



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



# DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

“SIMULACIÓN, PROTOTIPADO Y ENSAYOS A FLEXIÓN DE VIGAS TIPO SÁNDWICH CON  
NÚCLEO DE MATERIAL CELULAR”

AUTOR:

RODRÍGUEZ CHANCUSI, DIEGO FERNANDO

DIRECTOR:

ING. JOSÉ EMILIO PÉREZ ROSALES

SANGOLQUÍ 2023



# CONTENIDOS

## GENERALIDADES

- INTRODUCCIÓN
- OBJETIVOS

## MARCO TEÓRICO

- ENREJADOS Y ESTRUCTURAS CELULAR
- MANUFACTURA ADITIVA
- ESTRUCTURA SÁNDWICH
- PRUEBAS A FLEXIÓN

## DISEÑO GENERATIVO DE VIGAS DE NÚCLEO DE MATERIAL CELULAR

- DISEÑO EXPERIMENTAL
- DISEÑO DE PROBETAS
- PROTOTIPADO DE VIGAS TIPO SÁNDWICH
- PRUEBAS A FLEXIÓN



# CONTENIDOS

## ÁNÁLISIS COMPUTACIONAL

- PROPIEDADES EFECTIVAS DEL NÚCLEO
- DISEÑO GENERATIVO DE PROBETAS
- ESTUDIO DE INDEPENDENCIA DE MALLA
- RESULTADOS ANALÍTICOS
- RESULTADOS DE SIMULACIÓN

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

- ANÁLISIS DE ERRORES
- CORRELACIÓN DE GRÁFICAS

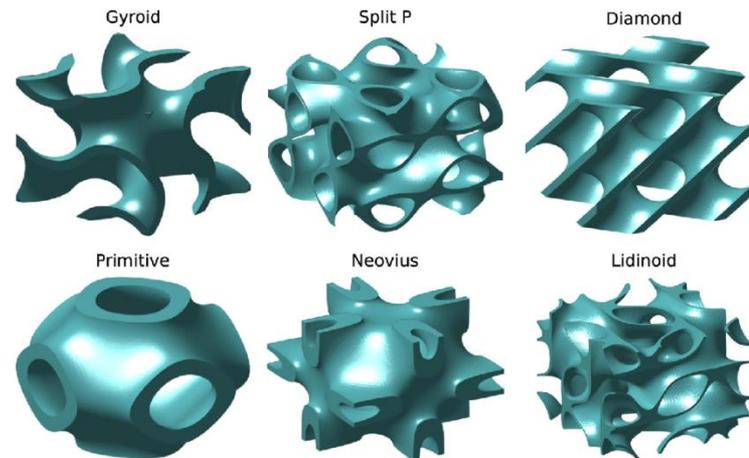
## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- CONCLUSIONES
- RECOMENDACIONES



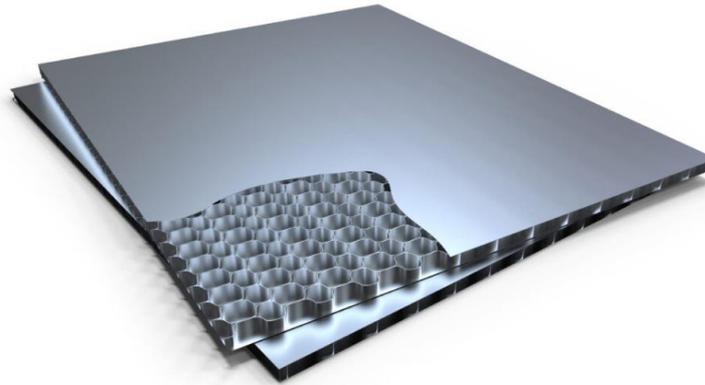
## INTRODUCCIÓN

Actualmente la optimización es muy requerida en la mayoría de procesos industriales, en relación a recursos utilizados y procesos constructivos, es por ello que se busca generar estructuras de baja densidad con alta resistencia, como las denominadas TPMS en donde su respuesta mecánica será de interés en este estudio. Para la generación de los mismos se utilizará el software Space Claim de Ansys.



## JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

El presente trabajo se presenta como pionero en la línea de estudios experimentales con el fin de comparar los resultados obtenidos computacionales y experimentales. Mediante el planteamiento de la hipótesis respecto a si las estructuras TPMS podrían ejercer un papel significativo en la alta resistencia a la flexión.



Estructura de tipo panal de abeja “honeycomb” de aluminio.

# GENERALIDADES

## OBJETIVO GENERAL

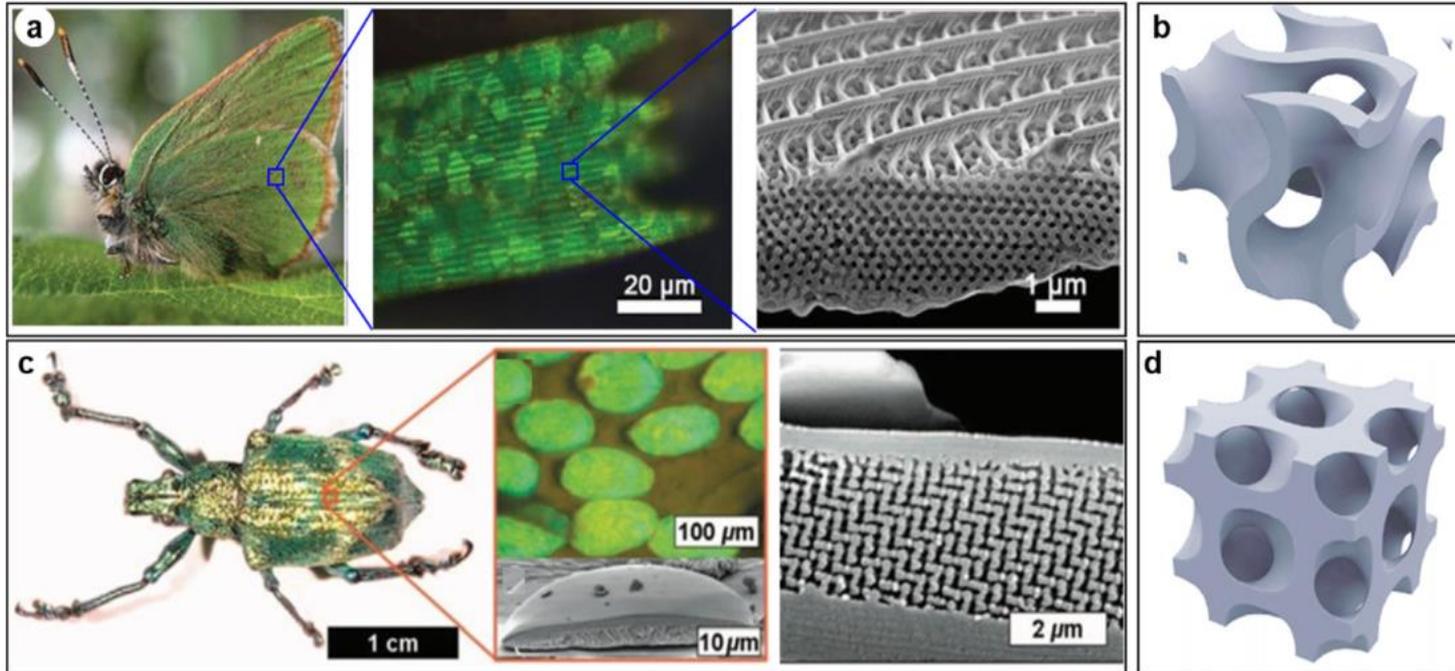
- Simular, prototipar y ensayar mediante pruebas de flexión vigas tipo sándwich con núcleo de material celular.

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar mediante software CAD y prototipar 3 núcleos de material celular mediante impresión 3D de sólidos por el proceso de la estereolitografía.
- Ensamblar las vigas tipo sándwich con los núcleos de material celular.
- Evaluar mecánicamente las vigas de núcleo de material celular y vigas tipo sándwich empleando pruebas de flexión.
- Simular y evaluar los núcleos de las arquitecturas de material celular, así como su aplicación en vigas tipo sándwich.
- Realizar un análisis comparativo de resultados entre simulación y ensayos mecánicos.

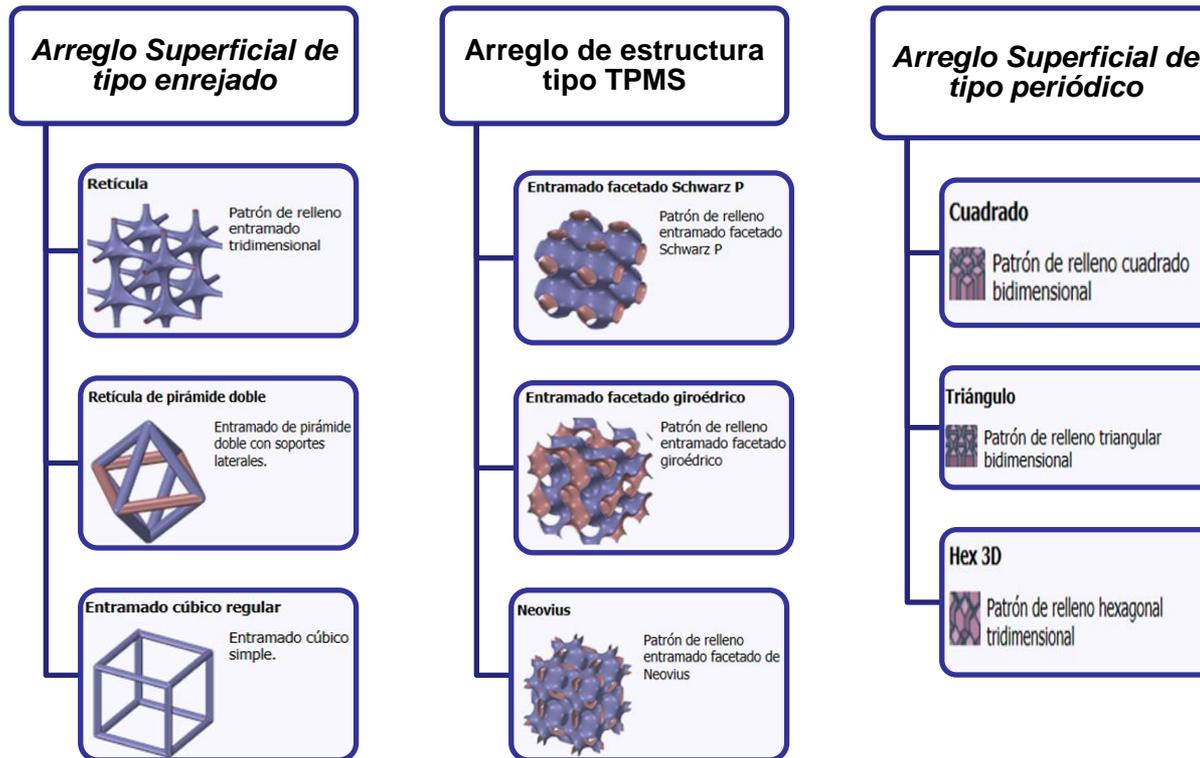


## ESTRUCTURA CELULAR



## ESTRUCTURA CELULAR

Son superficies definidas matemáticamente en dos o tres dimensiones, estas pueden ser de tipo enrejados, superficies triplemente periódicas (TPMS) y de tipo periódico.



## MANUFACTURA ADITIVA

### IMPRESIÓN DE SÓLIDOS MEDIANTE ESTEREOLITGRAFÍA (SLA)



## MANUFACTURA ADITIVA

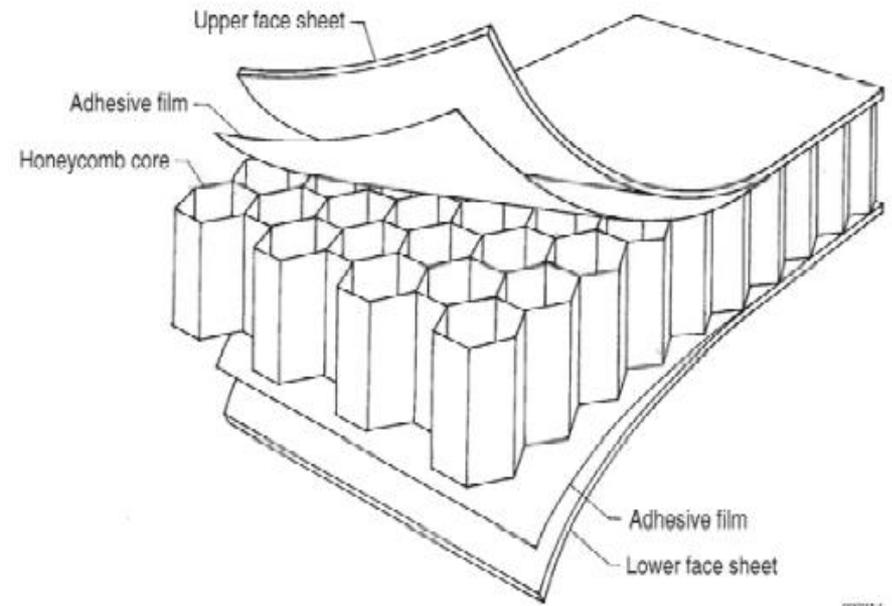
### PROPIEDADES DE LA RESINA

	METRIC <sup>1</sup>		IMPERIAL <sup>1</sup>		METHOD
	Green <sup>2</sup>	Post-Cured <sup>3</sup>	Green <sup>2</sup>	Post-Cured <sup>3</sup>	
<b>Tensile Properties</b>					
Ultimate Tensile Strength	38 MPa	65 MPa	5510 psi	9380 psi	ASTM D 638-10
Tensile Modulus	1.6 GPa	2.8 GPa	234 ksi	402 ksi	ASTM D 638-10
Elongation at Failure	12 %	6.2 %	12 %	6.2 %	ASTM D 638-10
<b>Flexural Properties</b>					
Flexural Modulus	1.25 GPa	2.2 GPa	181 ksi	320 ksi	ASTM C 790-10
<b>Impact Properties</b>					
Notched IZOD	16 J/m	25 J/m	0.3 ft-lbf/in	0.46 ft-lbf/in	ASTM D 256-10
<b>Temperature Properties</b>					
Heat Deflection Temp. @ 264 psi	427 °C	58.4 °C	108.9 °F	137.1 °F	ASTM D 648-07
Heat Deflection Temp. @ 66 psi	49.7 °C	73.1 °C	121.5 °F	163.6 °F	ASTM D 648-07



# MARCO TEÓRICO

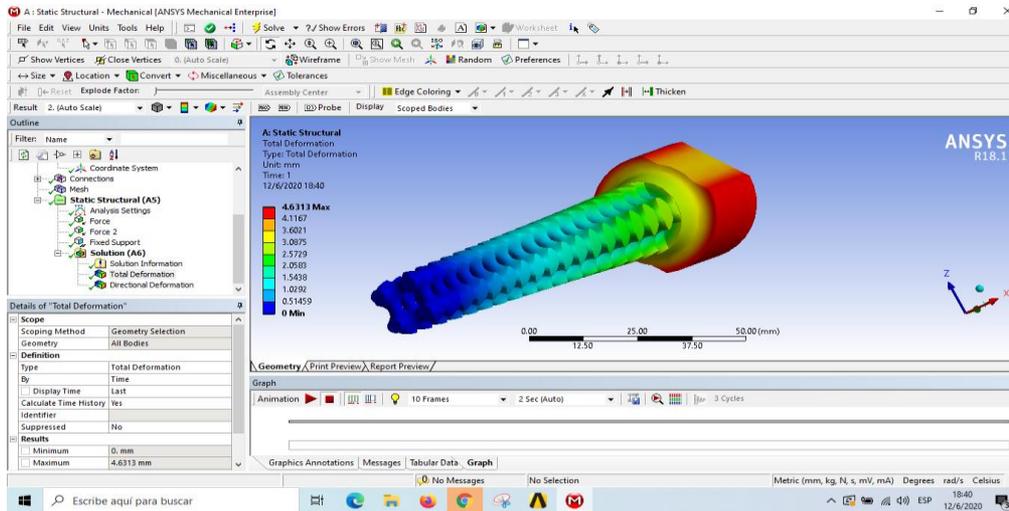
## PANEL SÁNDWICH



## DISEÑO EN ANSYS

Ansys Workbench es un software que usa solución numérica por elementos finitos para resolver varios tipos de problemas de ingeniería. Los problemas que se pueden resolver en este software son de tipo: dinámico, estático, estructurales, termodinámicos, mecánica de fluidos, entre otros.

## STATIC STRUCTURAL



Este software permite determinar soluciones para encontrar esfuerzos, deformaciones, reacciones en estructuras, etc.

## ENSAYOS A FLEXIÓN

La prueba de materiales es una parte fundamental de la ciencia e ingeniería de materiales, para comprender los límites de los materiales mediante la determinación de sus propiedades físicas y mecánicas.

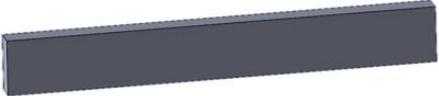


La prueba de flexión de 3 puntos, también conocida como prueba de flexión o prueba de viga transversal, mide el comportamiento de los materiales en una geometría de carga de viga simple. Este tipo de prueba proporciona información sobre cómo responden los materiales a una combinación de fuerzas de tensión, compresión y corte, y los resultados son útiles en ingeniería estructural y civil.

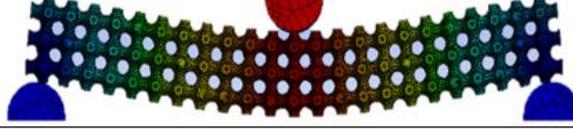
# DISEÑO GENERATIVO DE VIGAS

## DISEÑO EXPERIMENTAL

Para dar un mejor análisis en el comportamiento de las estructuras, es necesario el diseño experimental

Arquitectura del núcleo	
Sólido	
Schwarz p	
Arreglo cuadrado bidimensional	
Arreglo hexagonal tridimensional	

Porosidad	
60%	
70%	

Material de las capas externas, pieles o alas de la viga tipo sándwich	
Aluminio	
Resina	
Estructura de la viga	
Viga sándwich	
Núcleo	



# DISEÑO GENERATIVO DE VIGAS

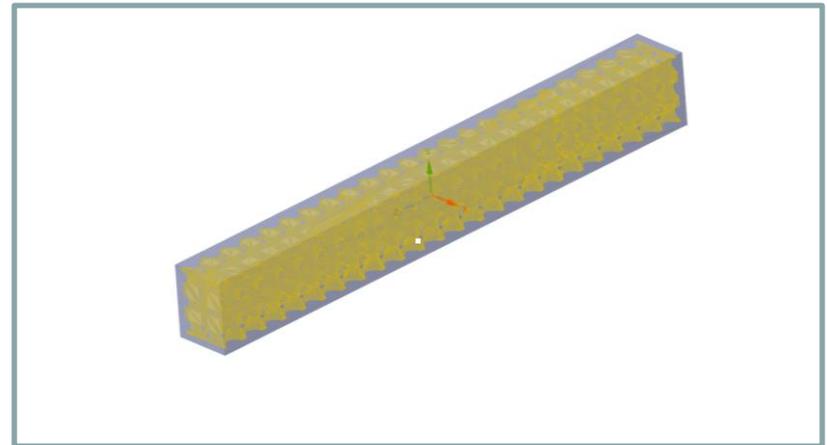
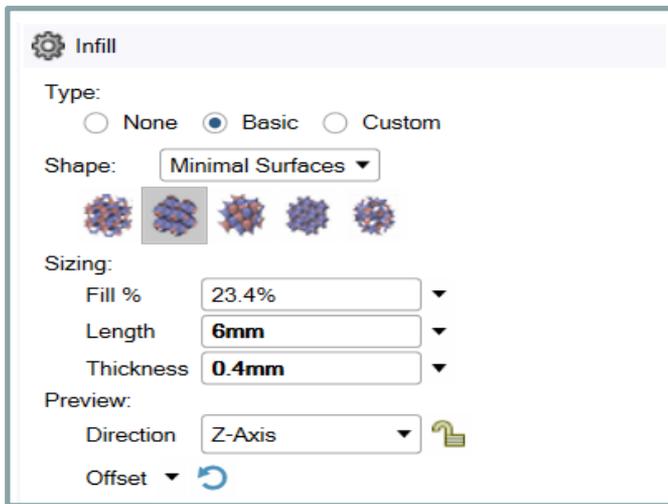
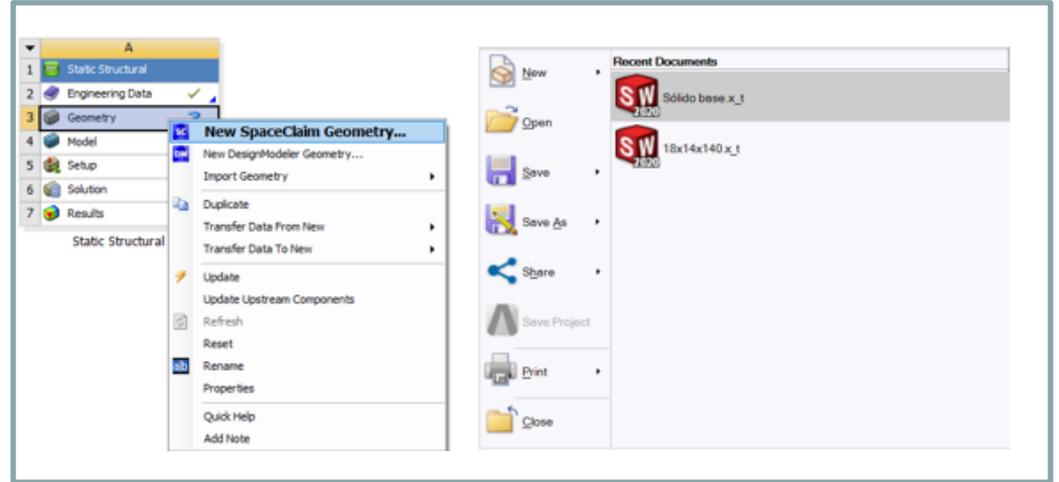
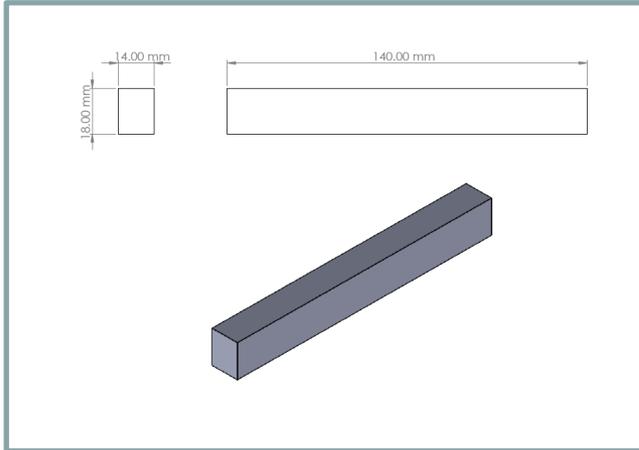
## DISEÑO EXPERIMENTAL

Nro de probetas	Arquitectura del núcleo	Estructura de la viga	Material alas	Porosidad	
1	Núcleo sólido	Núcleo	N/A	N/A	
2	Schwarz P	Núcleo	N/A	70%	
3				60%	
4		Viga sándwich	Lámina de resina	70%	
5				60%	
6				Aluminio	70%
7					60%
8					Arreglo Cuadrado
9	70%				
10	Viga sándwich	Lámina de resina	70%		
11			60%		
12		Aluminio	70%		
13			60%		
14			Arreglo Hexagonal	Núcleo	
15	70%				
16	Viga sándwich	Lámina de resina		70%	
17				60%	
18		Aluminio		70%	
19				60%	



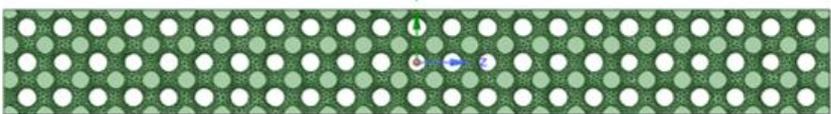
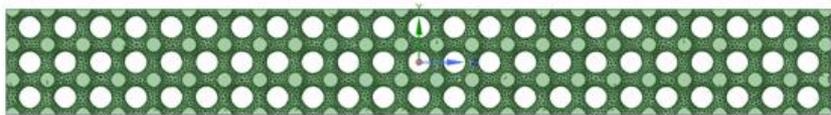
# DISEÑO GENERATIVO DE VIGAS

## DISEÑO DE NÚCLEOS EN ANSYS

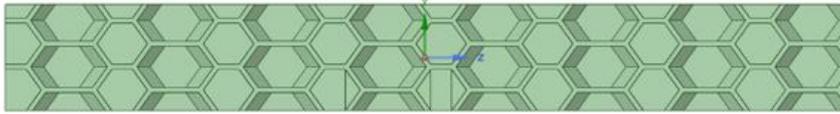


# DISEÑO GENERATIVO DE VIGAS

## DISEÑO DE NÚCLEOS EN ANSYS

Porosidad	Núcleo
60%	
70%	

**ARREGLO  
SCHWARZ P**

Porosidad	Núcleo
60%	
70%	

**ARREGLO  
HEXAGONAL  
TRIDIMENSIONAL**

**ARREGLO  
CUADRADO  
BIDIMENSIONAL**

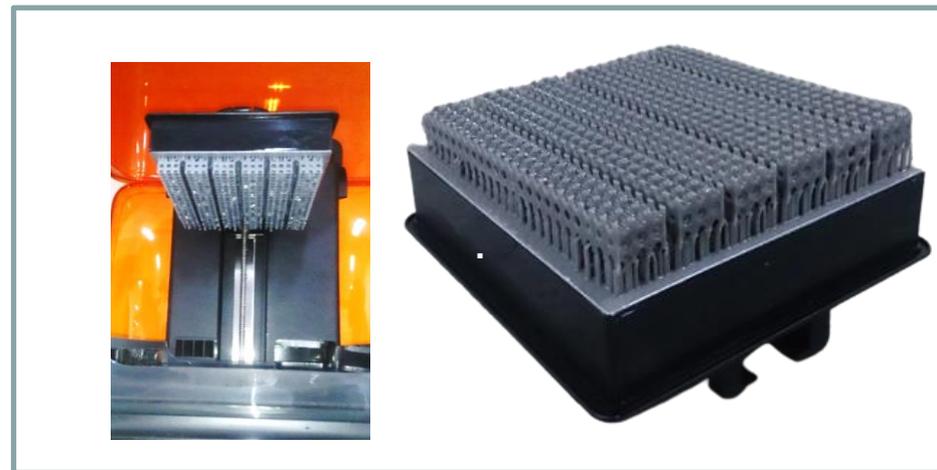
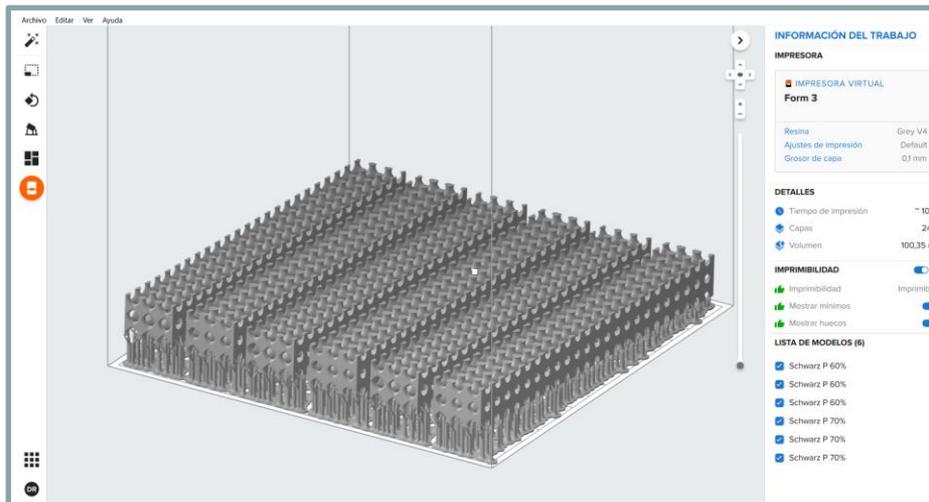
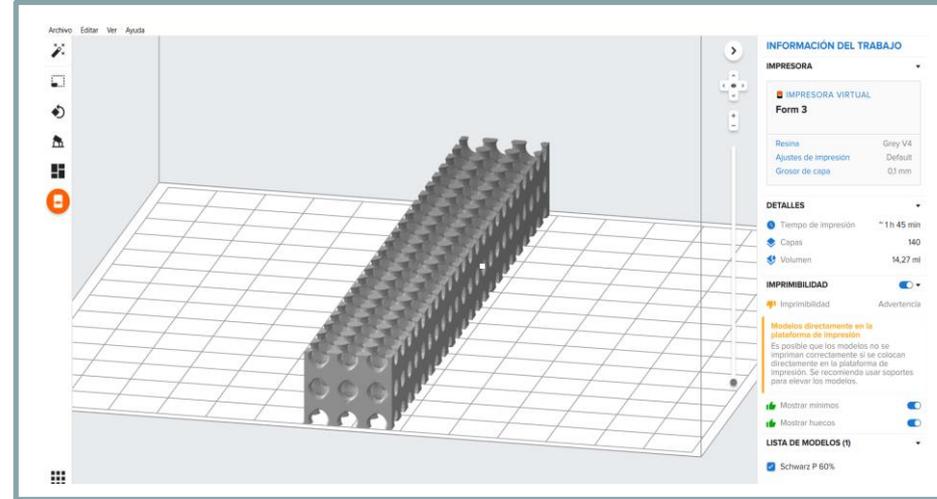
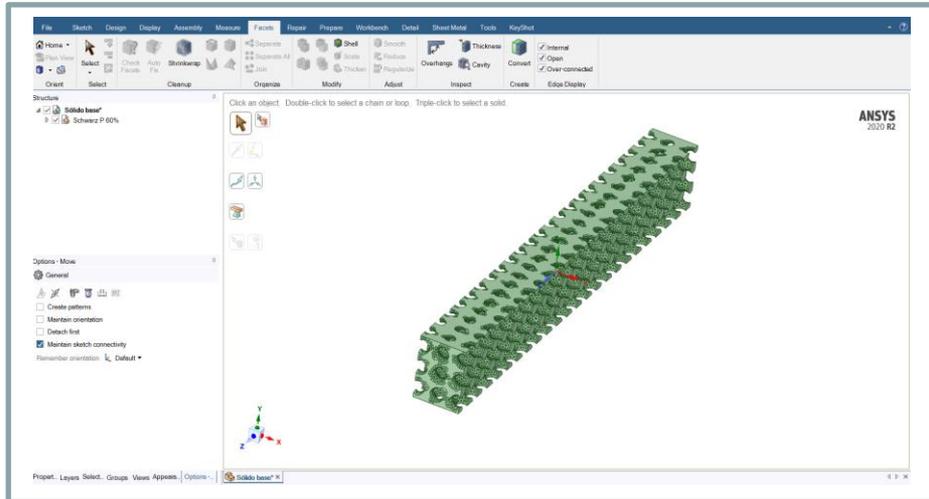
Porosidad	Núcleo
60%	
70%	



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# DISEÑO GENERATIVO DE VIGAS

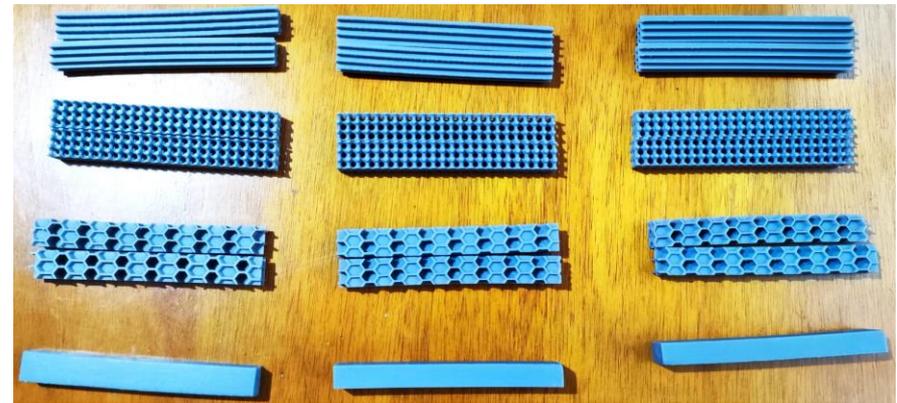
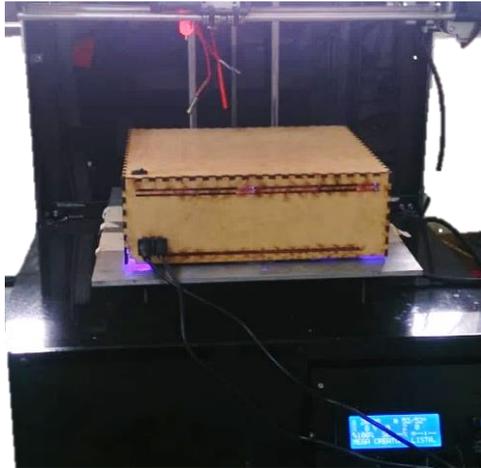
## IMPRESIÓN DE PROBETAS



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# DISEÑO GENERATIVO DE VIGAS

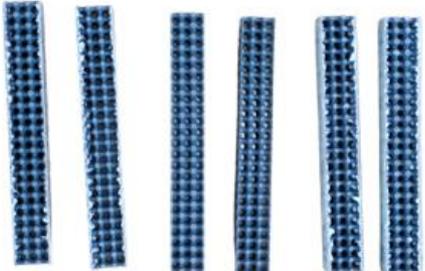
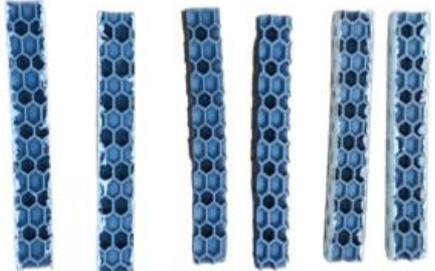
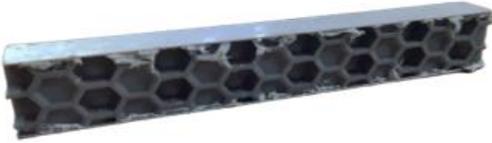
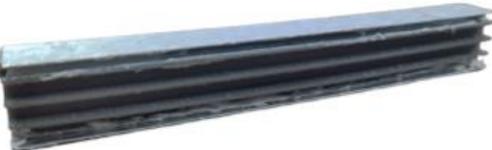
## IMPRESIÓN DE PROBETAS



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# DISEÑO GENERATIVO DE VIGAS

## PREFABRICADO DE VIGAS TIPO SANDWICH

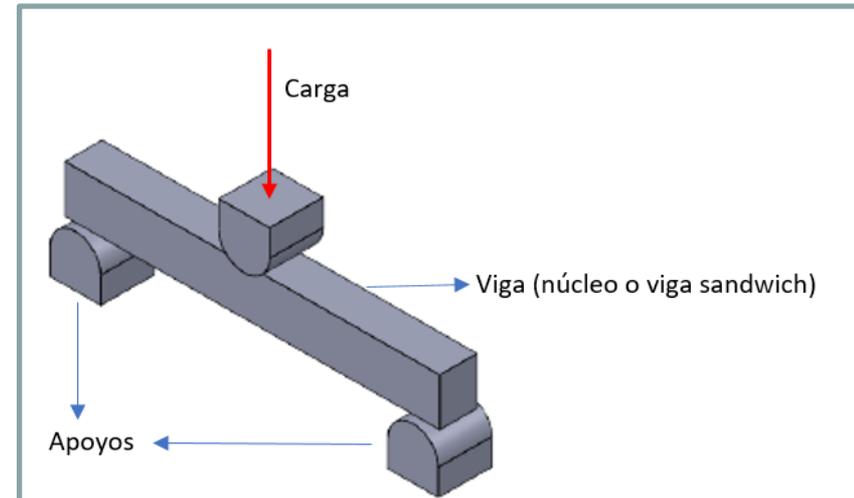
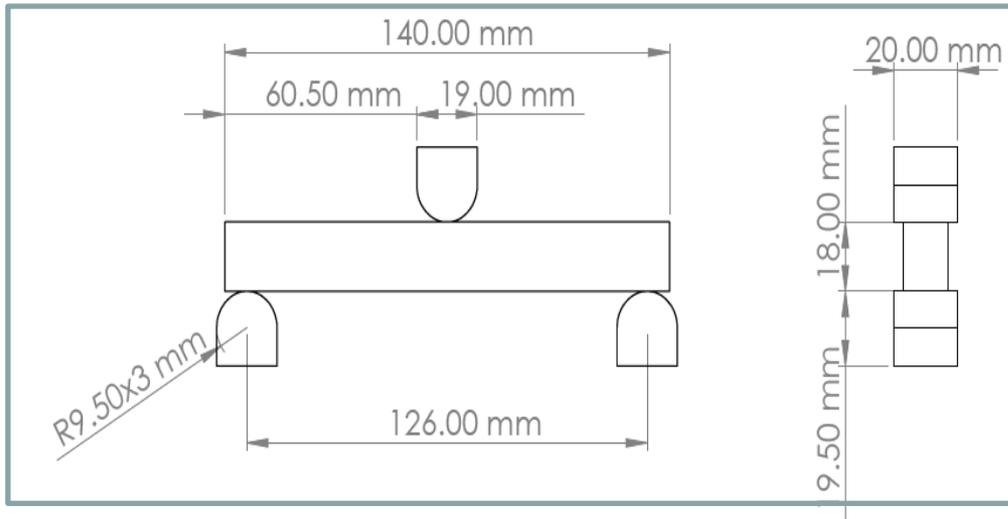
Vigas sándwich de núcleo celular		
Topología	Núcleo celulares	Vigas sándwich
Schwarz P 60% y 70%		
Hexagonal tridimensional 60% y 70%		
Cuadrado bidimensional 60% y 70%		



# DISEÑO GENERATIVO DE VIGAS

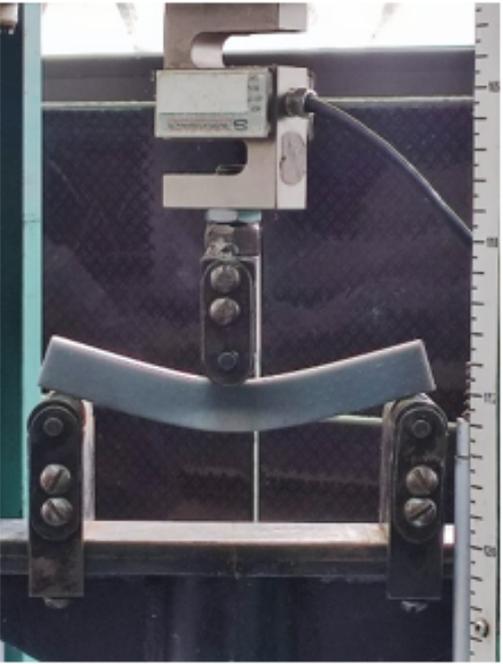
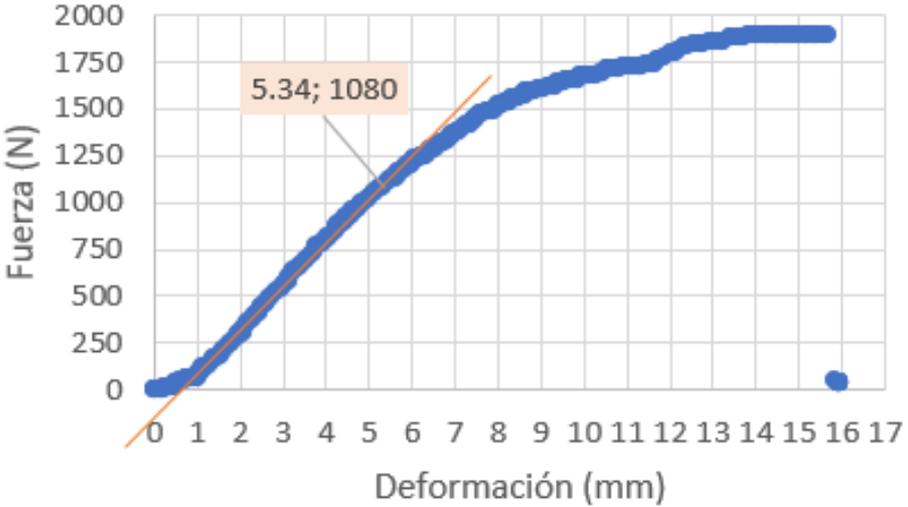
## ENSAYO A FLEXIÓN

La realización de este ensayo nos sirve para conocer el comportamiento mecánico de las vigas y así poder determinar algunas de sus propiedades mecánicas principales, para posteriormente compararlas con resultados obtenidos a través de simulaciones.



# DISEÑO GENERATIVO DE VIGAS

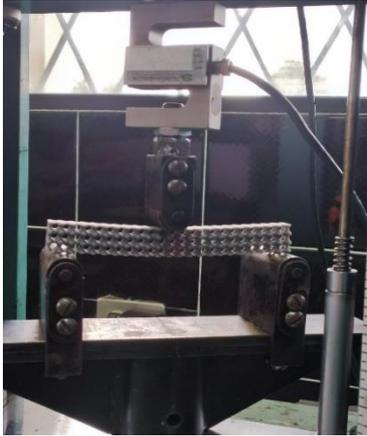
## ENSAYO A FLEXIÓN

Nro	Arquitectura del núcleo	Estructura de la viga	Material alas	Porosidad								
1	Núcleo sólido	Núcleo	N/A	N/A								
<b>Ensayo a flexión</b>		<b>Resultado</b>										
		<p>Fuerza vs Deformación</p>  <table border="1"><caption>Datos del gráfico Fuerza vs Deformación</caption><thead><tr><th>Deformación (mm)</th><th>Fuerza (N)</th></tr></thead><tbody><tr><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>5.34</td><td>1080</td></tr><tr><td>16</td><td>~1900</td></tr></tbody></table>			Deformación (mm)	Fuerza (N)	0	0	5.34	1080	16	~1900
Deformación (mm)	Fuerza (N)											
0	0											
5.34	1080											
16	~1900											



# DISEÑO GENERATIVO DE VIGAS

## ENSAYO A FLEXIÓN



# DISEÑO GENERATIVO DE VIGAS

## ENSAYO A FLEXIÓN

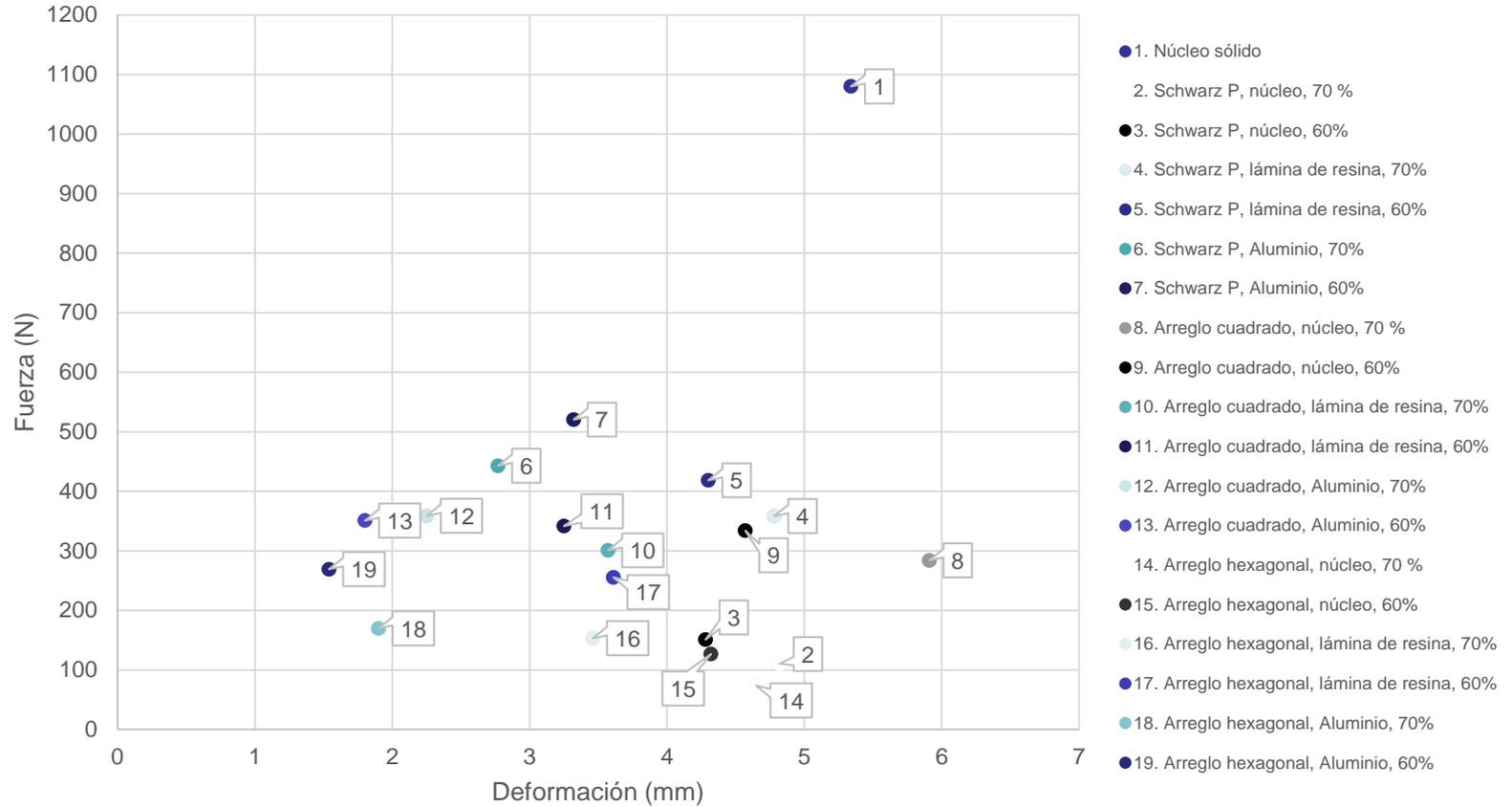
Arquitectura del núcleo	Estructura de la viga	Material Alas/pieles	Porosidad %	Fuerza aplicada N	Desplazamiento experimental mm		
<b>Núcleo sólido</b>	Núcleo	N/A	N/A	1080	5.34		
<b>Schwarz P</b>	Núcleo	N/A	70%	110.3	4.82		
			60%	150.9	4.28		
	Viga sándwich	Lámina de resina	70%	358.3	4.78		
			60%	418.5	4.30		
		Aluminio	70%	442.79	2.77		
			60%	520.4	3.32		
<b>Arreglo Cuadrado</b>	Núcleo	N/A	70%	284	5.91		
			60%	333.9	4.57		
	Viga sándwich	Lámina de resina	70%	300.9	3.57		
			60%	341.6	3.25		
		Aluminio	70%	358.7	2.25		
			60%	350.9	1.80		
		<b>Arreglo Hexagonal</b>	Núcleo	N/A	70%	73.693	4.65
					60%	126.7	4.32
Viga sándwich	Lámina de resina		70%	153.2	3.46		
			60%	255.3	3.61		
	Aluminio		70%	169.8	1.90		
			60%	269.2	1.54		



# DISEÑO GENERATIVO DE VIGAS

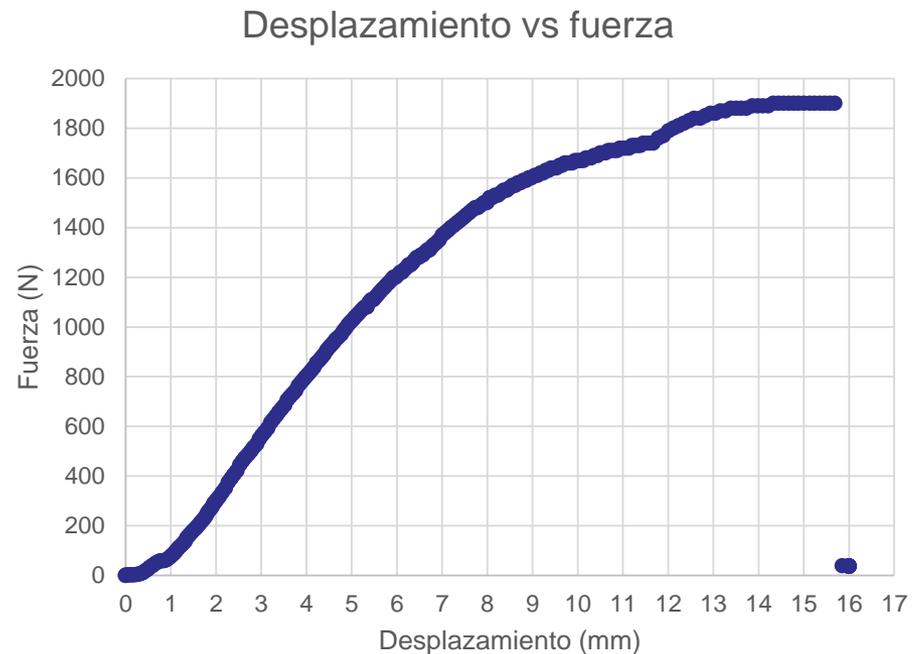
## ENSAYO A FLEXIÓN

Gráfico de dispersión de resultados fuerza vs deformación



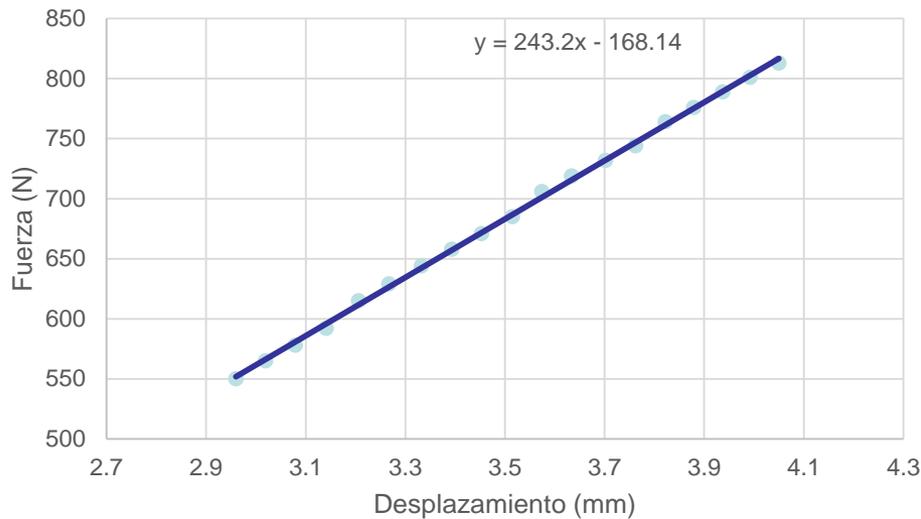
## PROPIEDADES EFECTIVAS DEL NÚCLEO

Para determinar las propiedades mecánicas del material base utilizado para fabricar las estructuras sándwich, se caracterizan las propiedades a flexión de la primera probeta impresa (núcleo sólido).



## PROPIEDADES EFECTIVAS DEL NÚCLEO

Fuerza vs desplazamiento



$$m = \frac{dP}{d\delta} = \frac{48EI}{L^3} = 243.20 \frac{N}{mm} \quad E = \frac{243.20 * L^3}{48I}$$



$$I = \frac{1}{12} b h^3 = \frac{1}{12} * 14mm * (18mm)^3 = 6804 mm^4$$

$$E = \frac{243.20 * L^3}{48I} = \frac{243.20 \frac{N}{mm} * (126mm)^3}{48 * 6804mm^4} = 1489.6 Mpa$$

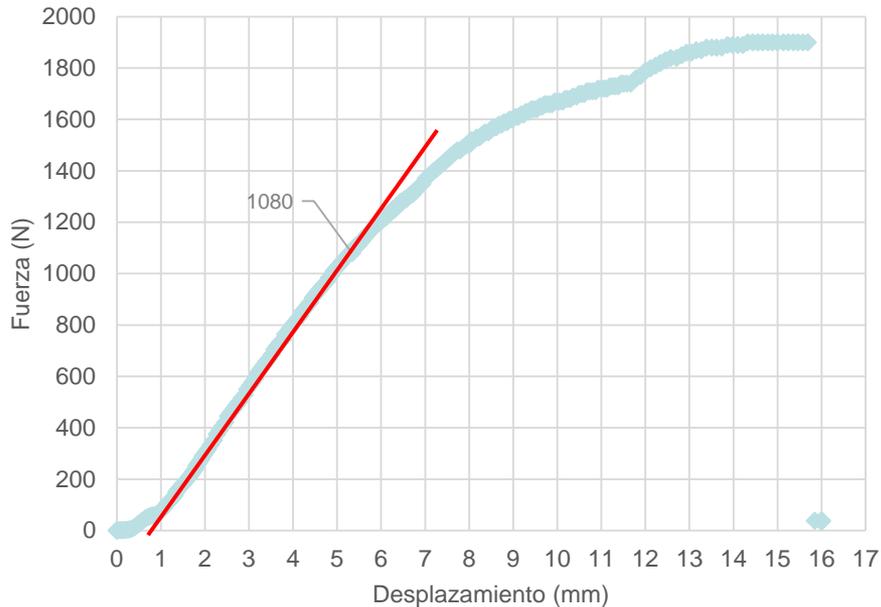
El resultado obtenido es coherente, basándonos en el rango del módulo de elasticidad que se ubica en la ficha técnica de la resina, este módulo de flexión se encuentra en el rango de 1.25Gpa a 2.20Gpa.



## PROPIEDADES EFECTIVAS DEL NÚCLEO

### Límite de proporcionalidad

DESPLAZAMIENTO VS FUERZA



$$M = \frac{F * L}{4}$$

$$\sigma = \frac{M * c}{I} = \frac{\frac{FL}{4} * \frac{h}{2}}{\frac{1}{12}bh^3} = \frac{3FL}{2bh^2}$$

con una longitud entre apoyos  $L=126\text{mm}$ , una base  $b=14\text{mm}$ , una altura  $h=18\text{mm}$  y con la fuerza última en la región lineal de  $F=1080\text{N}$  se tiene que el límite de proporcionalidad es igual a:

$$\sigma_p = \frac{3FL}{2bh^2} = \frac{3 * 1080\text{N} * 126\text{mm}}{2 * 14\text{mm} * (18\text{mm})^2} = 45 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 45\text{Mpa}$$



## SIMULACIÓN EN ANSYS WORKBENCH

### CREAR UN NUEVO MATERIAL

The screenshot shows the ANSYS Workbench Engineering Data interface. The left sidebar lists various material models, with 'Strength' selected. The main window displays a table of material properties for 'Resina Standard Gray'.

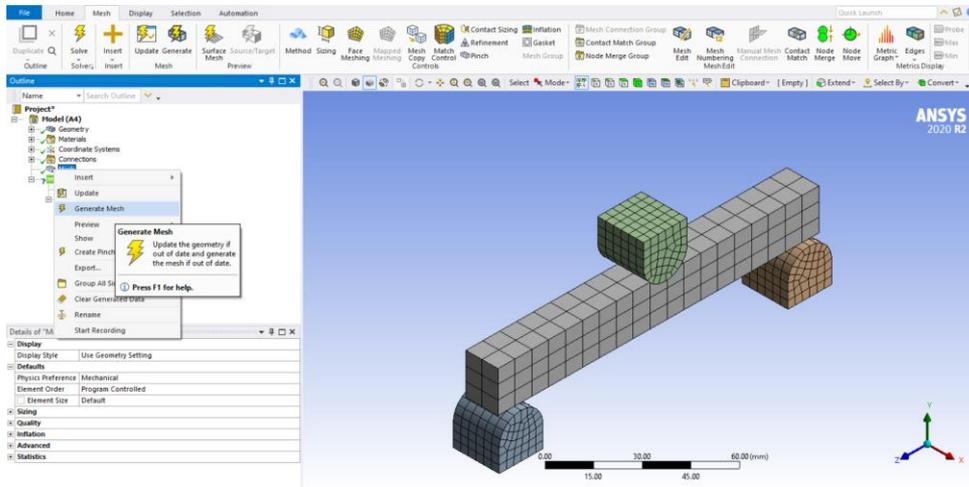
Property	Value	Unit
Density	1420	kg m <sup>-3</sup>
Isotropic Elasticity		
Derive from	Young's Modulus and Poisson...	
Young's Modulus	2200	MPa
Poisson's Ratio	0.3	
Bulk Modulus	1.8333E+09	Pa
Shear Modulus	8.4615E+08	Pa
Tensile Yield Strength	65	MPa

The top screenshot shows a 3D model of a mechanical part in ANSYS Workbench. The bottom screenshot shows the same model with a material selection dialog open, highlighting 'Resina Standard Gray'.

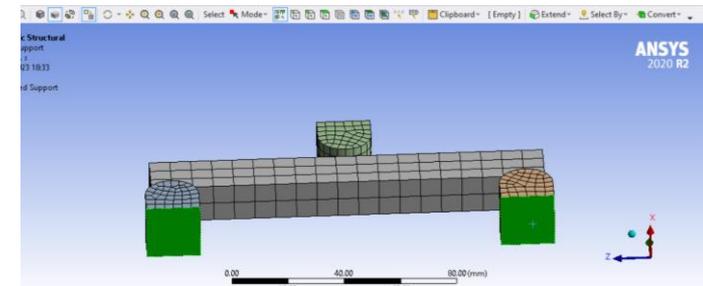


## SIMULACIÓN EN ANSYS WORKBENCH

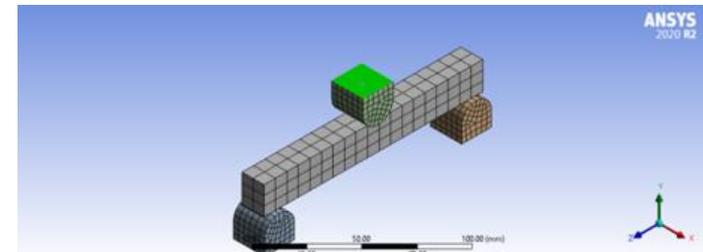
### MALLADO



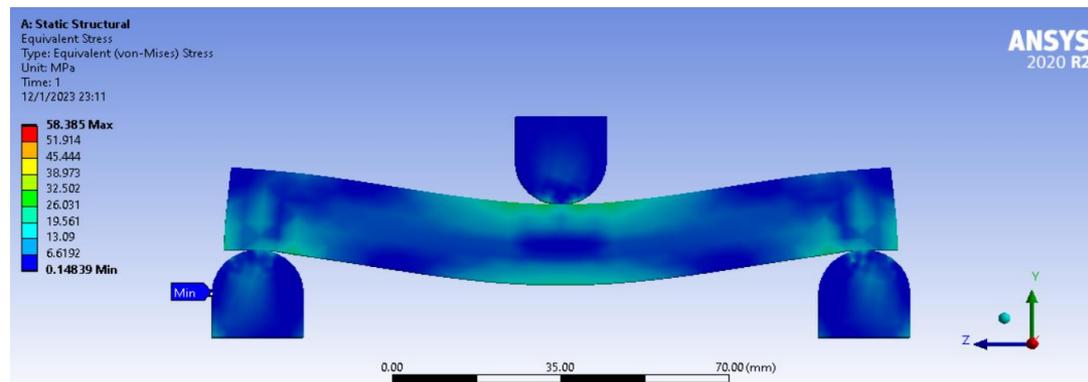
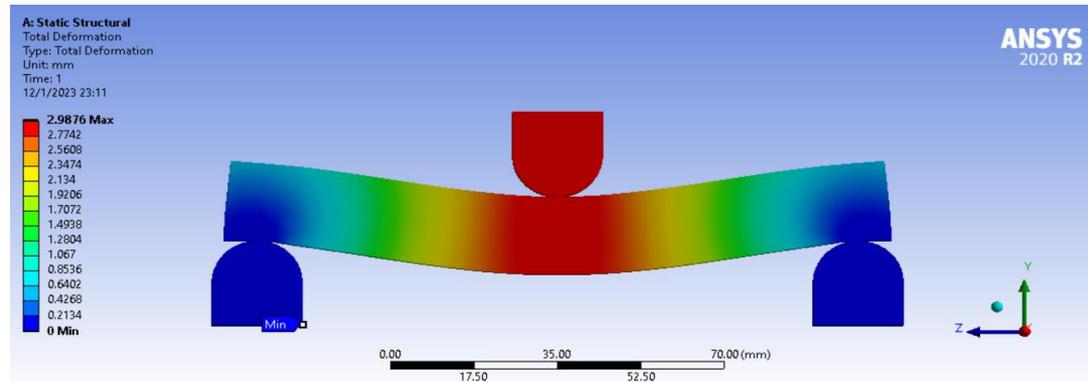
### SOPORTES Y RESTRICCIONES



### APLICACIÓN DE FUERZA



## SIMULACIÓN EN ANSYS WORKBENCH

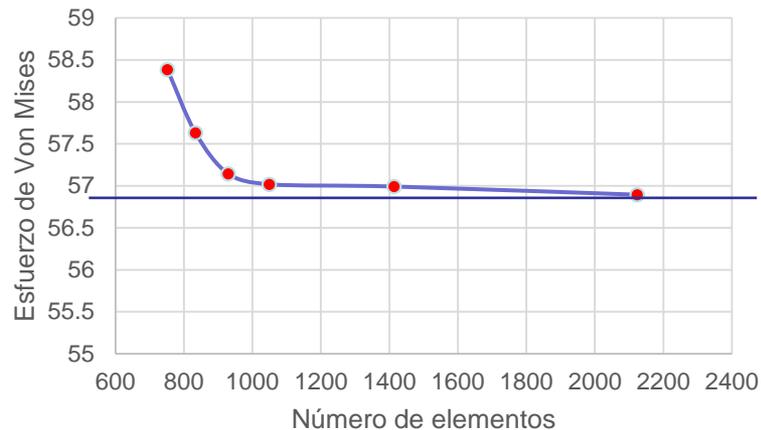


Carga aplicada	Desplazamiento máximo	Esfuerzo máximo
1080 N	2.9876 mm	58.385 MPa

## ESTUDIO DE INDEPENDENCIA DE MALLA

Tamaño de elementos	Número de elementos	Esfuerzo de Von Mises (Mpa)
7.82 (default)	752	58.358
7	834	57.631
6	930	57.143
5	1050	57.019
4	1414	56.992
3	2124	56.895

Esfuerzo de Von Mises (Mpa) vs Número de elementos



Carga aplicada	Desplazamiento máximo	Esfuerzo máximo
1080 N	2.9512 mm	56.895 MPa



## CALIDAD DE MALLA

Tamaño de elementos (mm)	7.82 (default)	3																																				
Element Quality	<table border="1"> <tr><td colspan="2">Quality</td></tr> <tr><td>Check Mesh Quality</td><td>No</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> Target Quality</td><td>Default (0.050000)</td></tr> <tr><td>Smoothing</td><td>Medium</td></tr> <tr><td>Mesh Metric</td><td>Element Quality</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> Min</td><td>0.72927</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> Max</td><td>0.99844</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> Average</td><td>0.94816</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> Standard Deviation</td><td>5.2496e-002</td></tr> </table>	Quality		Check Mesh Quality	No	<input type="checkbox"/> Target Quality	Default (0.050000)	Smoothing	Medium	Mesh Metric	Element Quality	<input type="checkbox"/> Min	0.72927	<input type="checkbox"/> Max	0.99844	<input type="checkbox"/> Average	0.94816	<input type="checkbox"/> Standard Deviation	5.2496e-002	<table border="1"> <tr><td colspan="2">Quality</td></tr> <tr><td>Check Mesh Quality</td><td>No</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> Target Quality</td><td>Default (0.050000)</td></tr> <tr><td>Smoothing</td><td>Medium</td></tr> <tr><td>Mesh Metric</td><td>Element Quality</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> Min</td><td>0.72927</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> Max</td><td>0.99844</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> Average</td><td>0.98095</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> Standard Deviation</td><td>3.8927e-002</td></tr> </table>	Quality		Check Mesh Quality	No	<input type="checkbox"/> Target Quality	Default (0.050000)	Smoothing	Medium	Mesh Metric	Element Quality	<input type="checkbox"/> Min	0.72927	<input type="checkbox"/> Max	0.99844	<input type="checkbox"/> Average	0.98095	<input type="checkbox"/> Standard Deviation	3.8927e-002
Quality																																						
Check Mesh Quality	No																																					
<input type="checkbox"/> Target Quality	Default (0.050000)																																					
Smoothing	Medium																																					
Mesh Metric	Element Quality																																					
<input type="checkbox"/> Min	0.72927																																					
<input type="checkbox"/> Max	0.99844																																					
<input type="checkbox"/> Average	0.94816																																					
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	5.2496e-002																																					
Quality																																						
Check Mesh Quality	No																																					
<input type="checkbox"/> Target Quality	Default (0.050000)																																					
Smoothing	Medium																																					
Mesh Metric	Element Quality																																					
<input type="checkbox"/> Min	0.72927																																					
<input type="checkbox"/> Max	0.99844																																					
<input type="checkbox"/> Average	0.98095																																					
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	3.8927e-002																																					
Skewness	<table border="1"> <tr><td colspan="2">Quality</td></tr> <tr><td>Check Mesh Quality</td><td>No</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> Target Quality</td><td>Default (0.050000)</td></tr> <tr><td>Smoothing</td><td>Medium</td></tr> <tr><td>Mesh Metric</td><td>Skewness</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> Min</td><td>1.3058e-010</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> Max</td><td>0.49193</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> Average</td><td>0.15543</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> Standard Deviation</td><td>0.11914</td></tr> </table>	Quality		Check Mesh Quality	No	<input type="checkbox"/> Target Quality	Default (0.050000)	Smoothing	Medium	Mesh Metric	Skewness	<input type="checkbox"/> Min	1.3058e-010	<input type="checkbox"/> Max	0.49193	<input type="checkbox"/> Average	0.15543	<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0.11914	<table border="1"> <tr><td colspan="2">Quality</td></tr> <tr><td>Check Mesh Quality</td><td>No</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> Target Quality</td><td>Default (0.050000)</td></tr> <tr><td>Smoothing</td><td>Medium</td></tr> <tr><td>Mesh Metric</td><td>Skewness</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> Min</td><td>1.3057e-010</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> Max</td><td>0.49193</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> Average</td><td>5.6349e-002</td></tr> <tr><td><input type="checkbox"/> Standard Deviation</td><td>0.10357</td></tr> </table>	Quality		Check Mesh Quality	No	<input type="checkbox"/> Target Quality	Default (0.050000)	Smoothing	Medium	Mesh Metric	Skewness	<input type="checkbox"/> Min	1.3057e-010	<input type="checkbox"/> Max	0.49193	<input type="checkbox"/> Average	5.6349e-002	<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0.10357
Quality																																						
Check Mesh Quality	No																																					
<input type="checkbox"/> Target Quality	Default (0.050000)																																					
Smoothing	Medium																																					
Mesh Metric	Skewness																																					
<input type="checkbox"/> Min	1.3058e-010																																					
<input type="checkbox"/> Max	0.49193																																					
<input type="checkbox"/> Average	0.15543																																					
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0.11914																																					
Quality																																						
Check Mesh Quality	No																																					
<input type="checkbox"/> Target Quality	Default (0.050000)																																					
Smoothing	Medium																																					
Mesh Metric	Skewness																																					
<input type="checkbox"/> Min	1.3057e-010																																					
<input type="checkbox"/> Max	0.49193																																					
<input type="checkbox"/> Average	5.6349e-002																																					
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0.10357																																					



# ANÁLISIS COMPUTACIONAL

## DETERMINACIÓN DE DEFORMACIÓN POR MÉTODO ANALÍTICO

$$P = 1080 \text{ N}$$

$$L = 126 \text{ mm}$$

$$E = 2200 \text{ Mpa}$$

$$I = 6804 \text{ mm}^4$$

$$\delta = \frac{P L^3}{48 E I} = \frac{1080 \text{ N} * (126 \text{ mm})^3}{48 * 2200 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} * 6804 \text{ mm}^4} = 3.0068 \text{ mm}$$

Se observa que el valor del desplazamiento máximo del resultado de la simulación numérica y el resultado de deflexión máxima de forma analítica son muy cercanos con un error relativo de:

$$e_r = \frac{|\text{Desplazamiento analítico} - \text{Desplazamiento simulación}|}{\text{Desplazamiento analítico}} * 100\%$$

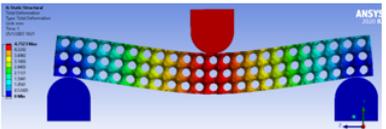
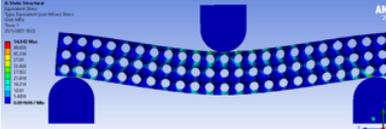
$$e_r = \frac{|3.0068 - 2.9512|}{3.0068} * 100\% = 1.85\%$$

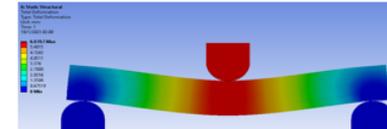
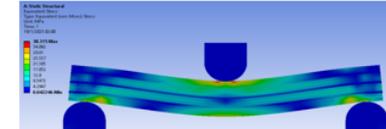


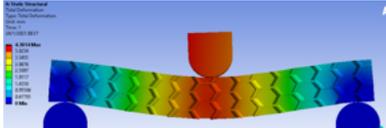
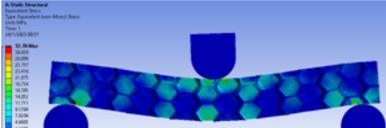
# ANÁLISIS COMPUTACIONAL

## SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL ENSAYO DE FLEXIÓN

<b>Módulo de elasticidad efectiva</b>	<b>Límite de proporcionalidad</b>
1489.6 Mpa	45 Mpa

Nro	Arquitectura del núcleo	Estructura de la viga	Fuerza aplicada (N)	Material alas	Porosidad
2	Schwarz P	Núcleo	110.3	N/A	70%
<b>Deflexión máxima</b>			<b>Esfuerzo de Von Mises</b>		
					
4.7523 mm			54.042 Mpa		

Nro	Arquitectura del núcleo	Estructura de la viga	Fuerza aplicada (N)	Material alas	Porosidad
8	Cuadrado	Núcleo	284.0	N/A	70%
<b>Deflexión máxima</b>			<b>Esfuerzo de Von Mises</b>		
					
6.0767 mm			38.315 Mpa		

Nro	Arquitectura del núcleo	Estructura de la viga	Fuerza aplicada (N)	Material alas	Porosidad
14	Hexagonal	Núcleo	73.69	N/A	70%
<b>Deflexión máxima</b>			<b>Esfuerzo de Von Mises</b>		
					
4.3014 mm			32.78 Mpa		



# ANÁLISIS COMPUTACIONAL

## RESULTADO DE SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL ENSAYO DE FLEXIÓN

Arquitectura del núcleo	Estructura de la viga	Material Alas/pieles	Porosidad (%)	Fuerza aplicada (N)	Desplazamiento Solución numérica (mm)	Esfuerzo Von-Mises (Mpa)		
<b>Núcleo sólido</b>	Núcleo	N/A	N/A	1080	5.38	60.57		
<b>Schwarz P</b>	Núcleo	N/A	70%	110.3	4.75	54.04		
			60%	150.9	4.50	52.00		
	Viga sándwich	Lámina de resina	70%	358.3	4.86	48.70		
			60%	418.5	4.73	48.92		
		Aluminio	70%	442.79	3.10	101.52		
			60%	520.4	2.94	92.62		
<b>Arreglo Cuadrado</b>	Núcleo	N/A	70%	284	6.08	38.32		
			60%	333.9	4.88	36.73		
	Viga sándwich	Lámina de resina	70%	300.9	4.01	44.10		
			60%	341.6	3.48	46.81		
		Aluminio	70%	358.7	2.12	68.13		
			60%	350.9	1.51	58.52		
		<b>Arreglo Hexagonal</b>	Núcleo	N/A	70%	73.693	4.30	32.78
					60%	126.7	4.05	35.19
Viga sándwich	Lámina de resina		70%	153.2	3.40	31.87		
			60%	255.3	3.95	50.76		
	Aluminio		70%	169.8	2.17	57.09		
			60%	269.2	1.58	62.54		



# ANÁLISIS DE RESULTADOS

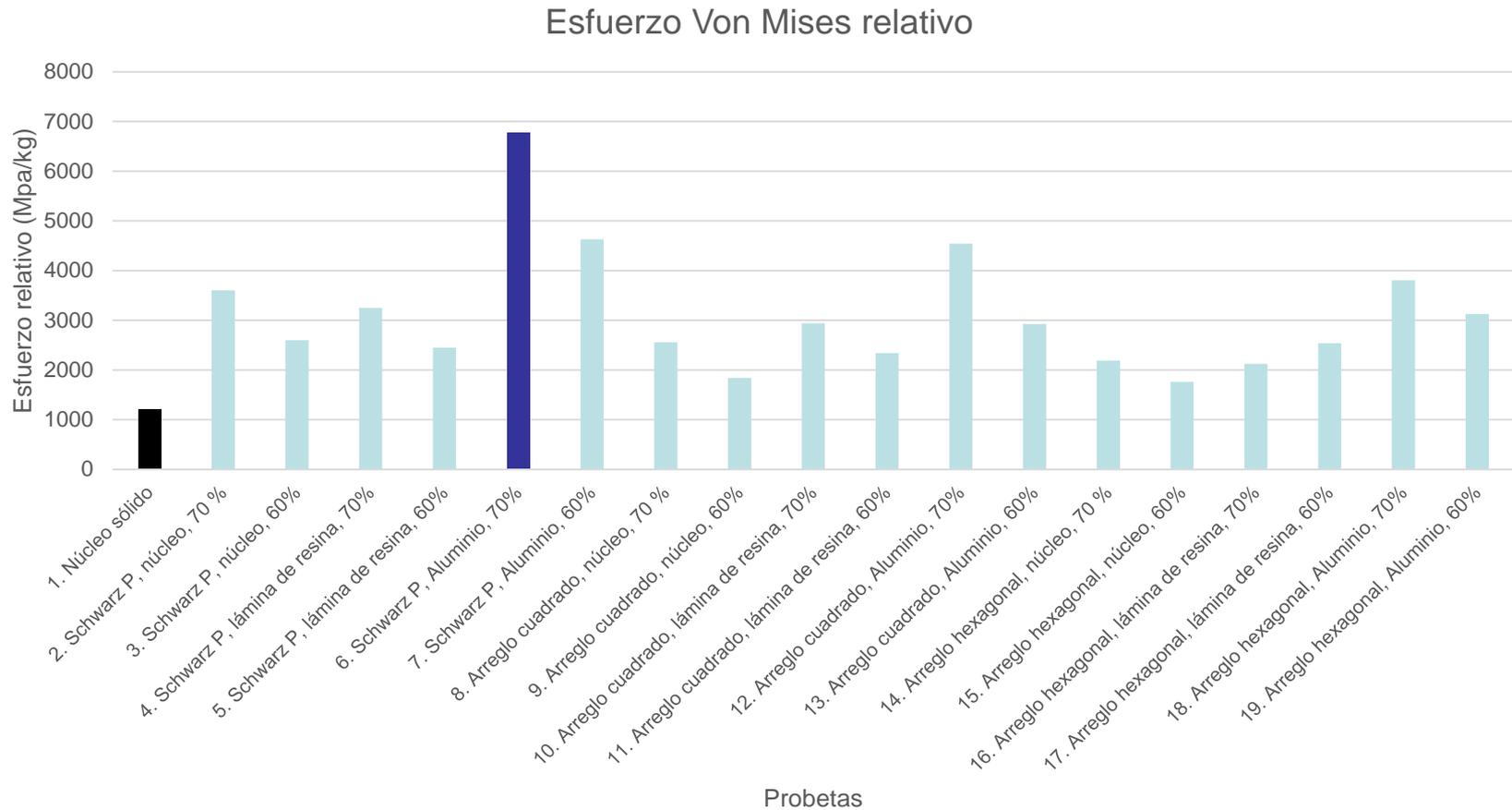
## RESULTADO DE SIMULACIÓN NUMÉRICA

Arquitectura del núcleo	Estructura de la viga	Material	Porosidad	Masa	Fuerza aplicada	Desplazamiento Solución numérica	Esfuerzo Von-Mises	Esfuerzo Von-Mises relativo
		Alas/piel es	(%)	(kg)	(N)	(mm)	(Mpa)	(Mpa/kg)
Núcleo sólido	Núcleo	N/A	N/A	0.05	1080	5.38	60.57	1211.40
Schwarz P	Núcleo	N/A	70%	0.015	110.3	4.75	54.04	3602.67
			60%	0.02	150.9	4.5	52	2600.00
	Viga sándwich	Lámina de resina	70%	0.015	358.3	4.86	48.7	3246.67
			60%	0.02	418.5	4.73	48.92	2446.00
		Aluminio	70%	0.015	442.79	3.1	101.52	6768.00
			60%	0.02	520.4	2.94	92.62	4631.00
Arreglo Cuadrado	Núcleo	N/A	70%	0.015	284	6.08	38.32	2554.67
			60%	0.02	333.9	4.88	36.73	1836.50
	Viga sándwich	Lámina de resina	70%	0.015	300.9	4.01	44.1	2940.00
			60%	0.02	341.6	3.48	46.81	2340.50
		Aluminio	70%	0.015	358.7	2.12	68.13	4542.00
			60%	0.02	350.9	1.51	58.52	2926.00
Arreglo Hexagonal	Núcleo	N/A	70%	0.015	73.693	4.3	32.78	2185.33
			60%	0.02	126.7	4.05	35.19	1759.50
	Viga sándwich	Lámina de resina	70%	0.015	153.2	3.4	31.87	2124.67
			60%	0.02	255.3	3.95	50.76	2538.00
		Aluminio	70%	0.015	169.8	2.17	57.09	3806.00
			60%	0.02	269.2	1.58	62.54	3127.00



# ANÁLISIS DE RESULTADOS

## RESULTADO DE SIMULACIÓN NUMÉRICA



# ANÁLISIS DE RESULTADOS

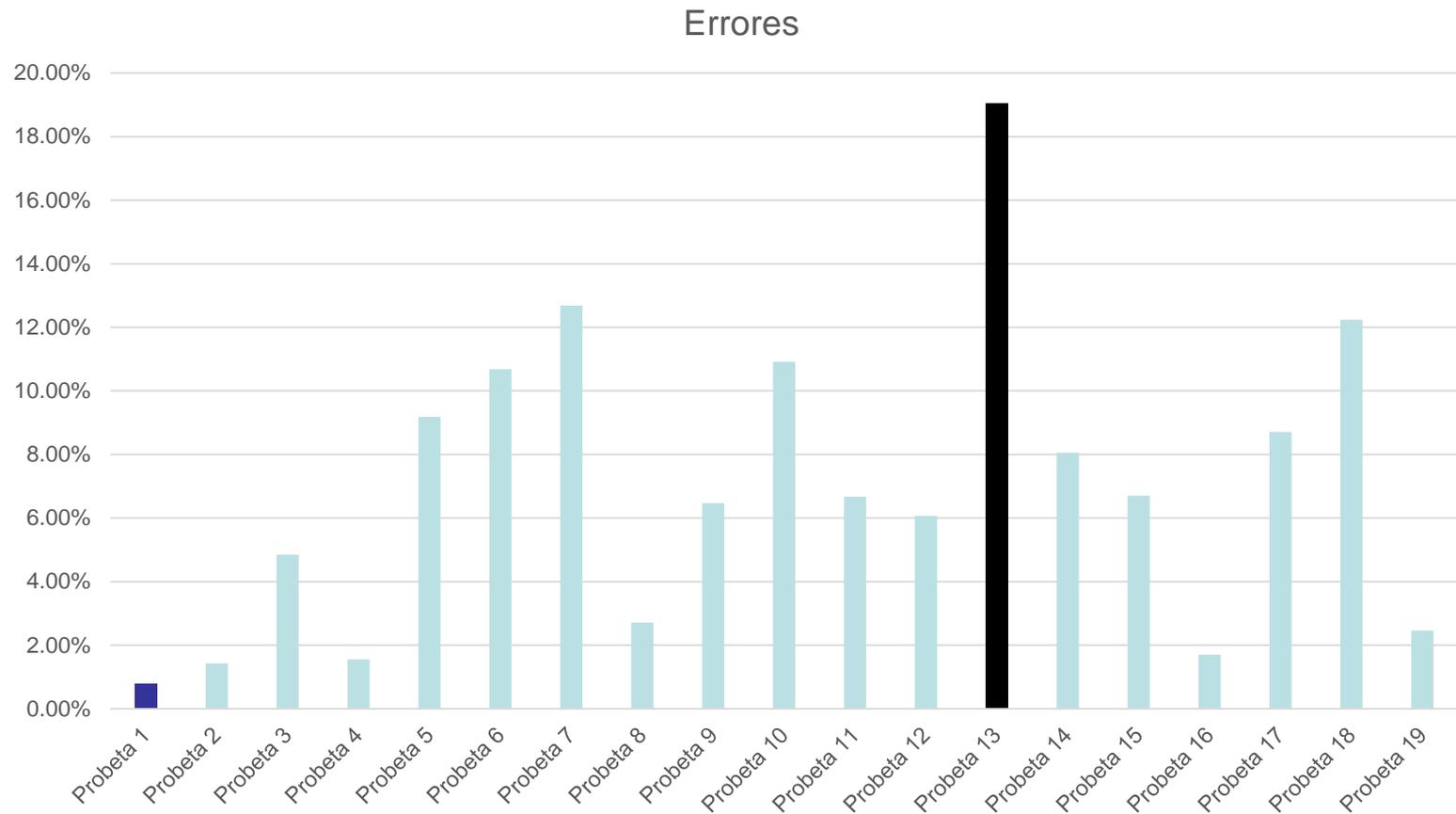
## ANÁLISIS DE ERRORES

N°	Arquitectura del núcleo	Estructura de la viga	Material alas	Porosidad (%)	Fuerza aplicada (N)	Desplazamiento experimental (mm)	Desplazamiento Solución numérica (mm)	Error relativo (%)
1	Núcleo sólido	Núcleo	N/A	N/A	1080	5.34	5.38	0.77%
2	Schwarz P	Núcleo	N/A	70%	110.3	4.82	4.75	1.42%
3	Schwarz P	Núcleo	N/A	60%	150.9	4.28	4.50	4.85%
4	Schwarz P	Viga sándwich	Lámina de resina	70%	358.3	4.78	4.86	1.55%
5	Schwarz P	Viga sándwich	Lámina de resina	60%	418.5	4.30	4.73	9.19%
6	Schwarz P	Viga sándwich	Aluminio	70%	442.79	2.77	3.10	10.68%
7	Schwarz P	Viga sándwich	Aluminio	60%	520.4	3.32	2.94	12.68%
8	Arreglo Cuadrado	Núcleo	N/A	70%	284	5.91	6.08	2.71%
9	Arreglo Cuadrado	Núcleo	N/A	60%	333.9	4.57	4.88	6.46%
10	Arreglo Cuadrado	Viga sándwich	Lámina de resina	70%	300.9	3.57	4.01	10.91%
11	Arreglo Cuadrado	Viga sándwich	Lámina de resina	60%	341.6	3.25	3.48	6.67%
12	Arreglo Cuadrado	Viga sándwich	Aluminio	70%	358.7	2.25	2.12	6.07%
13	Arreglo Cuadrado	Viga sándwich	Aluminio	60%	350.9	1.80	1.51	19.03%
14	Arreglo Hexagonal	Núcleo	N/A	70%	73.693	4.65	4.30	8.06%
15	Arreglo Hexagonal	Núcleo	N/A	60%	126.7	4.32	4.05	6.70%
16	Arreglo Hexagonal	Viga sándwich	Lámina de resina	70%	153.2	3.46	3.40	1.70%
17	Arreglo Hexagonal	Viga sándwich	Lámina de resina	60%	255.3	3.61	3.95	8.70%
18	Arreglo Hexagonal	Viga sándwich	Aluminio	70%	169.8	1.90	2.17	12.24%
19	Arreglo Hexagonal	Viga sándwich	Aluminio	60%	269.2	1.54	1.58	2.46%



# ANÁLISIS DE RESULTADOS

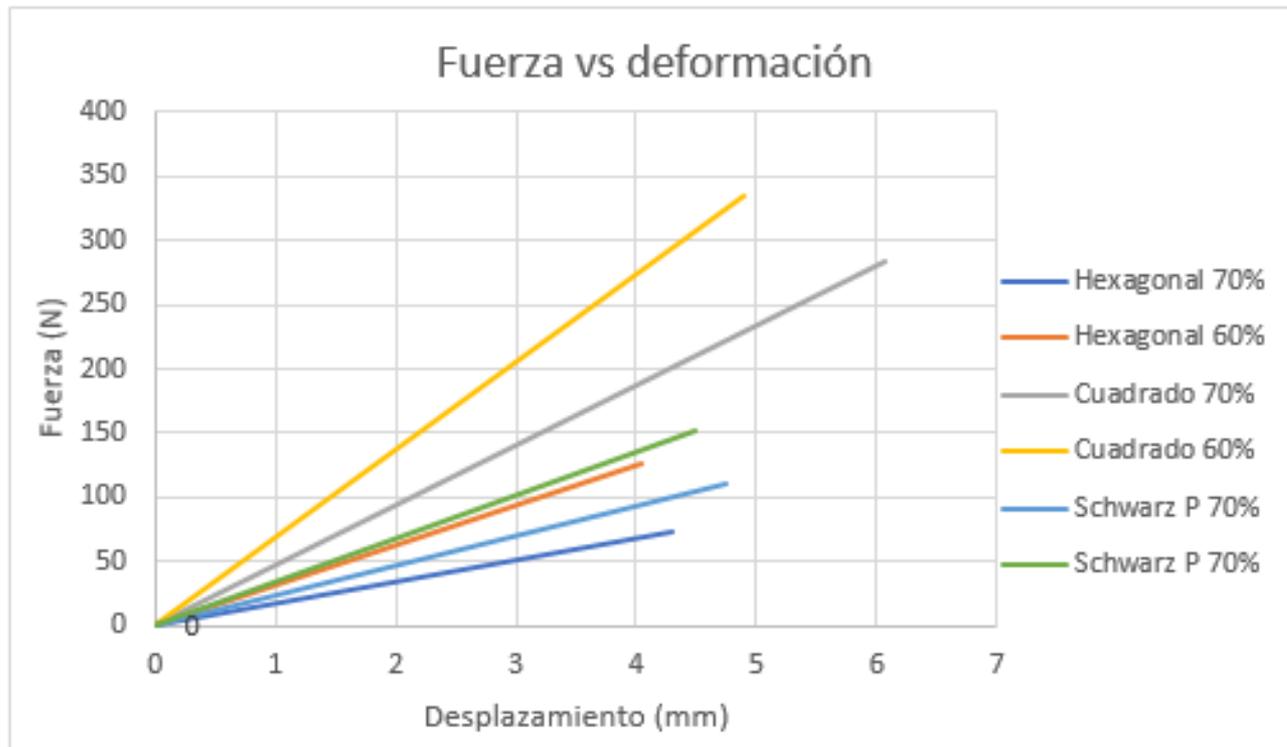
## ANÁLISIS DE ERRORES



# ANÁLISIS DE RESULTADOS

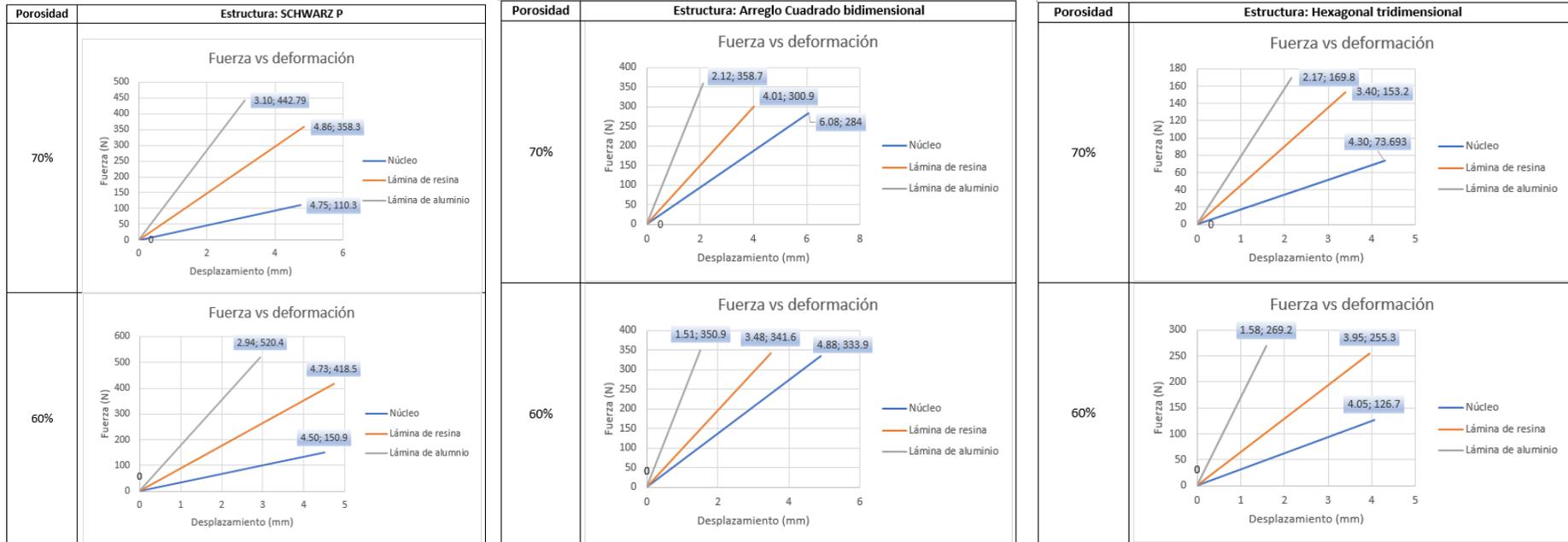
## CORRELACIÓN DE GRÁFICAS

*Comparación de Núcleos celulares.*



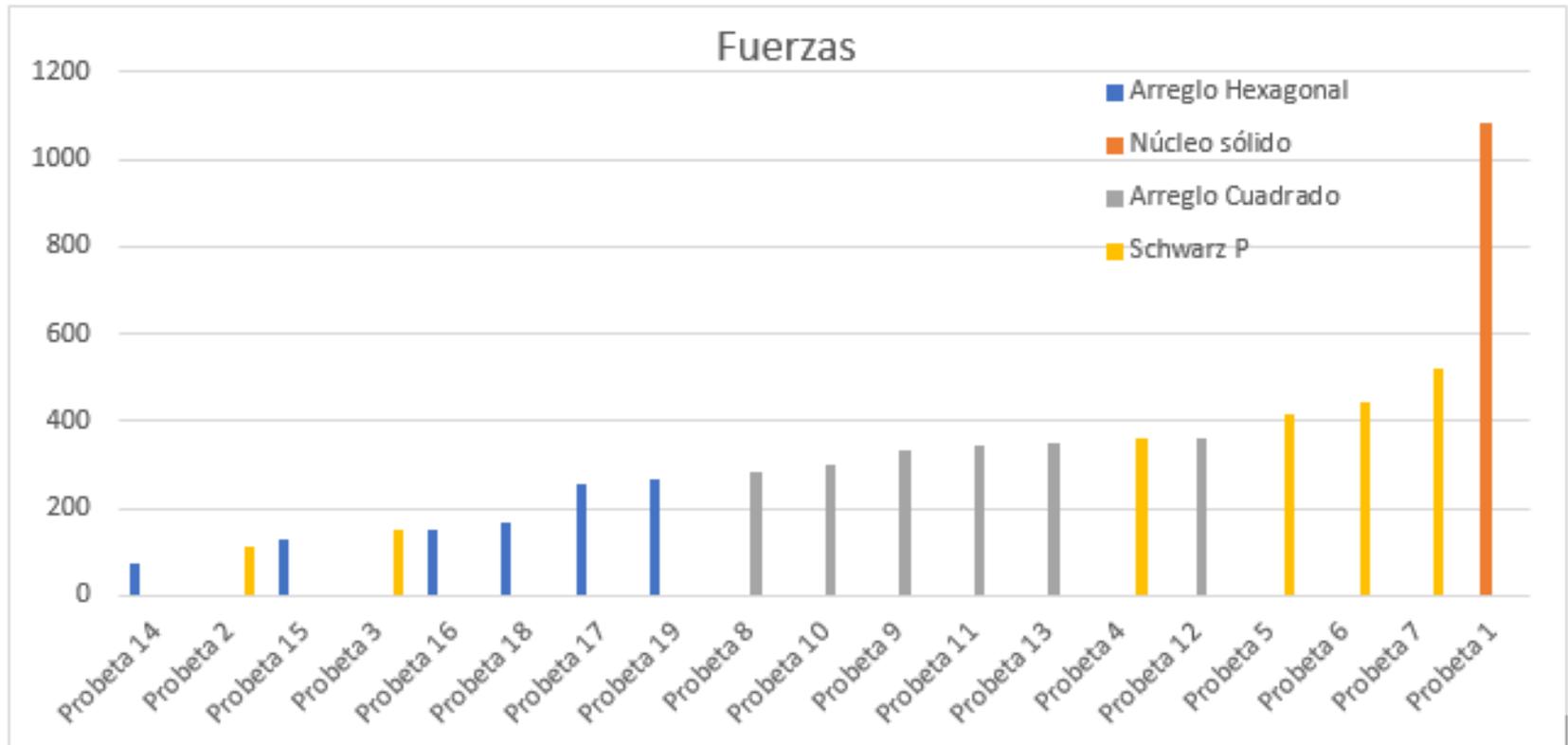
# ANÁLISIS DE RESULTADOS

## CORRELACIÓN DE GRÁFICAS



# ANÁLISIS DE RESULTADOS

## FUERZA MÁXIMA ALCANZADA EN LA EXPERIMENTACIÓN



# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## CONCLUSIONES

- Se determinó que las estructuras de tipo “arreglo cuadrado” son más dúctiles que las estructuras de topología de núcleo “Schwarz P” y “arreglo hexagonal”, éstas últimas presentan un comportamiento frágil.
- El núcleo celular de tipo “arreglo cuadrado” con un porcentaje de porosidad del 60% mostró una resistencia mayor que otras tipologías del núcleo, mientras que la viga tipo sándwich de tipo “Schwarz P” con capas externas de aluminio con un porcentaje de porosidad del 60% aumentó significativamente su resistencia, siendo la viga tipo sándwich que mejor comportamiento mecánico ha presentado de todo el diseño experimental.
- El efecto que producen las alas o capas externas en los núcleos de material celular aumentan significativamente la rigidez a los núcleos de material celular.



# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## CONCLUSIONES

- El núcleo de menor resistencia mecánica fue el de tipo “arreglo hexagonal” con una porosidad del 70%. Mientras que la viga tipo sándwich que menor resistencia a flexión tuvo también fue la viga de núcleo “arreglo hexagonal” con capas externas de resina “High Temp”.
- Se establece que mientras mayor sea el porcentaje de porosidad, las vigas de núcleo celular y de vigas tipo sándwich tendrán menor rigidez a la flexión. Así mismo mientras el porcentaje de porosidad disminuya, la rigidez a la flexión va a aumentar
- Para las vigas tipo sándwich, su comportamiento también depende de la porosidad del núcleo (como se describió en el ítem anterior), así como también del material de las capas externas o alas, es así que mientras mayor sea el módulo de Young del material de las capas, la viga tiene un comportamiento más rígido a la flexión.



# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## CONCLUSIONES

- Comparando los resultados experimentales y de simulación, la probeta que obtuvo el mayor error relativo fue la viga sándwich de tipo “arreglo cuadrado” con una porosidad del 60% con capas externas de aluminio con un er: 19.03%, y la probeta que presentó un menor error relativo fue la del núcleo sólido con un er: 0.77%.
- El esfuerzo de Von Mises en las probetas se encuentra en el intervalo de 30 Mpa a 60 Mpa, con excepción de la viga sándwich de tipo “Schwarz P” con capas externas de aluminio, que tiene un esfuerzo de Von Mises de 101.52 MPa y de 92.62 MPa con porosidades del 70% y 60% respectivamente.
- La probeta que mayor esfuerzo relativo posee es la de tipología Schwarz P, con láminas externas de aluminio y con porosidad de su núcleo al 70%, con un esfuerzo de Von Mises de 6768 Mpa/kg. Mientras que la que menor esfuerzo relativo de Von Mises presentó, es la probeta de núcleo sólido, con un esfuerzo relativo de 1211.4 Mpa/kg.



# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda caracterizar la resina antes de realizar las simulaciones para reducir los errores al momento de comparar sus desplazamientos en los ensayos de flexión.
- Al momento de realizar el diseño generativo mediante Space Claim, antes de hacer sólidos a los núcleos TPMS, se recomienda pulsar la opción “ajustar encoger” en el menú de facetas en núcleos en donde su diseño sea complejo.
- Se recomienda ensayar y analizar más núcleos TPMS para ampliar el conocimiento acerca del comportamiento a flexión que puedan tener los otros núcleos, y de la misma manera verificar el efecto que tiene la porosidad en cada uno de estos núcleos.
- Para conseguir la mayor resistencia de la resina, se sugiere que la limpieza se realice con alcohol isopropílico y en el postcurado el parámetro de temperatura y tiempo sea controlado según indique el proveedor.



# GRACIAS



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



# DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

“SIMULACIÓN, PROTOTIPADO Y ENSAYOS A FLEXIÓN DE VIGAS TIPO SÁNDWICH CON  
NÚCLEO DE MATERIAL CELULAR”

AUTOR:

RODRÍGUEZ CHANCUSI, DIEGO FERNANDO

DIRECTOR:

ING. JOSÉ EMILIO PÉREZ ROSALES

SANGOLQUÍ 2023

