



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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

**ESTUDIO DE LA FABRICACIÓN DE UN CASCO TÁCTICO MILITAR  
MEDIANTE INGENIERÍA INVERSA PARA EL USO DE LAS FUERZAS  
ARMADAS DEL ECUADOR.**

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

**Integrantes:**

Tasinchano Toapanta Roberto Luis  
Zhispón Rivera Jonathan Rubén

**Tutor:**

Ing. Xavier Rolando Sánchez Sánchez

**Sangolquí, 13 de marzo de 2024**



# OBJETIVOS

## OBJETIVO GENERAL

Analizar la fabricación y composición de un casco táctico militar mediante ingeniería inversa.

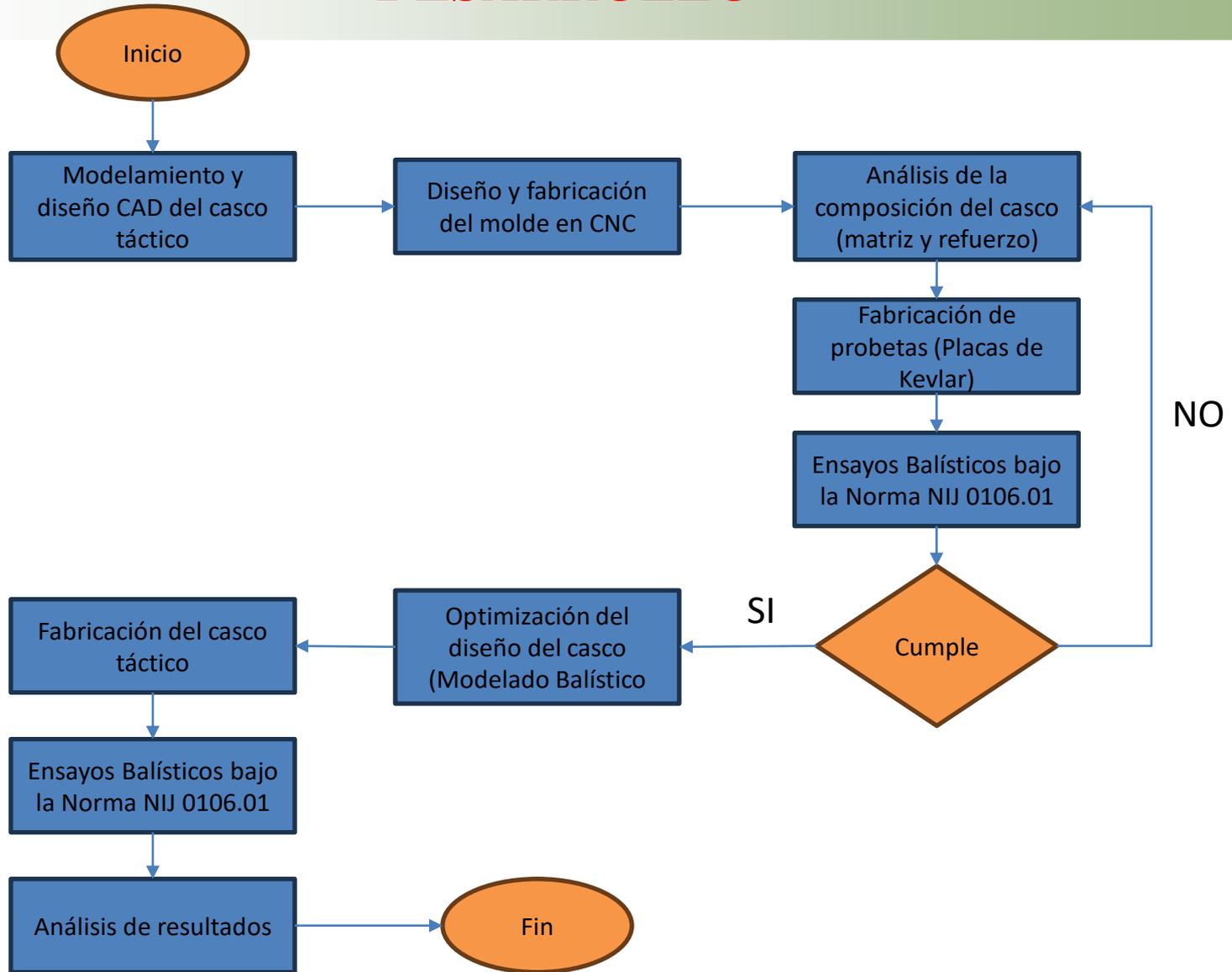
## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Fabricar un casco táctico militar para el uso del personal de las Fuerzas Armadas del Ecuador.

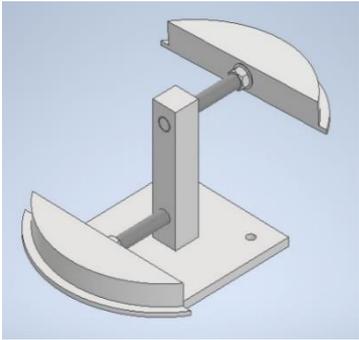
Ejecutar el casco fabricado a pruebas balísticas bajo la norma NIJ STD 0106.01 para cascos balísticos.

Evaluar el estado del casco táctico fabricado..

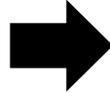
# DESARROLLO



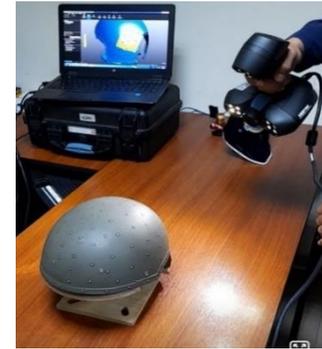
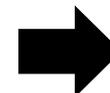
# Modelamiento y Diseño CAD



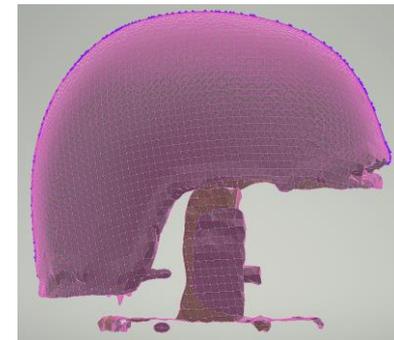
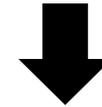
Diseño del soporte



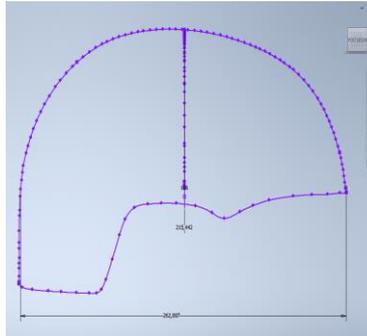
Marcadores de puntos de referencia



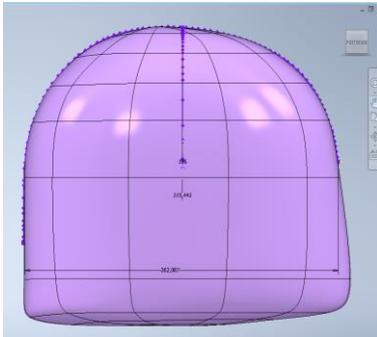
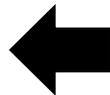
Escaneo 3D



Malla poligonal

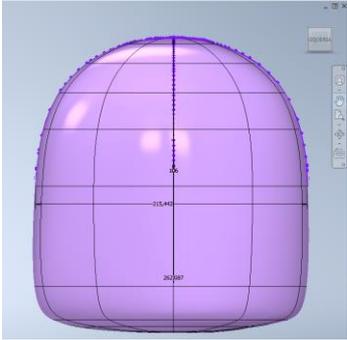


Perfiles extraídos del escaneo

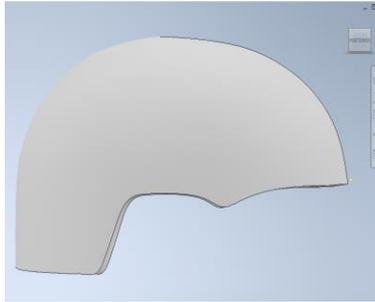
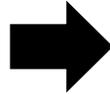


Free Form – Vista Lateral

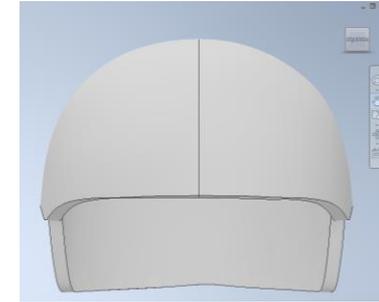
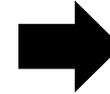
# Modelamiento y Diseño CAD



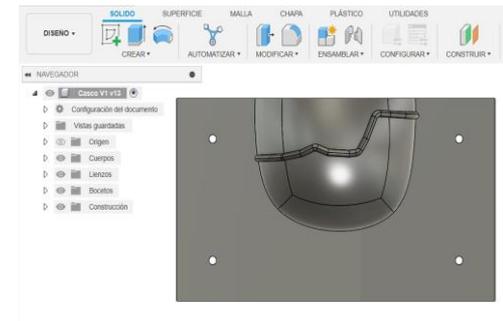
Free Form – Vista Frontal



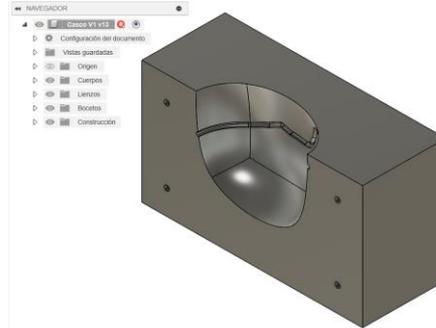
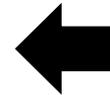
Casco táctico – Vista Lateral



Casco táctico – Vista Frontal



Molde del casco – Corte Vista Frontal



Molde del casco – Corte Vista Isométrica

# Fabricación del molde

## Quebracho colorado

Densidad:  
 $1.10 - 1.30 \text{ g/cm}^3$

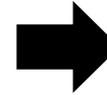
Resistencia a compresión:  
 $90 - 130 \text{ MPa}$

Resistencia a la Flexión:  
 $140 - 180 \text{ MPa}$

Dureza Janka:  
 $4,500 \text{ a } 5,000 \text{ lbf.}$



Construcción del tocho de madera

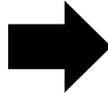


Maquinado CNC

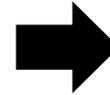
# Preparación del molde



Lijado y aplicación de  
Gelcoat

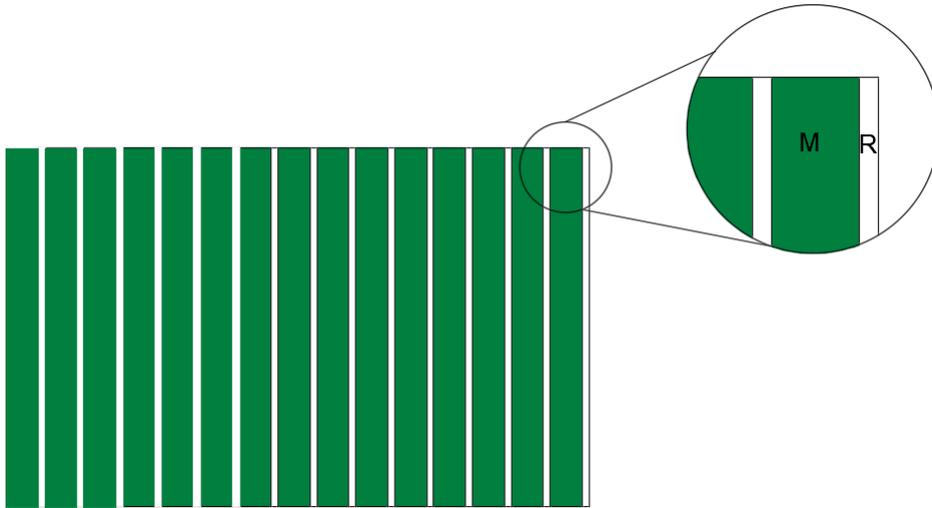


Cera desmoldante



Aplicación de PVA

# Análisis de una lámina de material compuesto



**Figura 1.**

Corte transversal de un laminado de material compuesto

Características de un laminado de material compuesto

- Número de Láminas
- Dimensiones
- Materiales
  - Matriz  
 $E_m, \sigma_m, \nu_m$
  - Refuerzo  
 $E_f, \sigma_f, \nu_f, V_f, \theta$
- Manufactura

# Análisis de una lámina de material compuesto

## Cantidad de volumen de fibras

### Refuerzo

$$\rho_r = \frac{m_r}{V_{re}}$$
$$V_{re} = \frac{m_r}{\rho_r} \quad (1)$$

### Matriz

$$\rho_m = \frac{m_m}{V_m}$$
$$V_m = \frac{m_m}{\rho_m} \quad (2)$$

### Material Compuesto

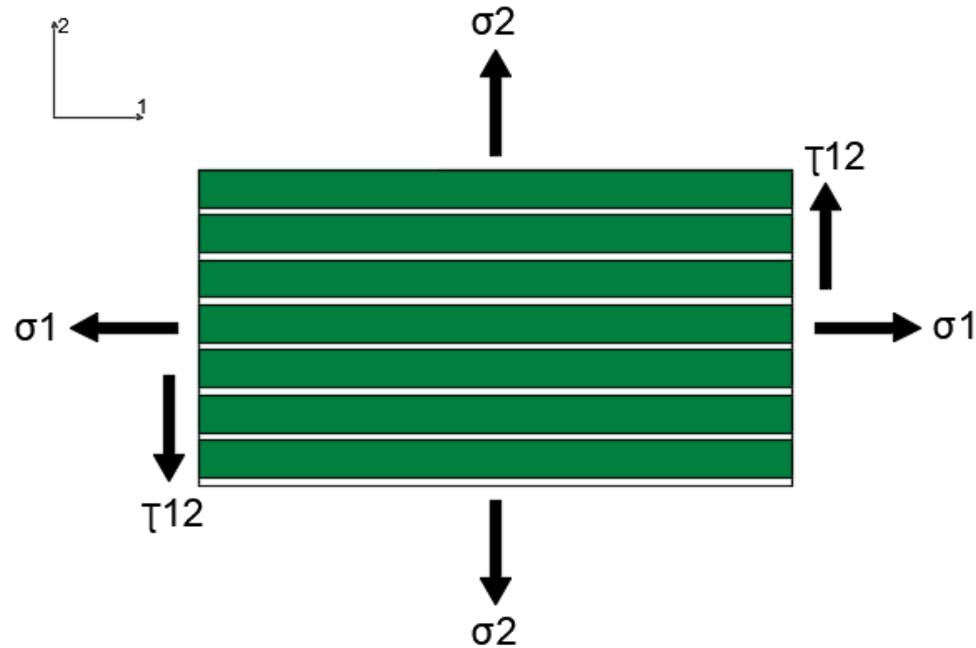
$$V_{MC} = V_m + V_r$$

### Cantidad de Volumen de fibras

$$V_r = \frac{V_{re}}{V_{MC}} \quad (3)$$

# Análisis de una lámina de material compuesto

## Estado de Esfuerzos



**Figura 2**

Diagrama de estado esfuerzos de un material compuesto

# Análisis de una lámina de material compuesto

## Modulo de tracción en dirección 1

### Fuerzas en Equilibrio

$$\sum F = 0 \quad (4)$$

$$F_1 - F_m - F_r = 0$$

$$\sigma_1 * A_1 = \sigma_m * A_m + \sigma_r * A_r \quad (5)$$

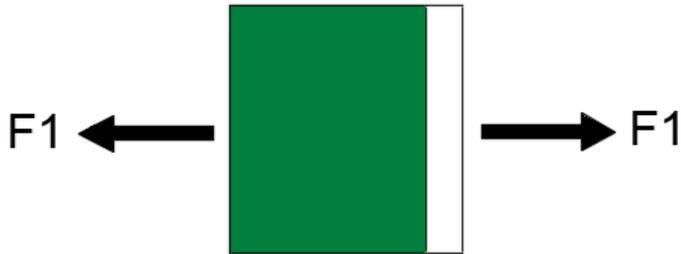
### Ley de Hooke

$$E_1 * A_1 * \varepsilon_1 = E_m * A_m * \varepsilon_m + E_r * A_r * \varepsilon_r$$

$$E_1 * A_1 * \frac{\delta_1}{l_o} = E_m * A_m * \frac{\delta_m}{l_o} + E_r * A_r * \frac{\delta_r}{l_o}$$

$$E_1 = E_m * V_m + E_r * V_r$$

$$E_1 = E_m * (1 - V_r) + E_r * V_r \quad (7)$$

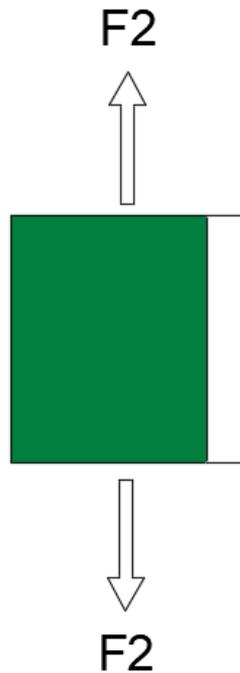


**Figura 3.**

Material compuesto sometido a tracción en dirección 1

# Análisis de una lámina de material compuesto

## Modulo de tracción en dirección 2



**Figura 4.**

Material compuesto sometido a tracción en dirección 2

## Esfuerzos iguales

$$\sigma_2 = \sigma_m = \sigma_r \quad (8)$$

$$E_2 = \frac{E_m * (1 + 2 * \beta * V_r)}{1 - \beta * V_r} \quad (9)$$

Donde:

$$\beta = \frac{\frac{E_r}{E_m} - 1}{\frac{E_r}{E_m} + 2} \quad (10)$$

# Análisis de una lámina de material compuesto

## Módulo de cortadura en dirección 1-2

$$G_{12} = G_m * \frac{(G_r + G_m) + V_r * (G_f - G_m)}{(G_r + G_m) - V_r * (G_f - G_m)} \quad (11)$$

## Módulo de Poisson en dirección 1-2

$$v_{12} = v_r * V_r + v_m(1 - V_r) \quad (12)$$

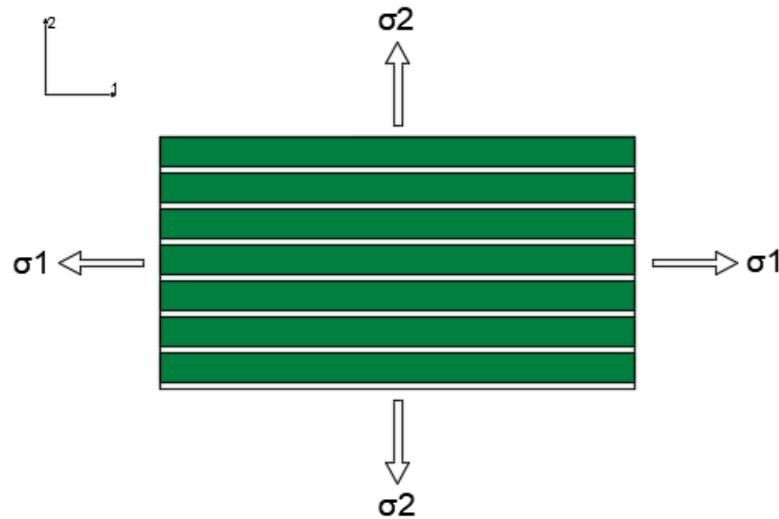
## Módulo de Poisson en dirección 2-1

$$v_{21} = v_{12} * \left( \frac{E_2}{E_1} \right) \quad (13)$$

# Análisis de una lámina de material compuesto

## Relaciones $\sigma - \varepsilon$ en las direcciones locales 1-2

### Relaciones $\sigma - \varepsilon$ paramétricas



### Deformación longitudinal

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_1} - \nu_{21} * \frac{\sigma_2}{E_2} \quad (15)$$

### Deformación transversal

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E_2} - \nu_{12} * \frac{\sigma_1}{E_1} \quad (16)$$

### Deformación por cortante

$$\gamma_{12} = \frac{\tau_{12}}{G_{12}} \quad (17)$$

**Figura 5.**

Diagrama de esfuerzos en las direcciones locales 1-2

# Análisis de una lámina de material compuesto

## Relaciones $\sigma - \varepsilon$ en las direcciones locales 1-2

Relaciones  $\sigma - \varepsilon$  matricial

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (18)$$

Deformaciones en el material compuesto en las direcciones 1-2

$$[\varepsilon_{12}] = [S] * [\sigma_{12}] \quad (19)$$

Donde:

$[S]$ : Matriz de flexibilidad

Esfuerzos en el material compuesto en las direcciones 1-2

$$[\sigma_{12}] = [Q] * [\varepsilon_{12}] \quad (20)$$

Donde:

$$[Q] = [S]^{-1}$$

# Análisis de una lámina de material compuesto

## Relaciones $\sigma - \varepsilon$ en las direcciones globales x-y

### Relaciones $\sigma - \varepsilon$ matricial

$$[\sigma_{12}] = [T_\sigma] * [\sigma_{xy}] \quad (21)$$

$$[\varepsilon_{12}] = [T_\varepsilon] * [\varepsilon_{xy}] \quad (22)$$

Para lo cual:

$$[T_\sigma] = \begin{bmatrix} \cos^2(\theta) & \sen^2(\theta) & 2 \sen(\theta)\cos(\theta) \\ \sen^2(\theta) & \cos^2(\theta) & -2 \sen(\theta)\cos(\theta) \\ -\sen(\theta)\cos(\theta) & \sen(\theta)\cos(\theta) & \cos^2(\theta) - \sen^2(\theta) \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$[T_\varepsilon] = \begin{bmatrix} \cos^2(\theta) & \sen^2(\theta) & \sen(\theta)\cos(\theta) \\ \sen^2(\theta) & \cos^2(\theta) & -\sen(\theta)\cos(\theta) \\ -2 \sen(\theta)\cos(\theta) & 2 \sen(\theta)\cos(\theta) & \cos^2(\theta) - \sen^2(\theta) \end{bmatrix} \quad (24)$$

# Análisis de una lámina de material compuesto

## Deformaciones del material en las direcciones globales x-y

$$[\varepsilon_{xy}] = [T_\varepsilon]^{-1} * [\varepsilon_{12}] \quad (25)$$

Deformaciones en las direcciones locales:

$$[\varepsilon_{12}] = [S] * [\sigma_{12}] \quad (26)$$

Reemplazando:

$$[\varepsilon_{xy}] = [T_\varepsilon]^{-1} * [S] * [\sigma_{12}] \quad (27)$$

Esfuerzos en las direcciones locales en función de las direcciones globales:

$$[\sigma_{12}] = [T_\sigma] * [\sigma_{xy}] \quad (28)$$

$$[\varepsilon_{xy}] = [T_\varepsilon]^{-1} * [S] * [T_\sigma] * [\sigma_{xy}]$$

$$[\varepsilon_{xy}] = \overline{[S]} * [\sigma_{xy}] \quad (29)$$

Donde:

$\overline{[S]}$ : Matriz de flexibilidad global

# Análisis de una lámina de material compuesto

## Relaciones $\sigma - \varepsilon$ en direcciones locales (1-2)

$$[\varepsilon_{12}] = [S] * [\sigma_{12}] \quad (30)$$

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix}$$

## Relaciones $\sigma - \varepsilon$ en direcciones globales (x-y)

$$[\varepsilon_{xy}] = [\bar{S}] * [\sigma_{xy}] \quad (31)$$

$$[\bar{S}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{yx}}{E_y} & 0 \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix}$$

# Análisis de un laminado de material compuesto

Estimación de características mecánicas del laminado:

$$\overline{[S]} = [T_\varepsilon]^{-1} * [S] * [T_\sigma] \quad (32)$$

$$\overline{[S]} = \begin{bmatrix} \bar{S}_{11} & \bar{S}_{12} & 0 \\ \bar{S}_{21} & \bar{S}_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{S}_{33} \end{bmatrix}$$

Módulo de Tracción

$$E_x = \frac{1}{\bar{S}_{11}} \quad (33)$$

$$E_y = \frac{1}{\bar{S}_{22}} \quad (34)$$

Módulo de Cizalla o Cortadura

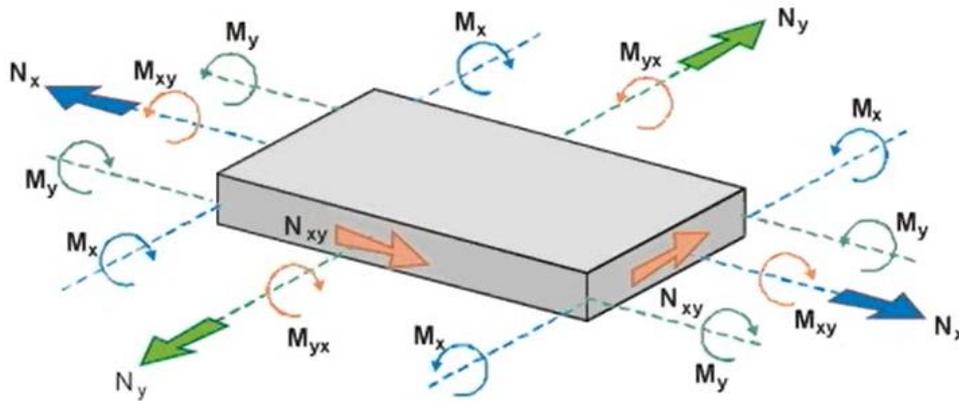
$$G_{xy} = \frac{1}{\bar{S}_{33}} \quad (35)$$

Módulo de Poisson

$$v_{xy} = -E_x * \bar{S}_{21} \quad (36)$$

$$v_{yx} = -E_y * \bar{S}_{12}$$

# Análisis de un laminado de material compuesto

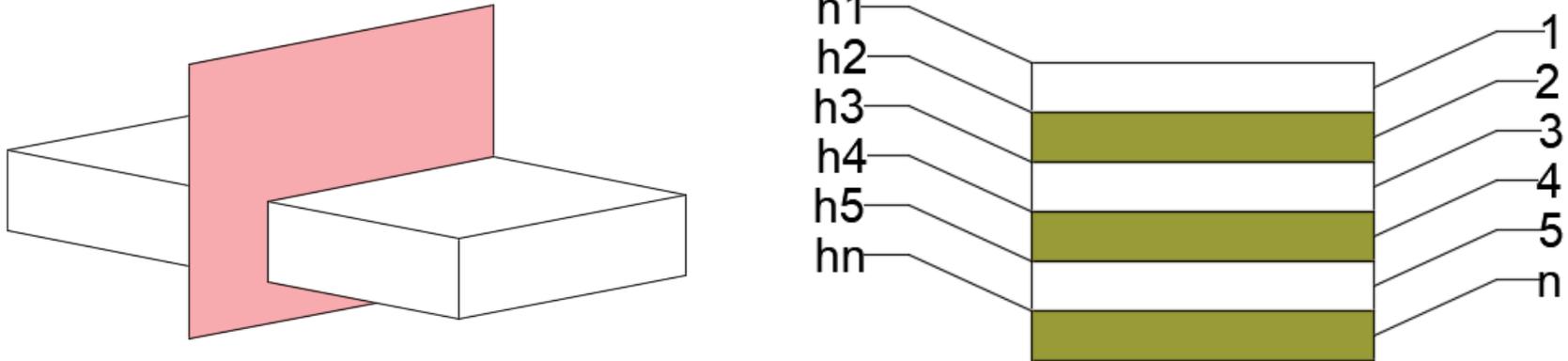


**Figura 6.**  
Diagrama de esfuerzos en las direcciones  
globales x,y

Características de un laminado de  
material compuesto

- Número de Láminas
- Dimensiones
- Materiales
- Matriz
  - $E_m, \sigma_m, \nu_m$
- Refuerzo
  - $E_f, \sigma_f, \nu_f, V_f, \theta$

# Análisis de un laminado de material compuesto

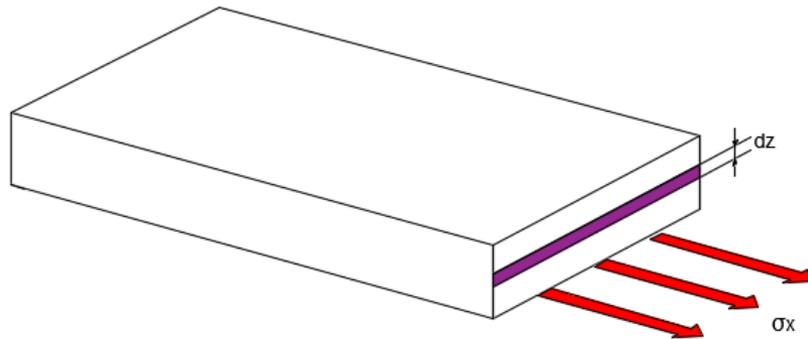


**Figura 7.**  
Corte transversal de un laminado de material compuesto

Espesor:

$$e = h_i - h_{i-1}$$

# Análisis de un laminado de material compuesto



**Figura 8.**  
Análisis del esfuerzo perpendicular en el eje x de un material compuesto

$$N_x = \int \sigma_x dz \quad (37)$$

## Arreglo matricial

### Fuerza

$$[N] = \int [\sigma] dz \quad (38)$$

### Momento

$$[M] = \int [\sigma] * z dz \quad (39)$$

### Deformación

$$\varepsilon(z) = \varepsilon + z * c \quad (40)$$

# Análisis de un laminado de material compuesto

Aplicando la Ley de Hooke

$$\sigma(z) = [\bar{Q}] * [\varepsilon] + [\bar{Q}] * z * [c] \quad (41)$$

Fuerza Total

$$[N]_T = \sum_{i=1}^{ln} [N]_i = \sum_{i=1}^{ln} \int_{h_{i-1}}^{h_i} [\sigma]_i * dz \quad (42)$$

$$[N]_T = \sum_{i=1}^{ln} \left\{ [\bar{Q}] * [\varepsilon] * \int_{h_{i-1}}^{h_i} dz + [Q] * [c] * \int_{h_{i-1}}^{h_i} z dz \right\}_i \quad (43)$$

$$[N]_T = \sum_{i=1}^{ln} \left\{ \underbrace{[\varepsilon] * [\bar{Q}] * (h_i - h_{i-1})}_{[A]} + \underbrace{[c] * [\bar{Q}] * \frac{1}{2} * (h_i^2 - h_{i-1}^2)}_{[B]} \right\}_i \quad (44)$$

$$[N]_T = [A] * [\varepsilon] + [B] * [c] \quad (45)$$

# Análisis de un laminado de material compuesto

## Momento Total

$$[M]_T = \sum_{i=1}^{ln} [M]_i = \sum_{i=1}^{ln} \int_{h_{i-1}}^{h_i} [\sigma]_i * z * dz \quad (46)$$

$$[M]_T = \sum_{i=1}^{ln} \left\{ [\overline{Q}] * [\varepsilon] * \int_{h_{i-1}}^{h_i} z dz + [Q] * [c] * \int_{h_{i-1}}^{h_i} z^2 dz \right\}_i \quad (47)$$

$$[M]_T = \sum_{i=1}^{ln} \left\{ \underbrace{[\varepsilon] * [\overline{Q}] * \frac{1}{2} * (h_i^2 - h_{i-1}^2)}_{[A]} + \underbrace{[c] * [\overline{Q}] * \frac{1}{3} * (h_i^3 - h_{i-1}^3)}_{[B]} \right\}_i \quad (48)$$

$$[M]_T = [B] * [\varepsilon] + [D] * [c] \quad (49)$$

# Análisis de una laminado de material compuesto

## Expresión Paramétrica

$$[N]_T = [A] * [\varepsilon] + [B] * [c] \quad (50)$$

$$[M]_T = [B] * [\varepsilon] + [D] * [c] \quad (51)$$

## Expresión Matricial

$$\begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \varepsilon \\ c \end{bmatrix} \quad (52)$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ \beta & d \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} \quad (53)$$

# Análisis de un laminado de material compuesto

Si tomamos a  $[M] = 0$

$$[\varepsilon] = a * [N] \quad (54)$$

Donde:

$$[N] = h_T * [\sigma] \quad (55)$$

Reemplazando en la ecuación de la deformación

$$[\varepsilon] = a * h_T * [\sigma] \quad (56)$$

Matriz de esfuerzos en función de la deformación

$$h_T * [a] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{yx}}{E_x} & 0 \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix}$$

# Análisis de un laminado de material compuesto

Estimación de características mecánicas del laminado:

$$[a] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} \end{bmatrix}$$

Módulo de Tracción

$$E_x = \frac{1}{a_{11} * h_T} \quad (57)$$

$$E_y = \frac{1}{a_{22} * h_T} \quad (58)$$

Módulo de Cizalla o Cortadura

$$G_{xy} = \frac{1}{a_{33} * h_T} \quad (59)$$

Módulo de Poisson

$$v_{xy} = -E_x * a_{21} * h_T \quad (60)$$

$$v_{yx} = -E_y * a_{12} * h_T \quad (61)$$

# Análisis de un laminado de material compuesto

Estimación de características mecánicas del laminado:

<b>Propiedades de los materiales</b>		
<b>Matriz (Cemento de Contacto)</b>		
Modulo a la tracción	0,007	GPa
Modulo de corte	0,00077	GPa
Modulo de Poisson	0,5	--
<b>Refuerzo (Kevlar 49)</b>		
Modulo a la tracción	131	GPa
Modulo de corte	19	GPa
Modulo de Poisson	0,36	--

<b>PROPIEDADES MECÁNICAS DEL LAMINADO DE MATERIAL COMPUESTO</b>		
REFUERZO 0°-90° DIRECCIONES LOCALES	Ex	55,63 GPa
	Ey	55,63 GPa
	Gxy	0,02 GPa
	vxy	0,44
	vyx	0,44
REFUERZO 45° DIRECCIONES GLOBALES	Ex	62,5 GPa
	Ey	62,5 GPa
	Gxy	0,07 GPa
	vxy	0,49
	vyx	0,49

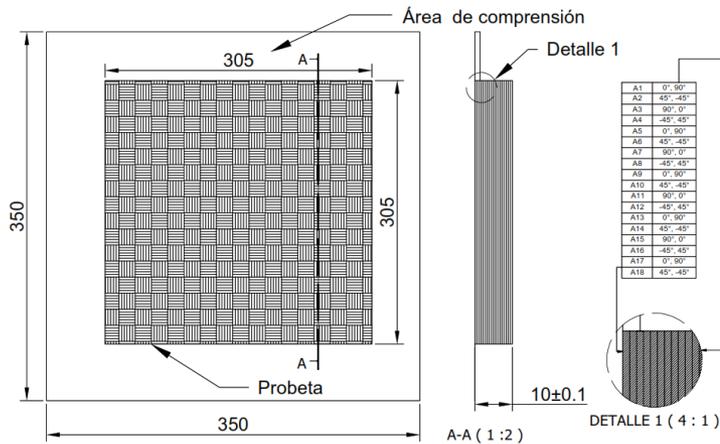
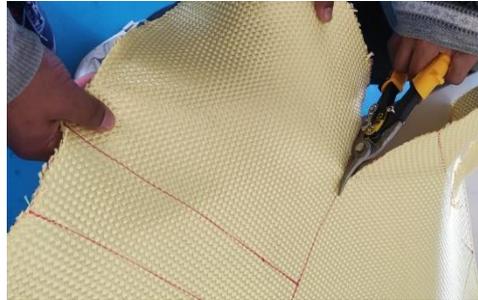
# Fabricación de las placas de Kevlar

## Dimensiones:

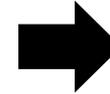
Norma NIJ 0106.01

12x12 in

350 x 350 mm



Trazado y corte de Láminas de Kevlar



Aplicación del cemento de contacto y curado

# Análisis de impacto en un material compuesto

La norma NIJ 0106.01, titulada "Cascos balísticos", clasifica los cascos balísticos en tres niveles de amenaza en función de su capacidad para resistir la penetración y el impacto contundente. Estos niveles son el Nivel IIA, el Nivel II y el Nivel IIIA, siendo el Nivel IIIA el que ofrece el mayor nivel de protección.

**Tabla 1**

*Exigencia de nivel de protección balístico NIJ 0106.01*

Calibre	Tipo de bala	Peso del cartucho	Longitud del cañón	Velocidad	Impactos requeridos por muestra
0.44	SWC	15.55 gr	14 a 16 cm	426 ± 15 m/s	5
Magnum		240 gr	5.5 a 6.25 in	1400 ± 50 ft/s	
9 mm	FMJ	8.0 gr	24 a 26 cm	426 ± 15 m/s	5
		124 gr	9.5 a 10.25 in	1400 ± 50 ft/s	

*Nota.* La tabla detalla las especificaciones de las municiones, velocidad de impacto, etc., que se realiza en los ensayos balísticos. Tomado de *NIJ Standard for Ballistic Helmets* (pg.9), (National Institute of Justice., 1981)

# Análisis de impacto en un material compuesto

## Balance de energía



**Figura 9.**

Análisis de velocidad del proyectil a través de las capas de kevlar

$$E_{mec1} - |W_{F_{resistencia}}| = E_{mec2}$$

$$\frac{1}{2}mV_1^2 + mgh_1 - |F_R \cdot \Delta x \cdot \cos(180^\circ)| = \frac{1}{2}mV_2^2 + mgh_2$$

$$\frac{1}{2}mV_1^2 - |F_R \cdot \Delta x \cdot (-1)| = \frac{1}{2}mV_2^2$$

# Análisis de impacto en un material compuesto

*Fuerza de arrastre*

$$F_R = \frac{1}{2} \rho v^2 C_d A$$

Dónde:

- $\rho$  es la densidad del aire
- $v$  es la velocidad de la bala en el aire
- $C_d$  es el coeficiente de arrastre que depende de la forma del objeto
- $A$  es el área de proyección perpendicular a la dirección del movimiento

*Coeficiente de arrastre  
de una bala G1*

$$C_d = 0.5191$$

$$\rho_{\text{aire}} = 1.2 \text{ kg/m}^3$$

*Cálculo del área de la sección transversal de la bala*

Diámetro del proyectil:  $\phi = 0.355 \text{ in} \cong 9.017 \text{ mm}$

$$A = \pi * \frac{\phi^2}{4}$$

$$A = \pi * \frac{(9.017 \text{ [mm]})^2}{4}$$

$$A = 63.86 \text{ [mm}^2] \approx 6.386 \times 10^{-5} \text{ [m}^2]$$

# Análisis de impacto en un material compuesto

Reemplazando los valores para el cálculo de la fuerza de arrastre

$$F_R = \frac{1}{2} \left( 1.2 \frac{kg}{m^3} \right) \left( 440 \frac{m}{s} \right)^2 (0.5191) (6.386 \times 10^{-5} m^2)$$
$$F_R = 3.85 [N]$$

Despejando la velocidad de impacto en el punto  $V_2$  por medio del balance de energía:

$$V_2 = \sqrt{\frac{2 \left( \frac{1}{2} m V_1^2 - F_R \Delta x \right)}{m}}$$
$$V_2 = \sqrt{\frac{2 \left( \frac{1}{2} (0.008 kg) \left( 441 \frac{m}{s} \right)^2 - (3,85 N)(5m) \right)}{(0.008 kg)}}$$
$$V_2 = 434,48 \left[ \frac{m}{s} \right]$$

# Análisis de impacto en un material compuesto

La principal forma de caracterizar el rendimiento de un sistema fibroso es mediante las fórmulas desarrolladas por (Hymas, Lacey, Rohrbach, Gillard, & Berkey, 2019)

$$\Gamma_0 = \frac{\rho h}{\frac{m}{A}}$$

$$V_{50} = (1 + \Gamma_0) \sqrt{\frac{2Ah\sigma_{max}}{m\Gamma_0\varepsilon_{max}^{0.25}}}$$

- $\Gamma_0$ , comparación de la densidad areal del tejido con la bala.
- $V_{50}$  velocidad crítica en la cual un proyectil tiene una probabilidad específica de penetrar un material balístico durante pruebas estándar.
- $\rho$ , densidad del tejido
- $h$ , espesor el tejido
- $m$ , masa del proyectil
- $A$ , área transversal de la bala
- $\sigma_{max}$  es la resistencia a la tracción del tejido.
- $\varepsilon_{max}$  es la tensión máxima que puede soportar el tejido antes de que se rompa una fibra.

# Análisis de impacto en un material compuesto

**Tabla 2**

*Propiedades mecánicas de diferentes fibras de aramida*

Material	Clase	Densidad [ $kg/m^3$ ]	Módulo elástico [ $GPa$ ]	Resistencia a la tracción [ $GPa$ ]	Tensión de rotura [%]
Kevlar 29	P-aramida	1440	70.5	2.92	3.6
Kevlar 49	P-aramida	1440	112	3.0	2.4
Kevlar 129	P-aramida	1450	99	3.4	3.3

*Nota.* La tabla hace referencia a las propiedades mecánicas que presentan las distintas fibras de kevlar. Tomado de *Análisis experimental y numérico del comportamiento mecánico del material compuesto base aramida empleado en protecciones personales* (pg.38), por (Díaz, 2021)

# Análisis de impacto en un material compuesto

Reemplazando valores se obtiene la comparación de la densidad areal del tejido con la bala  $\Gamma_0$  y  $V_{50}$ .

$$\Gamma_0 = \frac{\left(1440 \frac{kg}{m^3}\right) (7.8 \times 10^{-4} m)}{\frac{0.008 kg}{(6.386 \times 10^{-5} m^2)}}$$

$$\Gamma_0 = 0.00896$$

$$V_{50} = (1 + 0.00896) \sqrt{\frac{2(6.386 \times 10^{-5} m^2)(7.8 \times 10^{-4} m)(3 \times 10^9 Pa)}{(0.008 kg)(0.00896)(2.4)^{0.25}}}$$

$$V_{50} = 583.8 \left[ \frac{m}{s} \right]$$

# Análisis de impacto en un material compuesto

En la Tabla 2 se especifica la cantidad de capas requeridas, la cual varía de acuerdo a los estándares de  $V_{50}$ .

**Tabla 3**

*Número de capas necesarias para  $V_{50}$  requeridos*

Requisito $V_{50}$	Material Usado	Número de capas
550 m/s	Aramida solamente	14
600 m/s	Aramida solamente	16
650 m/s	Aramida solamente	18

*Nota.* La Tabla detalla el número de capas de aramida que son requeridas dependiendo el valor de  $V_{50}$ . Tomado de *Casco de fibra aramida tipo kevlar para tropas de infantería ligera* (pg.3), (Ejercito Argentino, 2004)

Para una velocidad  $V_{50} = 583.8 \left[ \frac{m}{s} \right]$ , se necesitaría 16 capas del tejido de kevlar 49, para la construcción del casco táctico.

# Análisis de impacto en un material compuesto

Se puede determinar la velocidad de la bala en cada capa después de romperse, por medio de la siguiente fórmula obtenida de (Hymas, Lacey, Rohrbach, Gillard, & Berkey, 2019):

$$V_i = \frac{V_p}{1 + \Gamma_0} e^{-\frac{\sum_{i=2}^n \Gamma_0 \psi_1^2 + \Gamma_0 \psi_{i,fl}^2 - \Gamma_0}{1 + \Gamma_0}}$$

Dónde:

- $V_p$  es la velocidad del proyectil ( $V_p = 438.29 \left[ \frac{m}{s} \right]$ )
- $\psi_i$  es el número de la capas activa o penetrada por la bala
- $\psi_{i,fl}$  es el número de la capa que se activa una vez que la bala atraviese la anterior capa.



**Figura 10.**

Esquema del impacto de una bala en un sistema fibroso.

# Análisis de impacto en un material compuesto

**Tabla 4**

*Velocidad de impacto del proyectil 9 mm 124 grain en cada capa*

N° Capas	Velocidad $\left[\frac{m}{s}\right]$
2	305,96
3	271,68
4	231,88
5	190,22
6	149,99
7	113,67
8	82,81
9	57,98
10	39,02
11	25,24
12	15,69
13	9,38
14	5,39
15	2,97
16	1,58
17	0,00
18	0,00

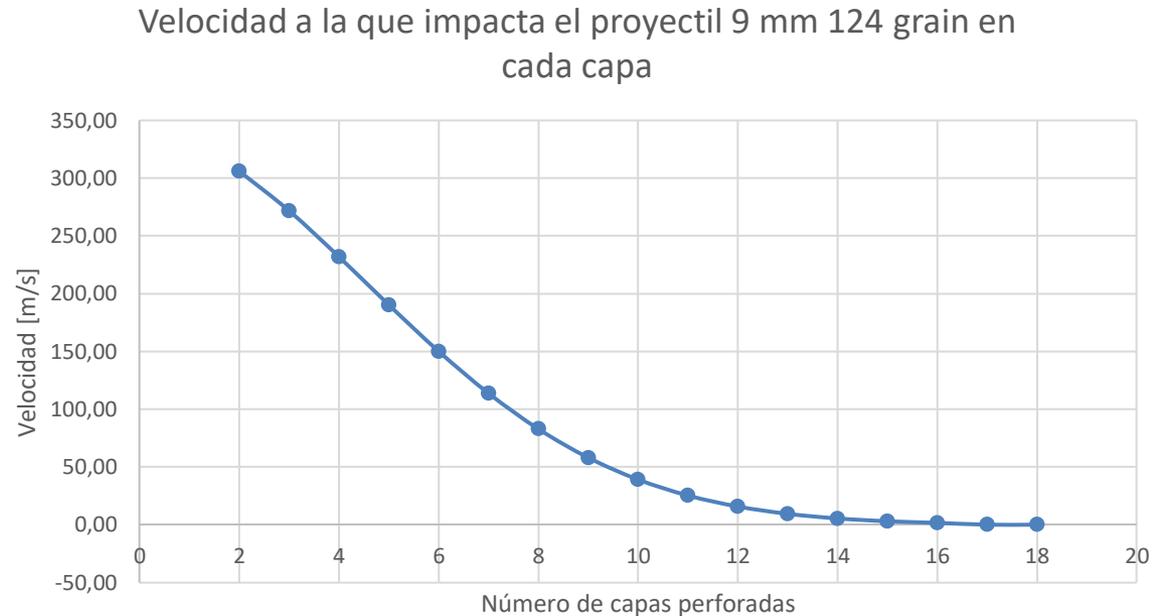
En la Tabla 4 se detallan los resultados obtenidos al iterar la fórmula para determinar la velocidad con la que la bala impacta cada una de las láminas de kevlar.

*Nota.* La tabla proporciona información detallada sobre el número de capas que la bala atraviesa y la velocidad con la que impacta en cada una de ellas.

# Análisis de impacto en un material compuesto

**Figura 10**

Modelo matemático de la velocidad del proyectil 9 mm 124 grain con la que impacta y penetra una serie de capas de kevlar 49.

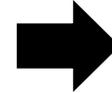


El modelo matemático obtenido dio como resultado la velocidad a la que impacta la bala cada capa hasta llegar a la N°16, en dónde es prácticamente nula, es decir que no la penetraría, y solo existiría algún trauma en ella.

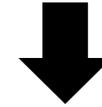
# Fabricación del Casco Táctico



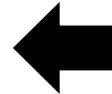
Molde Adaptado a la Forma del Casco



Corte de láminas



Curado y endurecimiento

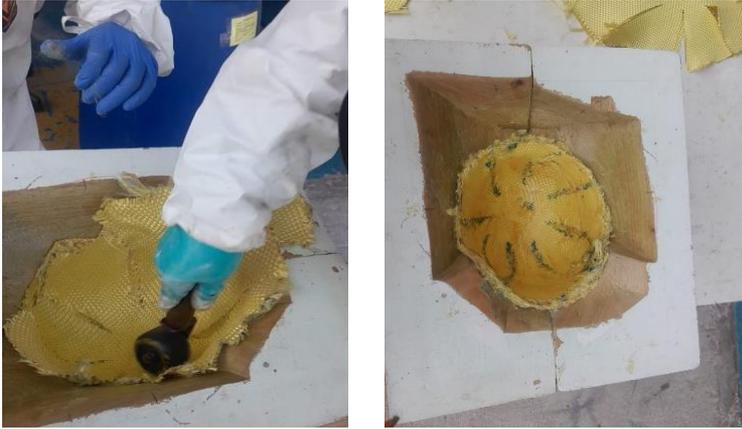


Refuerzo de fibra de vidrio

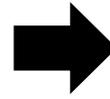


Capa externa

# Fabricación del Casco Táctico



Laminación del Casco Táctico



Casco Táctico

## Ensayos de Probetas

Forma cuadrada de 350 mm x 350 mm

*3 Probetas*

- Matriz ( 1 Resina, 2 Cemento de Contacto)
- Refuerzo (3 Kevlar)

## Parámetros norma NIJ 106.01

- Proyectoil calibre 9 mm FMJ 124 grains de 448 m/s  $\pm$  9.1 m/s
- Distancia requerida desde el cañón: 5 m
- Temperatura ambiente: Entre 20 °C – 28°C
- Humedad relativa: Entre 30% - 70%.
- 5 impactos por cada ensayo
- Angulo de incidencia 0°
- Numero de impactos: 5

# Análisis de Resultados

## Ensayo N.º 1

### Condiciones del ensayo N.º 1

4.- TOMA DE DATOS AMBIENTALES		5.- PARAMÉTROS DEL ENSAYO BALÍSTICO	
Detalle		Detalle	
Humedad relativa	50.6 %	Munición requerida	Cal 9mm FMJ 124 grains
Temperatura superficial	21.8 °C	Velocidad de la munición ( promedio )	433 m/s
Temperatura ambiental	22.4 °C	Distancia del disparo	5 metros
Temperatura del rocío	10.8 °C		-
Depresión total (t-t')	10.0 °C		-

ENSAYOS BALÍSTICOS										
IDENTIFICACIÓN				INSPECCIÓN					FECHA	OBSERVACIÓN
ELEMENTO	CANT	Material	TÉCNICO	MUNICIÓN UTILIZADA			RESULTADO			
				9 mm	448 m/s promedio	Disparos	ACEPT	RECH.		
Placa ensayo 1	1	Kevlar	J. Rodríguez	9 mm	436 m/s	5	-	X	2023-09-08	Rechazado



Figura 11.

Placa Kevlar 49 con resina epóxica sometida a pruebas balísticas

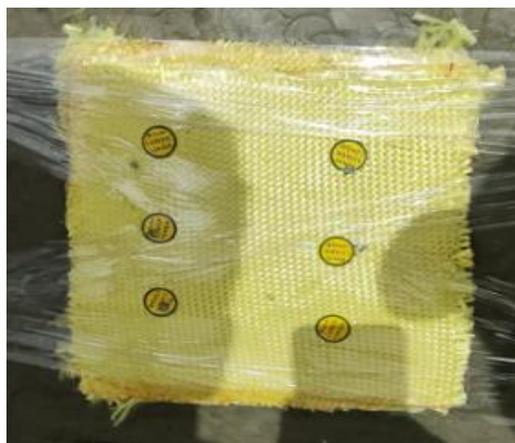
# Análisis de Resultados

## Ensayo N.º 2 y N.º 3

### Condiciones del ensayo N.º 2 y N.º 3

Detalle		Detalle	
Humedad relativa	51.6 %	Munición requerida	Cal 9mm FMJ 124 grains
Temperatura superficial	22.8 °C	Velocidad de la munición ( promedio )	430 m/s
Temperatura ambiental	22.4 °C	Distancia del disparo	5 metros
Temperatura del rocío	10.7 °C	-	-
Depresión total (t-t')	11.0 °C	-	-

ENSAYOS BALÍSTICOS										
IDENTIFICACIÓN				INSPECCIÓN					FECHA	OBSERVACIÓN
ELEMENTO	CANT	Material	TÉCNICO	MUNICIÓN UTILIZADA			RESULTADO			
				9 mm	448 m/s promedio	Disparos	ACEPT	RECH.		
Placa ensayo 1	1	Kevlar	J. Rodríguez	9 mm	433 m/s	5	x	-	2023-09-12	Aprobado
Placa ensayo 2	1	Kevlar	J. Rodríguez	9 mm	430 m/s	5	x	-	2023-09-12	Aprobado



**Figura 12.**

Placa Kevlar 49 con cemento de contacto sometida a pruebas balísticas

# Análisis de Resultados

## Registro fotográfico de Probeta N.º2

### Examinación de láminas

Lámina 1



Lámina 2



Lámina 3



Lámina 4



Lámina 5



Lámina 6



# Análisis de Resultados

## Registro fotográfico de Probeta N.º2

### Examinación de láminas

Lámina 7



Lámina 8



Lámina 9



Lámina 10



Lámina 11



Lámina 12



# Análisis de Resultados

## Medición de Trauma Balístico

### Parámetros norma NIJ 106.01

- $BFD \leq 40 \text{ mm}$
- BFD es una medida de la deformación causada por el impacto de un proyectil

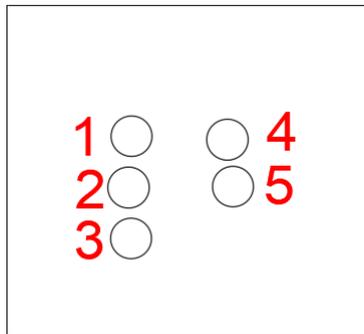


**Figura 13.**  
Medición del trauma balístico

# Análisis de Resultados

## Medición de Trauma Balístico

Se realizaron medidas de las deformaciones de la plastia ocasionadas por el impacto del proyectil.



**Figura 14.**  
Posición de las deformaciones en la probeta

1



25.00 mm

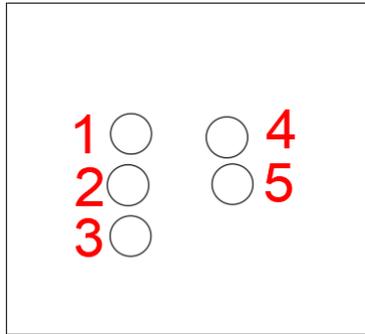
2



24.00 mm

# Análisis de Resultados

## Medición de Trauma Balístico



**Figura 14.**  
Posición de las deformaciones en la probeta

3



23.54 mm

4



24.85 mm

5



21.22 mm

## Ensayos de Casco Táctico

Forma Casco Táctico protección III A

1 Elemento

- Matriz (Cemento de Contacto)
- Refuerzo (Kevlar)

## Parámetros norma NIJ 106.01

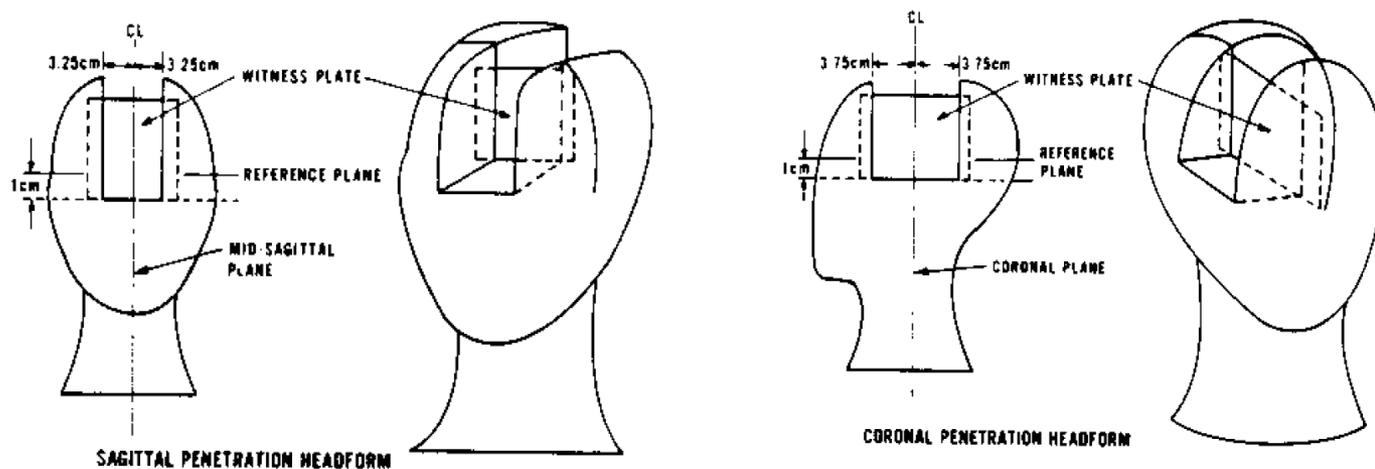
- Proyectil calibre 9 mm FMJ 124 grains de 448 m/s  $\pm$  9.1 m/s
- Distancia requerida desde el cañón: 5 m
- Temperatura ambiente: Entre 20 °C – 28°C
- Humedad relativa: Entre 30% - 70%.
- 5 impactos por cada ensayo
- Angulo de incidencia 0°
- Numero de impactos: 5

# Análisis de Resultados

## Ensayo

### Condiciones del ensayo para el Casco Táctico

En la figura 15 se muestra el análisis de puntos y planos críticos de protección de la cabeza para un impacto balístico.



**Figura 15.**

Diagrama de locaciones críticas para un impacto balístico

# Análisis de Resultados

## Ensayo N.º 1

### Condiciones del ensayo N.º 1

Detalle		Detalle	
Humedad relativa	50.6 %	Munición requerida	Cal 9mm FMJ 124 grains
Temperatura superficial	21.8 °C	Velocidad de la munición ( promedio )	433 m/s
Temperatura ambiental	22.4 °C	Distancia del disparo	5 metros
Temperatura del rocío	10.8 °C	-	-
Depresión total (t-t')	10.0 °C	-	-

ENSAYOS BALÍSTICOS										
IDENTIFICACIÓN				INSPECCIÓN					FECHA	OBSERVACIÓN
ELEMENTO	CANT	Material	TÉCNICO	MUNICIÓN UTILIZADA		Disparos	RESULTADO			
				9 mm	448 m/s promedio		ACEPT	RECH.		
Casco ensayo 5	1	Kevlar	J. Rodríguez	9 mm	435 m/s	5	X	-	2024-02-01	Aprobado



Figura 16.

Casco Táctico sometido a Pruebas balísticas

# CONCLUSIONES

- El análisis teórico del material compuesto permite obtener las propiedades del material compuesto, al asociarse el kevlar (49) y el cemento de contacto, es decir refuerzo y matriz, las propiedades mecánicas tienden a disminuir aproximadamente un 2% , sin embargo, este porcentaje no afecta en el comportamiento que se quiere obtener en el material, por el contrario, esa pérdida es convalidada con las características de protección y fabricación que realiza la matriz en el refuerzo.
- Los ensayos realizados para la certificación del casco táctico conforme a la norma NIJ 0101.06 comprenden una evaluación exhaustiva tanto cualitativa como cuantitativa. La evaluación cualitativa se centra en garantizar que el casco no sufra perforaciones ante el impacto de proyectiles. Por otro lado, la evaluación cuantitativa implica medir la profundidad del impacto en una placa de plastilina, estableciendo un límite máximo de 40 mm para prevenir lesiones graves en el usuario del casco. Dado que el casco superó exitosamente esta prueba al no presentar perforaciones y al demostrar que el trauma resultante del impacto fue menor a 40 mm, se confirma su idoneidad y seguridad para su uso en situaciones tácticas y militares.

# CONCLUSIONES

- Según el análisis de velocidad, al impactar el proyectil contra la primera capa del material compuesto, se registra una pérdida de velocidad del 11.2%. Esta disminución se incrementa significativamente en la quinta capa, llegando aproximadamente a un 62%, y finalmente, en la capa 16, se observa una velocidad residual de 0 m/s, indicando la detención total del proyectil y la interrupción de su capacidad de perforación. En contraste, durante el ensayo balístico, los proyectiles mantienen una velocidad constante desde su disparo inicial. Sin embargo, se observa una variación en la profundidad de penetración en las diferentes capas del material. Este fenómeno se atribuye a factores externos como la resistencia al aire y otras condiciones ambientales. Es relevante señalar que el proyectil que logró perforar la mayor cantidad de capas se detuvo en la capa 12, lo que sugiere una concordancia cercana entre los resultados experimentales y los cálculos teóricos.

**GRACIAS POR SU ATENCIÓN**