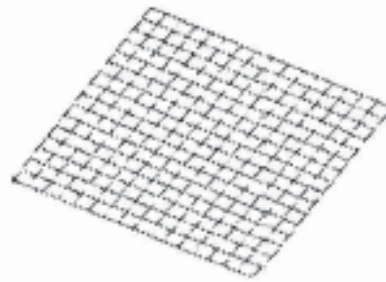
MÁSTER UNIVERSITARIO EN SISTEMAS ESPACIALES  
POR LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



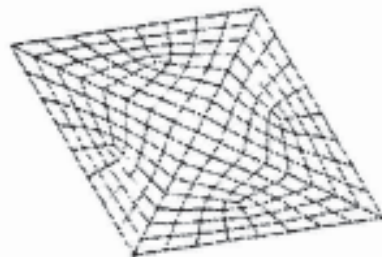
POLITÉCNICA



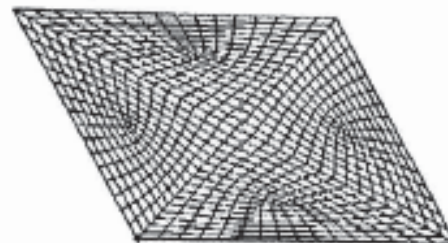
(a) Regular Mesh



(b) Refined Regular Mesh



(c) Distorted Mesh



(d) Refined distorted Mesh

### Mallado regular

- Hay que refinarlo para evitar soluciones espúreas
- Definir la forma de los elementos para poder combinarlo con la orientación de los rigidizadores

### Mallado Irregular

- Problema con las orientaciones
- Problema con el número de elementos y la distorsión de los mismos



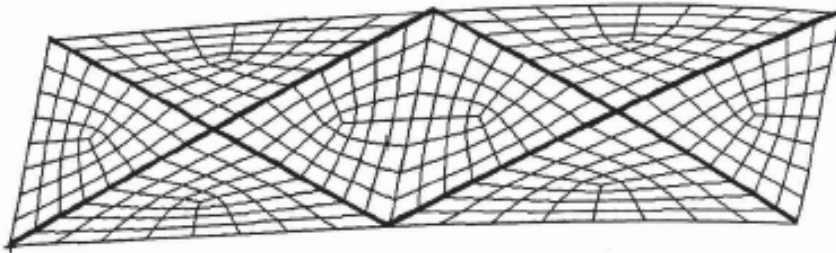
# MUSE

MÁSTER UNIVERSITARIO EN SISTEMAS ESPACIALES  
POR LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



POLITÉCNICA

## Modo de fallo de las estructuras: PANDEO



MSC.Patran 2005 r2 27-Oct-07 23:35:18

Fringe: Default, A1:Mode 1 : Factor = 6218.2, Eigenvectors, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: Default, A1:Mode 1 : Factor = 6218.2, Eigenvectors, Translational

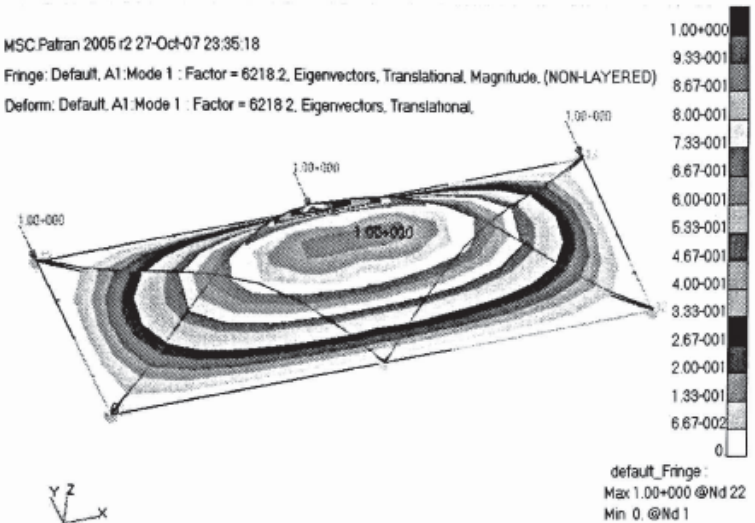


Figure 14 Buckling mode of 2-cell cross stiffened plate



MÁSTER UNIVERSITARIO EN SISTEMAS ESPACIALES  
POR LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



POLITÉCNICA

## Recomendaciones

- Buscar una estrategia de mallado que evite elementos “distorsionados” (usar CQUAD4)
- Verificar desde la geometría la orientación de los ejes elemento y de los ejes material
- Realizar una estrategia de laminado para cumplir las condiciones de diseño
- Evitar mallados densos propensos a elementos distorsionados