



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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

**DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE UN MÉTODO DE REPARACIÓN PARA CASCOS TÁCTICOS
MILITARES**

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

Autor:

Solano Yépez Erick Wladimir

Tutor:

Ing. Sánchez Sánchez Xavier Rolando, PhD.

Sangolquí, 12 de marzo de 2024



INTRODUCCIÓN

ALCANCE



Figura 1. Casco para efectuar reparación.

JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

El uso de materiales compuestos en la reparación de piezas, elementos u estructuras.

Brindar una alternativa viable para la reparación de cascos dados de baja.

Aportar a estudios de investigación de reparación de composites en el ámbito militar.

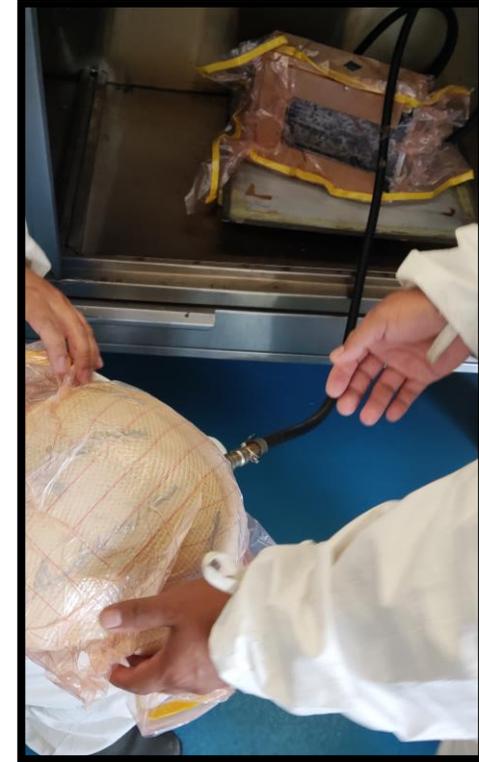


Figura 2. Reparación de composites.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- **Desarrollar un método de reparación para cascos tácticos militares.**

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- **Realizar el estudio de los principales factores que causan daños en los cascos tácticos.**
- **Aplicar el método de reparación a un casco dado de baja.**
- **Verificar la resistencia balística del casco reparado.**



DEFINICIÓN DE CARACTERÍSTICAS DEL CASCO

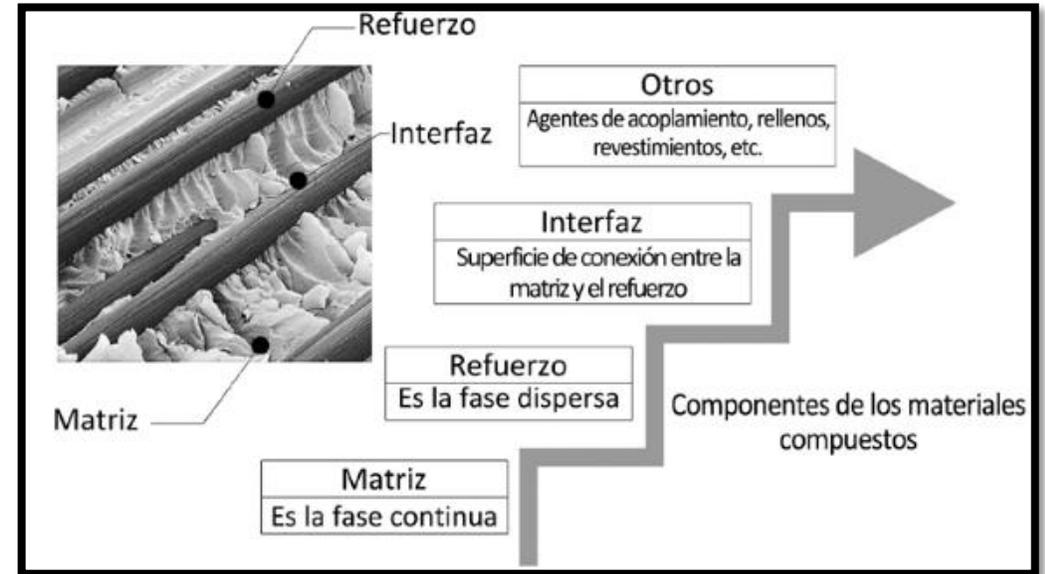
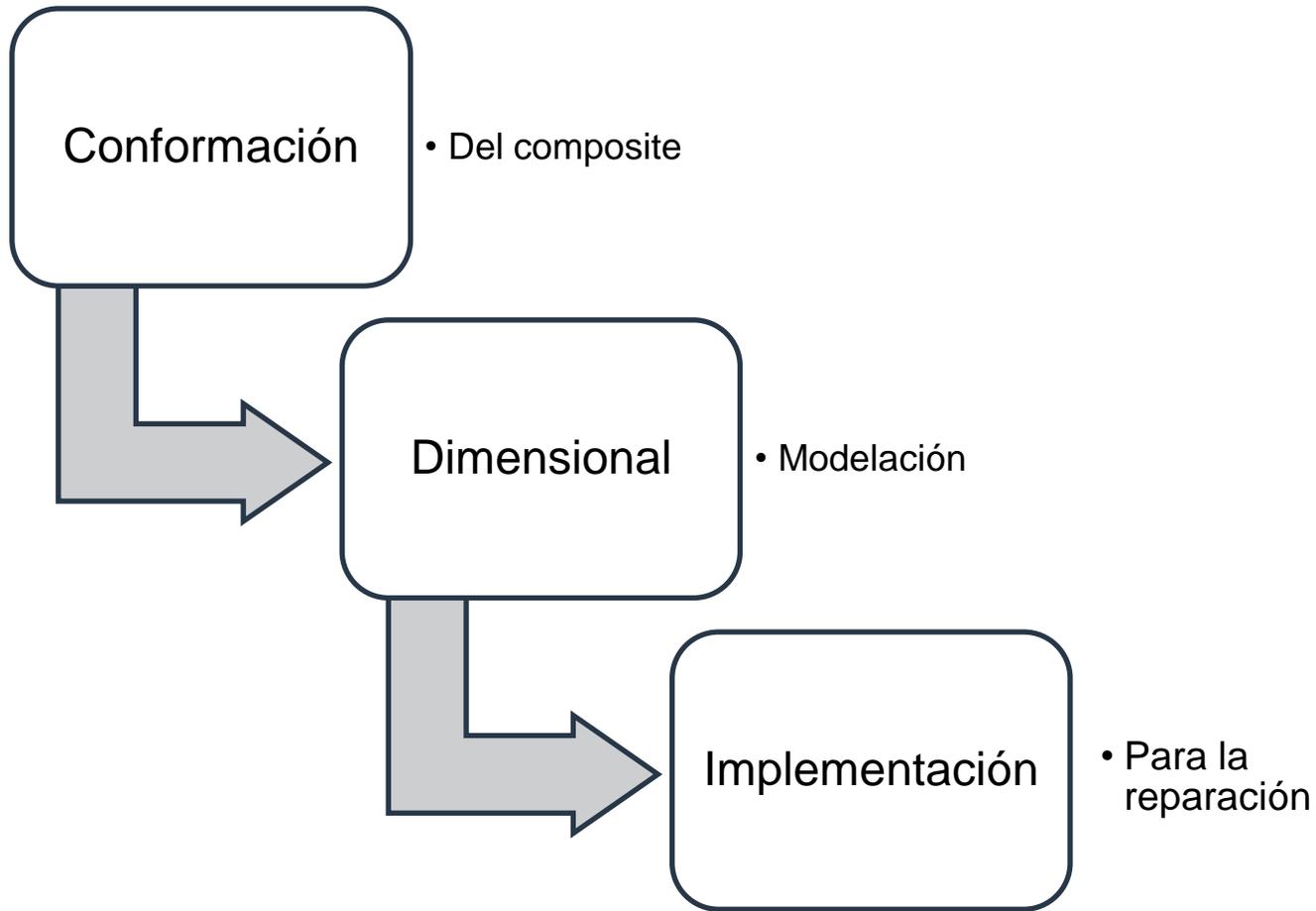


Figura 3. Componentes de un composite.

CONFORMACIÓN

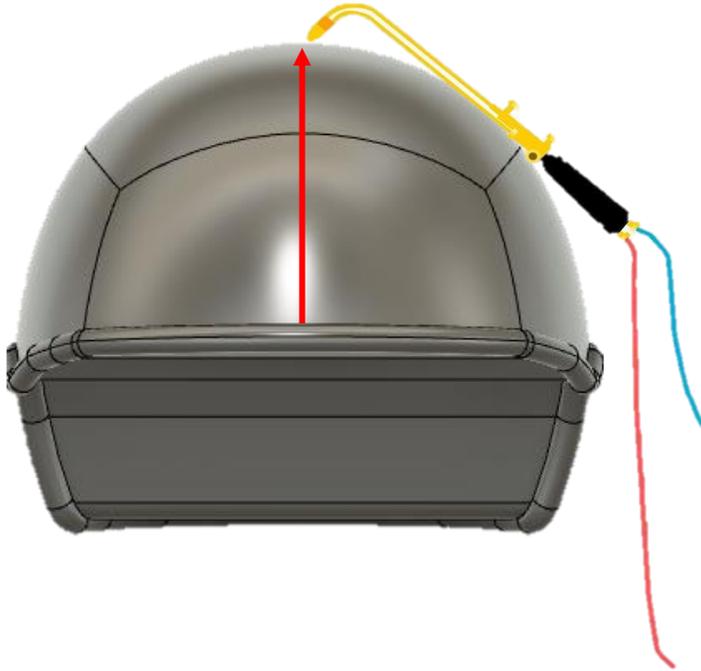


Figura 4. Esquema y resultado de prueba de mechero.

CONFORMACIÓN

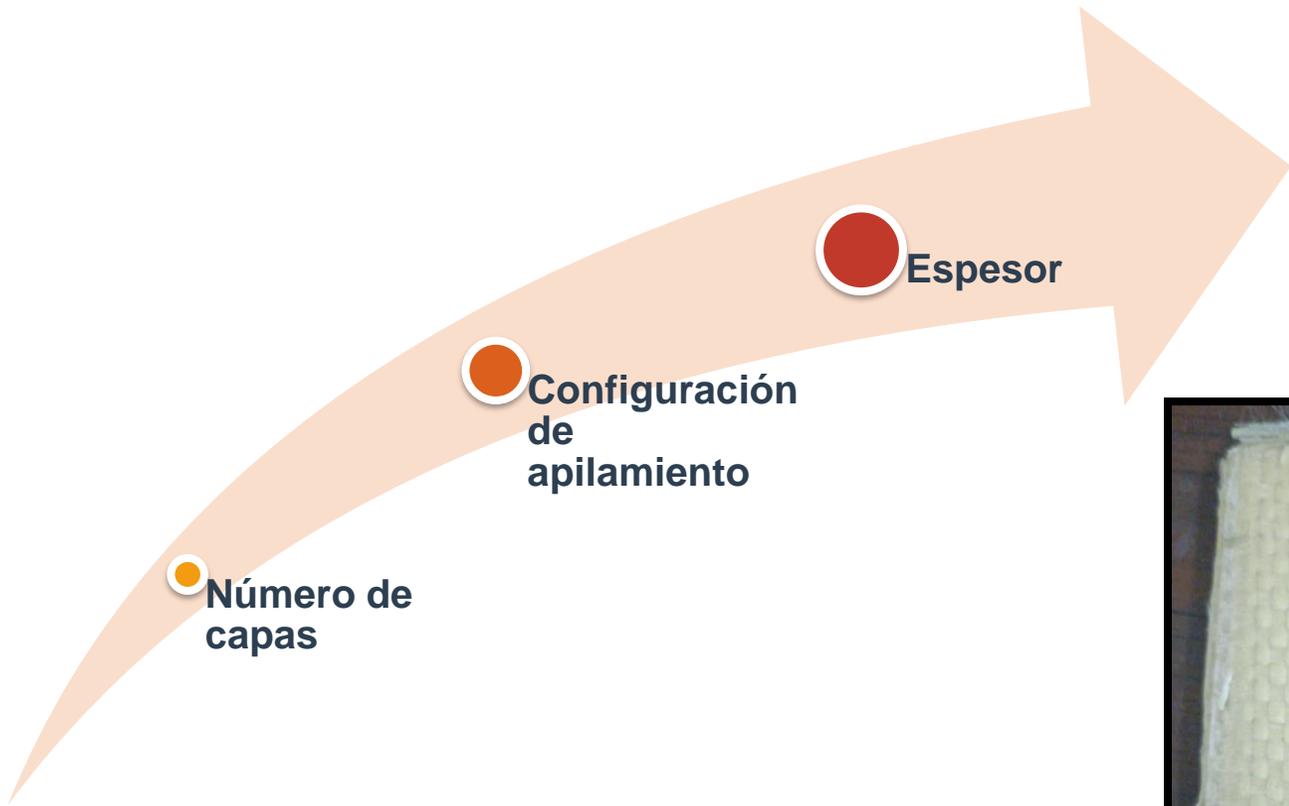


Figura 5. Comprobación de espesor.



DIMENSIONAL

Preparación



Escaneo



Post
procesado



IMPLEMENTACIÓN

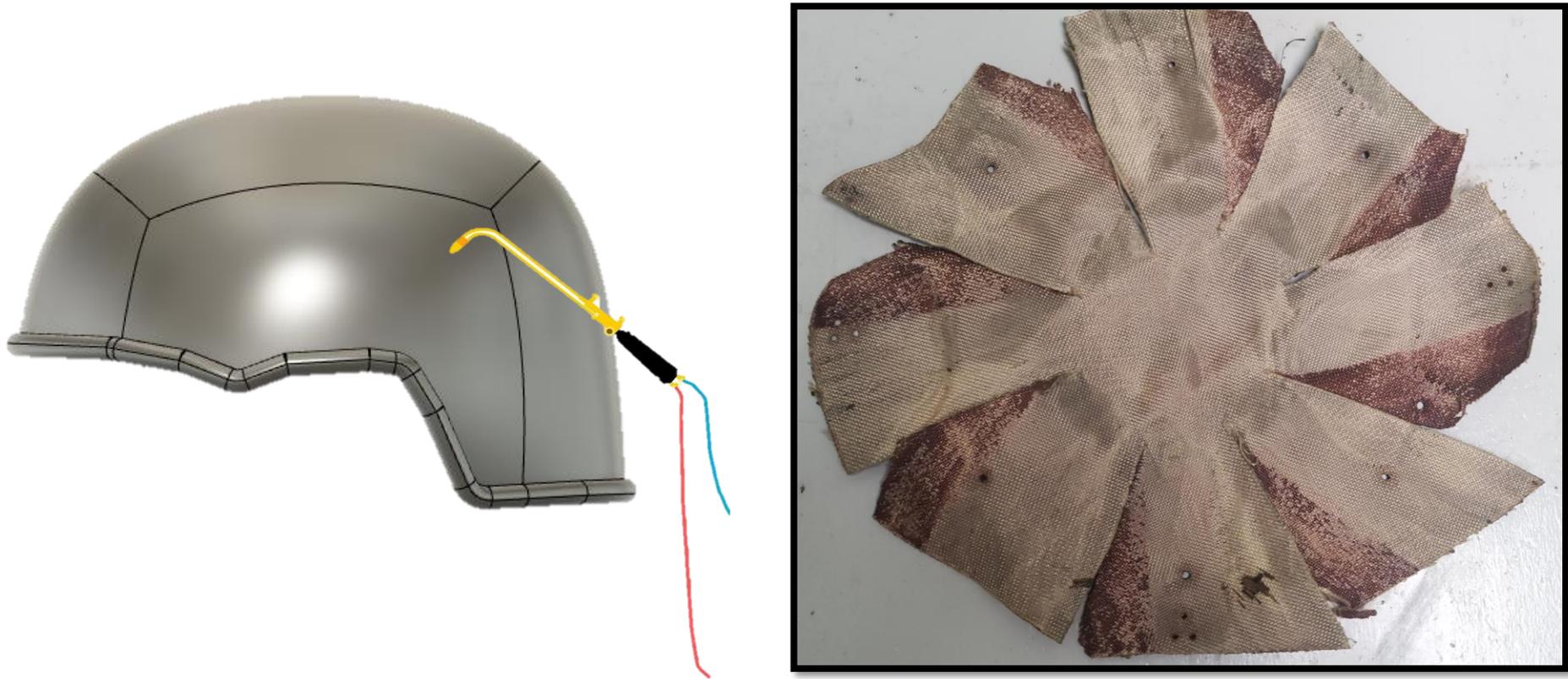


Figura 6. Proceso de delaminación.

DAÑOS Y DEFECTOS

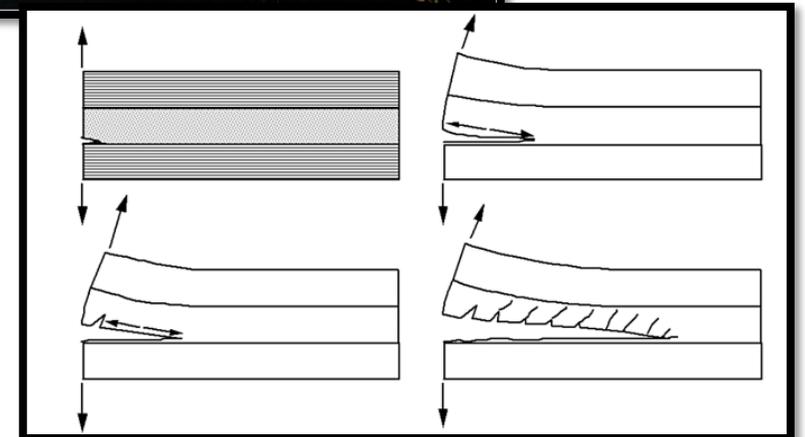
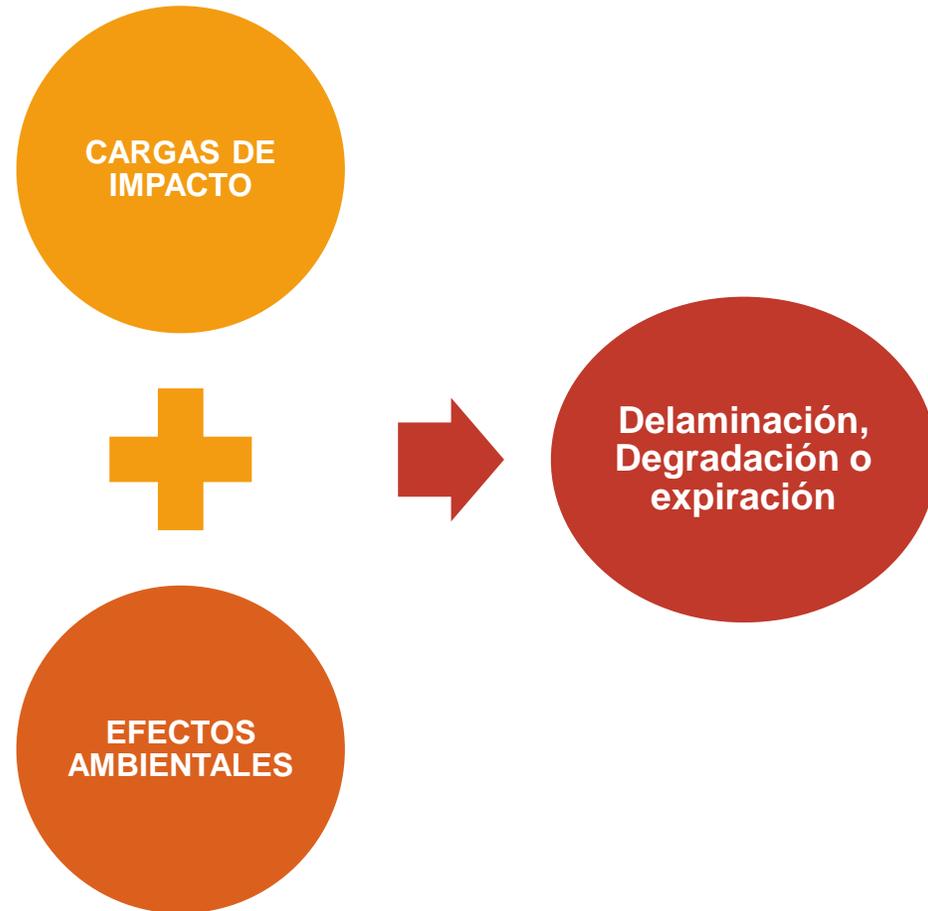


Figura 7. Daños en materiales compuestos.

PROCESO DE FABRICACIÓN PROBETAS

COMPROBAR

NÚMERO DE
CAPAS

TIPO DE
MATRIZ

ORIENTACIÓN
DE LAS
FIBRAS



PROCESO DE FABRICACIÓN PROBETAS

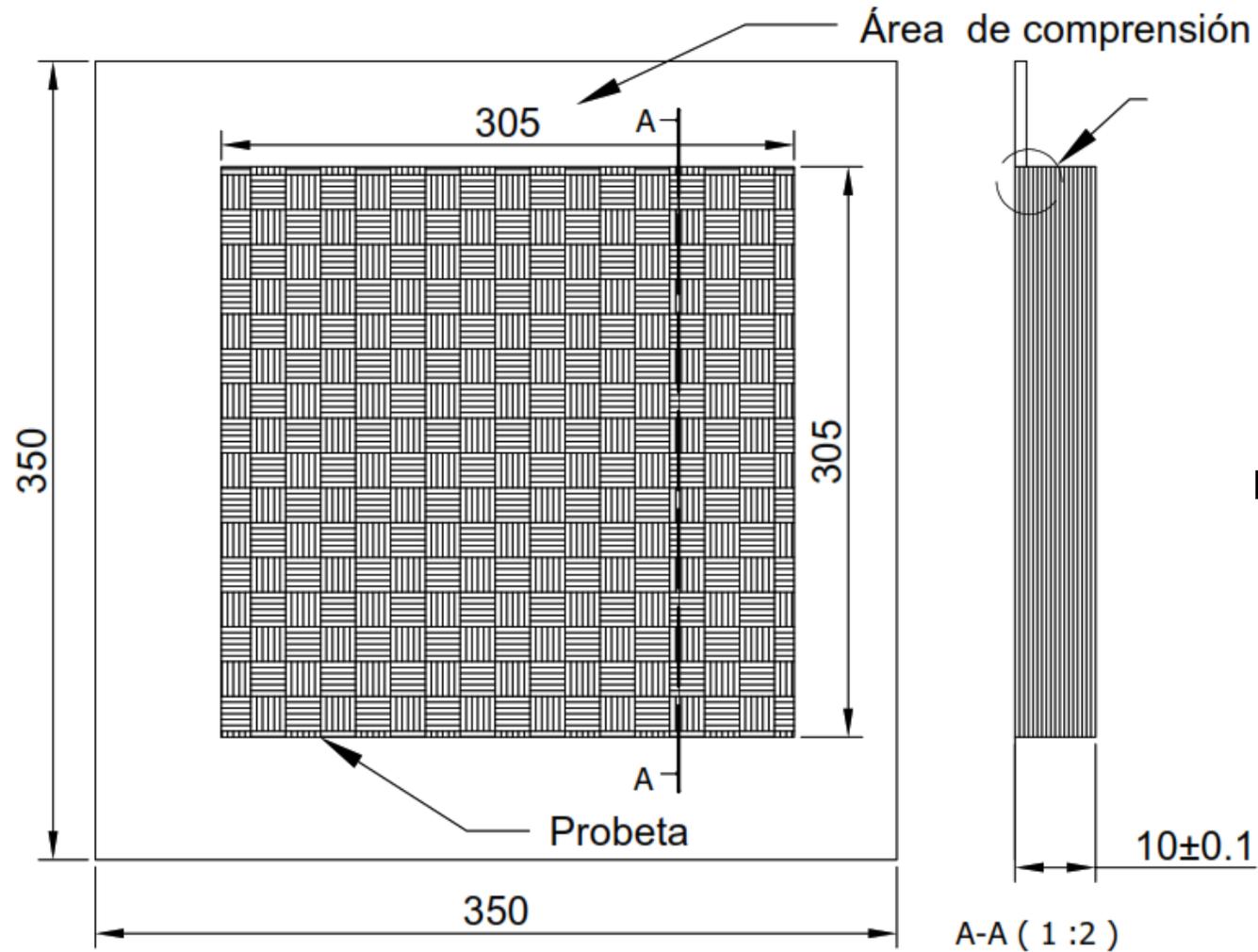


Figura 8. Dimensionamiento de probeta.

Nota. dimensionamiento requerido por NIJ

0108.01



PROCESO DE FABRICACIÓN PROBETAS



Paso 1



Paso 2



Paso 3



Paso 4



Paso 5



Paso 6



PROCESO DE PRUEBA DE RESISTENCIA BALÍSTICA (PROBETAS)

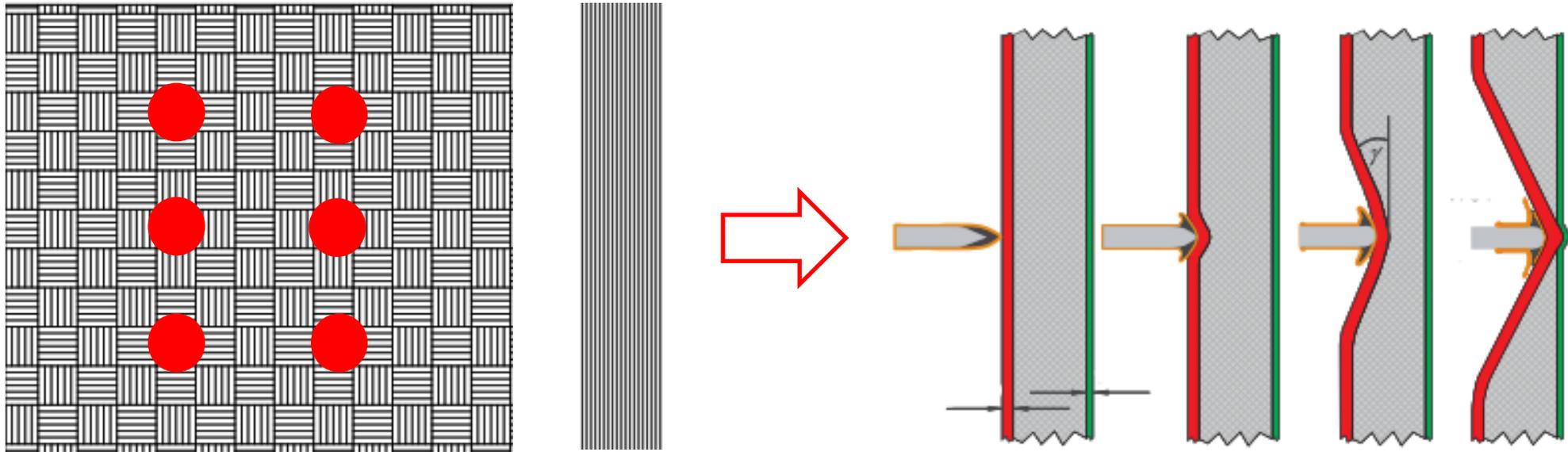


Figura 9. Esquema de prueba balística probeta plana.

PROCESO DE PRUEBA DE RESISTENCIA BALÍSTICA (PROBETAS)

Verificar



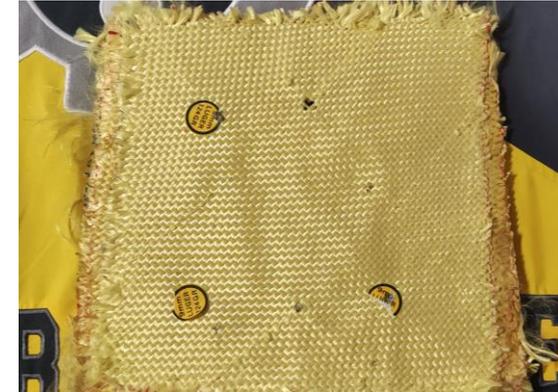
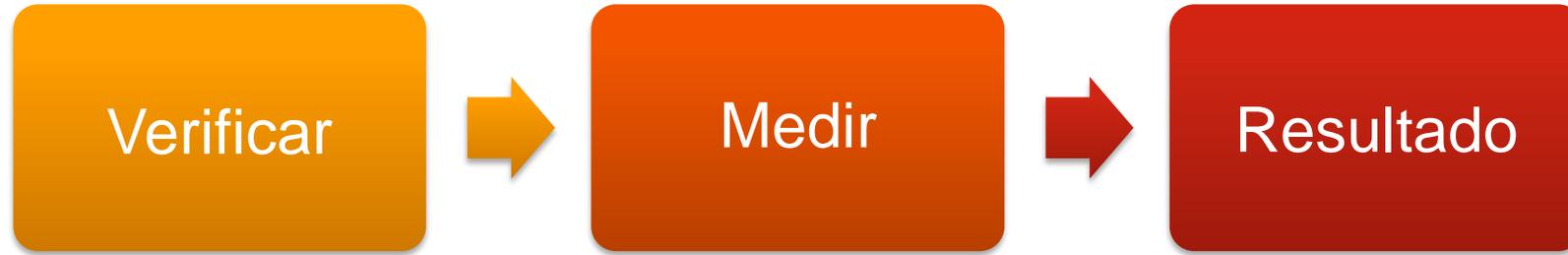
Colocar



Disparar



PROCESO DE PRUEBA DE RESISTENCIA BALÍSTICA (PROBETAS)



PROCESO DE PRUEBA DE RESISTENCIA BALÍSTICA (PROBETAS)



PROCESO DE REPARACIÓN CASCO

SELECCIÓN

EVALUACIÓN

EJECUCIÓN



ANÁLISIS DEL PROCESO DE REPARACIÓN CASCO

Para realizar la ejecución del proceso se analiza matemáticamente la resistencia del material balístico al impacto a partir de la expresión (1) del análisis dimensional de Cunniff.

$$\phi \left(\Gamma_0, \frac{V_{50}}{\Omega^{1/3}} \right) = 0 \quad (1)$$

Si $\Gamma_0 = \text{constante}$, por lo tanto, se tiene

$$V_{50} \propto \Omega^{1/3}$$
$$V_{50} = \Omega^{1/3}$$

Se tiene que $\Omega = S_t \cdot V_w$

$$V_{50} = (S_t \cdot V_w)^{1/3} \quad (2)$$

Si $S_t = \frac{\sigma \varepsilon}{2\rho}$, $V_w = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$, reemplazando se tiene

ANÁLISIS DEL PROCESO DE REPARACIÓN CASCO

Calculando la tenacidad específica y la velocidad de onda de tensión de la fibra de aramida Kevlar 49

$$S_t = \frac{\sigma \varepsilon}{2\rho}$$

$$V_w = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

$$S_t = \frac{3,04 \times 10^9 [Pa] \cdot 0,0237}{2 \cdot 1440 \left[\frac{Kg}{m^3} \right]}$$

$$V_w = \sqrt{\frac{120 \cdot 10^9 [Pa]}{1440 \left[\frac{Kg}{m^3} \right]}}$$

$$S_t = 25,02 \cdot 10^3 \left[\frac{m^2}{s^2} \right]$$

$$V_w = 9,13 \cdot 10^3 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Reemplazando en (2) se obtiene



ANÁLISIS DEL PROCESO DE REPARACIÓN CASCO

El límite balístico V50 según Cunniff

$$V_{50} = \left(25,02 \cdot 10^3 \left[\frac{m^2}{s^2} \right] \cdot 9,13 \cdot 10^3 \left[\frac{m}{s} \right] \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$V_{50} = \left(228,40 \cdot 10^6 \left[\frac{m^3}{s^3} \right] \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$V_{50} = \left(228,40 \cdot 10^6 \left[\frac{m^3}{s^3} \right] \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$V_{50c} = 611,3 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Considerando los efectos generados por el impacto balístico en las probetas se define los parámetros para la ejecución de la reparación.

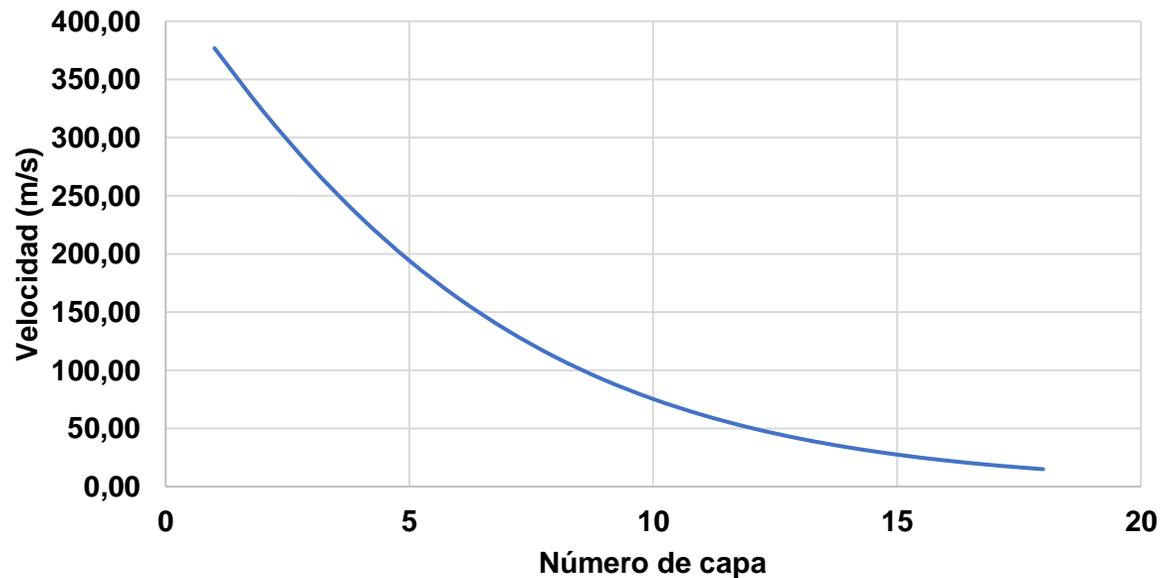


ANÁLISIS DEL PROCESO DE REPARACIÓN CASCO

Perfil de velocidad teórico a partir del modelo de Phoenix - Porwal

$$V = \frac{V_p}{1 + \tilde{\Gamma}_0} \exp \left[- \frac{\sum_{i=1}^n \varphi_i \Gamma_{0i} \psi_i^2 + \sum_{i=1}^n (1 - \varphi_i) \Gamma_{0i} \psi_{i,fi}^2 - \tilde{\Gamma}_0}{1 + \tilde{\Gamma}_0} \right]$$

Perfil de velocidad teórico del impacto balístico



ANÁLISIS DEL PROCESO DE REPARACIÓN CASCO

Analizando la velocidad del proyectil y definiendo un factor de seguridad

$$V_p = V_{bala} + 3 \cdot \alpha$$

$$V_p = (403 + 3 \cdot 11,35) \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$V_p = 437 \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$FS = \frac{V_{50c}}{V_p}$$

$$FS = \frac{612 \left[\frac{m}{s} \right]}{437 \left[\frac{m}{s} \right]}$$

$$FS = 1,40$$

Cumple con el nivel de protección IIIA requerido.

Tabla 1. Relación V_{50} vs Número de capas

Requisito	Número de capas
V_{50} (m/s)	tipo Kevlar
550	14
600	16
650	18



ANÁLISIS DEL PROCESO DE REPARACIÓN CASCO

Considerando que la reparación implica el cambio de las capas con daños.

$$espesor_{penetrado} = e_{kevlar} \cdot \text{número de capas}$$

$$espesor_{penetrado} = 0,78 [mm] \cdot 12 = 9,36 mm$$

$$espesor_{penetrado} \approx 10 mm$$

Se selecciona un laminado conformado por 16 capas.

$$e_{laminado} = e_{fibra,kevlar} \cdot \text{número de capas} = 0,78 \cdot 16 = 12,48 mm$$

$$e_{delaminado} = e_{fibra,kevlar} \cdot \text{número de capas retiradas} = 0,78 \cdot 6 = 4,68 mm$$

$$e_{delaminado} \approx 5 mm$$



ANÁLISIS DEL PROCESO DE REPARACIÓN CASCO

Las capas con daños corresponden a 5 mm de espesor y a seis capas de material balístico.

$$\text{Número de capas}_{\text{reparación}} = \# \text{capas}_{\text{segun } V_{50}} - \# \text{capas}_{\text{casco delaminado}} = 16 - 12 = 4$$

$$\text{Número de capas}_{\text{reparación}} = 4$$

$$e_{\text{reparación,laminado}} = e_{\text{fibra,kevlar}} \cdot \text{número de capas} = 0,78 \cdot 4 = 3,12 \text{ mm}$$

Se requiere efectuar la laminación de cuatro capas con matriz de cemento de contacto al casco en la zona externa al considerarla más crítica al impacto.



PROCESO DE REPARACIÓN CASCO



Paso 1



Paso 2



Paso 3



Paso 4



Paso 5



Paso 6



Paso 7



Paso 8



PROCESO DE REPARACIÓN CASCO



Paso 9



Paso 10



Paso 11



Paso 12



Paso 13



Paso 14



Paso 15



Paso 16



PRUEBA DE RESISTENCIA BALÍSTICA CASCO REPARADO

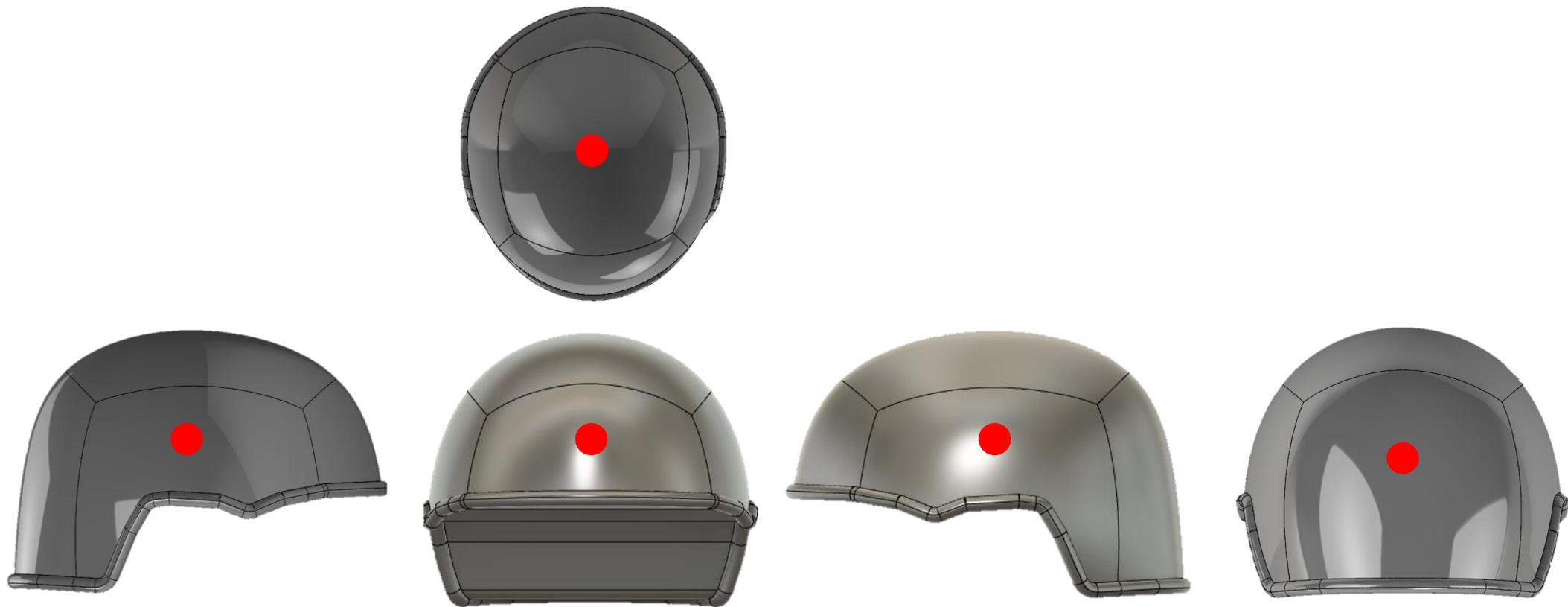


Figura 10. Esquema de prueba balística casco.

PRUEBA DE RESISTENCIA BALÍSTICA CASCO REPARADO

Verificar



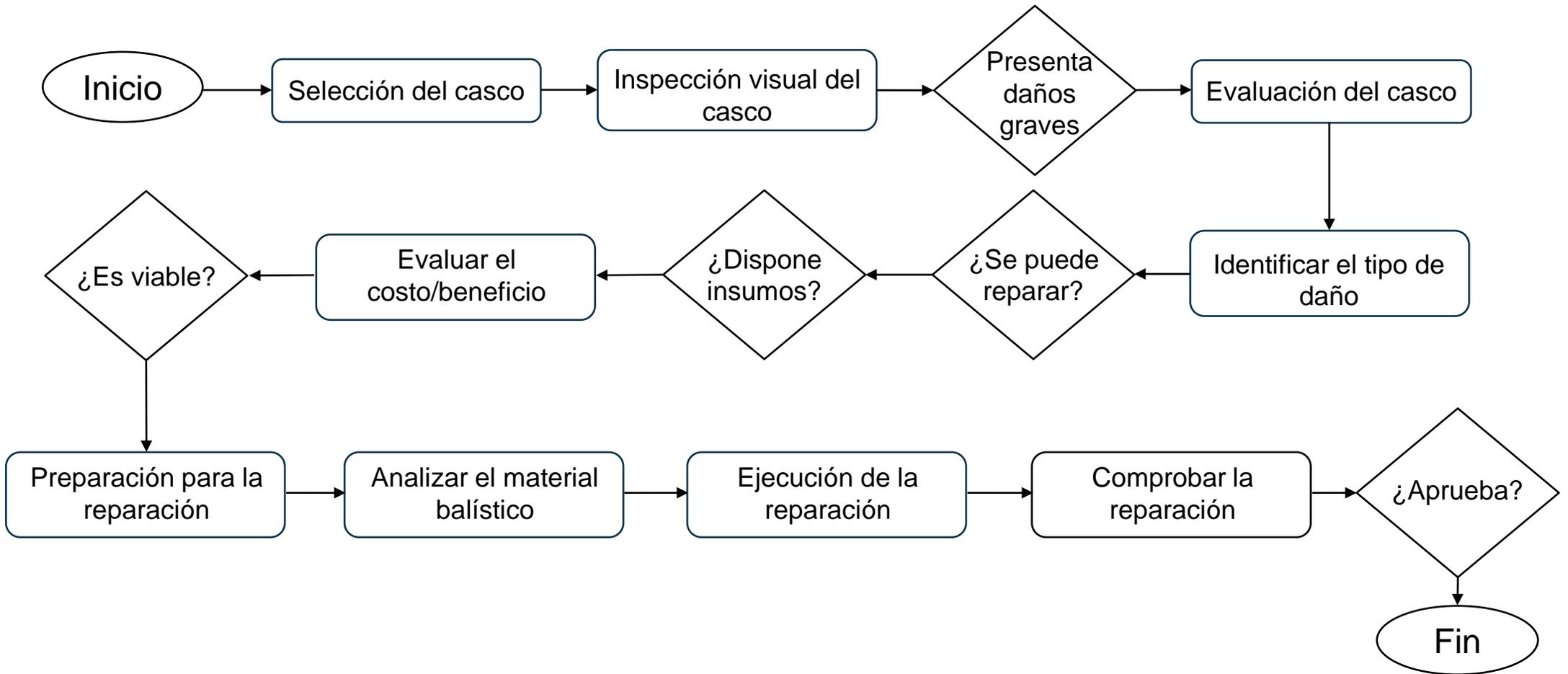
Colocar



Disparar



DIAGRAMA DE FLUJO MÉTODO DE REPARACIÓN



RESULTADOS

ELEMENTOS ENSAYADOS

Tabla 2. Elementos ejecutados ensayo balístico.

Elemento	Fibra	Matriz	Configuración	Número de capas	Condición
Probeta	Kevlar 49	Resina Epoxi	0°- 90°	18	Nuevo
Probeta	Kevlar 49	Silicon en frio	0°- 90°- 45°	18	Nuevo
Probeta	Kevlar 49	Silicon caliente	0°- 90°- 45°	18	Nuevo
Probeta	Kevlar 49	Cemento de contacto	0°- 90°- 45°	18	Nuevo
Casco	Kevlar	-	-	-	Caducado
Casco	Kevlar 49	Cemento de contacto	0°- 90°- 45°	16*	Reparado
Casco	Kevlar 49	Cemento de contacto	0°- 90°- 45°	16	Fabricado

Nota. * cuatro capas son nuevas y se colocaron en la parte externa del casco.



PROBETAS

Tabla 3. Resultados ensayos balísticos probetas planas.

Elemento	Matriz	Velocidad	Impactos	Resultado
Probeta	Resina epoxi infusión	436 m/s	5	Penetración de 5 impactos
Probeta	Silicon en frio	430 m/s	5	Trauma* máximo 45 mm
Probeta	Silicon caliente	420 m/s	5	Trauma máximo 36 mm
Probeta	Cemento de contacto	431 m/s	5	Trauma máximo 25 mm

Nota. *refiérase a la deformación causada en la probeta por el impacto de la bala con el material balístico sin generar penetración.



Figura 11. Resultados ensayo balístico probetas.



CASCOS

Tabla 4. Resultados ensayos balísticos cascos.

Elemento	Matriz	Velocidad	Impactos	Resultado
Casco	-	431 m/s	5	Penetración de 5 impactos
Casco	Cemento de contacto	437 m/s	5	*Penetración de 1 impacto
Casco	Cemento de contacto	435 m/s	5	Sin penetración



Figura 12. Resultados ensayo balístico casco reparado.

CASCOS (REPARADO - CADUCADO)



Figura 13. Comparación de resultados de ensayo balístico casco reparado - caducado.

CASCOS (REPARADO – FABRICADO)



Figura 14. Comparación de resultados de ensayo balístico casco reparado - fabricado.

CONCLUSIONES

- El factor crítico que produce el deterioro del casco táctico es el envejecimiento natural del material balístico producto de la exposición a ambientes agresivos, que consecuentemente generan delaminación y degradación en sus propiedades.
- El ensayo de resistencia balística a probetas planas determinó que el laminado fabricado con 18 capas de tejido de aramida Panamá style 1350 con fibras de Kevlar 49, matriz de cemento de contacto y configuración de apilamiento $0^\circ, 90^\circ, 45^\circ, \dots, 90^\circ, 45^\circ, 0^\circ$ soporta un nivel de protección NIJ III-A a una velocidad promedio del proyectil calibre 9 mm FMJ de 426 ± 15 metros por segundo y cuyos impactos generaron un trauma máximo de 25 mm de profundidad. Se concluye que la matriz de cemento de contacto mejora la ductilidad del composite y con ello optimizar el número de capas del laminado.



- El ensayo de resistencia balística al casco reparado determinó que la reparación con un laminado de la superficie externa del yelmo con 4 capas de tejido de aramida Panamá style 1350 con fibras de Kevlar 49, matriz de cemento de contacto y configuración de apilamiento $90^{\circ}, 45^{\circ}, 90^{\circ}, 45^{\circ}$ soporta parcialmente un nivel de protección NIJ III-A a una velocidad promedio del proyectil calibre 9 mm FMJ de $448 \pm 9,1$ metros por segundo, debido a que los impactos generaron delaminación en la cavidad por la pérdida de adherencia de los traslapes de las capas interiores, lo cual se puede optimizar con un laminado interior del casco.
- En base de las pruebas balísticas, se comprueba que la reparación mejora parcialmente la resistencia balística de un casco dado de baja.

- El método de reparación del casco militar se fundamentó en tres ejes de acción: selección, evaluación y ejecución, en función de la viabilidad técnica y operativa disponible, se validó experimentalmente mediante ensayos de resistencia balística, resultando en un proceso innovador para la investigación tecnológica en reparaciones con materiales compuestos aplicados al ámbito militar.



RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar tanto la laminación externa como interna del casco a reparar.
- Para determinar con certeza el envejecimiento de los cascos dados de baja, se recomienda realizar muestras del material balístico de cascos del ejército y someterlas a ensayos mecánicos para determinar estadísticamente un factor de degradación común de las propiedades mecánicas debido al envejecimiento natural
- En la fase de ejecución del método de reparación, al realizar la delaminación se recomienda controlar la temperatura y realizar intervalos cortos de exposición al calor.



GRACIAS POR SU ATENCIÓN



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA