

## **CARACTERIZACIÓN DEL ACERO UTILIZADO EN LA CARROCERÍA CON PROTECCIÓN PASIVA DE LOS VEHÍCULOS BLINDADOS PANHARD AML-90 DEL C.I.C.T.E.**

En este paper se realizó primeramente un análisis de caracterización de materiales balísticos basándose en norma MIL-A-46100 y MIL-A-12560H con el fin de determinar las propiedades del acero balístico empleado en la carrocería del PANHARD AML-90 para futuras modificaciones. Posterior a ello se realizaron distintos ensayos de laboratorio con la finalidad de obtener la caracterización mecánica la cual incluye ensayos de tracción, dureza, impacto y balísticos con el objetivo de obtener las diferentes características mecánicas del acero blindado como la resistencia a la fluencia, resistencia ultima, dureza, el alargamiento porcentual, la resiliencia ,la capacidad de absorber energía al impacto y la deformación que sufre al ser sometido a impactos balísticos dichos datos fueron obtenidos en los respectivos laboratorios de Mecánica de Materiales. Para conseguir estos resultados se tuvo que realizar un proceso de selección de corte adecuado con el objetivo de no alterar las propiedades del material. Se realizó también una caracterización metalográfica que incluye micrografía, chispa y composición química realizada en los laboratorios de Metalurgia de la ESPE y por el Departamento de Metalurgia de Adelca bajo normas internacionales y nacionales. Adicionalmente se realizó una simulación de impacto balístico en ANSYS donde se dio la validez el análisis de elementos finitos al comparar con los resultados con las pruebas balísticas.

### **INTRODUCCIÓN**

Los vehículos AML-90 fueron desarrollados por la empresa Francesa Panhard en los años 50 .Se vendieron un total aproximado de 5000 unidades alrededor del mundo los cuales tienen un gran desempeño debido a que su peso es ligero en comparación a otros vehículos de defensa y se encuentra muy bien armados.

El ejército Ecuatoriano al momento dispone de 8 de estos tanques dentro de su equipamiento armamentista. Parte de estos vehículos se encuentran a cargo del C.I.C.T.E. Debido a la antigüedad de los vehículos el C.I.C.T.E. a buscado la repotenciación de los AML-90.En el mes de Marzo del 2012 el C.I.C.T.E realizo un cambio de motor de gasolina por uno de diesel con fines de ahorro de combustible y de cuidado del medio ambiente. En dicho acondicionamiento, las dimensiones del motor a Diesel no eran iguales a las del motor a gasolina; razón por la cual, se vio la necesidad de modificar el diseño original. Al realizar una

investigación sobre aceros balísticos que se debía usar en dichas modificaciones se observó que existe un escaso conocimiento sobre el tema. En el momento de realizar dichas modificaciones la selección del material fue realizada de manera empírica. El C.I.C.TE como institución de investigación de tipo militar no debería realizar procedimientos de selección de materiales para vehículos blindados de manera empírica más bien debe procurar la aplicación de normas internacionales en sus procedimientos.



**Figura 1 Repotenciación PANHARD AML-90**

Fuente: David Díaz



**Figura 2 Compartimiento original para el motor a gasolina del PANHARD AML-90**

Fuente: David Díaz

Al momento de tomar decisiones de manera empírica se tuvo que tomar en cuenta un alto factor de seguridad; como consecuencia, aumentó el espesor de las planchas de acero empleadas en las

modificaciones respectivas, esto afecta directamente al rendimiento del vehículo debido a que el peso es un factor importante a considerar además se resta autonomía de movimiento. Un vehículo con mayor peso tiene un desempeño inferior al desempeño que podría tener uno con una selección de materiales apropiada. Consecuentemente esto tendrá una influencia negativa en el consumo de combustible y en las emisiones de gases ya que al tener mayor peso se requiere mayor potencia.

Además, el C.I.C.T.E procura buscar una solución local que atienda a esta necesidad de selección de materiales con el fin de diseño y mantenimiento para dichos vehículos; sin embargo, existe un gran desconocimiento de los aceros existentes en el mercado Ecuatoriano que tengan propiedades similares a la de los aceros balísticos empleados para vehículos de combate.

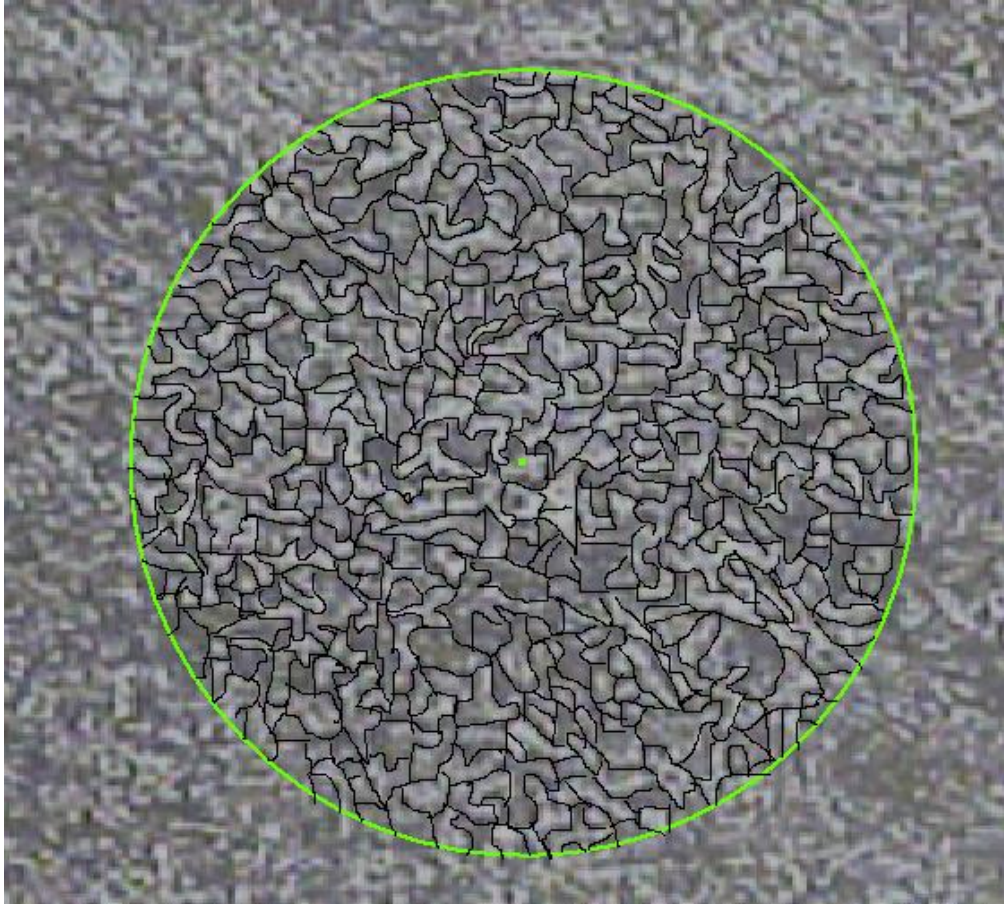


**Figura 3. Puerta compartimiento del motor original del PANHARD AML-90**

Fuente: David Díaz

## CARACTERIZACIÓN METALÚRGICA

### ESTRUCTURA MICROGRÁFICA



**Figura 4. Micrografía del acero empleado en la carrocería del PANHARD AML-90 200X**

Fuente: David Díaz

Aplicando el método planimétrico se trazo una circunferencia de área de  $5000 \text{ mm}^2$  ( $d= 79.8\text{mm}$ ) de la mejor imagen que se pueda obtener del microscopio. Una vez trazado el círculo, se cuento el número de granos presentes dentro del círculo y se cuento los granos que son intersecados por la línea de la circunferencia aplicando la siguiente fórmula

$$N_A = f * \left( N_{inside} + \frac{N_{Interceptal}}{2} \right)$$

$$N_A = 8 * \left( 309 + \frac{36}{2} \right) = 2616 \text{ granos por mm}^2$$

Donde:

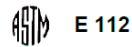
$N_A = 2616$  es el tamaño grano promedio de grano por  $\text{mm}^2$

$f =$  es el factor multiplicativo de Jeffrie 8

$N_{\text{Inside}} = 309$

$N_{\text{Intercepted}} = 36$

El factor de corrección de Jeffrie se lo obtiene de la tabla 5 de la norma ASTM E 112 para cada aumento del lente microscópico.



**TABLA 5 Relación entre el Aumento utilizado y el Multiplicador Jeffries,  $f$ , para un Área de  $5000 \text{ mm}^2$  (un círculo con un diámetro de  $79.8\text{-mm}$ ) ( $f = 0.0002 M^2$ )**

Aumento Utilizado	Multiplicador Jeffries, $f$ , para obtener granos/ $\text{mm}^2$
1	0.0002
10	0.02
25	0.125
50	0.5
75*	1.125
100	2.0
150	4.5
200	8.0
250	12.5
300	18.0
500	50.0
750	112.5
1000	200.0

**Figura 5. Factor de corrección de Jeffrie**

Fuente: (ASTM E 112, 2007)

Una vez obtenido el numero de granos se procede a determinar el diámetro de grano y el numero ASTM.

$$d \text{ prom} = \frac{1}{(N_A)^{\frac{1}{2}}}$$

$$d \text{ prom} = \frac{1}{(2616)^{\frac{1}{2}}} = 0.01955 \text{ mm}$$

$$G = \frac{\text{Log } N_A}{\text{Log } 2} - 2.95 = \frac{\text{Log } 2616}{\text{Log } 2} - 2.95 = 8.4$$

Donde  $d \text{ prom}$  es el diámetro de grano y  $G$  es el numero ASTM.

**Table 8.1 ASTM grain size numbers versus average grain diameter**

ASTM No.	Average diameter, $\mu\text{m}$	Relative size
-1	510	Very coarse
0	360	
1	250	Coarse
2	180	
3	125	
4	90	Medium
5	65	
6	45	
7	32	Fine
8	22	
9	16	
10	11	Very fine
11	8.0	
12	5.6	
13	4.0	Ultrafine
14	2.8	
15	2.0	

Fuente: (ASTM E 112, 2007)

**Figura 6 ASTM tamaño de grano versus diámetro de grano**

Según la figura 6.4 se puede decir que el grano del PANHARD AML-90 es fino por lo tanto esta información será empleada en el momento de seleccionar el tipo de grano para la simulación balística en ANSYS además Un índice ASTM grande indica, muchos granos, es decir, un tamaño de grano fino lo que implica altas resistencias.

Un material con grano fino es más duro y resistente que uno con granos gruesos, puesto que cuando existen granos finos existe un área local de límite de grano mayor para impedir el movimiento de las dislocaciones.

El esfuerzo a la fluencia se relaciona con el diámetro de grano por medio de la ecuación de Hall-Petch.

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-\frac{1}{2}}$$

$$k_y = (\sigma_y - \sigma_0) d^{\frac{1}{2}}$$

$$k_y = (1200 - 250) 0.0195^{\frac{1}{2}} = 132.836 \text{ Mpa mm}^{\frac{1}{2}}$$

Donde  $\sigma_0$ : esfuerzo movimiento de dislocaciones

$K_y$ : Coeficiente de fortalecimiento

$d^{\frac{1}{2}}$ : Diámetro de grano

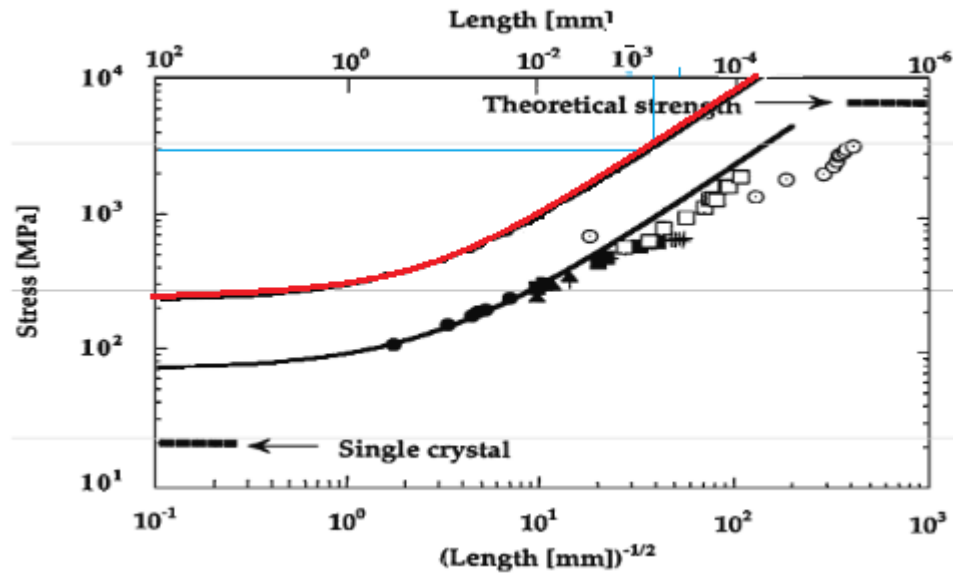
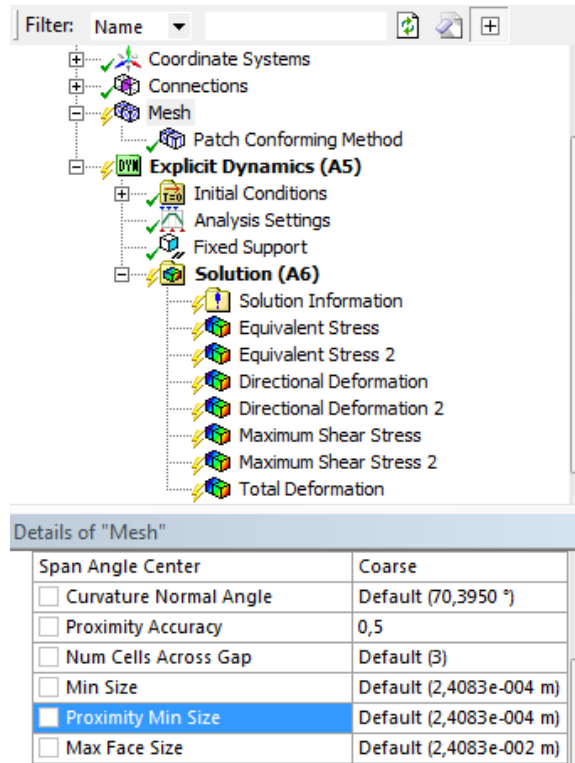


Figura 7. Esfuerzo vs diámetro de grano

Fuente: TR Smith

De manera especulativa se pueden determinar las constantes del material  $K_y$  y  $\sigma_0$  de manera gráfica haciendo referencia a la figura 6.5 Esfuerzo vs diámetro de grano para aceros haciendo una extrapolación se pueden obtener  $K_y = 132.836 \text{ Mpa mm}^{\frac{1}{2}}$  y  $\sigma_0 = 250 \text{ Mpa}$ .

Adicionalmente el examen metalográfico corroboró la distribución isotrópica y el tamaño de grano que fueron utilizados en el análisis de elementos finitos en ANSYS para validar el mallado de grano fino de acuerdo a la figura 6.4 así el tamaño de grano de ANSYS es del  $2.38 \times 10^{-2}$  versus  $1.955 \times 10^{-2}$  de la metalografía que representa un variación del 15%. La selección de tamaño de grano en el análisis de elementos finitos fue seleccionada de esta manera para facilitar la velocidad de análisis del computador. La variación de los resultados finales en términos de esfuerzos y deformaciones no varía significativamente.



**Figura 8. Tamaño de grano ANSYS**

Fuente: David Díaz

## ESTRUCTURA QUÍMICA

Los porcentajes en de los elementos químicos encontrados en la carrocería del Panhard AML-90 se pueden visualizar en la siguiente tabla.

**Tabla 1. Composición química del acero PANHARD AML-90**

Metales	Panhard AML-90	12560 Rango Máximo
	%	%
Carbón ( C )	0,273	0,32
Silicio ( Si )	0,268	-
Manganeso ( Mn )	0,568	-



<b>Fosforo ( P )</b>	0,0115	0,02
<b>Azufre ( S )</b>	0,0033	0,01
<b>Cobre ( Cu )</b>	0,114	0,25
<b>Cromo (Cr )</b>	2,287	-
<b>Niquel ( Ni )</b>	1,754	-
<b>Molibdeno ( Mo )</b>	0,564	-
<b>Aluminio ( Al )</b>	0,0066	0,1
<b>Cobalto ( Co )</b>	0,0355	-
<b>Titania ( Ti )</b>	<0.001	0,1
<b>Niobio ( Nb )</b>	<0.004	-
<b>Vanadio ( V )</b>	0,11	-
<b>Wolframio ( W )</b>	<0.010	-
<b>Plomo ( Pb )</b>	<0.0030	-
<b>Boro ( B )</b>	0,0015	0,003
<b>Estaño ( Sn )</b>	0,0133	-
<b>Cinc ( Zn )</b>	<0.002	-
<b>Arsénico ( As )</b>	0,022	-
<b>Bismuto ( Bi )</b>	<0.002	-
<b>Calcio ( Ca )</b>	0,0012	-
<b>Cerio ( Ce )</b>	<0.0030	-
<b>Circonio ( Zr )</b>	<0.002	-
<b>Lantano ( La )</b>	0,003	-
<b>Hierro ( Fe )</b>	93,96	-

Fuente: Adelca

Los porcentajes en peso tanto del cromo, níquel y molibdeno hacen que estos materiales se presenten en grandes cantidades respecto a otros. La combinación de los tres hace que el material se caracterice por una alta resistencia, tenacidad y ductibilidad por lo que serán de vital importancia tomarlos en cuenta los efectos que estos producen en el comportamiento mecánico. En los resultados de la composición química se destacó que la aleación está compuesta por una gran cantidad y variedad de elementos químicos. Por la cantidad de carbono encontrado se puede decir que se trata de un acero de medio contenido de carbono se encuentra en el rango de 0.25%

a 0.60%. Por su contenido de carbono pueden ser tratados térmicamente por templado y revenido mejorando así las propiedades mecánicas.

## CARACTERIZACIÓN MECÁNICA

Tabla 2 Caracterización mecánica acero PANHARD AML-90

Resultado de Ensayos Acero Panhard AML-90					
ENSAYOS MECANICOS	ENSAYO DE TRACCION				
	Resistencia a la Fluencia		Resistencia última		%
	(Mpa)	(Ksi)	(Mpa)	(Ksi)	
	1265	183.46	1337.1	193.92	17.546
	ENSAYO DE DUREZA				
	Dureza Rockwell C Scale,150 Kgf Load, Diamond Penetrator	Dureza Brinell,3000 Kgf Load 10 mm Ball	Resistencia Ultima (Mpa)	Resistencia Ultima (Ksi)	
	42	390		175.5	
	ENSAYO DE IMPACTO				
	Ensayo Charpy Longitudinal				
	Energía almacenada (Kg m)	Energía almacenada (pie – lb)	Energía almacenada (Joule)	Resiliencia (J/mm <sup>2</sup> )	
4.53333333	32.7896	44.4565867	0.5557		
Ensayo Charpy Transversal					
4.51666667	32.669	44.293	0.5537		

Fuente: David Díaz

Por los resultados obtenidos en los ensayos mecánicos podemos decir que se trata de una aleación con una alta resistencia a la fluencia de 1265 Mpa y con una alta dureza de 390 Brinell a pesar de su alta dureza el material tiene una gran ductibilidad. Así mismo presenta una gran capacidad de absorber energía de 44 Joules. Sus características lo convierten en un material bastante versátil el cual a pesar de la gran dureza que

posee tiene una gran ductibilidad y capacidad de absorber energía. Basándose en los resultados obtenidos por los distintos ensayos y al compararlos con la norma MIL-A-12560H se puede concluir que el acero empleado en la carrocería PANHARD AML-90 es un acero blindado clase 4b.

En base a la norma MIL-A-12560H el acero blindado clase 4b tiene las siguientes características de acuerdo a los literales mostrados a continuación.

- 1.2.6 El blindaje forjado templado debe alcanzar un máximo de dureza de HRC 41 (BHN 381).
- 3.2.5. Los resultados de la prueba de impacto Charpy V -notch de blindaje presentado para aceros blindados clase 4 debe ser superior a 20 ft- lb (27 J) en todo el espesor.
- 6.1.4 Los laboratorios de investigación y desarrollo determinaron que el acero presenta una alta resistencia y una alta ductibilidad.

**Tabla 3 Tabla comparativa Caracterización mecánicas acero PANHARD AML-90 vs Acero blindado Clase 4b**

Características	Norma MIL-12560 Acero blindado Clase 4b	Acero Panhard AML-90
Dureza(HB)	381	390
Charpy V-notch	Superior 27 J	44
Esfuerzo a la Fluencia (Mpa)	Alta resistencia	1265
% Elongación	Alta ductibilidad	17.546

Fuente: David Díaz

Para tener un mejor criterio de selección se comparo las características mecánicas y químicas de los aceros disponibles de la Bohler con las propiedades del acero empleado en la carrocería del PANHARD AML-90.

Los aceros Bohler disponen de de varios materiales con el espesor de ½ pulgada que son potenciales candidatos de material de reemplazo para las modificaciones en el Panhard AML-90 en la tabla

que se muestra a continuación se los presenta con sus propiedades mecánicas y la diferencia porcentual que tiene con el material base.

**Tabla 4. Comparación Aceros locales con acero Panhard AML-90.**

Resistencia a la Fluencia(Mpa)	PANHARD AML - 90	CHRONIT 400	DIFERENCIA %	CHRONIT 450	DIFERENCIA %	CHRONIT 500	DIFERENCIA %
	1265	1250	1.18	1450	14.6	1600	26.4
Dureza (HB)	390	390	0	450	15.38	490	25.6
Charpy Impacto (Joule)	44	40	9.09	25	43.18	25	43.2
Elongación %	17.546	10	43	8	54.4	8	54.4

Fuente: David Díaz

**Tabla 5. Comparación Química Aceros locales con acero Panhard AML-90.**

Metales	Panhard AML-90	CHRONIT 400	CHRONIT 500
	%	%	%
Carbón ( C )	0.273	0.25	0.35
Silicio ( Si )	0.268	0.55	0.55
Manganeso ( Mn )	0.568	1.6	1.6
Cromo ( Cr )	2.287	0.4	0.4
Titanio ( Ti )	<0.001	0.02	0.02
Boro ( B )	0.0015	0.004	0.004

Fuente: David Díaz

Con la finalidad de emitir un criterio de selección del acero más adecuado para el reemplazo de material en las partes modificadas de la carrocería del Panhard AML-90 se fundamentaron en base al criterio de la siguiente matriz de decisión donde los valores de ponderación más altos se los atribuyo a la resistencia a la fluencia, dureza, capacidad de absorber energía y ductibilidad.

**Tabla 6. Matriz de decisión**

<b>Resistencia a la Fluencia(Mpa)</b>	<b>PONDERACION</b>	<b>CHRONIT 400</b>	<b>CHRONIT 450</b>	<b>CHRONIT 500</b>
	35	35	35	35
<b>Dureza (HB)</b>	20	20	20	20
<b>Charpy Impacto (Joule)</b>	35	30	20	20
<b>Elongación %</b>	10	8	5	5
<b>Total</b>	100	93	80	80

Fuente: David Díaz

El resultado más óptimo en la matriz de selección pertenece al acero CHRONIT 400 en el cual se encuentra bajo disponibilidad inmediata en la ciudad de Quito en los aceros BOHLER del Ecuador. El acero CHRONIT 400 tiene varias las aplicaciones para elementos de movimiento de tierra, minerales y materiales abrasivos: dientes y palas retroexcavadoras, volquetes, maquinaria pesada, tolvas, trituradoras, prensas y lo más importante aplicaciones para blindajes lo cual convierte dicho material en el candidato más adecuado para el reemplazo de las partes modificadas en la carrocería del Panhard AML-90.

## **SIMULACION DE IMPACTO BALISTICO**

### **INTRODUCCION**

Para el propósito de estudio del comportamiento del material y validación del mismo ante un impacto de bala se ha desarrollado mediante un análisis de elementos finitos aplicados un software desarrollado en ANSYS 14.5 que permite la simulación de impacto balístico. Los ensayos balísticos demandan un gran numero pruebas de tiro lo cual implica material de prueba, municiones, un tirador que esté capacitado para

efectuar las pruebas balísticas y el empleo varios recursos mientras un software nos permite visualizar con bastante proximidad a la realidad el comportamiento del material. La cantidad de material para caracterizar el acero empleado en el PANHARD AML-90 fue bastante limitado para las pruebas fue bastante limitado razón por la cual no se pudo seguir los parámetros específicos de la norma MIL-12560 la cual especifica las dimensiones de las planchas de acero para realizar las pruebas. La simulación de un impacto balístico por medio de análisis de elementos finitos provee una alternativa que se acerca bastante a la realidad y puede ayudar para guiar el proceso de diseño y selección de materiales para realizar futuras modificaciones.

La investigación preliminar del impacto balístico en las partes de blindaje pasivo de la carrocería del PANHARD AML-90 se llevo a cabo empleando métodos de simulaciones numéricas de elementos finitos .Los datos de las características mecánicas obtenidas de manera experimental del acero empleado en la carrocería del PANHARD AML-90 fueron utilizadas para la simulación del impacto balístico entre el acero empleado en la carrocería contra una bala de calibre .50. Así mismo las características de velocidad de impacto óptimas y los parámetros requeridos para la ecuación de estado de impacto de la bala fueron aplicados en la simulación. El modelo matemático de Johnson-Cook fue empleado en la simulación para fines de análisis de impacto aplicando métodos Eulerianos.

#### **SOFTWARE UTILIZADO**

Todas las simulaciones de elementos finitos fueron realizadas usando Explicit Dynamics Mechanical herramienta de ANSYS WORKBENCH y AUTODYN. Resolviendo el modelo matemático en la interfaz del Dynamics Mechanical por medio de varias iteraciones dentro de un tiempo de exposición previamente determinado se pueden analizar importantes resultados tales como la deformación producida por el impacto de la bala sobre la carrocería, el esfuerzo cortante máximo que se puede producir una vez ocurrido el impacto y las características de resistencia que presenta el material después de sufrir el impacto.

Evaluated los resultados de la interfaz grafica ejecutada en AUTODYN se puede apreciar si la bala atraviesa o no la plancha de acero además se puede características importantes del material como la presión que es

ejercida entre la bala y la plancha de acero o la energía acumulada además se tiene una mejor interfaz grafica de cómo quedaría la plancha de acero después del impacto.

## **MODELO MATEMATICO Y PARAMETROS APLICADOS EN LA SIMULACION BALISTICA**

### **PARAMETROS CARACTERISTICOS Y MODELO MATEMATICO UTILIZADO PARA EL ACERO BLINDADO**

Antes de realizar el análisis se utilizó los datos obtenidos de la caracterización del acero de las partes pasivas del vehículo como condiciones de frontera para el análisis de elementos finitos. Al someter el acero empleado en la carrocería del vehículo PANHARD AML-90 a distintos ensayos mecánicos se logro obtener los siguientes resultados.

**Tabla 7.1 Propiedades mecánicas del acero balístico**

<b>Acero Balístico Panhard AML-90</b>	
<b>Yield Strength(Mpa)</b>	1268
<b>Ultimate Yield Strength(Mpa)</b>	1337
<b>Brinell Hardness</b>	400
<b>% Elongación</b>	16.7
<b>Charpy Test (Joule)</b>	45.11

Fuente: David Díaz

Para la simulacion balistica se tomaron en cuenta como condiciones de frontera la velocidad de la bala de 890 m/s en eje z que es la velocidad optima de impacto para un bala calibre .50, el empotramiento de la plancha de acero en sus cuatro lados que simula a como se efectuan los ensayos balisticos,las propiedades respectivas del nucleo de la bala y su ojiva y finalmente las propiedades mecanicas del acero

empleado en las partes de protección pasiva en el PANHARD AML -90 aplicadas en el modelo matemático de Johnson Cook el cual está representado por la siguiente ecuación.

El modelo de Johnson – Cook es un modelo mecánico de material que fue desarrollado especialmente para modelos metálicos implicados en condiciones de impacto, o compresión, de ahí que sea ampliamente utilizado en diferentes simulaciones de ensayos de impacto con materiales metálicos.

El modelo mecánico de Johnson – Cook reproduce el comportamiento de los materiales sujetos a grandes deformaciones, altas temperaturas y altas velocidades de deformación. La formulación de este método define la tensión equivalente de Von Mises como tres términos desacoplados donde el primero de ellos define la dependencia del endurecimiento por deformación, el segundo la sensibilidad de la deformación y el tercero la sensibilidad de la temperatura.

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] (1 - Th^m) \quad 6.1$$

Donde:

$\varepsilon$  = Resistencia plástica efectiva

$\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}$  = Razón de resistencia efectiva normalizada

$\dot{\varepsilon}$  = Razón resistencia efectiva plástica

$\dot{\varepsilon}_0$  = Razón de referencia equitativa

Th = Temperatura no dimensional normalizada

A = Esfuerzo de fluencia

B = Constante de endurecimiento

C = Razón constante de resistencia

n = Coeficiente de endurecimiento

m = Coeficiente de ablandamiento térmico



**Tabla 7.2 Parámetros Johnson –Cook para el acero balístico**

Parámetros	Simbología	Unidades	
Densidad	$\delta$	$Kg/m^3$	7790
Esfuerzo a la Fluencia	A	Mpa	1268
Constante de rigidez	B	Mpa	3340
Constante de Razón de esfuerzo	C		0.0114
Exponente térmico de reblandecimiento	m		0.94
Exponente de endurecimiento	n		0.89
Temperatura de fusión	Tm	K	1800
Temperatura de referencia	Tr	K	293
Calor Especifico	Cp	J/kg K	460

Fuente: Lee, M., Yoo, Y. H., Analysis of metal armour systems, International Journal of Impact Engineering, Vol. 25, pp. 819-829, Seoul 2001

**Figura 7.2 Parámetros Johnson –Cook & Gruneisen EOS ANSYS para el acero balístico**

Properties of Outline Row 3: Armor Steel				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Density	7986	kg m <sup>-3</sup>	
3	Specific Heat	477	J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	
4	Johnson Cook Strength			
5	Strain Rate Correction	First-O...		
6	Initial Yield Stress	1265	MPa	
7	Hardening Constant	3340	MPa	
8	Hardening Exponent	0.89		
9	Strain Rate Constant	0.014		
10	Thermal Softening Exponent	1		
11	Melting Temperature	1800	K	
12	Reference Strain Rate (/sec)	1		
13	Shear Modulus	81800	MPa	
14	Shock EOS Linear			
15	Gruneisen Coefficient	2.17		
16	Parameter C1	4569	m s <sup>-1</sup>	
17	Parameter S1	1.49		
18	Parameter Quadratic S2	0	s m <sup>-1</sup>	

Fuente: David Díaz

### 7.3.2 DIMENSIONES DE LA PLANCHA DE ACERO BLINDADO

La geometría de la plancha de acero fue dada en Autodesk Inventor 2014 en este software se dio las dimensiones de la plancha de acero basadas en la norma MIL-A-12560H.

**Figura 7.3 Dimensiones de la plancha de acero blindado para pruebas de impacto balísticas**

Nominal thickness range, inches	Minimum size $\frac{1}{2}$ of test plates, inches	Test projectile and obliquity
0.25 to 0.565 incl.	12 x 36	Cal .30 M2 AP at 0°
0.566 to 1.125 incl.	12 x 36	Cal .50 M2 AP at 0°
1.126 to 2.750 incl.	12 x 36	20 mm M602 APIT at 0°
2.751 to 3.500 incl.	60 x 60	90 mm M82 APC at 45°
3.501 to 3.999 incl.	60 x 60	90 mm M82 APC at 30°
4.00 to 6.250 incl.	60 x 60	90 mm M318A1 AP at 0°
Over 6.251 $\frac{2}{2}$	---	---

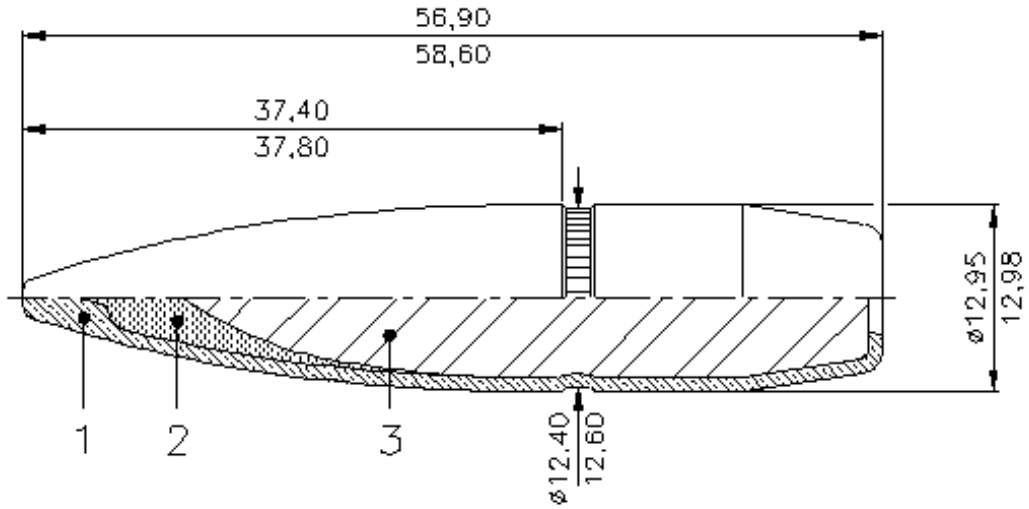
Fuente: MIL-A-12560H Tabla IX

### 7.3.3 PARAMETROS CARACTERISTICOS PARA LA MUNICION CALIBRE .50

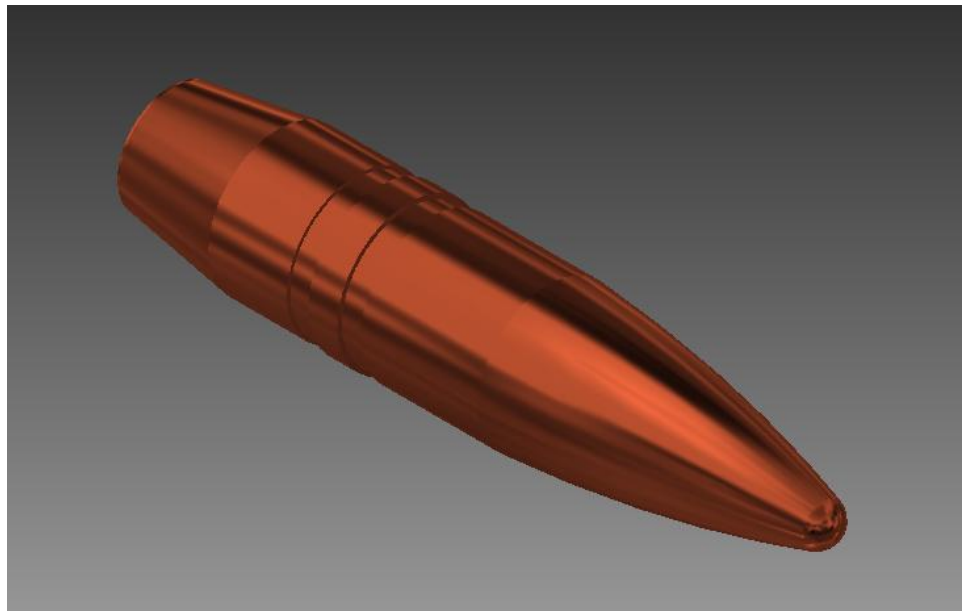
La munición de calibre .50 esta compuesta por una camisa de cobre y un núcleo de acero o plomo.

En las tablas siguientes se detallaran los parámetros respectivos para cada uno de sus componentes.

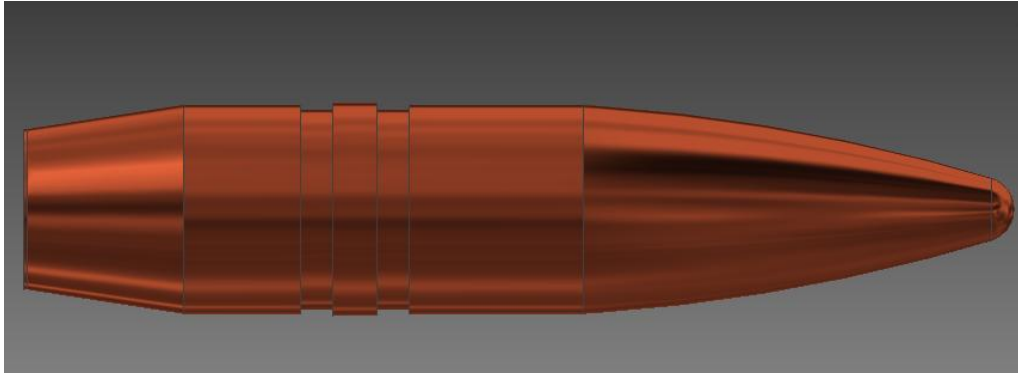
Para la geometría de la bala se baso en las dimensiones de la compañía Brasileira CBC. Con dichas dimensiones se importo la geometría en Autodesk Inventor\



**Figura 7.4 Dimensiones Munición calibre.50**  
 Fuente: Compañía Brasileira de cartuchos CBC



**Figura 7.5 Calibre.50 Isometría Autodesk Inventor**  
 Fuente: David Díaz



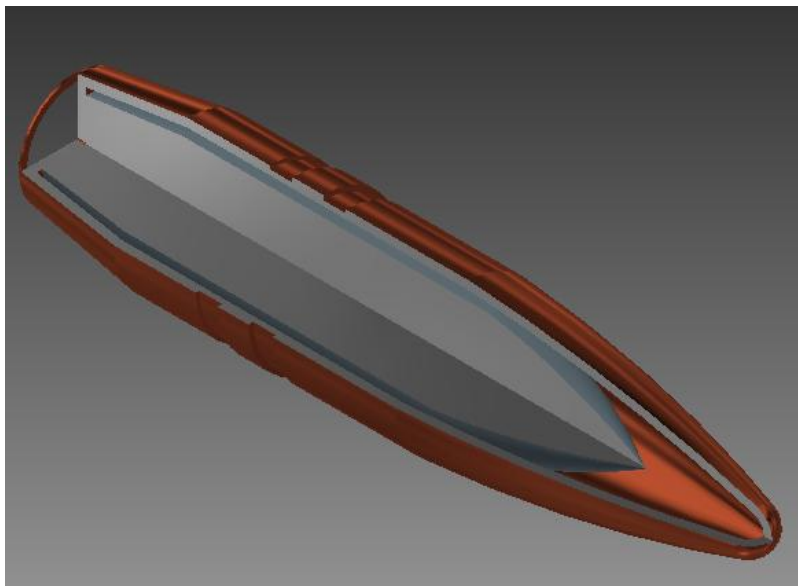
**Figura 7.6 Calibre.50 Vista Lateral Autodesk Inventor**

Fuente: David Díaz



**Figura 7.7 Calibre.50 Vista Lateral Corte Autodesk Inventor**

Fuente: David Díaz















**Figura 7.8 Calibre.50 Vista Isométrica Corte Autodesk Inventor**

Fuente: David Díaz

### 7.3.4 PARAMETROS CARACTERISTICOS PARA LA MUNICION CALIBRE .50













Los parámetros característicos fueron asignados a cada parte que conforma la bala de calibre .50 en las tablas que se presentan a continuación se pueden observar las propiedades mecánicas y de impacto características de cada material.

**Figura 7.9 Propiedades mecánicas y de impacto del cobre**

Properties of Outline Row 4: Cooper				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	 
2	 Density	8930	kg m <sup>-3</sup> 	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
3	 Bilinear Isotropic Hardening			<input type="checkbox"/>
4	Yield Strength	70	MPa 	<input type="checkbox"/>
5	Tangent Modulus	91	Pa 	<input type="checkbox"/>
6	 Shear Modulus	45000	MPa 	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
7	 Shock EOS Linear			<input type="checkbox"/>
8	Gruneisen Coefficient	1.99		<input type="checkbox"/>
9	Parameter C1	3940	m s <sup>-1</sup> 	<input type="checkbox"/>
10	Parameter S1	1.489		<input type="checkbox"/>
11	Parameter Quadratic S2	0	s m <sup>-1</sup> 	<input type="checkbox"/>

Fuente: David Díaz

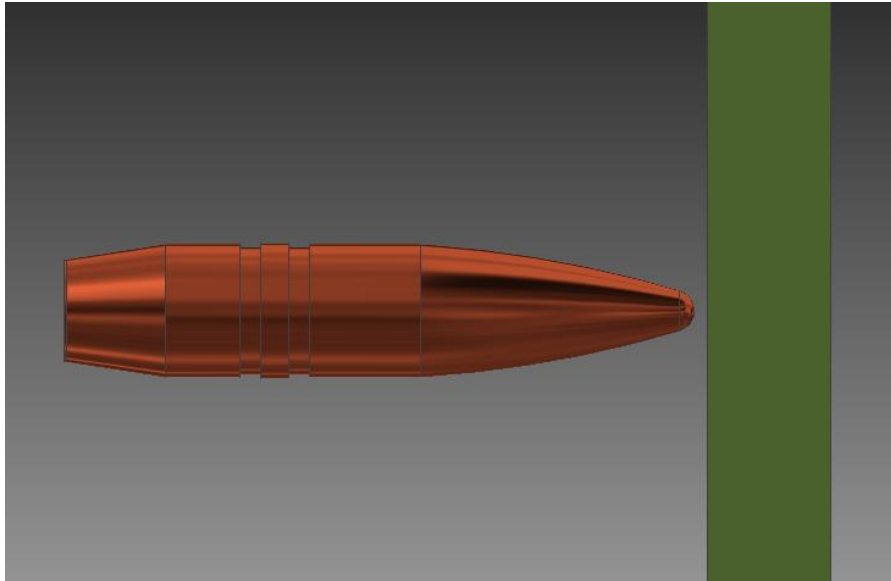
**Figura 7.10 Propiedades mecánicas y de impacto del núcleo de plomo**

Properties of Outline Row 5: Lead				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	 
2	 Density	11350	kg m <sup>-3</sup> 	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
3	 Bilinear Isotropic Hardening			<input type="checkbox"/>
4	Yield Strength	5	MPa 	<input type="checkbox"/>
5	Tangent Modulus	6.5	MPa 	<input type="checkbox"/>
6	 Shear Modulus	5600	MPa 	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
7	 Shock EOS Linear			<input type="checkbox"/>
8	Gruneisen Coefficient	2.77		<input type="checkbox"/>
9	Parameter C1	2051	m s <sup>-1</sup> 	<input type="checkbox"/>
10	Parameter S1	1.46		<input type="checkbox"/>
11	Parameter Quadratic S2	0	s m <sup>-1</sup> 	<input type="checkbox"/>

Fuente: David Díaz

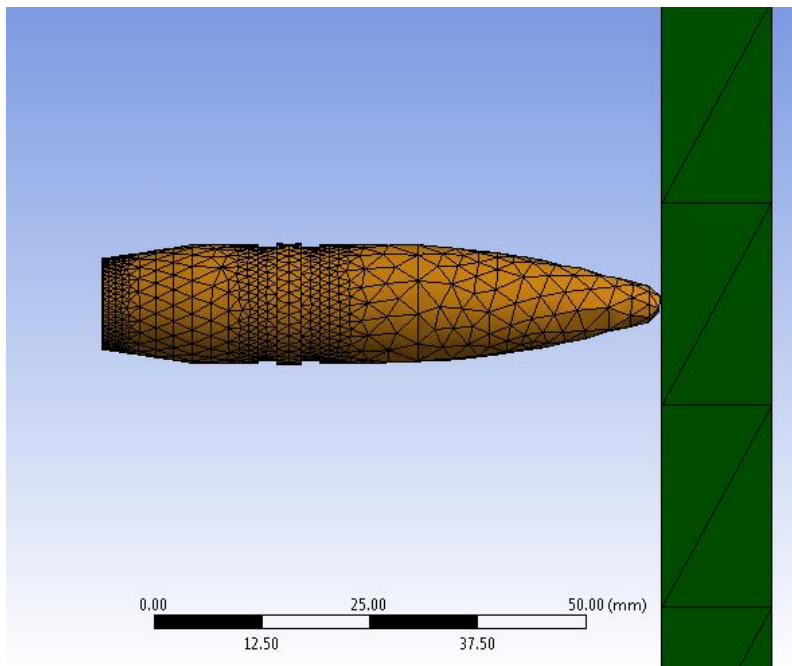
Una vez ingresadas las condiciones de frontera se importo las geometrías de la munición con la plancha de acero balístico al Explicit Dynamics Mechanical en la figura a continuación se puede observar los

resultados del mallado y la importación del ensamblaje a la interfaz de ANSYS. Como indica la norma MIL-A-12560H el impacto se hace a 0 grados.



**Figura 7.12 Vista conjunta Calibre.50 y plancha de acero balístico Autodesk Inventor**

Fuente: David Díaz



**Figura 7.13 Vista conjunta Calibre.50 y plancha de acero balístico mallado Explicit Dynamics Mechanical**

Fuente: David Díaz

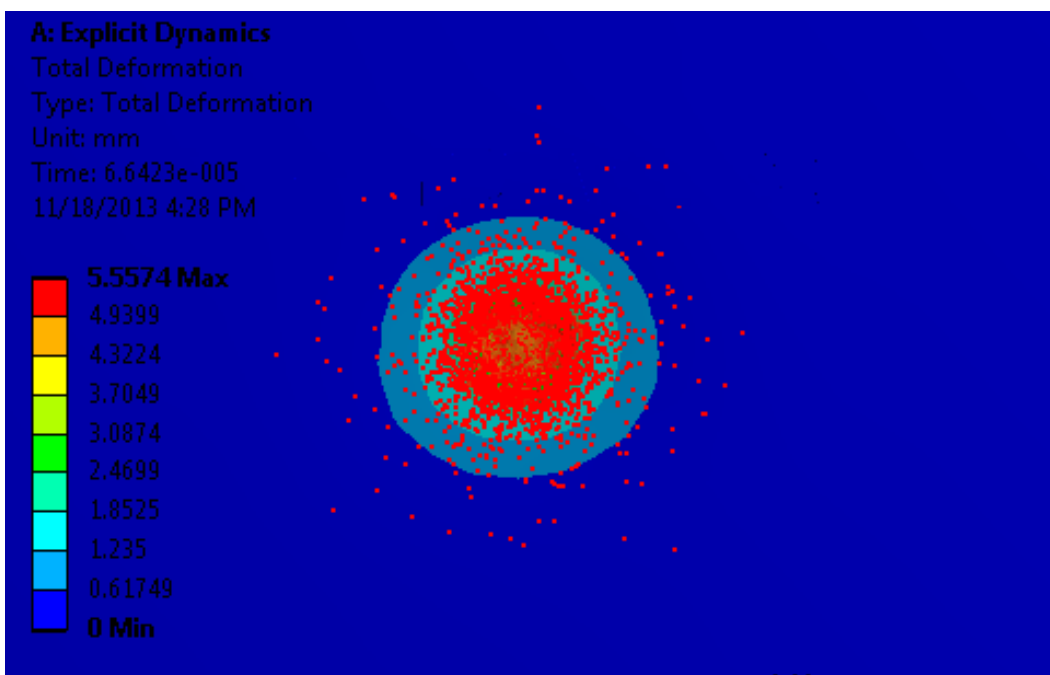
#### 7.4. SIMULACION EXPLICIT DYNAMICS MECHANICAL IMPACTO BALISTICO CON MUNICION DE NUCLEO DE PLOMO

Por medio de Explicit Dynamics Mechanical una aplicación de Workbench de Ansys se realizo un análisis de elementos finitos por medio de un mallado Euleriano y poniendo condiciones de frontera antes dichas se obtuvieron los siguientes resultados.

##### 7.4.1 DEFORMACIÓN TOTAL DE LA PLANCHA DE ACERO BALÍSTICO

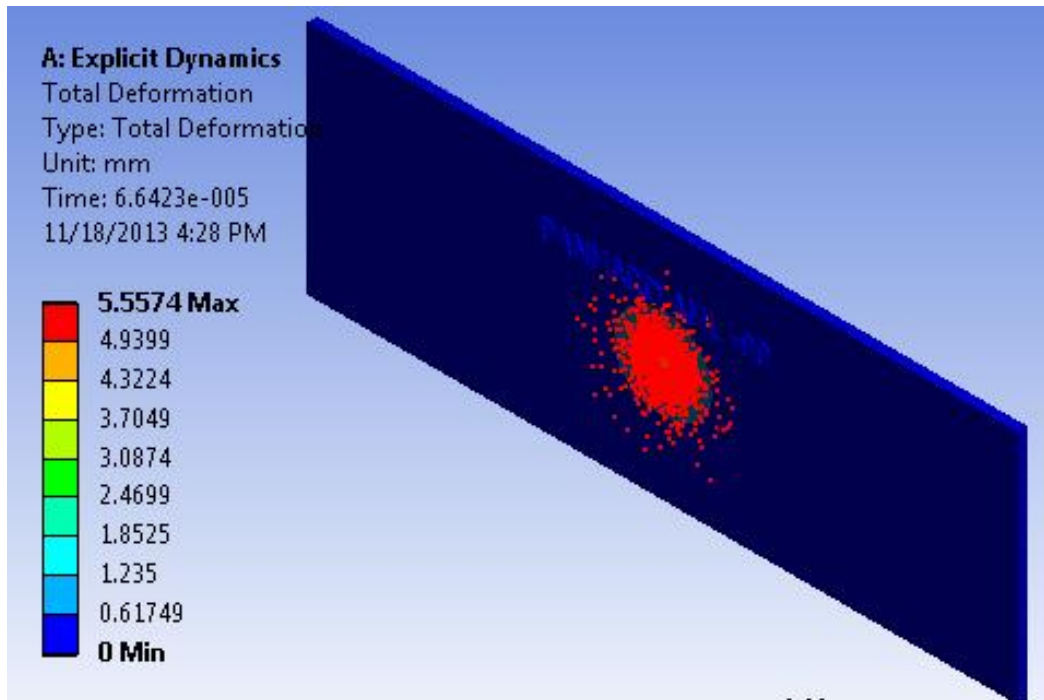
En el primer análisis se reflejan los resultados de la deformación total de la plancha de acero después de ser sometida a una impacto de la munición calibre .50 donde se puede observar el desplazamiento de la cara frontal. La interpretación de colores esta dada por el color rojo que representa el desplazamiento máximo y el color azul representa el desplazamiento mínimo.

En las siguientes figuras se puede observar los resultados en sus respectivas vistas.



**Figura 7.14 Vista Frontal de la Deformación Total Acero Balístico**

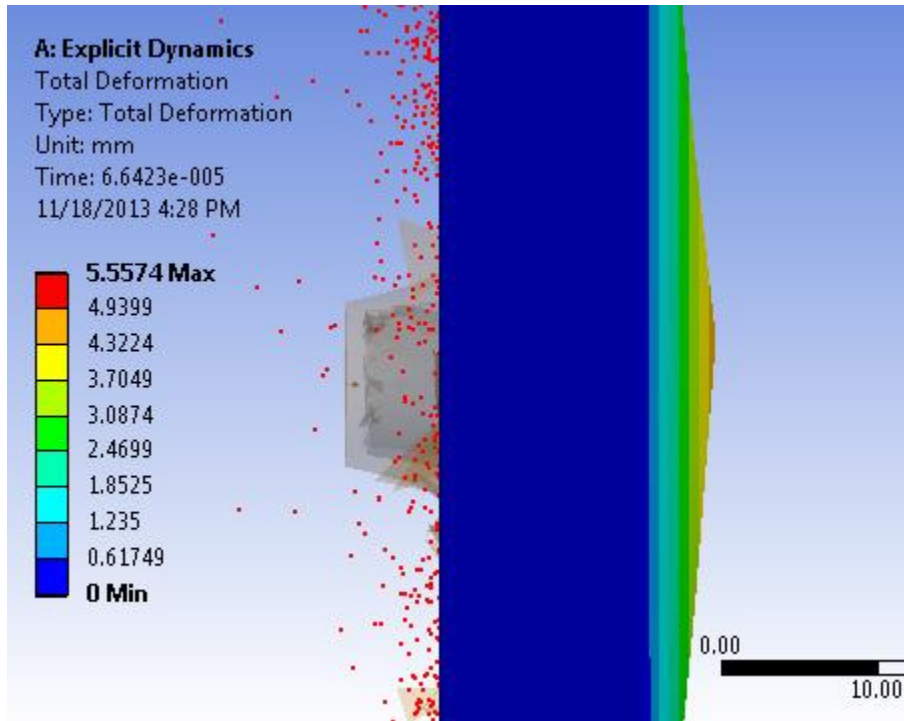
*Fuente: David Díaz*



**Figura7.15 Vista Isométrica de la Deformación Total Acero Balístico**

*Fuente: David Díaz*





**Figura 7.16 Vista Lateral de la Deformación Total Acero Balístico**

*Fuente: David Díaz*

El espesor original de la plancha de acero es de 12.7 mm la deformación total máxima es 5.5574mm

$$\text{Longitud Final} = \text{Deformacion Maxima} + \text{Longitud Inicial} \quad 6.1$$

$$\text{Longitud Final} = (5.5574 + 12.7) = 18.25 \text{ mm}$$

$$\% \text{ Incremento Impacto} = \frac{(\text{Longitud final} - \text{Longitud Inicial})}{(\text{Longitud inicial})} * 100 \quad 6.2$$

$$\% \text{ Incremento Impacto} = \frac{(18.25 - 12.7)}{(12.7)} * 100 = 43.7\%$$

#### 7.4.1.1 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA DEFORMACIÓN TOTAL ACERO BALÍSTICO

La deformación máxima es de 5.5574 mm por efecto del impacto de la bala al tiempo de  $6.64 \times 10^{-5}$  segundos su longitud inicial aumenta a 18.25 mm. Además podemos observar que la bala no penetra la plancha de acero debido a la gran resistencia a la fluencia y porcentaje de elasticidad que posee el material del tanque Panhard AML-90. Sin embargo una deformación de tal magnitud es considerable al ver que su longitud aumenta en 43.7%.

#### 7.4.2 DEFORMACIÓN DIRECCIONAL DE LA PLANCHA DE ACERO BALÍSTICO

En el análisis a continuación se pueden ver los resultados de la deformación direccional de la cara trasera de la plancha de acero después de ser sometida al impacto de la bala calibre .50. La interpretación de colores esta dada por el color azul que representa el desplazamiento máximo y el color rojo representa el desplazamiento mínimo esto se debe a nuestro sistema de referencia en donde la dirección del desplazamiento esta en sentido contrario respecto a dicho eje.

En las siguientes figuras se puede observar los resultados en sus respectivas vistas.

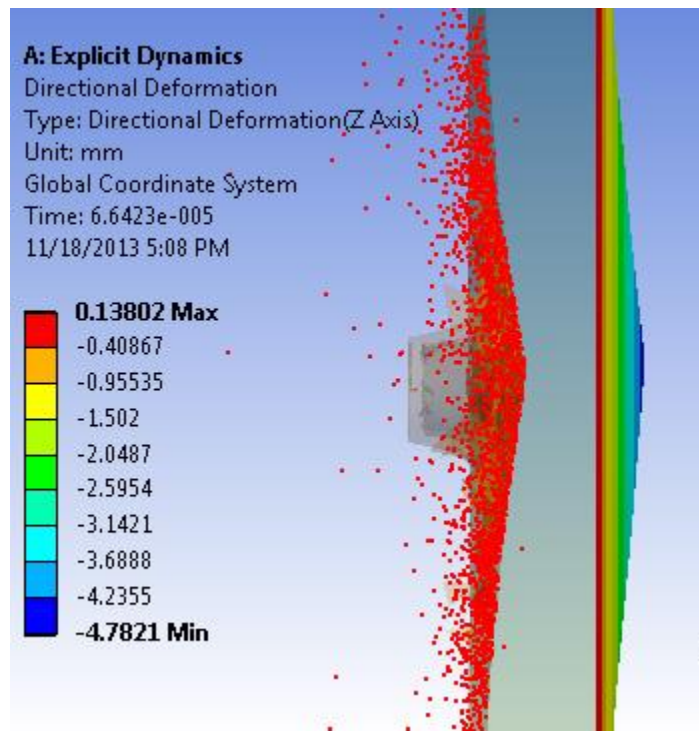


Figura 7.18 Vista Lateral de la Deformación Direccional Acero Balístico

Fuente: David Díaz

El espesor original de la plancha de acero es de 12.7 mm la deformación total máxima es 4.78

$$L_{final} = L_i + \text{deformacion max} \quad 6.3$$

$$\text{Incremento debido al Impacto} = (12.7 + 4.78) = 17.48 \text{ mm}$$

$$\% \text{ Incremento Impacto} = \frac{(\text{Longitud final} - \text{Longitud inicial})}{(\text{Longitud inicial})} * 100 \quad 6.4$$

$$\% \text{ Incremento debido al Impacto} = \frac{(17.48 - 12.7)}{(12.7)} * 100 = 37.63\%$$

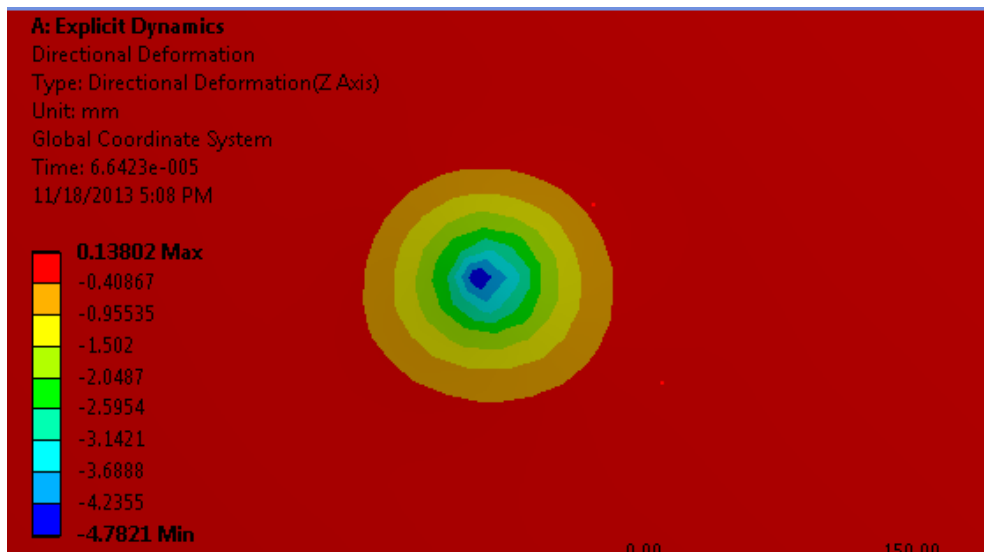
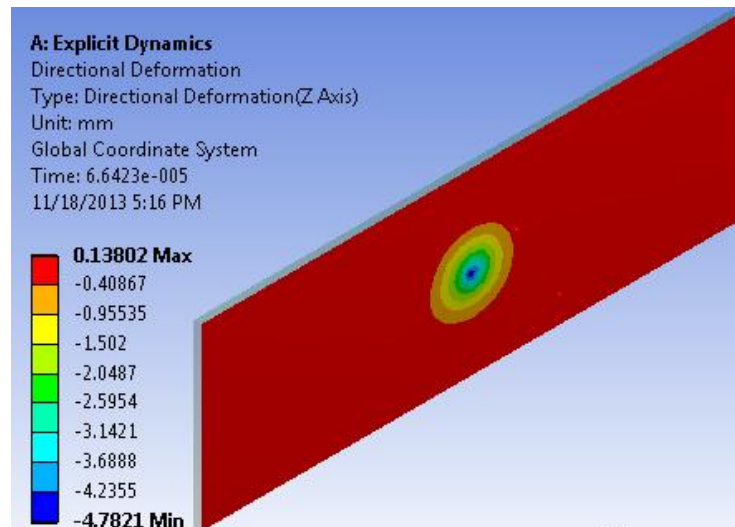


Figura 7.19 Vista Frontal de la Deformación Direccional Acero Balístico

Fuente: David Díaz



**Figura 7.15 Vista Isométrica de la Deformación Direccional Acero Balístico**

*Fuente: David Díaz*

#### **7.4.2.1 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS**

La deformación máxima es de 4.78 mm por efecto del impacto de la bala al tiempo de  $6.64 \times 10^{-5}$  segundos su longitud inicial aumenta 17.48 mm. Además podemos observar que la bala no penetra la plancha de acero debido a la gran magnitud de resistencia a la fluencia y porcentaje de elasticidad que tiene el material. Sin embargo una deformación de tal magnitud es considerable al ver que su longitud aumenta en 37.63%.

#### **7.4.3 ANÁLISIS DE ESFUERZO CORTANTE MÁXIMO**

En el siguiente análisis se pueden ver los resultados del esfuerzo cortante máximo en la plancha de acero después de ser sometida al impacto de la bala calibre .50. La interpretación de colores esta dada por el color rojo que representa el mayor valor del esfuerzo cortante máximo. Se hizo un análisis para la cara frontal que es la que recibe el impacto de la bala y para la cara paralela trasera de la plancha de acero con la

finalidad de comparar los resultados.

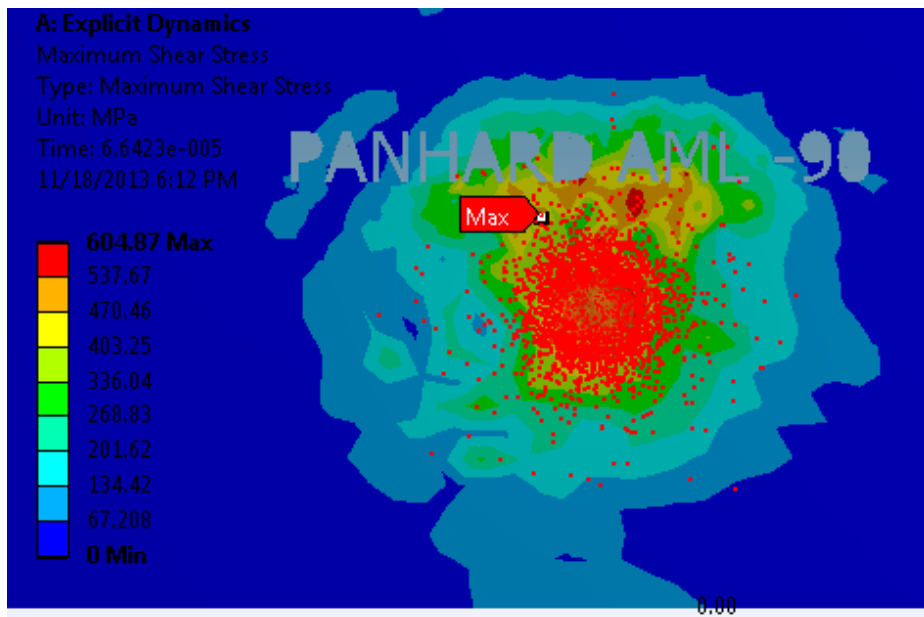


Figura 7.21 Vista Frontal Esfuerzo Cortante Máximo aplicado en la cara frontal del Acero Balístico

Fuente: David Díaz

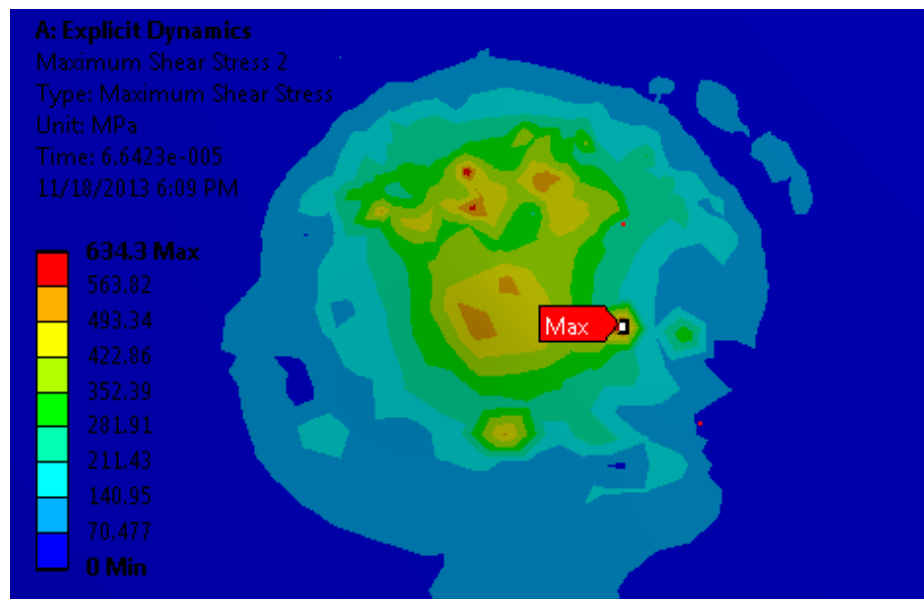


Figura 7.22 Vista Frontal Esfuerzo Cortante Máximo aplicado en la cara trasera del Acero Balístico

Fuente: David Díaz

Fuente: David Díaz

En los resultados de los análisis experimentales de la caracterización del acero empleado en la carrocería Panhard AML-90 se obtuvo una Resistencia a la fluencia de 1265 Mpa y un porcentaje de elongación del 17.54% razón por la cual se puede considerar al material empleado es dúctil y por lo tanto se puede emplear la siguiente ecuación.

$$\tau = \frac{Sy}{2} \quad 6.5$$

$$\tau = \frac{1265 \text{ Mpa}}{2} = 632.5 \text{ Mpa}$$

Observamos que en el resultado de la simulación en Explicit Dynamics Mechanical tenemos un esfuerzo cortante máximo de 604.87 Mpa en la cara frontal y 634.3 en la cara trasera. Al Comparar los resultados teóricos con los resultados obtenidos por la simulación podemos observar lo siguiente.

Cara frontal

$$Error\% = \frac{Valor \text{ teorico} - Valor \text{ practico}}{Valor \text{ practico}} * 100 \quad 6.6$$

$$Error\% = \frac{604.87 - 632.5}{632.5} * 100 = 4.36\%$$

Cara trasera

$$Error\% = \frac{Valor \text{ teorico} - Valor \text{ practico}}{Valor \text{ practico}} * 100 \quad 6.7$$

$$Error\% = \frac{634.3 - 632.5}{632.5} * 100 = 0.28\%$$

#### 7.4.3.1 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

El esfuerzo cortante máximo es de 604.87 Mpa mm y 632.5 Mpa en la cara frontal y trasera. Al hacer una comparación entre los valores obtenidos por la simulación en Explicit Dynamics Mechanical y el valor del esfuerzo cortante máximo teórico podemos observar que existe una diferencia pequeña de 4.36 y 0.28 % que se encuentran dentro de un rango del 5% que es aceptado.

#### 7.4.4 ANÁLISIS DE ESFUERZO EQUIVALENTE DE VON –MISES

En el siguiente análisis se pueden ver los resultados del esfuerzo equivalente de Von-Mises. Después de que la bala impacta al material la Resistencia a la fluencia sufre un decremento de tal manera que las propiedades mecánicas que la carrocería Panhard AmL-90 son afectadas. La interpretación de colores esta dada por el color rojo que representa el mayor valor del esfuerzo equivalente para tener un análisis más detallado se analizo la cara frontal y trasera de la plancha de acero.

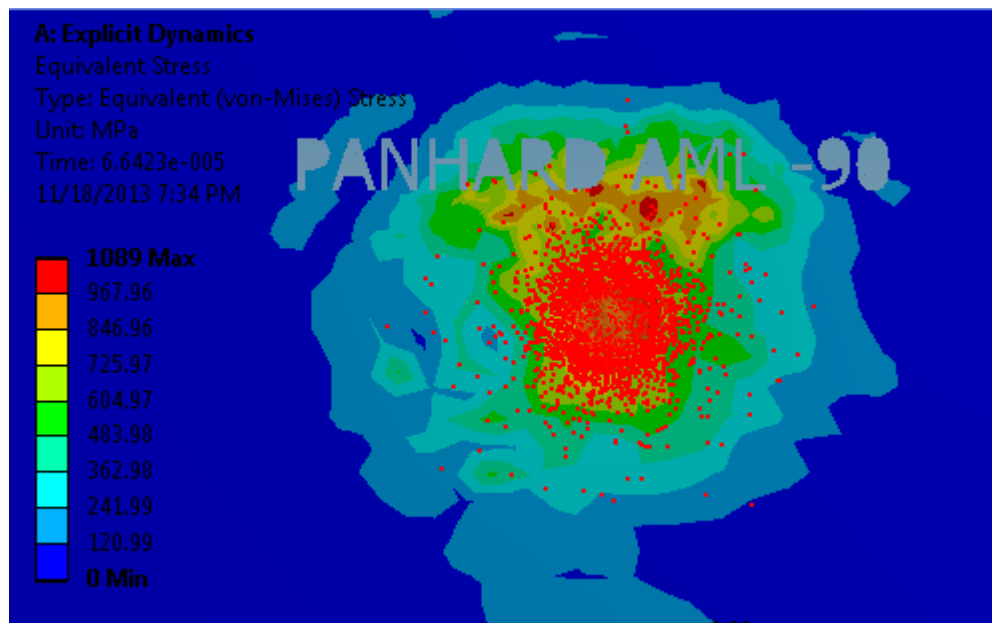
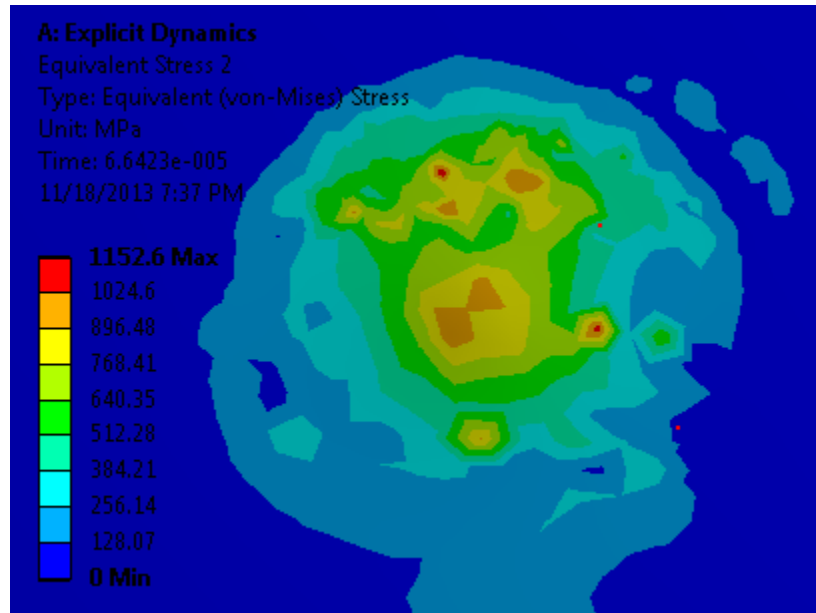


Figura 7.25 Vista Frontal Esfuerzo Equivalente Von -Mises Acero Balístico Cara Frontal

Fuente: David Díaz



**Figura 7.26 Vista Trasera Esfuerzo Equivalente Von -Mises Acero Balístico Cara Trasera**

Fuente: David Díaz

#### **7.4.4.1ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS**

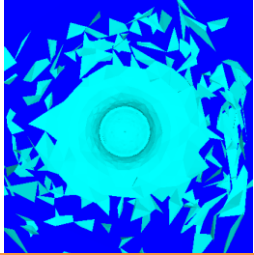


El esfuerzo equivalente Von -Mises fueron 1089 y 1152.6 Mpa en la cara frontal y trasera de la plancha de acero respectivamente. Al hacer una comparación de los valores obtenidos por la simulación en Explicit Dynamics Mechanical y el valor del esfuerzo a la fluencia del material de 1265 Mpa podemos concluir que el material no entra a la fluencia razón por la cual podemos decir que el material resiste el impacto balístico sin que sea penetrado por la munición.

#### **7.45 VALIDACION SIMULACION DE IMPACTO BALISTICO ANSYS**

Con la finalidad de validar la simulación se compara los resultados obtenidos en las pruebas balísticas con los resultados de la simulación de esta manera se puede determinar que tan certeros son los resultados de las simulaciones con la realidad.



**Tabla comparativa y de validación para la simulación**

Características	Simulación Impacto balístico munición ordinaria núcleo de plomo ANSYS	Impacto balístico con munición ordinaria núcleo de plomo			
		Prueba 1	Diferencia %	Prueba 2	Diferencia %
					
<b>Perforación</b>	No	No	-	No	-
<b>Deformación Direccional</b>	4.7	4.48	4.9	4.52	3.98

Fuente: David Díaz

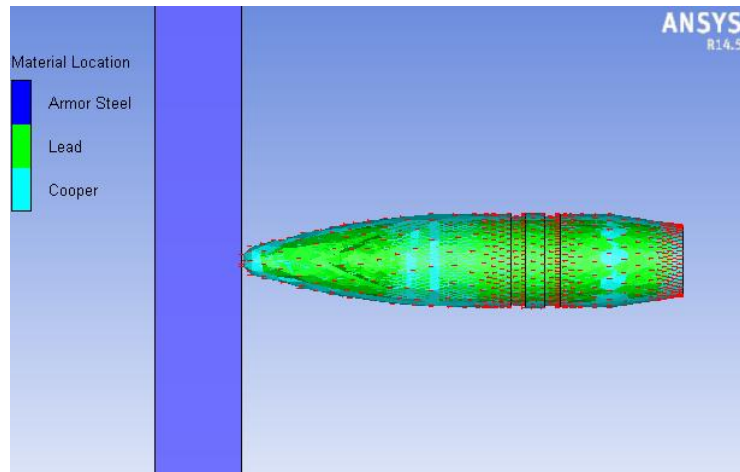
Al tener una diferencia porcentual menor del 5 % se puede considerar a la simulación de impacto balístico como aceptable en la simulación se da una deformación direccional de de 4.7 mm lo cual nos muestra un criterio conservador a lado de las deformaciones direccionales que se obtuvieron en las pruebas balísticas de 4.48 y 4.52 respectivamente.

### 7.5 SIMULACION DINAMICA AUTODYN

Autodyn es una interfaz grafica de Ansys en donde se puede observar con detenimiento el comportamiento de la bala al ser sometida al impacto así mismo se puede distinguir que efectos tiene el impacto balístico sobre la plancha de acero blindada. En la figuras a continuación se puede observar detalladamente el impacto de la bala.

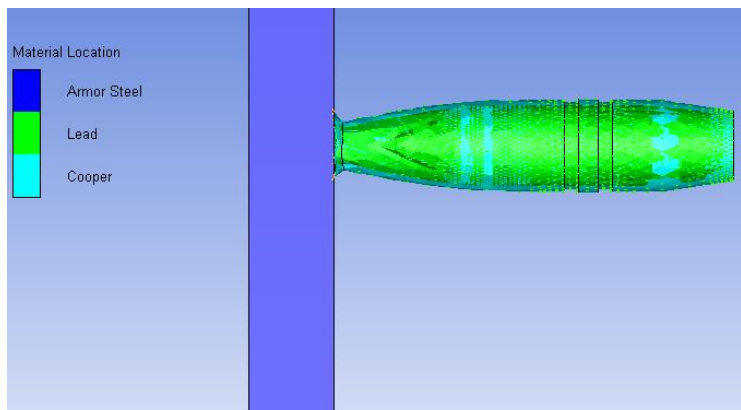
### Contorno grafico de locación de los respectivos materiales

En esta interfaz se puede ver el comportamiento de cada material en el momento de ser sometido a un impacto. En las figuras a continuación se podrá apreciar este comportamiento a distintos ciclos.



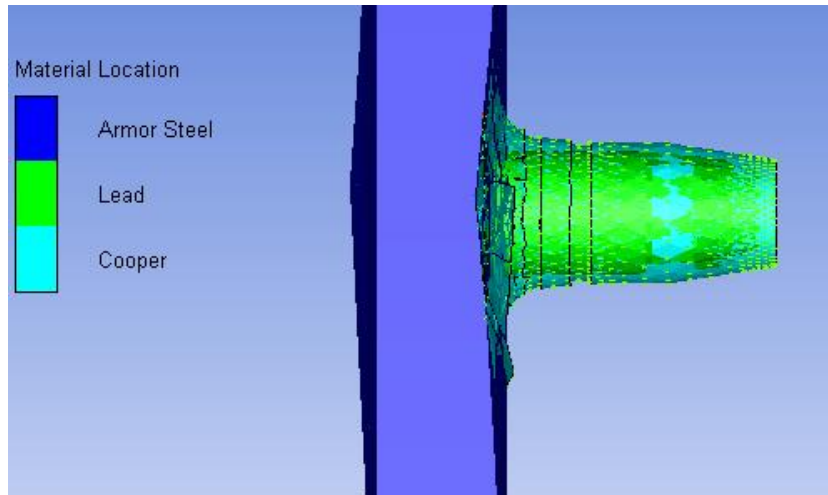
**Figura 7.29 Simulación de impacto balístico munición con núcleo de plomo calibre .50**

Fuente: David Díaz



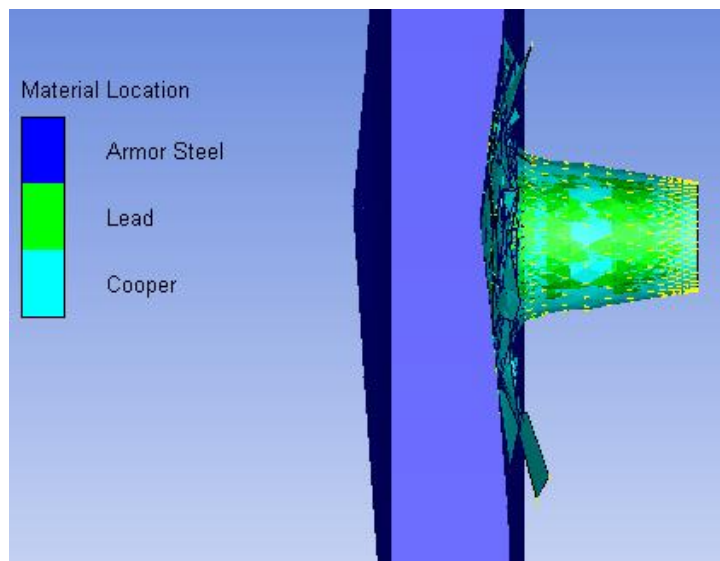
**Figura 7.30 Simulación de impacto balístico munición con núcleo de plomo calibre .50**

Fuente: David Díaz



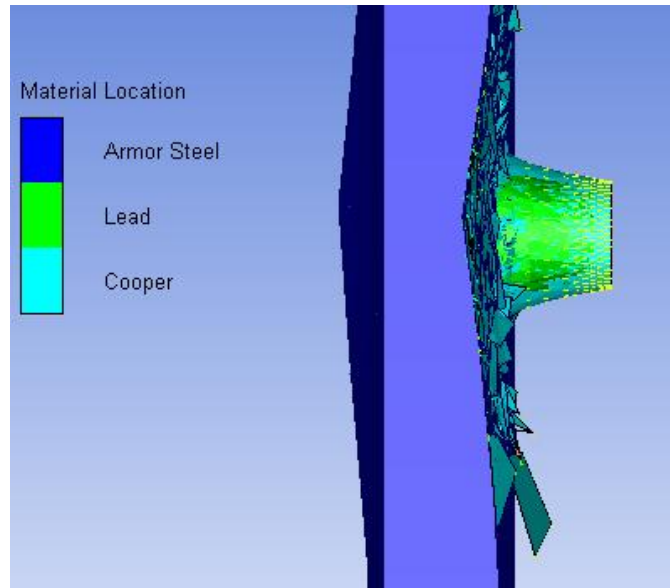
**Simulación de impacto balístico munición con núcleo de plomo calibre .50**

Fuente: David Díaz



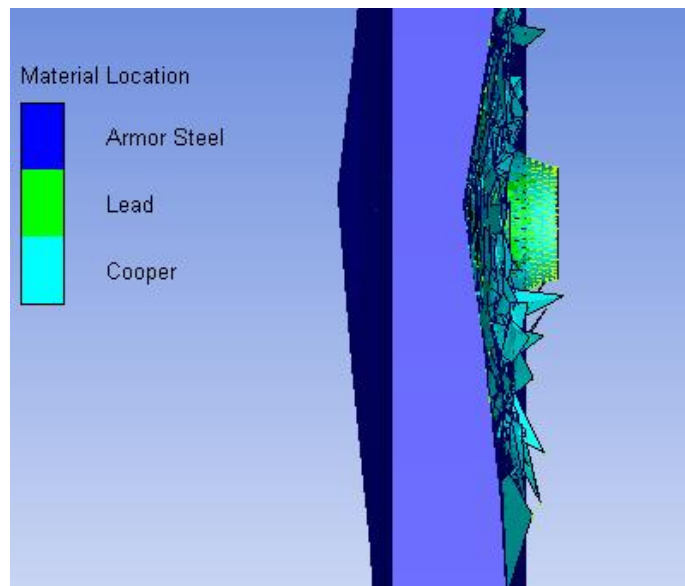
**Simulación de impacto balístico munición con núcleo de plomo calibre .50**

Fuente: David Díaz



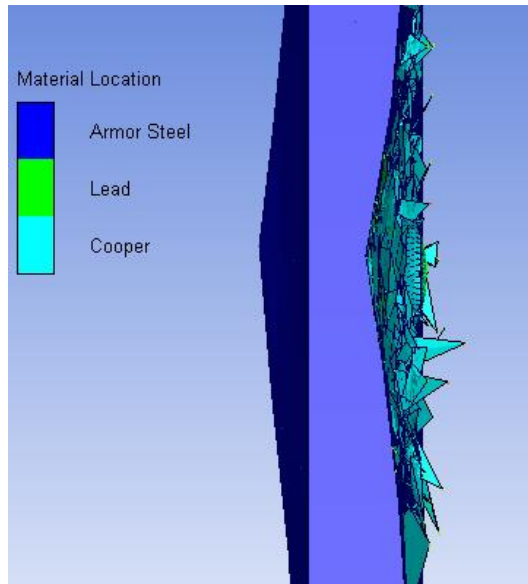
**Simulación de impacto balístico munición con núcleo de plomo calibre .50**

Fuente: David Díaz



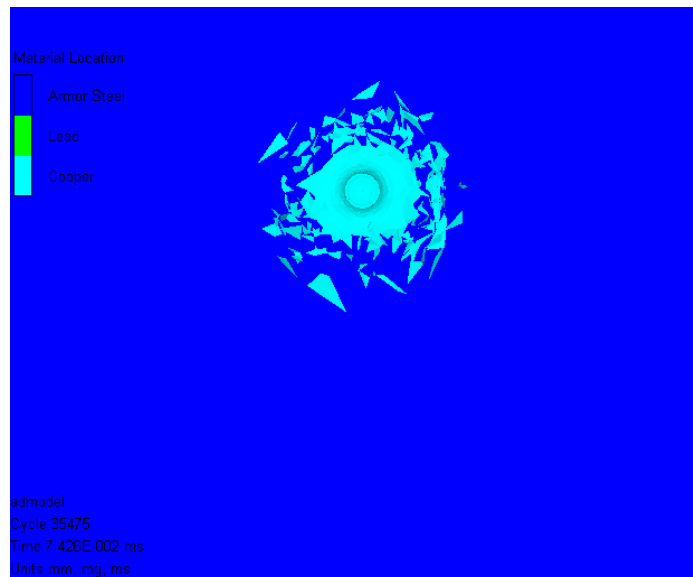
**Figura 7.34 Simulación de impacto balístico munición con núcleo de plomo calibre .50**

Fuente: David Díaz



**Simulación de impacto balístico munición con núcleo de plomo calibre .50**

Fuente: David Díaz



**Simulación de impacto balístico vista frontal munición con núcleo de plomo calibre .50**

Fuente: David Díaz

La simulación balística muestra que existe un trauma considerable por parte de la bala sin embargo no existe penetración. Por medio de Ansys Mechanical se puede medir esta deformación direccional correspondiente a 4,78 mm.

## CONCLUSIONES

- Por su composición química se determinó que el acero empleado en el PANHARD AML-90 es de medio contenido de carbono ya que se encuentra en el rango de 0.25% a 0.60%. La combinación y la gran cantidad en porcentaje en peso del cromo, níquel y molibdeno hacen que el material posea una gran resistencia, tenacidad y ductibilidad por lo que serán de vital importancia tomarlos en cuenta los efectos que estos producen en el comportamiento mecánico.
- En los resultados de la composición química se destacó que la aleación está compuesta por una gran diversidad de elementos químicos razón por la cual esta aleación es tan única.
- La versatilidad que presenta el material empleado en el vehículo PANHAR AML-90 hace que dicha aleación sea única teniendo propiedades mecánicas como una gran resistencia a la fluencia de 1265 Mpa con una dureza de 390 HB acompañados de un porcentaje de elongación de 17.5% lo cual coloca al material como un material dúctil a pesar del gran valor de su dureza.
- Comparando los resultados obtenidos de los respectivos ensayos en los laboratorios tanto de caracterización metalografía y mecánica con la norma MIL-12560 se puede concluir que el material empleado en el PANHARD AML-90 es un material blindado clase 4b.
- Al realizar el ensayo de tracción se encontró en dos de las probetas el material no estaba compuesto de una sola plancha de acero si no habían sido soldados algunos retazos para conformar la geometría de la puerta. En

dicho ensayo se descubrió rastros de soldadura después de haber realizado una rigurosa inspección visual. Además el mal proceso de soldadura puede afectar de manera drástica a las propiedades del material reduciendo la resistencia a la fluencia original del material de 1265 Mpa a 514.6 y 613.23 Mpa aproximadamente el 50 %.

- La simulación de impacto balístico emulada en ANSYS MECHANICAL aplicando un análisis de elementos finitos muestra grandes prestaciones y determina varias propiedades de importancia como el esfuerzo cortante que ejerce el impacto de una bala, el esfuerzo resultante, la deformación direccional en la plancha de acero y por medio de una interfaz grafica muestra las secuelas del trauma después del impacto. Dichos resultados tienen absoluta validez ya que la diferencia entre los resultados reales y los simulados no tienen una variación mayor al 5% por lo tanto son aceptables.
- El material CHRONIT 400 no tiene exactamente las mismas propiedades del acero empleado en el PANHARD AML -90 sin embargo es el candidato más idóneo debido a que la resistencia a la fluencia es de 1250 Mpa teniendo una diferencia de 1.18% respecto al material y posee la misma dureza de 390 HB además tiene una alta disponibilidad en el mercado local.
- Al presentar características similares el CHRONIT 400 con el acero empleado en el PANHARD AML-90 el comportamiento del material al impacto balístico tendrá un comportamiento similar esto se puede concluir

debido a que el error porcentual entre el resultado de la simulación con la realidad no supera el 5 %.

- Al realizar las pruebas balísticas se demostró que el blindaje de la carrocería del PANHARD AML- 90 solo soporta municiones ordinarias calibre .50 tipo M2. En el caso de usar alguna variante de esta munición como perforante trazadora incendiaria o perforante la munición penetrara a la placa de acero.
- Según la normas MIL-C-3066B y MIL-C-60666 una munición perforante incendiaria trazadora o perforante calibre .50 producirá una penetración total al momento de realizar un impacto balístico en placas de acero blindado de 7/8” cuando se realiza el disparo a 100 yardas. El impacto balístico realizado sobre la plancha de acero del PANHAR AML-90 fue realizado a 200 yardas con las municiones mencionadas pero vale recalcar el espesor de la plancha blindada de este vehículo es de 1/2” menor al espesor señalado por las normas, quedando así justificada la penetración total por parte de las municiones en la plancha blindada del vehículo PANHAR AML-90.

## **RECOMENDACIONES**

- Al realizar la construcción de la parte de la carrocería con el nuevo material seleccionado se recomienda realizar los respectivos cortes en las planchas de acero por medio del corte de chorro de agua ya que dicho corte no altera las propiedades mecánicas como otros cortes que cambian las



propiedades del material base debido a la zona afectada térmica. Así mismo se puede dibujar distintos tipos de geometría y aplicando el mismo procedimiento que una CNC por medio de coordenadas se corta cualquier tipo de geometría por más compleja que sea esta.

- En el caso de usar otro material con otras características mecánicas se sugiere realizar una simulación previa para observar el comportamiento del material antes de alguna selección de material.
- Seguir el procedimiento de soldadura recomendado por los aceros BOHLER.
- Seguir los procedimientos que indica la norma MIL 12560 para realizar pruebas balísticas en el material candidato antes de realizar el reemplazo.
- Tomar precaución que la carrocería del PANHARD AML-90 solo resistirá impactos de municiones ordinarias de núcleo plomo hasta el calibre .50 tipo M2 en el caso de que se den impactos con munición de núcleo de acero o perforante incendiaria trazadora de calibre .50 o mayores existirá penetración total a la carrocería.

## BIBLIOGRAFÍA

Askeland, D. (2004). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales. 4ed.* México: Editorial Thomson.

ASM. (2010). *Mecánica.* Miami: Pearson.

(2004). *ASM Handbook. Welding, Brazing and Soldering volume 6. 9ed.* Estados Unidos.

(2007). *ASTM A370-07a.*

(2007). *ASTM A 407 – 07.*

(2007). *ASTM E 112.*

(2005). *ASTM E 3 – 01.*

(2005). *ASTM E 3 – 01.*

(2005). *ASTM E 407 – 07.*

(2005). *ASTM E 407 – 07.*

GFELDST. (s.f.). *Ensayo de Materiales .* Obtenido de

<http://emet5ensayodemateriales.blogspot.com/2008/11/choque-o-impacto.html>

James M. Gere, B. (2000). *Mechanics of Materials Séptima Edición.* México: McGraw Hill.

Maicol, L. (s.f.). Obtenido de <http://tecnologicaalvarezcalderon.blogspot.com/2007/10/la-produccion-de-el-acero.html>

Mangonon. (2001). *Ciencia de Materiales Selección y Diseño. Primera Edición.* México: Pearson Education.

(2005). *MIL-C-3066C.*

(2007). *Norma MIL-DTL- 12560H.*

*puentelar.* (s.f.). Obtenido de <http://puentelara.blogspot.com/>

*Tecnologías y electividad.* (s.f.). Obtenido de

<http://tecnologiaselectividad.blogspot.com/2009/08/red-hexagonal-compacta-hcp.html>

*Tripod.* (s.f.). Obtenido de <http://dongualo.tripod.com/analogica/cristalinas.htm>

*Tripod.* (s.f.). Obtenido de <http://dongualo.tripod.com/analogica/cristalinas.htm>

*Wikipedia.* (s.f.). Obtenido de [http://es.wikipedia.org/wiki/Corte\\_con\\_chorro\\_de\\_agua](http://es.wikipedia.org/wiki/Corte_con_chorro_de_agua)

