



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

FATIGA A FLEXIÓN ROTATIVA EN MATERIALES COMPUESTOS EN BASE DE FIBRA DE VIDRIO

Trabajo de integración curricular previo a la obtención del título de
Ingeniero Mecánico

Integrantes:

Hernández Ganán Pablo René
Yandún Sánchez Carlos Andrés

Tutor:

Ing. José Emilio Pérez Rosales

Sangolquí, 01 de septiembre de 2023



MOTIVACIÓN



AIRBUS A320
AIR FRANCE

(Air France, 2023)

Alcance



Figura 1. Máquina R.R. Moore

- Determinar las curvas Esfuerzo–Vida de materiales compuestos en base de fibra de vidrio, utilizando el método de R. R Moore.
- Adecuar mecánicamente la máquina de fatiga de R.R. Moore del LMM para ensayos de fatiga en materiales compuestos.
- Fabricar probetas de material compuesto en base de fibra de vidrio y resina de poliéster.

JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

Comparar la resistencia a la fatiga del material compuesto en diferentes porcentajes de fibra de refuerzo.

Brindar una alternativa a la máquina R.R. Moore para realizar ensayos de fatiga por flexión rotativa en diferentes materiales.

Aportar a estudios de investigación con la información obtenida del análisis de curvas de vida del material compuesto.

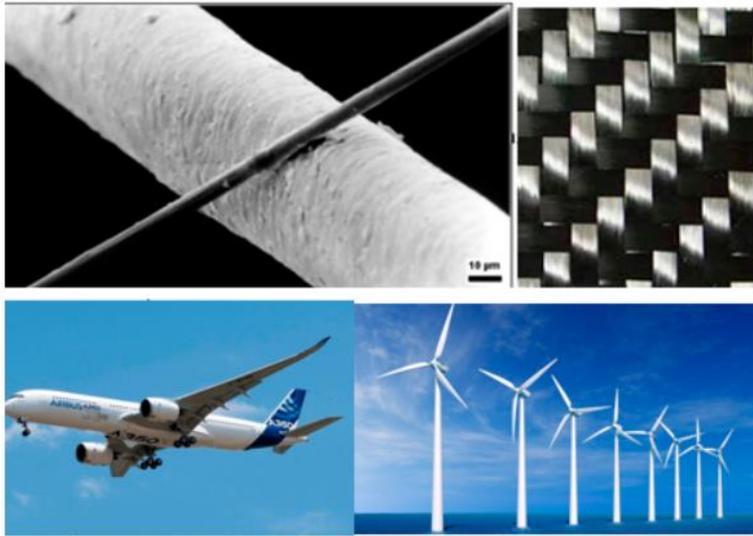


Figura 2. Aplicaciones Materiales Compuestos

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Determinar las curvas esfuerzo-vida de materiales compuestos en base de fibra de vidrio, utilizando el método de R.R. Moore.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Adecuar mecánicamente la máquina de ensayos a la fatiga en acero del LMM, para realizar ensayos a fatiga en material compuesto en base de fibra de vidrio.
- Obtener las curvas esfuerzo-vida de material compuesto en base de fibra de vidrio.

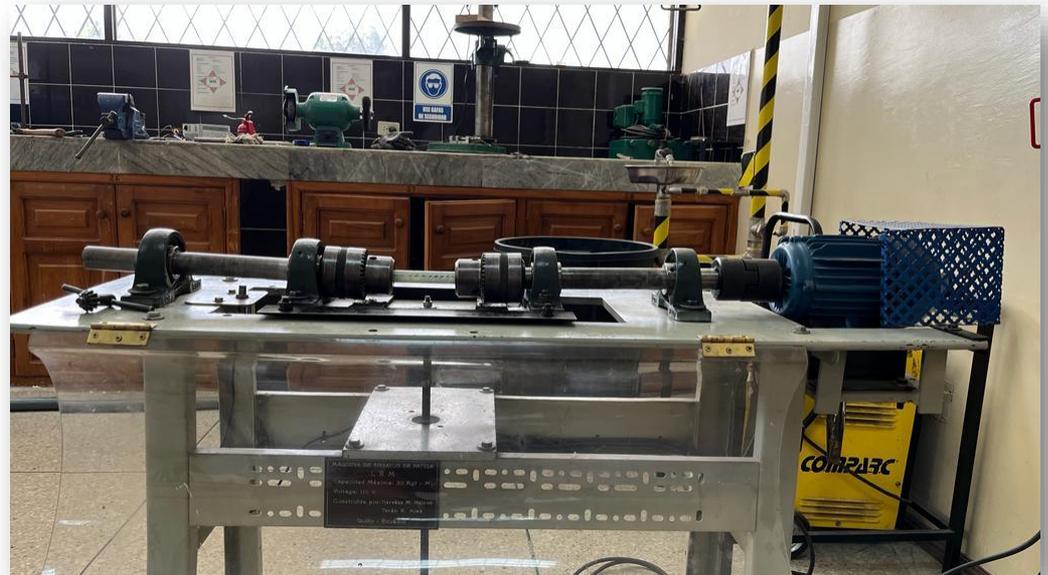
DESARROLLO

Acondicionamiento de la Máquina de ensayos a fatiga R.R. Moore

LIMITACIONES

- Peso de elementos mecánicos.
- Deflexión inicial en la probeta.

Figura 3. Estado inicial de la máquina de R.R. Moore



Simulación – SAP 2000

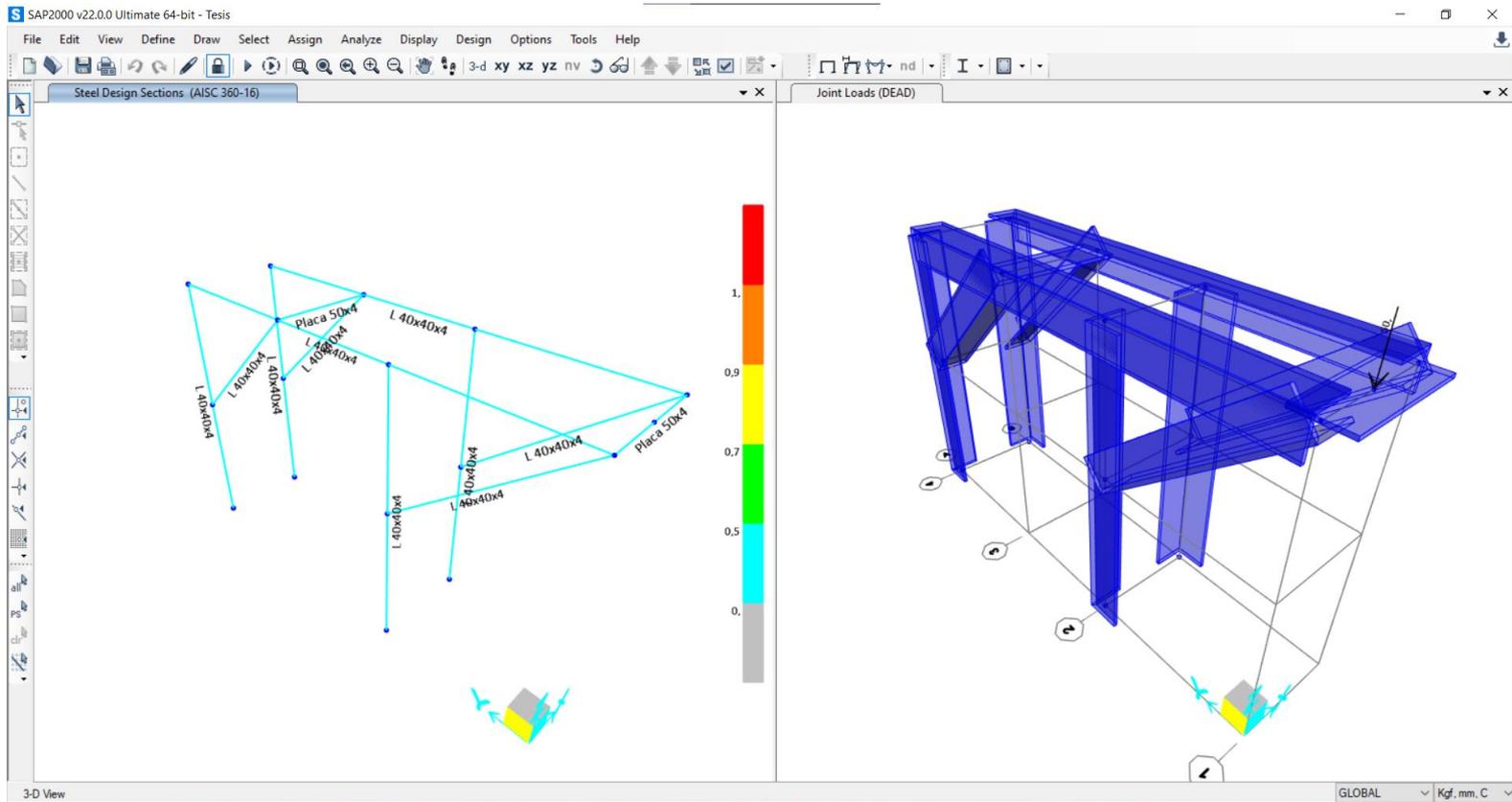


Figura 4. Simulación SAP 2000 – Estructura Metálica

- Se observa que con el perfil L 40x40x4 [mm] y placas de 50x4 [mm] se logra rigidizar la estructura y soportar sin problemas los pesos que integra la máquina.

Simulación – SAP 2000

Deformed Shape (MODAL) - Mode 1; T = 0,03849; f = 25,98227

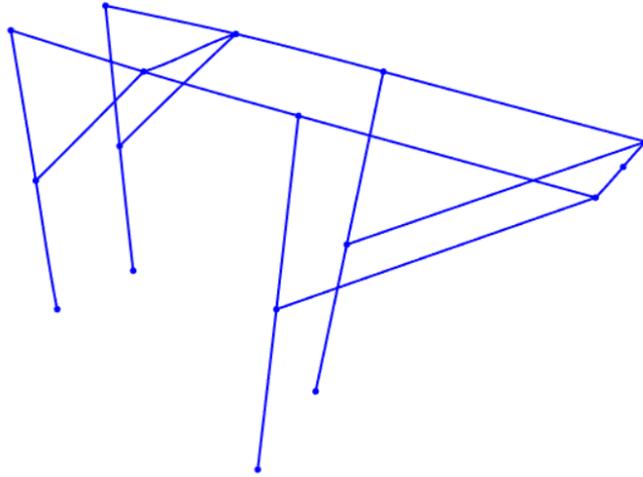


Figura 5. Simulación Modal 1

- Modal 1 = Traslación eje axial
- Periodo $T=0,03849$ [s]
- Frecuencia $f=25,98$ [Hz]

Deformed Shape (MODAL) - Mode 2; T = 0,01043; f = 95,91171

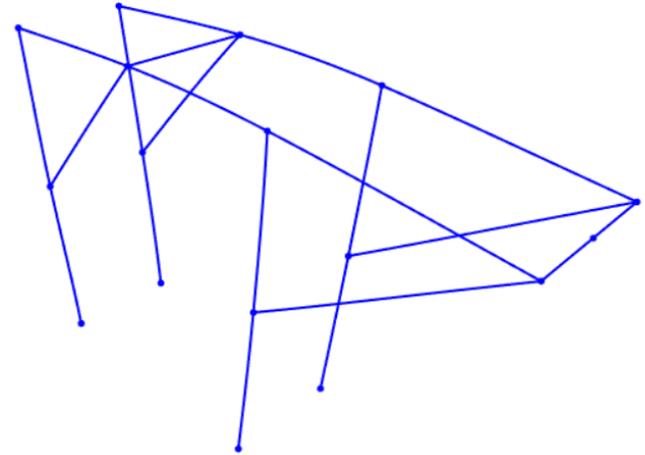


Figura 6. Simulación Modal 2

- Modal 2 = Traslación eje longitudinal (Eje Y)
- Periodo $T=0,01043$ [s]
- Frecuencia $f=95,91$ [Hz]

Simulación – SAP 2000

Deformed Shape (MODAL) - Mode 3; T = 0,0076; f = 131,55089

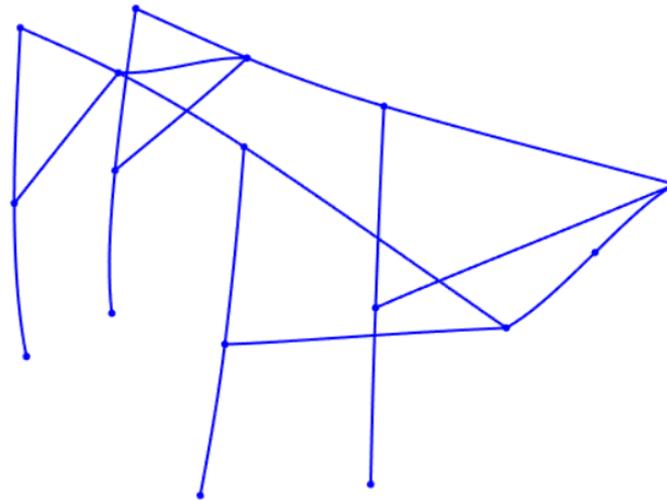


Figura 7. Simulación Modal 3

- Modal 3 = Torsión Eje Z
- Periodo $T=0,0076$ [s]
- Frecuencia $f=131,55$ [Hz]

Frecuencia natural de la estructura vs la del sistema

- Ecuación general de la frecuencia natural

$$f = \frac{1}{2 * \pi} * \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1)$$

Donde:

$$k = \frac{m * g}{\frac{3}{4} * \delta_{m\acute{a}x}}$$

$$f = \frac{1}{2 * \pi} * \sqrt{\frac{k}{m}} \approx \frac{18}{\sqrt{\delta_{m\acute{a}x}}}$$

$$\delta_{m\acute{a}x} = 0,005 \text{ m}$$

$$f = \frac{18}{\sqrt{\delta_{m\acute{a}x}}} \quad (2)$$

$$f = \frac{18}{\sqrt{0,005}} = 254,56 \text{ [Hz]}$$

Comparativa

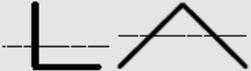
$$f_{sistema} = 131,55 \text{ [Hz]}$$

$$f_{estructura} = 254,56 \text{ [Hz]}$$

$$f_{estructura} > f_{sistema} \quad \text{ok}$$

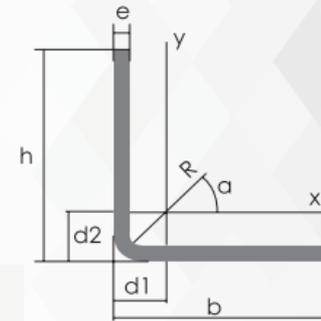
Diseño de miembros a flexión

- La flexión que se genera en las vigas se produce en el momento en el que se deforman al aplicar las cargas.

TABLE USER NOTE F1.1 Selection Table for the Application of Chapter F Sections				
Section in Chapter F	Cross Section	Flange Slenderness	Web Slenderness	Limit States
F7		C, NC, S	C, NC, S	Y, FLB, WLB, LTB
F8		N/A	N/A	Y, LB
F9		C, NC, S	N/A	Y, LTB, FLB, WLB
F10		N/A	N/A	Y, LTB, LLB
F11		N/A	N/A	Y, LTB
F12	Unsymmetrical shapes, other than single angles	N/A	N/A	All limit states

Y = yielding, CFY = compression flange yielding, LTB = lateral-torsional buckling, FLB = flange local buckling, WLB = web local buckling, TFY = tension flange yielding, LLB = leg local buckling, LB = local buckling, C = compact, NC = noncompact, S = slender, N/A = not applicable

← **Tabla 1.** Selección para la aplicación



Ángulos de alas iguales																				
Descripción	b	h	e	Masa	Área	d1	d2	Ángulo a	Eje X - X			Eje Y - Y			Eje U - U			Eje V - V		
									lx	Wx	rx	ly	Wy	ry	lu	Wu	ru	lv	Wv	rv
									cm4	cm3	cm									
L 20x 2	20	20	2	0,57	0,73	0,60	0,60	45,00	0,28	0,20	0,62	0,28	0,20	0,62	0,46	0,32	0,79	0,10	0,14	0,37
L 20 x 3	20	20	3	0,81	1,03	0,65	0,65	45,00	0,38	0,28	0,60	0,38	0,28	0,60	0,63	0,45	0,78	0,12	0,17	0,34
L 25x 2	25	25	2	0,73	0,93	0,72	0,72	45,00	0,56	0,32	0,78	0,56	0,32	0,78	0,92	0,52	1,00	0,20	0,23	0,47
L 25x 3	25	25	3	1,05	1,33	0,78	0,78	45,00	0,78	0,45	0,77	0,78	0,45	0,77	1,30	0,74	0,99	0,26	0,30	0,45
L 30 x 2	30	30	2	0,88	1,13	0,85	0,85	45,00	1,00	0,46	0,94	1,00	0,46	0,94	1,63	0,77	1,20	0,37	0,35	0,57
L 30x 3	30	30	3	1,28	1,63	0,90	0,90	45,00	1,40	0,67	0,93	1,40	0,67	0,93	2,32	1,09	1,19	0,49	0,46	0,55
L 30x 4	30	30	4	1,65	2,10	0,95	0,95	45,00	1,76	0,86	0,91	1,76	0,86	0,91	2,93	1,38	1,18	0,58	0,55	0,52
L 40x 2	40	40	2	1,20	1,33	1,10	1,10	45,00	2,44	0,84	1,26	2,44	0,84	1,26	3,96	1,40	1,61	0,92	0,65	0,78
L 40x 3	40	40	3	1,75	2,23	1,15	1,15	45,00	3,49	1,22	1,25	3,49	1,22	1,25	5,71	2,02	1,60	1,27	0,90	0,75
L 40x 4	40	40	4	2,28	2,90	1,20	1,20	45,00	4,44	1,59	1,24	4,44	1,59	1,24	7,23	2,59	1,59	1,55	1,10	0,73
L 40x 5	40	40	5	2,77	3,54	1,25	1,25	45,00	5,29	1,92	1,22	5,29	1,92	1,22	8,80	3,11	1,58	1,77	1,25	0,71
L 50x 2	50	50	2	1,51	1,93	1,35	1,35	45,00	4,85	1,33	1,59	4,85	1,33	1,59	7,85	2,22	2,02	1,85	1,05	0,98
L 50x 3	50	50	3	2,22	2,83	1,40	1,40	45,00	7,01	1,95	1,57	7,01	1,95	1,57	11,42	3,23	2,01	2,61	1,47	0,96
L 50x 4	50	50	4	2,90	3,70	1,45	1,45	45,00	9,01	2,54	1,56	9,01	2,54	1,56	14,76	4,18	2,00	3,25	1,84	0,94
L 50x 5	50	50	5	3,56	4,54	1,50	1,50	45,00	10,84	3,10	1,55	10,84	3,10	1,55	17,89	5,06	1,99	3,79	2,14	0,91

Tabla 2. Catálogo de ángulos y perfiles

1. Cálculo módulo plástico

$$Z_x = \frac{b * d^2}{4} \quad (3)$$
$$Z_x = 16000 [mm^3]$$

De acuerdo con el procedimiento de diseño estructural, se calcula los factores de carga y resistencia para la estructura.

2. LRFD

$$w_u = 1.4 * D \quad (4)$$
$$w_u = 95,60 \left[\frac{kgf}{mm} \right]$$

3. Momento

$$M_u = \frac{W_u * L^2}{8} \quad (5)$$
$$M_u = 172080 [kgf * mm]$$

4. Deflexión

$$\Delta_{m\acute{a}x} = \frac{L}{360} = 0,33 [mm]$$

5. Inercia

$$I = \frac{5 * W * L^4}{384 * E * \Delta_{m\acute{a}x}} \quad (6)$$

$$I = 27403,6 [mm^4]$$

6. LRFD

$$M_u \leq \phi b * M_n$$

$$M_u \leq \phi b * F_y * Z_{req}$$

$$Z_{req} = \frac{M_u}{\phi b * F_y} \quad (7)$$

$$Z_{req} = 7563,19 [mm^3]$$

Comparando los valores calculados del módulo plástico Z_x

$$\therefore Z_x > Z_{req}$$

$$16000 > 7563,19 \text{ Cumple}$$

Se selecciona el perfil **L40x40x4 [mm]** como el más adecuado para la construcción de la estructura metálica que será acoplada en la máquina de ensayos de fatiga R.R. Moore.

Cálculo de pernos de montaje

ANÁLISIS DE PERNOS

Pernos de alta resistencia en conexiones de deslizamiento crítico

La siguiente ecuación fue tomada de AISC 360-16; sección J3-4

$$R_u = \mu D_u h_f T_b n_s \quad (8)$$

Donde:

$$D_u = 1,13$$

$$n_s = 1$$

$$h_f = 1$$

$$\mu = 0,5$$

TABLE J3.1 Minimum Bolt Pretension, kips ^[a]			
Bolt Size, in.	Group A ^[a] (e.g., A325 Bolts)	Group B ^[a] (e.g., A490 Bolts)	Group C, Grade 2 ^[b] (e.g., F3043 Gr. 2 bolts)
1/2	12	15	—
5/8	19	24	—
3/4	28	35	—
7/8	39	49	—
1	51	64	90
1 1/8	64	80	113
1 1/4	81	102	143
1 3/8	97	121	—
1 1/2	118	148	—

^[a] Equal to 0.70 times the minimum tensile strength of bolts as specified in ASTM F3125/F3125M for Grade A325 and Grade A490 bolts with UNC threads, rounded off to nearest kip.

^[b] Equal to 0.70 times the minimum tensile strength of bolts, rounded off to nearest kip, for ASTM F3043 Grade 2 and ASTM F3111 Grade 2.

Tabla 3. Pretensión mínima del perno

Se selecciona inicialmente un perno 1/2 in.

$$D_p = \frac{1}{2} \text{ in}$$

$$T_b = 12 \text{ kips} = 5443,11 \text{ kgf}$$

Reemplazando:

$$R_n = (0,5)(1,13)(1)(5443,11 \text{ kgf})(1) = 3075,35 \text{ kgf/perno}$$

Resistencia nominal al corte del perno (sujetadores y piezas roscadas)

$$F_{nv} = 54 \text{ ksi} = 372 \text{ MPa}$$

TABLE J3.2 Nominal Strength of Fasteners and Threaded Parts, ksi (MPa)		
Description of Fasteners	Nominal Tensile Strength, F_{nt}, ksi (MPa)^[a]	Nominal Shear Strength in Bearing-Type Connections, F_{nv}, ksi (MPa)^[b]
A307 bolts	45 (310) ^[c]	27 (186) ^[c] ^[d]
Group A (e.g., A325) bolts, when threads are not excluded from shear planes	90 (620)	54 (372)

Tabla 4. Resistencia nominal al corte del perno

Área nominal del perno:

$$A_b = \frac{\pi D_p^2}{4} = 126,67 \text{ mm}^2$$

Se requiere de aproximadamente 4 pernos para garantizar suficiente capacidad, y estabilidad de la estructura.

$$n_b = 4 \text{ pernos}$$

Combinación de cargas

$$D = 70 \text{ [kgf]}$$

$$L = 8,36 \text{ [kgf]}$$

$$Pu = 1,2 * D + 1,6 * L \quad (9)$$
$$Pu = 1,2(70) + 1,6(8,36) = \mathbf{97,37 \text{ [kgf]}}$$

CORTANTE EN PERNOS

Si tomamos en cuenta que se requiere cuatro pernos para el montaje de la estructura. Cada perno soportara la cuarta parte de la fuerza aplicada:

$$R_p = \frac{P_u}{4} \quad (10)$$

$$R_p = \frac{97,376\text{kgf}}{4}$$

$$R_p = 24,344 \text{ kgf}$$

La resistencia al corte de un perno viene dada por la ecuación J3-1 de la AISC 360-16

$$R_{nv} = \phi F_{nv} A_b \quad (11)$$

$$R_{nv} = 0,75 (372\text{MPa})(126,67\text{mm}^2) = 35340,93 \text{ [N]} = 3603,77 \text{ [kgf]}$$

$$24,344 \text{ [kgf]} < 3603,77 \text{ [kgf]} \quad \text{Ok}$$

Perno seleccionado: Perno cabeza hexagonal interna 1/2 in ; cuatro unidades.

Proceso de Fabricación

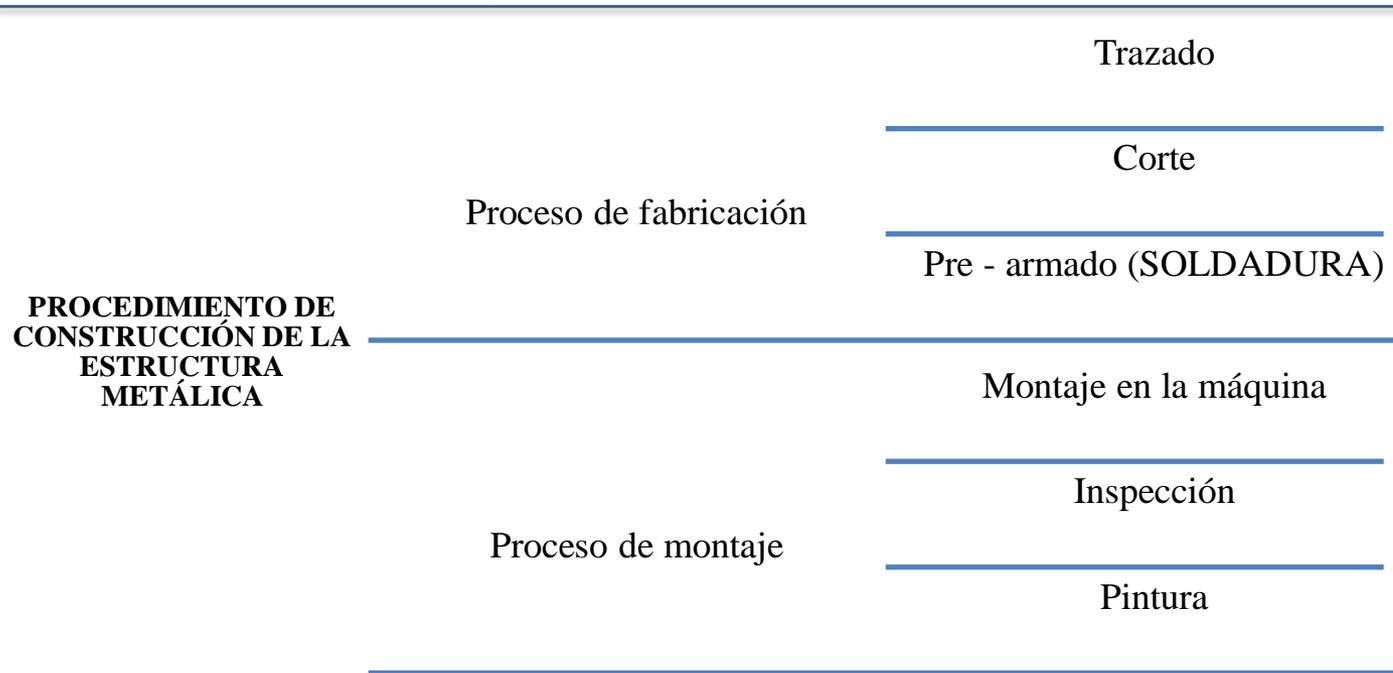


Figura 8. Proceso de Fabricación



Trazado

- Ángulo L 40x40x4 [mm]
- Placas 120x50x4 [mm]



Corte

- Bisel a 45°
- Corte recto



Pre-Armado

- Soldadura GMAW
- Escuadras Imantadas



Armado

- Unión Placas
- Unión Bases



Montaje

- Ubicación Estructura Metálica

Calibración máquina R.R. Moore

El proceso de calibración permite determinar la carga exacta que interactúa sobre la probeta al momento de realizar ensayos de fatiga en la máquina R.R. Moore de LMM.

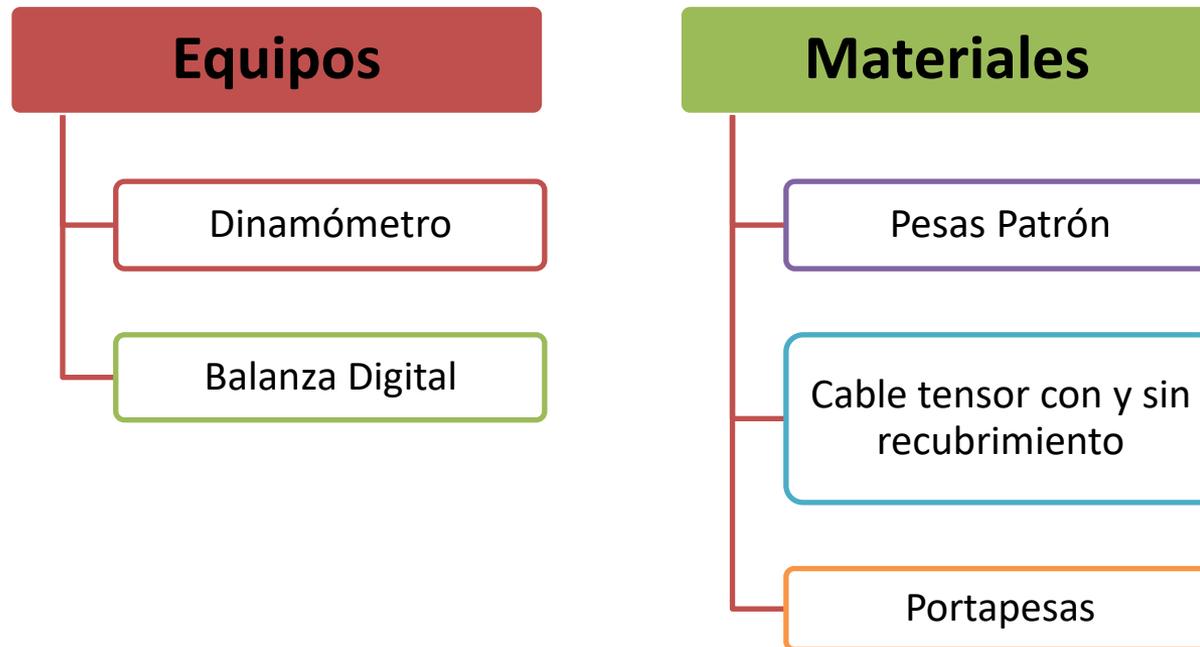


Figura 9. Calibración máquina R.R. Moore

Procedimiento de Calibración máquina R.R. Moore

Implementar el sistema de sujeción

Colocar el dinamómetro en el sistema montado

Colocar pesas patrón

Encerar la medida del dinamómetro

Tomar la medida marcada en el dinamómetro

Determinar el Error %

Cable tensor con recubrimiento

Tabla 5. Medidas teóricas y reales de cargas en [kg] para cable con recubrimiento

Teórico	Real								
	14,95		20,55		26,45		30,15		31,40
15,923	15,05	22,109	20,70	28,295	26,80	31,388	29,80	32,934	31,40
	15,00		21,00		27,00		29,85		31,30
Prom.	15,00	Prom.	20,75	Prom.	26,75	Prom.	29,93	Prom.	31,40
Error %	6,15	Error %	6,55	Error %	5,78	Error %	4,86	Error %	5,00

Cable tensor sin recubrimiento

Tabla 6. Medidas teóricas y reales de cargas en [kg] para cable sin recubrimiento

Teórico	Real								
	15,30		21,50		28,30		31,35		33,20
15,923	15,55	22,109	21,85	28,295	28,25	31,388	31,10	32,934	32,90
	15,70		21,80		28,25		31,85		33,10
Prom.	15,52	Prom.	21,72	Prom.	28,27	Prom.	31,23	Prom.	33,07
Error %	2,62	Error %	1,81	Error %	0,10	Error %	0,52	Error %	0,40

Determinación del módulo de Elasticidad



Figura 10. Máquina de ensayos universales



Figura 11. Strain Gages en probeta de MC

Determinación módulo de Elasticidad

Tabla 7. Datos geométricos probeta 30% de fibra de vidrio

DATOS GEOMÉTRICOS PROMEDIO	
Diámetro Externo	14,24 [mm]
Diámetro Interno	13,00 [mm]

Tabla 8. Ensayo para determinación del módulo de elasticidad del material compuesto

Carga [kg]	Deformación Unitaria [10 ⁻⁶]	Carga [kg]	Deformación Unitaria [10 ⁻⁶]	Carga [kg]	Deformación Unitaria [10 ⁻⁶]
	457,00		544,00		631,00
4,856	459,00	5,856	543,00	6,856	632,00
	457,00		544,00		629,00
Promedios	457,67		543,67		630,67

Determinación módulo de Elasticidad

Módulo de Elasticidad del Material Compuesto

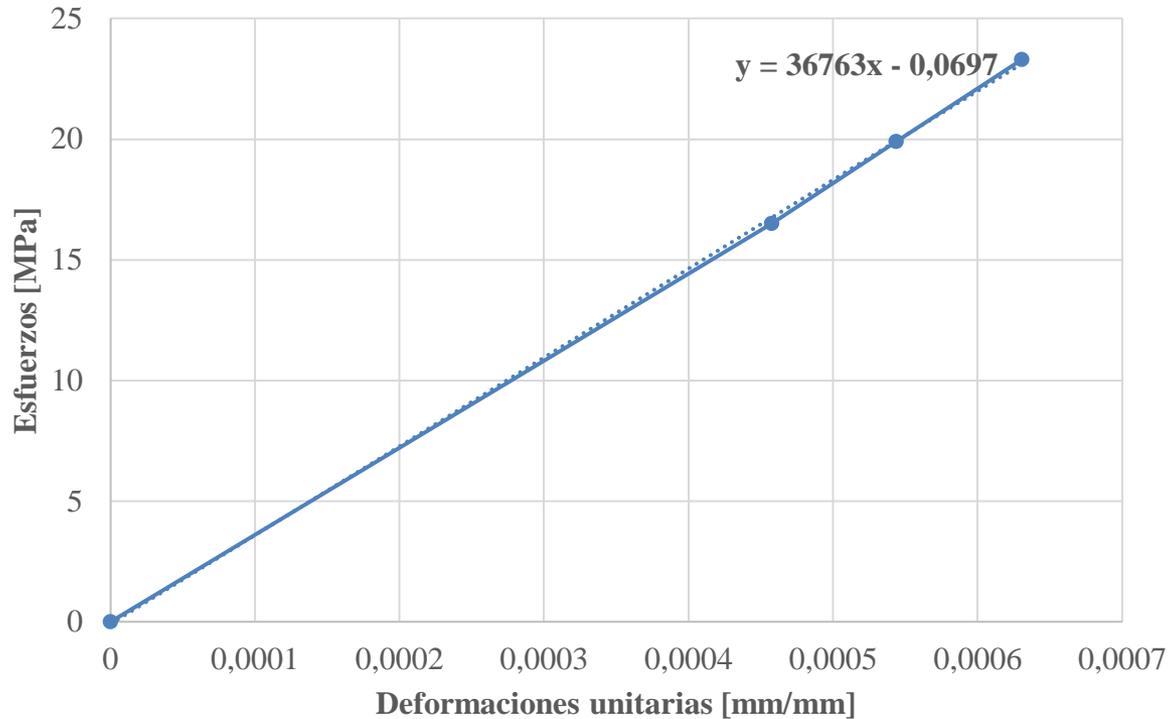


Figura 11. Gráfica módulo de elasticidad del MC

Nota. La figura #11 representa la gráfica esfuerzo vs deformación unitaria del material compuesto para la determinación del módulo de Elasticidad experimental.

Módulo de Elasticidad Teórico y Real

La pendiente de la función es el módulo de elasticidad del material:

$$E_{MC} = 36763 \left[\frac{N}{mm^2} \right] \rightarrow 374750,25 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]$$

Calculando el módulo de elasticidad con las propiedades mecánicas de los materiales.

$$E = V_f * E_f + V_m * E_m \quad (12)$$

$$V_f = 30 \% = 0,3$$

$$V_m = 1 - 0,3 = 0,7$$

$$E = 0,3 * 76x10^3 [MPa] + 0,7 * 4x10^3 [MPa]$$

$$E = 25600 [MPa] \quad \text{Módulo de elasticidad Teórico}$$

Cálculo Factor de Corrección

Aplicando la Ley de Hooke montada la probeta en la máquina R.R. Moore.

$$\sigma_1 = E * \epsilon \quad (13)$$

$$\sigma_1 = 374750,3 \left[\frac{kg}{cm^2} \right] * 1158,3 \times 10^{-6}$$

$$\sigma_1 = 434,08 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]$$

Se trabaja con la pesa de 12,373 [kgf]

$$F = 12,373 [kgf]$$

$$d = 20 [cm]$$

Calculando el momento.

$$M = \frac{F}{2} * d \quad (14)$$

$$M = \frac{12,373[kgf]}{2} * 20 [cm]$$

$$M = 123,6 [kgf * cm]$$

Calculando el esfuerzo aplicado.

$$\sigma_2 = \frac{123,6 [kgf * cm] x 0,712 [cm]}{0,0616 [cm^4]}$$

$$\sigma_2 = 1428,62 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]$$

Cálculo del % de corrección para la carga aplicada

Factor de corrección

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{434,08 [kg/cm^2]}{1428,62 [kg/cm^2]} = 0,3062 \quad \rightarrow \quad 30,62\%$$

Estudio de porcentaje en volumen de fibra a utilizar

Fracción Volumétrica $V_f=0,30$

Datos:

- $m_f = 10 [g]$
- $m_m = 10 [g]$
- $\rho_f = 2,58 \left[\frac{g}{cm^3} \right]$
- $\rho_m = 1,20 \left[\frac{g}{cm^3} \right]$

Partiendo de la Ley de Mezclas de los materiales compuestos:

$$M = m_f + m_m \quad (15)$$

Reemplazando los valores de masa:

$$M = 10 [g] + 10 [g]$$

$$M = 20 [g]$$

Estudio de porcentaje en volumen fibra a utilizar

Fracción Volumétrica $V_f=0,30$

Utilizando la expresión que relaciona la masa con el volumen y la densidad de un material, se obtiene:

$$m_f = \rho_f * v_f \quad (16)$$

Despejando la variable de volumen:

$$v_f = \frac{m_f}{\rho_f}$$

Reemplazando los valores de masa y densidad para la fibra de vidrio:

$$v_f = \frac{10 [g]}{2,58 \left[\frac{g}{cm^3} \right]}$$

$$v_f = 3,876 [cm^3]$$

Estudio de porcentaje en volumen fibra a utilizar

Fracción Volumétrica $V_f=0,30$

Calculando la misma expresión para la matriz de resina de poliéster:

$$v_m = \frac{10 [g]}{1,20 \left[\frac{g}{cm^3} \right]}$$

$$v_m = 8,333 [cm^3]$$

Resolviendo la ecuación de la Ley de Mezclas para la variable de Volumen:

$$V = v_f + v_m \quad (17)$$

$$V = 3,876 [cm^3] + 8,333 [cm^3]$$

$$V = 12,209 [cm^3]$$

Calculando el % de volumen para la fibra de vidrio y matriz de resina de poliéster, se tiene:

$$\%V_m = \frac{8,333 [cm^3]}{12,209 [cm^3]} = 0,68 \approx 0,70$$

$$\%V_f = \frac{3,876 [cm^3]}{12,209 [cm^3]} = 0,32 \approx 0,30$$

Estudio de porcentaje en volumen fibra a utilizar

Fracciones Volumétricas Finales:

Tabla 9. Fracciones volumétricas finales del material compuesto

DESCRIPCIÓN	PORCENTAJE 1	PORCENTAJE 2	PORCENTAJE 3
Matriz	50%	60%	70%
Fibra	50%	40%	30%

Análisis estadístico del tamaño de muestra

Para determinar la muestra se tomó como referencia la normativa ASTM E 739-10 “Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (ϵ -N) Fatigue Data”. (ASTM, 2015)

Tabla 10. Número de muestras de acuerdo con el tipo de prueba

Tipo de Prueba	Número mínimo de muestras
Preliminar y exploratorio (investigación exploratoria y pruebas de desarrollo)	6 a 12
Pruebas de investigación y desarrollo de componentes y muestras	6 a 12
Datos permitidos para diseño	12 a 24
Datos de confiabilidad	12 a 24

Análisis estadístico del tamaño de muestra

Aplicando conceptos de la estadística, el tamaño de la muestra de probetas de fibra de vidrio

$$n = \frac{Z\alpha^2 * p * q}{d^2} \quad (18)$$

Donde:

- $Z\alpha$ → El nivel de confianza
- d → Error máximo
- p → Proporción esperada (recomendable 0,95)
- $q = (1 - p)$ → Probabilidad que no ocurra

$$n = \frac{1,645^2 * 0,95 * 0,05}{0,05^2}$$
$$n = 42,49 \approx 42 \text{ probetas}$$

Dimensionamiento de la Probeta

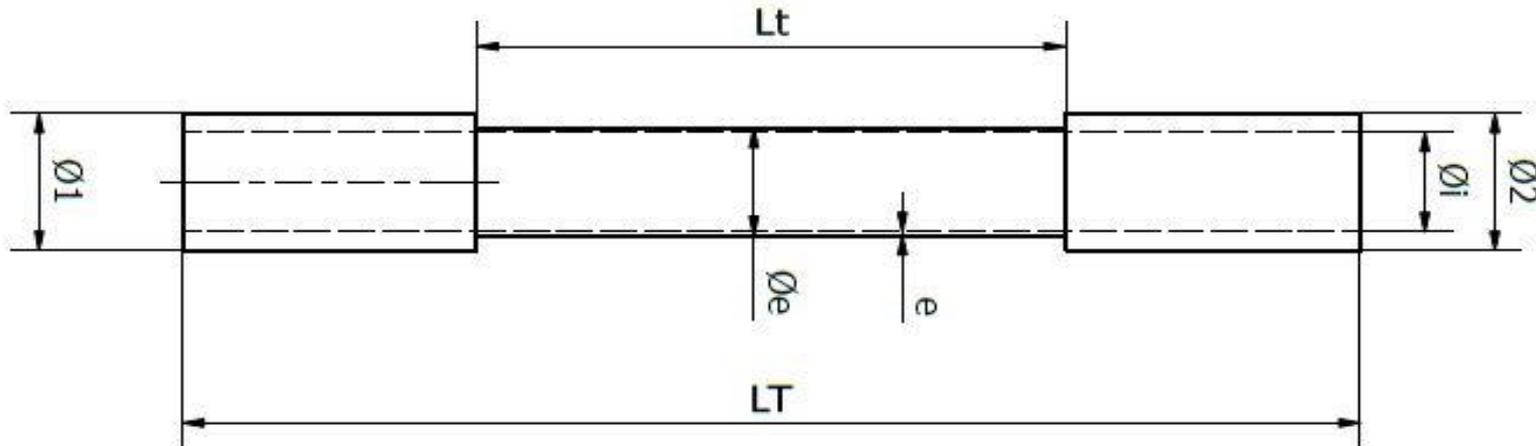


Figura 12. Esquema de la probeta de material compuesto

Donde:

- $L_T =$ Longitud total
- $L_t =$ Longitud de sección de trabajo
- $\phi_1 =$ Diámetro externo de refuerzo 1
- $\phi_2 =$ Diámetro externo de refuerzo 2
- $\phi_i =$ Diámetro interno de la sección de trabajo
- $\phi_e =$ Diámetro externo de la sección de trabajo
- $e =$ Espesor de la sección de trabajo

Proceso de Fabricación (Probetas)



Paso 1



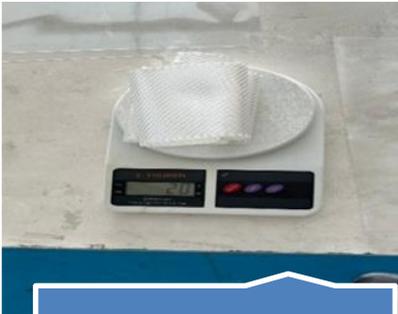
Paso 2



Paso 3



Paso 4



Paso 5



Paso 6



Paso 7



Paso 8

Proceso de Fabricación (Probetas)



Paso 9



Paso 10



Paso 11



Paso 12



Paso 13



Paso 14



Paso 15

Ensayo de Tracción

El ensayo de tracción determina la resistencia del material antes de la rotura, a partir del cual se define los porcentajes de esfuerzo que serán aplicados sobre la probeta de material compuesto para el ensayo a fatiga.



Puntos de Análisis para Ensayo a Fatiga

- $0,80 * \sigma_{sut}$
- $0,60 * \sigma_{sut}$
- $0,40 * \sigma_{sut}$
- $0,20 * \sigma_{sut}$

Figura 13. Máquina de Ensayos de Tracción -
AMSLER

Ensayo de Tracción

Ensayo de Tracción de Material Compuesto

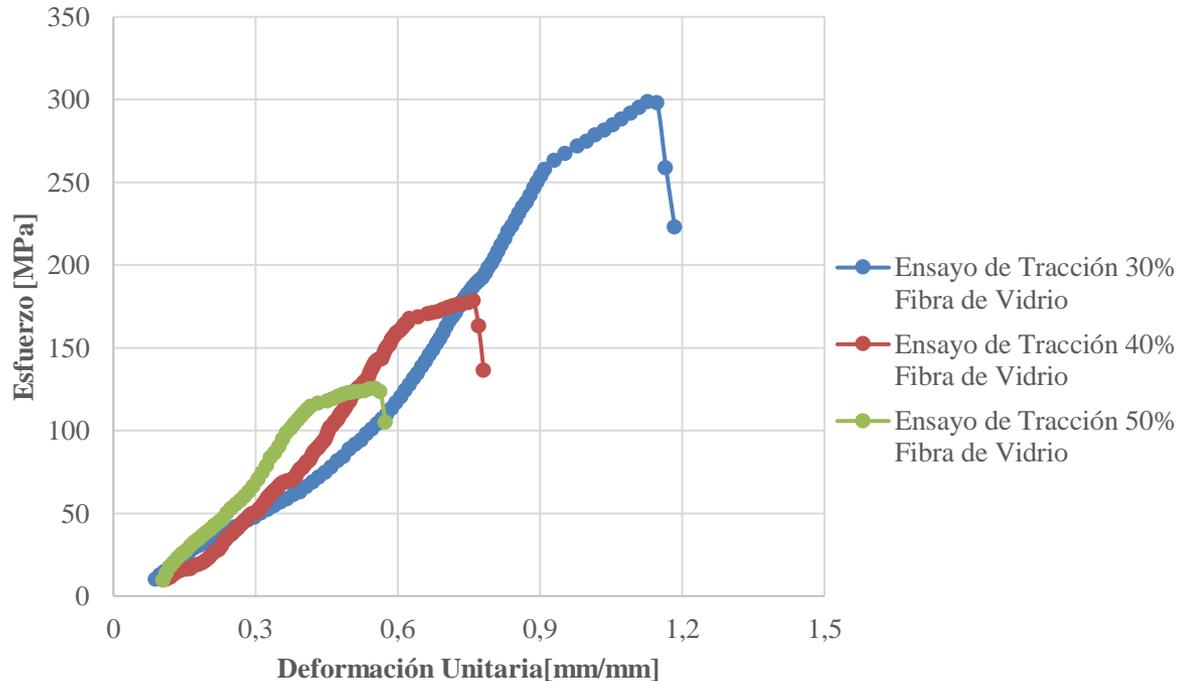


Figura 14. Ensayo de Tracción de MC para diferentes composiciones

Análisis: De acuerdo con la gráfica resultante de esfuerzo vs deformación unitaria en el ensayo de tracción, se obtuvo un esfuerzo máximo para el 30% de fibra de vidrio igual a 298,79 [MPa], para el caso del 40% de fibra un esfuerzo máximo de 178,63 [MPa] y para la composición del 50% de fibra un valor máximo de esfuerzo de 125,73 [MPa]; siendo la composición del 30% de fibra de vidrio en volumen la de mayor resistencia a la tracción.

Carga para ensayos de fatiga

Tabla 11. Carga para ensayo de fatiga – 50% Fibra de vidrio

Denominación	Carga Aplicada	Carga Corregida	Unidad
0,80 σ_{sut}	41,605	12,739	kgf
0,60 σ_{sut}	32,325	9,898	kgf
0,40 σ_{sut}	21,500	6,583	kgf
0,20 σ_{sut}	13,919	4,262	kgf

Tabla 12. Carga para ensayo de fatiga – 40% Fibra de vidrio

Denominación	Carga Aplicada	Carga Corregida	Unidad
0,80 σ_{sut}	60,884	18,643	kgf
0,60 σ_{sut}	45,419	13,907	kgf
0,40 σ_{sut}	30,779	9,425	kgf
0,20 σ_{sut}	20,105	6,156	kgf

Carga para ensayos de fatiga

Tabla 13. Carga para ensayo de fatiga – 30% Fibra de vidrio

Denominación	Carga Aplicada	Carga Corregida	Unidad
0,80 σ_{sut}	68,284	20,909	kgf
0,60 σ_{sut}	51,652	15,057	kgf
0,40 σ_{sut}	33,873	10,372	kgf
0,20 σ_{sut}	21,605	6,615	kgf

Determinación de curvas S-N

- ASTM E739-10 “Standards Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain – Life (ϵ -N) Fatigue Data”, (ASTM, 2015)

La ecuación que define y se ajusta para los ensayos de fatiga de material compuesto es de la forma:

$$N = aS^b \quad (19)$$

Donde:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X}) * (Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2} \quad (20)$$

$$a = \bar{Y} - b * \bar{X} \quad (21)$$

$$X_i = \log S_i \quad (22)$$

$$Y_i = \log N_i \quad (23)$$

Tabulación de datos – 50% Fibra de Vidrio

Tabla 14. Datos del ensayo de fatiga a flexión rotativa de material compuesto Vf=0,50

Descripción	Nro	Esfuerzo Aplicado	Ciclos
		[MPa]	
Ensayo 0,80*σ_{sut}	1	90,69	250
	2	78,59	400
	3	72,83	316
Ensayo 0,60*σ_{sut}	4	61,12	1250
	5	55,34	2050
	6	59,28	2550
Ensayo 0,40*σ_{sut}	7	39,71	3500
	8	47,86	3633
	9	43,85	4255
Ensayo 0,20σ_{sut}	10	28,34	22301
	11	27,18	26852
	12	30,02	40480

Tabulación de datos – 40% Fibra de Vidrio

Tabla 15. Datos del ensayo de fatiga a flexión rotativa de material compuesto $V_f=0,40$

Descripción	Nro	Esfuerzo Aplicado	Ciclos
		[MPa]	
Ensayo 0,80*σ_{sut}	1	97,90	200
	2	104,69	250
	3	117,89	280
Ensayo 0,60*σ_{sut}	4	93,35	450
	5	79,81	410
	6	71,42	480
Ensayo 0,40*σ_{sut}	7	49,34	4600
	8	57,46	6830
	9	60,73	8050
Ensayo 0,20σ_{sut}	10	44,10	41539
	11	43,82	45055
	12	40,97	50933

Tabulación de datos – 30% Fibra de Vidrio

Tabla 16. Datos del ensayo de fatiga a flexión rotativa de material compuesto Vf=0,30

Descripción	Nro	Esfuerzo Aplicado	Ciclos
		[MPa]	
Ensayo 0,80*σ_{sut}	1	145,81	133
	2	126,49	250
	3	124,98	466
Ensayo 0,60*σ_{sut}	4	109,96	633
	5	92,78	700
	6	86,49	813
Ensayo 0,40*σ_{sut}	7	59,15	5666
	8	58,76	7750
	9	52,10	11500
Ensayo 0,20σ_{sut}	10	51,36	52766
	11	49,14	58029
	12	47,24	60345

Determinación de curvas S-N

Esfuerzo - Vida Fibra de Vidrio - Resina de Poliéster

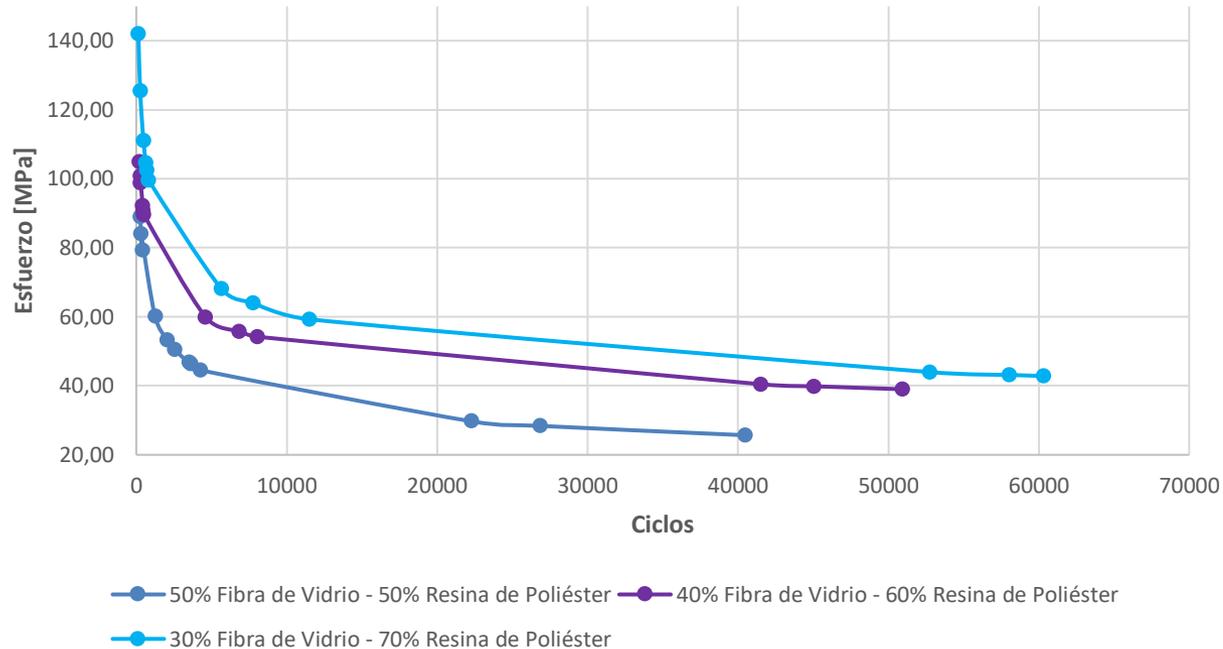


Figura 15. Curva S-N del Material Compuesto al 30%, 40%, 50% de Fibra de Vidrio

Análisis: En la figura #15 representa las gráficas de las curvas de vida del material compuesto en sus diferentes composiciones de fibra de vidrio y resina de poliéster; se evidencia que, a menor porcentaje en volumen de fibra de vidrio, tiene una mejor resistencia a la fatiga por flexión rotativa, así también la tendencia de las gráficas se mantiene y son exponencialmente decrecientes.

Análisis de la fractura



Figura 16. Rotura Probeta #5 – $V_f=30\%$

Análisis de la fractura



Figura 17. Rotura Probeta #7 – Vf=50%

Análisis de la fractura



Figura 18. Rotura Probeta #11 – Vf=40%

CONCLUSIONES

- El método de fabricación utilizado en las probetas de material compuesto a base de fibra de vidrio y resina de poliéster es el conocido como Layup.
- El módulo plástico de la estructura metálica dio un valor de 16.000 [mm³], siendo un parámetro que nos permita colocar hasta una carga máxima de 144,3 [kgf/mm] en el portapesas, sin que sufra deformaciones la estructura.
- El factor de corrección para ensayos de fatiga a flexión rotativa en la máquina R.R. Moore de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE es de 0,3062, factor que determinará la carga interactuante en la probeta, esto debido al efecto resorte que provoca el acople mecánico entre el motor y el eje de la máquina.

CONCLUSIONES

- En base al ensayo de tracción realizado en las probetas de material compuesto, se evidencia que las probetas con menor porcentaje de fibra de vidrio (30%) soportaron una carga mayor respecto a las probetas con mayor porcentaje de fibra de vidrio (50%), es decir, el promedio de la carga en el ensayo a tracción es de 298,79 [MPa] y 125,73 [MPa] respectivamente.
- Por la ecuación de ley de mezclas para materiales compuestos, tomando de referencia el porcentaje de fibra de vidrio (30%) y resina de poliéster (70%), el módulo de elasticidad teórico dio un valor de 25600 [MPa], mientras que por medio de la pendiente de la función obtenido del ensayo por medio de strain gages, el módulo de elasticidad práctico dio un valor de 36763 [MPa].

CONCLUSIONES

- El método utilizado para la determinación de curvas de vida del material compuesto es de tipo flexión rotativa sobre dos apoyos cargados (donde la carga es aplicada en los dos apoyos de la probeta) con un acople mecánico adicional, el cuál actúa como resorte en el eje, al aplicar las cargas en el portapesas.
- A menor porcentaje de fibra de vidrio en el material compuesto, tiende a una mayor resistencia a la fatiga por flexión rotativa, es decir, un porcentaje de 30% de fibra de vidrio resiste mayores esfuerzos respecto a la composición del 40% y 50% de fibra de vidrio, sin embargo, la tendencia de las gráficas se mantiene y son exponencialmente decrecientes; se asume que el comportamiento predominante en este material y expuesto al ensayo es la buena resistencia de la resina a esfuerzos de compresión otorgándole buenas propiedades mecánicas al material compuesto.

RECOMENDACIONES

- Realizar repetitivas mediciones de los diámetros externos e internos de la probeta para proporcionar una medida de la tendencia general, así obtendremos un valor exacto del esfuerzo a flexión.
- De acuerdo con la calibración realizada a la máquina de ensayos R.R. Moore, para próximos rediseños se deben instalar acoples tipo cardan entre el eje motriz del motor y el de la máquina, así se garantizará que la carga aplicada sea la que interactúa de forma pura sobre la probeta y a su vez su momento sea constante en la longitud de trabajo, eliminando pérdidas de carga aplicadas a la probeta.

RECOMENDACIONES

- Lijar las imperfecciones que se incrustan en el cambio de geometría de la probeta (refuerzo – área de trabajo), para así evitar concentradores de esfuerzos que generarían iniciación de grietas en el estado estático, esto se produce al ajustar los refuerzos a los mandriles de la máquina.
- El tiempo de secado de la probeta en el horno al vacío no debe sobrepasar los 60 minutos ya que por hojas de trabajo del CICTE ese es el tiempo establecido para probetas que conlleven resina de poliéster.

RECOMENDACIONES

- Al realizar el ajuste de los diámetros de refuerzo de la probeta al mandril de la máquina, verificar que el tope de acero este posicionado en la longitud correcta del diámetro interno de la probeta, así evitar estresar al material antes de la iniciación de los ciclos de la máquina.
- Realizar estudios experimentales sobre las aplicaciones emergentes para los materiales compuestos, tales como la fabricación aditiva (impresión 3D), estos estudios experimentales son fundamentales para avanzar en la comprensión de la combinación de las fibras de refuerzo con las resinas termoestables, así como para mejorar el diseño y la aplicación de estos materiales compuestos en la industria.

GRACIAS POR SU ATENCIÓN