



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO**

AUTOR: DÍAZ HERNÁNDEZ, RICARDO DAVID

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

DIRECTOR: ING. PABLO FIGUEROA

CODIRECTOR: ING. VICTOR ANDRADE

SANGOLQUÍ, DICIEMBRE 2013

CERTIFICACIÓN DE LA ELAVORACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto “CARACTERIZACIÓN DEL ACERO UTILIZADO EN LA CARROCERÍA CON PROTECCION PASIVA DE LOS VEHÍCULOS BLINDADOS PANHARD AML-90 DEL C.I.C.T.E.”, fue realizado en su totalidad por el señor David Ricardo Díaz Hernández como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

Sangolquí, 2013-12

Ing. Pablo Figueroa
DIRECTOR

Ing. Víctor Andrade
CODIRECTOR

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo David Ricardo Díaz Hernández con cédula de ciudadanía 171924535-7 certifico que el tema de tesis “CARACTERIZACIÓN DEL ACERO UTILIZADO EN LA CARROCERÍA CON PROTECCION PASIVA DE LOS VEHÍCULOS BLINDADOS PANHARD AML-90 DEL C.I.C.T.E.” es de mi total autoría.

Sr. David Ricardo Díaz Hernández

AUTORIZACION

Yo David Ricardo Díaz Hernández con cédula de ciudadanía 171924535-7 autorizo a la biblioteca virtual de la UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS para que publique mi tema de tesis “CARACTERIZACIÓN DEL ACERO UTILIZADO EN LA CARROCERÍA CON PROTECCION PASIVA DE LOS VEHÍCULOS BLINDADOS PANHARD AML-90 DEL C.I.C.T.E.”.

Sr. David Ricardo Díaz Hernández

DEDICATORIA

El presente proyecto dedico a mi familia por el gran apoyo durante todo este tiempo depositando siempre en mi toda su confianza para salir siempre adelante y porque me enseñaron que para alcanzar los objetivos propuestos es necesario mantener siempre un pensamiento positivo, valores, constancia y trabajar día a día venciendo el miedo y las dificultades.

DAVID RICARDO DIAZ HERNANDEZ

AGRADECIMIENTO

Primeramente quiero agradecer a mi familia que siempre ha sido un soporte diario y ejemplo de lucha constante que me ha servido para mejorar, persistir y lograr cada una de mis metas propuestas con esfuerzo y dedicación.

A mis amigos por brindarme su amistad y por los momentos compartidos durante toda la etapa universitaria.

A todos mis profesores que a lo largo de esta etapa universitaria, supieron brindarme sus conocimientos, experiencia y ayuda para ser un mejor profesional en especial a mi director el Ingeniero Pablo Figueroa y a mi codirector el Ingeniero Víctor Andrade quienes con sus conocimientos, apoyo y comprensión han sabido guiarme durante toda la realización del proyecto.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO	I
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	II
AUTORIZACION	III
DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTO	V
ÍNDICE DE CONTENIDOS	VI
RESUMEN	XVII
ABSTRACT	XVIII
CAPÍTULO 1	1
GENERALIDADES	1
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. ANTECEDENTES	3
1.2 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA	9
1.3.OBJETIVOS	11
1.3.1.GENERAL	11
1.3.2.ESPECÍFICOS	11
1.4.ALCANCE	11
CAPÍTULO 2	13
MARCO TEÓRICO	13

2.1.PROPIEDADES METALOGRÁFICAS	13
2.1.1.ESTRUCTURA DE LOS METALES	13
2.1.2.ESTRUCTURA DEL HIERRO PURO	14
2.1.3.DIAGRAMA DE FASES DEL HIERRO-CARBURO	16
2.1.4.ALEACIONES FERROSAS	19
2.1.5.COMPOSICIÓN QUÍMICA	24
2.1.6.MICROESTRUCTURA DE LA ALEACIÓN HIERRO CARBONO	29
2.2.PROPIEDADES MECÁNICAS	39
2.2.1.MÓDULO DE ELASTICIDAD	39
2.2.2.MÓDULO DE POISSON	42
2.2.3.RESISTENCIA A LA FLUENCIA	42
2.2.4.RESISTENCIA A LA TRACCIÓN	43
2.2.5.TENACIDAD	44
2.2.6.DUCTILIDAD	44
2.2.7.DUREZA	45
2.3.TRATAMIENTOS TÉRMICOS	46
2.3.1.RECOCIDO	47
2.3.2.TEMPLADO	48
2.3.3.CEMENTADO	49
CAPÍTULO 3	50
METODOLOGIA DE ENSAYOS Y PROCESO DE EXTRACCIÓN DE PROBETAS	50
3.1.SELECCIÓN DE CORTE PARA PROBETAS	50
3.1.1.CORTE CON GAS OXICOMBUSTIBLE	51
3.1.2.CORTE POR ARCO DE PLASMA	53
3.1.3.ELECTROEROSIÓN CON ALAMBRE	54
3.1.4.CORTE POR CHORRO DE AGUA	55
3.2SELECCIÓN DE CORTE	60
CAPÍTULO 4	62

CARACTERIZACIÓN METALOGRAFICA	62
4.1.INTRODUCCIÓN	62
4.2.EQUIPOS UTILIZADOS	63
4.3.ESTRUCTURA MICROGRÁFICA	64
4.3.1.NORMAS A APLICAR	64
4.3.2.PREPARACIÓN DE MUESTRAS	64
4.3.3.PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO MICROGRÁFICO	66
4.3.4.RESULTADOS	67
4.4.COMPOSICIÓN QUÍMICA	68
4.4.1.NORMAS A APLICAR	68
4.4.2.PREPARACIÓN DE MUESTRAS	69
4.4.3.PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO DE COMPOSICIÓN QUÍMICA	70
4.4.4.RESULTADOS	70
4.5.CARACTERÍSTICA DE CHISPA	72
4.5.1.NORMAS A APLICAR	72
4.5.2.PREPARACIÓN DE MUESTRAS	73
4.5.3.PROCEDIMIENTO PARA EL ENSAYO DE CHISPA	73
4.5.4.ESULTADOS	73
CAPÍTULO 5	74
CARACTERIZACIÓN MECÁNICA	74
5.1.INTRODUCCIÓN	74
5.2.EQUIPOS UTILIZADOS	75
5.2.1 EQUIPOS UTILIZADOS PARA EL CORTE Y ACABADOS	75
5.2.2 EQUIPOS UTILIZADOS PARA ENSAYOS MECÁNICOS	76
5.2 ENSAYOS MECANICOS	77
5.2.1 ENSAYO DE TRACCION	77
5.2.1.1 NORMAS A APLICAR	79
5.2.1.2 FABRICACIÓN DE PROBETAS	79
5.2.1.3 PROCEDIMIENTO DE ENSAYO	82

5.2.1.4	RESULTADOS	84
5.2.2	ENSAYO DE DUREZA	93
5.2.2.1	NORMAS A APLICAR	95
5.2.2.2	FABRICACIÓN DE PROBETAS	95
5.2.2.3	PROCEDIMIENTO DE ENSAYO	96
5.2.2.4	RESULTADOS	97
5.2.4	ENSAYO DE IMPACTO	99
5.2.4.1	NORMAS A APLICAR	100
5.2.4.2	FABRICACIÓN DE PROBETAS	100
5.2.4.3	PROCEDIMIENTO DE ENSAYO	103
5.2.4.4	RESULTADOS	104
5.2.5	PRUEBAS BALISTICAS	106
	CAPÍTULO 6	114
	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y SOLUCION TECNOLÓGICA	114
6.1.	INTRODUCCIÓN	114
6.2.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN METALOGRAFICA	115
6.2.1	ESTRUCTURA MICROGRÁFICA	115
6.2.2	COMPOSICIÓN QUÍMICA	121
6.2.3	CARACTERIZACIÓN MECÁNICA	124
6.3	EQUIVALENCIA DEL ACERO DEL PANHARLD AML-90 CON LAS EXISTENTES EN EL PAÍS Y SOLUCION LOCAL	126

FIGURA 6.4 ACEROS LOCALES CON CARACTERÍSTICAS SIMILARES A LAS DEL PANHARD AML-90.	126
CAPÍTULO 7	130
SIMULACION DE IMPACTO BALISTICO	130
7.1 INTRODUCCION	130
7.2.SOFTWARE UTILIZADO	131
7.3 MODELO MATEMATICO Y PARAMETROS APLICADOS EN LA SIMULACION BALISTICA	132
7.3.1 PARAMETROS CARACTERISTICOS Y MODELO MATEMATICO UTILIZADO PARA EL ACERO BLINDADO	132
7.3.2 DIMENSIONES DE LA PLANCHA DE ACERO BLINDADO	136
7.3.3 PARAMETROS CARACTERISTICOS PARA LA MUNICION CALIBRE .50	137
7.3.4 PARAMETROS CARACTERISTICOS PARA LA MUNICION CALIBRE .50	139
7.4SIMULACION EXPLICIT DYNAMICS MECHANICAL IMPACTO BALISTICO CON MUNICION DE NUCLEO DE PLOMO	142
7.4.1 DEFORMACIÓN TOTAL DE LA PLANCHA DE ACERO BALÍSTICO	142
7.4.1.1 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA DEFORMACIÓN TOTAL ACERO BALÍSTICO	145

7.4.2 DEFORMACIÓN DIRECCIONAL DE LA PLANCHA DE ACERO BALÍSTICO	145
7.4.2.1 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	148
7.4.3 ANÁLISIS DE ESFUERZO CORTANTE MÁXIMO	148
7.4.3.1 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	152
7.4.4 ANÁLISIS DE ESFUERZO EQUIVALENTE DE VON –MISES	152
7.4.4.1ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	155
7.45 VALIDACION SIMULACION DE IMPACTO BALISTICO ANSYS	155
7.5 SIMULACION DINAMICA AUTODYN	156
CAPÍTULO 8	165
ANÁLISIS ECONÓMICO	165
8.1. COSTOS	165
8.1.1. COSTOS DIRECTOS	165
8.1.2. COSTOS INDIRECTOS	166
8.1.3. COSTO TOTAL	167
CAPÍTULO 9	168
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	168
9.1. CONCLUSIONES	168
9.2. RECOMENDACIONES	170
BIBLIOGRAFÍA	172
LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO	173

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Módulo de elasticidad para diferentes tipos de enlaces	41
Tabla 3.8 Aproximación de la HAZ por oxicorte	53
Tabla 4.1 Composición química del acero PANHARD AML-90	72
Tabla 5.1 Dimensión proporcional de una probeta estándar para muñón	81
Tabla 5.2 Tabla de procesos para probetas para ensayo de tracción	81
Tabla 5.3 Resultados Ensayo de Tracción.....	85
Tabla 5.4 Tabla de Imágenes de las Probetas del Ensayo de Tracción	86
Tabla 5.5 Resultados Ensayo de Tracción omitiendo los valores de las probetas X050813 y X100813	92
Tabla 5.6 Resultados ensayo de dureza	98
Tabla 5.7 Tolerancias para probetas Charpy V-notch.....	102
Tabla 5.8 Tabla de procesos para probetas para ensayo de tracción	102
Tabla 5.9 Resultados Ensayo de Impacto V-NOTCH Longitudinal	104
Tabla 5.10 Resultados Ensayo de Impacto V-NOTCH Transversal.....	105
Tabla 5.11 Resultados de los impactos balísticos.....	114
Tabla 6.1 Composición química del acero PANHARD AML-90	122
Tabla 6.2 Caracterización mecánica acero PANHARD AML-90	124
Tabla 6.3 Tabla comparativa Caracterización mecánicas acero PANHARD AML-90 vs Acero blindado Clase 4b	125
Tabla 6.4 Equivalencia del acero de la carrocería del PANHARD AML-90.	126
Tabla 7.1 Propiedades mecánicas del acero balístico	133
Tabla 7.2 Parámetros Johnson –Cook para el acero balístico	135
Tabla 8.1 Costos directos de materiales	165
Tabla 8.2 Costos directos de probetas.....	165
Tabla 8.3 Costos directos ensayos de laboratorio	166
Tabla 8.4 Total costos directos	166
Tabla 8.5 Costos indirectos.....	166
Tabla 8.6 Costos totales	167

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Repotenciación Panhard aml-90.....	4
Figura 1.2 Compartimiento original para el motor a gasolina del Panhard aml-90	4
Figura 1.4 Puerta compartimiento del motor original del PANHARD AML-90	5
Figura 1.5 PANHARD AML-90 vista lateral.....	6
Figura 1.6 PANHARD AML-90.....	6
Figura 1.7 Acero Balístico	7
Figura 1.8 Vehículo con acero Balístico.....	9
Figura 2.1 Estructura cristalina Hexagonal Compacta (HCP)	14
Figura 2.2 Estructura cristalina BCC	16
Figura 2.3 Estructura cristalina FCC	16
Figura 2.4 Diagrama de fases hierro – carbono.....	18
Figura 2.5 Composición química del Acero Balístico	25
Figura 2.6 Esfuerzo de fluencia por el método convencional.....	43
Figura 3.1 Corte por chorro de agua.....	56
Figura 3.1 Microestructura PANHARD AML-90 200X.....	67
Figura 3.2 Microestructura PANHARD AML-90 100X.....	68
Figura 3.3 Espectrómetro de masas	69
Figura 3.4 Resultado de la composición química.....	71
Figura 5.1 Ensayo de Tracción	78
Figura 5.2 Probeta para ensayo de tracción	80
Figura 5.3 Probetas del Ensayo de Tracción rotas dentro y fuera de marcas	86
Figura 5.4 Grafica de Resultados del Ensayo de Tracción	91
Figura 5.4 Grafica de Resultados del Ensayo de Tracción de Probetas rotas dentro y fuera de marcas.....	93
Figura 5.5 Ensayo de dureza Brinell	94
Figura 5.6 Ensayo de dureza Brinell	98
Figura 5.7 Charpy V-Notch	101
Figura 5.8 Resultados Ensayo de Impacto V-NOTCH Longitudinal.....	106
Figura 5.9 Resultados Ensayo de Impacto V-NOTCH Transversal	106

Figura 5.10 Dimensiones de la plancha de acero blindado para pruebas balísticas	107
Figura 5.11 Cañón para simular dispararos municiones de calibre .50	108
Figura 5.12 Impacto de munición perforante calibre .50	109
Figura 5.13 Impacto de munición perforante calibre .50	109
Figura 5.14 Munición perforante calibre .50.....	110
Figura 5.15 Impacto de munición incendiaria trazadora calibre .50.....	111
Figura 5.16 Impacto de munición incendiaria trazadora calibre .50	111
Figura 5.17 Vista lateral del trauma del Impacto munición incendiaria trazadora calibre .50.....	112
Figura 5.18 Corte munición explosiva perforante calibre .50	112
Figura 5.19 Munición ordinaria núcleo de plomo calibre .50	113
Figura 5.20 Munición ordinaria núcleo de plomo calibre .50	113
Figura 6.1 Micrografía del acero empleado en la carrocería del PANHARD AML-90 200X	116
Figura 6.2 Micrografía del acero empleado en la carrocería del PANHARD AML-90 200X conteo de granos.....	117
Figura 6.3 Factor de corrección de Jeffrie.....	118
Figura 7.1 ANSYS Mechanical.....	132
Figura 7.2 Parámetros Johnson –Cook &Gruneisen EOS ANSYS para el acero balístico	135
Figura 7.3 Dimensiones de la plancha de acero blindado para pruebas de impacto balísticas	136
Figura 7.4 Dimensiones Munición calibre.50	137
Figura 7.5 Calibre.50 Isometría Autodesk Inventor	138
Figura 7.6 Calibre.50 Vista Lateral Autodesk Inventor	138
Figura 7.7 Calibre.50 Vista Lateral Corte Autodesk Inventor	138
Figura 7.8 Calibre.50 Vista Isométrica Corte Autodesk Inventor.....	139
Figura 7.9 Propiedades mecánicas y de impacto del cobre.....	139
Figura 7.10 Propiedades mecánicas y de impacto del núcleo de plomo....	140

Figura 7.12 Vista conjunta Calibre.50 y plancha de acero balístico Autodesk Inventor.....	141
Figura 7.13 Vista conjunta Calibre.50 y plancha de acero balístico mallado Explicit Dynamics Mechanical.....	141
Figura 7.14 Vista Frontal de la Deformación Total Acero Balístico	143
Figura 7.15 Vista Isométrica de la Deformación Total Acero Balístico.....	143
Figura 7.16 Vista Lateral de la Deformación Total Acero Balístico	144
Figura 7.17 Grafica de Resultados de la Deformación Total Acero Balístico	145
Figura 7.18 Vista Lateral de la Deformación Direccional Acero Balístico..	146
Figura 7.19 Vista Frontal de la Deformación Direccional Acero Balístico .	147
Figura 7.15 Vista Isométrica de la Deformación Direccional Acero Balístico	147
Figura 7.20 Grafica de Resultados de la Deformación Direccional Acero Balístico.....	148
Figura 7.21 Vista Frontal Esfuerzo Cortante Máximo aplicado en la cara frontal del Acero Balístico.....	149
Figura 7.22 Vista Frontal Esfuerzo Cortante Máximo aplicado en la cara trasera del Acero Balístico.....	149
Figura 7.23 Grafica de Resultados Esfuerzo Cortante Máximo Acero Balístico en la cara frontal	150
Figura 7.24 Grafica de Resultados Esfuerzo Cortante Máximo Acero Balístico en la cara trasera	150
Figura 7.25 Vista Frontal Esfuerzo Equivalente Von -Mises Acero Balístico Cara Frontal.....	153
Figura 7.26 Vista Trasera Esfuerzo Equivalente Von -Mises Acero Balístico Cara Trasera	153
Figura 7.27 Grafica de Resultados Esfuerzo Equivalente Von –Mises Acero Balístico Cara Frontal.....	154
Figura 7.28 Grafica de Resultados Esfuerzo Equivalente Von –Mises Acero Balístico Cara Trasera	154
Figura 7.29 Simulación de impacto balístico munición con núcleo de plomo calibre .50	157

Figura 7.30 Simulación de impacto balístico munición con núcleo de plomo calibre .50	157
Figura 7.31 Simulación de impacto balístico munición con núcleo de plomo calibre .50	158
Figura 7.32 Simulación de impacto balístico munición con núcleo de plomo calibre .50	158
Figura 7.33 Simulación de impacto balístico munición con núcleo de plomo calibre .50	159
Figura 7.34 Simulación de impacto balístico munición con núcleo de plomo calibre .50	159
Figura 7.35 Simulación de impacto balístico munición con núcleo de plomo calibre .50	160
Figura 7.36 Simulación de impacto balístico vista frontal munición con núcleo de plomo calibre .50.....	160
Figura 7.37 Contour Plot Presión entre la munición y la placa de acero blindado.....	161
Figura 7.38 Contour Plot Presión entre la munición y la placa de acero blindado.....	162
Figura 7.39 Contour Plot Presion entre la munición y la placa de acero blindado.....	162
Figura 7.40 Contour Plot Miss Stress entre la munición y la placa de acero blindado.....	163
Figura 7.41 Contour Plot Miss Stress entre la munición y la placa de acero blindado.....	163
Figura 7.42 Contour Plot Miss Stress entre la munición y la placa de acero blindado.....	164
Figura 7.43 Contour Plot Miss Stress entre la munición y la placa de acero blindado.....	164

RESUMEN

En el presente documento se realizó primeramente un análisis de caracterización 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 última, 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.

Palabras Clave: **PANHARD AML- 90, ACERO BLINDADO, ANSYS SIMULACIÓN DINÁMICA, CICTE.**

ABSTRACT

In this document it was made an characterization analysis that was based on MIL- A- 46100 and MIL- A- 12560H standards; in order to, determinate the armor steel properties that has the steel that was used on the PANHARD AML- 90. Therefore, it will be enough information for future modifications on the PANHARD AML- 90. First of all, a diversity of laboratory tests were performed in order to obtain the mechanical properties which include tensile, hardness, impact and ballistic in order to obtain various mechanical characteristics of the steel armored as the yield strength; thus, the results will provide values of ultimate strength, hardness, percent elongation, resilience, the ability to absorb impact energy and the deformation that suffer the armor steel plate under to ballistic impacts. Those data were obtained in the respective laboratories in mechanics of materials. To achieve those results it was made a rigorous and appropriate process of cut selection in order to avoid changing the material properties. Metallographic characterization includes micrograph, sparkle and chemical composition made in the laboratories of Metallurgy of the ESPE and the Department of Metallurgy Adelca under international and national standards was also performed. In addition, it was made an ANSYS impact simulation and the results were compared with the impact bullet results in order to validate the finite element analysis on ANSYS impact bullet simulation with the reality.

Keywords: **PANHARD AML-90, ARMORED, ANSYS DYNAMIC SIMULATION, CICTE.**

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCIÓN

El acero es una aleación de hierro con carbono en una proporción que oscila entre 0,03 y 2%. Se suele componer de otros elementos, ya inmersos en el material del que se obtienen. Pero se le pueden añadir otros materiales para mejorar su dureza, maleabilidad u otras propiedades. Las propiedades físicas de los aceros y su comportamiento a distintas temperaturas dependen sobre todo de la cantidad de carbono y de su distribución. Antes del tratamiento térmico, la mayoría de los aceros son una mezcla de tres sustancias, ferrita, perlita, cementita. La ferrita, blanda y dúctil, es hierro con pequeñas cantidades de carbono y otros elementos en disolución. La cementita es un compuesto de hierro con el 7% de carbono aproximadamente, es de gran dureza y muy quebradiza. La perlita es una mezcla de ferrita y cementita, con una composición específica y una estructura características, sus propiedades físicas con intermedias entre las de sus dos componentes.

La resistencia y dureza de un acero que no ha sido tratado térmicamente depende de la proporciones de estos tres ingredientes. Cuanto mayor es el contenido en carbón de un acero, menor es la cantidad de ferrita y mayor la de perlita: cuando el acero tiene un 0,8% de carbono, está por

compuesto de perlita. El acero con cantidades de carbono aún mayores es una mezcla de perlita y cementita. Dichas propiedades varían dependiendo de las distintas aplicaciones en las cuales se desenvolverá el acero(Maicol).

El hierro al constituirse como elemento base del acero conserva características metálicas del hierro en estado puro cuya estructura cristalina cambia a partir de una temperatura crítica punto en el cual, empieza a disolverse una cierta cantidad de carbono y con ello realizar tratamientos térmicos para alcanzar ciertas características metalográficas para mejorar las propiedades mecánicas del material.

Existen muchos factores que mejoran el comportamiento mecánico del material a más de los tratamientos térmicos. Los elementos de aleación que forman parte de la composición química del acero, es uno de los factores que dan características más específicas al material ya que cada elemento en determinada cantidad en porcentaje en peso, hace que el acero alcance ciertos niveles de dureza, ductilidad, resistencia, tenacidad y en cuanto a los procesos de manufactura, se requiere que los aceros sean conformables y soldables.

Asociaciones de ingenieros e institutos realizan publicaciones acerca de las especificaciones de los productos de acero, muchas de ellas son muy conocidas y respetadas de las que se pueden obtener información necesaria para realizar un análisis del acero mediante procedimientos específicos de

laboratorio para caracterizar y determinar el tipo de material que es utilizado para la construcción o modificación de vehículos blindados en base a los resultados obtenidos en diferentes ensayos mecánicos y metalográficos que hace referencia este documento.

1.2. ANTECEDENTES

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 observo 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 1.1 Repotenciación PANHARD AML-90

Fuente: David Díaz



Figura 1. 2Compartimiento 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 1.4 Puerta compartimiento del motor original del PANHARD AML-90

Fuente: David Díaz



Figura 1.5 PANHARD AML-90 vista lateral

Fuente: Google imágenes



Figura 1.6 PANHARD AML-90

Fuente: Google imágenes

El acero usado en las partes de la protección pasiva de la carrocería en vehículos blindados es elaborado con una composición química especial

que garantiza un buen desempeño balístico además se realizan tratamientos térmicos al acero para garantizar la dureza Brinell requerida. El acero balístico también requiere buenas propiedades de conformado en frío lo cual ayuda a mejorar sus propiedades de dureza y una excelente adecuación a la soldadura con materiales ferríticos y austeníticos.



Figura 1.7 Acero Balístico

Fuente: Google imágenes

Los aceros balísticos se encuentran especificados en las normas MIL₁ sección A 46100 y 12560. Estas especificaciones están aprobadas para su uso de aplicaciones militares por todos los departamentos y agencias de Defensa de Estados Unidos y sus aliados. El ámbito de aplicación de dichas normas cubre los aceros que han tenido tratamientos de templeado y revenido de alta dureza forjado en armadura de placas para aplicaciones de blindaje ligero hasta un espesor recomendado de 2 pulgadas. Las especificaciones de las normas dichas cubren un alto blindaje, debido a su dureza sus aplicaciones pueden ser varias. La dureza de la superficie de este material es de 477 y 534 Brinell. Mientras la aplicación de la norma MIL-A 12560 cubre placas de acero forjado con blindaje homogéneo en espesores de 1/4 a 6 pulgadas. Aprobada para uso en vehículos de combate

y para las pruebas de munición. La carrocería del vehículo PANHARD AML-90 está conformada por planchas de acero balístico con un espesor de hasta media pulgada.

Normas militares

El procedimiento de la caracterización del acero debe estar bajo los siguientes documentos forman parte de la norma MIL-A-12560 en la medida especificada.

ASTM INTERNATIONAL

- A578M Examination of Plain and Clad Steel Plates for Special Applications
- ASTM A751 - Standard Test Methods, Practices, and Terminology for Chemical Analysis of Steel Products
- ASTM E10 - Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials
- ASTM E18 - Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials
- ASTM E23 - Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials
- ASTM E110 - Standard Test Method for Indentation Hardness of Metallic Materials by Portable Hardness Testers (DoD adopted)
- ASTM E140 - Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among
- Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial

- Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness ASTM E1444
- Standard Practice for Magnetic Particle Testing (DoD adopted)

Los aceros balísticos deben cumplir con los requerimientos de aceptación de acuerdo a la norma MIL-A-12560H como:

- Composición química
- Tratamiento térmico
- Propiedades mecánicas
 - Dureza
 - Resistencia al Impacto
 - Pruebas de Tensión
- Pruebas balísticas
- Condiciones superficiales



Figura 1.8 Vehículo con acero Balístico

Fuente: Google imágenes

1.2 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

Al ser el C.I.C.T.E un centro de investigación y desarrollo de aplicaciones de tipo militar, es prioritario el uso y manejo de normas militares internacionales al momento de realizar cualquier operación de modificación, diseño o mantenimiento.

Es de prioridad tener una sustentación en normas internacionales al realizar cualquier operación de modificación en los vehículos blindados de tal manera que en el caso de usar una solución local esta se encuentre fundamentada en estándares internacionales de aspecto militar.

El C.I.C.T.E ha venido aplicando ciertos procedimientos de forma empírica, debido a que no existe una investigación e información sobre la caracterización de aceros balísticos para el uso de vehículos blindados. Estas modificaciones tienen repercusiones en el desempeño de los vehículos ya que al existir un factor de desconocimiento se ha procedido a sobredimensionar las planchas de acero para las nuevas modificaciones de los vehículos. Consecuentemente un vehículo blindado debe garantizar la integridad y seguridad de los ocupantes basándose en normas internacionales. Es así que el procedimiento de toma de decisiones para el uso de un material para la modificación de los vehículos blindados debe ser realizado de acuerdo a un procedimiento basado en normas internacionales más no solamente al criterio y a la experiencia.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. GENERAL

Definir el tipo de acero balístico utilizado en los vehículos blindados PANHARD AML-90. Mediante ensayos permitiendo su caracterización metalografía y mecánica obteniendo un rango de valores que permita conocer el tipo de acero que es utilizado.

1.3.2. ESPECÍFICOS

- Aplicar los requerimientos de las normas MIL para la realización de los respectivos ensayos de laboratorio.
- Determinar mediante las pruebas, ensayos y test metalográficos, destructivos, no destructivos, balísticos aplicando las especificaciones de las normas MIL.
- Analizar los resultados obtenidos de los diferentes ensayos y compararlas con los requisitos que pide la norma MIL.
- Proyectar una solución tecnológica con el fin del reemplazo del acero balístico utilizado en las partes de la carrocería con protección pasiva vehículo blindado PANHARD AML-90.

1.4. ALCANCE

Al desarrollar la caracterización de los aceros balísticos usados en los vehículos blindados se tendrá un conocimiento de sus características mecánicas y propiedades químicas de este tipo de acero.

Los procedimientos de selección de materiales para modificaciones o acondicionamientos que se realicen sobre los vehículos blindados tendrán un sustento basado en normas internacionales militares.

Las conclusiones y recomendaciones de esta tesis servirán a los laboratorios de mecánica y ciencia de los materiales, fábrica de municiones Santa Bárbara así mismo el C.I.C.T.E podrá usar dichas conclusiones y recomendaciones para la obtención de una solución de calidad y costo eficiente en aceros blindados.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1. PROPIEDADES METALOGRÁFICAS

2.1.1. ESTRUCTURA DE LOS METALES

Todos los materiales se encuentran constituidos por átomos que están distribuidos de manera geométrica en el espacio siguiendo un patrón determinado que depende del material y del estado que se encuentre. Esta distribución atómica puede darse de manera que no tenga un patrón definido, es decir, que su arreglo atómico sea de corto enlace cuyos átomos se enlazan con otros formando moléculas siguiendo una distribución amorfa. Cuando los materiales presentan este tipo de arreglo atómico se los llama materiales amorfos y tal es el caso del vidrio que es considerado como un material líquido solidificado.

Estos materiales pueden adoptar alguna de las catorce redes cristalinas de Bravais pero la gran mayoría se cristalizan solamente en tres estructuras que son; cúbica centrada en el cuerpo (BCC), cúbica centrada en las caras (FCC), hexagonal compacta (HCP). Esta última estructura cristalina tiene dos puntos de red por celda unitaria, uno por las ocho esquinas y otro por el centro de la celda. Como característica principal de la estructura cristalina HCP, al igual que la estructura FCC, tiene un factor de

empaquetamiento de 0.74%, lo que significa que los materiales que tienen este valor poseen niveles de energía menores y más estables debido a que al solidificarse tanto para estructura HCP como para FCC, liberan más energía a medida que los átomos se aproximan y se enlazan fuertemente entre sí.

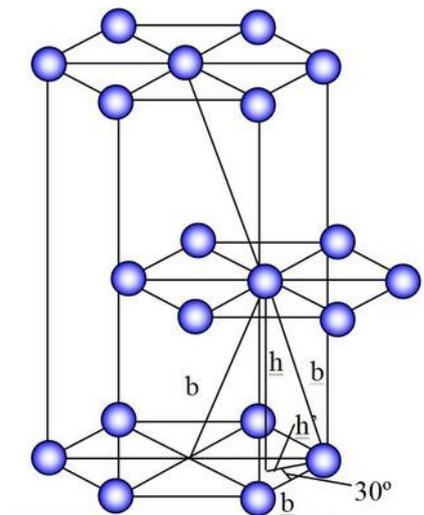


Figura 2.1 Estructura cristalina Hexagonal Compacta (HCP)

Fuente:(Tecnologías y electividad)

2.1.2. ESTRUCTURA DEL HIERRO PURO

El hierro al ser un metal puro, como característica principal presenta más de una estructura cristalina (elemento alotrópico) en estado sólido a diferentes incrementos de temperatura cambiando siempre a la forma más estable en cada nivel de energía. A temperatura ambiente hasta los 912°C, el hierro presenta una estructura cristalina BCC conocida como ferrita o hierro α .

En esta estructura podemos ver la presencia de ocho átomos más un átomo central. Cada uno de los átomos que se encuentran en las esquinas del cubo representa un punto de red que es adyacente a otras celdas unitarias constituyéndose $1/8$ de punto de red por cada celda unitaria. Al multiplicar este valor por las ocho esquinas de la celda unitaria más el átomo central, la estructura cristalina posee 2 átomos por cada celda unitaria. Otra característica de esta estructura es el factor de empaquetamiento cuyo valor es de 0.68%, lo que significa que los átomos ocupan el 68% de la celda unitaria mientras que el 32% constituye el espacio vacío haciéndola una estructura cristalina no muy compacta.

A medida que aumentamos la temperatura hasta los 1394°C , el hierro presenta una estructura cristalina FCC que toma el nombre de hierro γ o austenita. En esta estructura podemos ver que cada punto de red representa $1/8$ de átomo por cada celda unitaria y $1/2$ átomo por cada una de las caras del cubo lo cual hace que cada celda unitaria tenga 4 átomos. Como característica principal es el factor de empaquetamiento de 0.74% permitiendo que esta estructura cristalina sea más compacta con relación a la estructura cristalina BCC.

Entre las temperaturas de 1394°C hasta 1538°C retorna a la estructura BCC y por encima de la temperatura de 1538°C que es el punto de fusión del hierro, pierde la estructura cristalina al encontrarse en estado líquido.

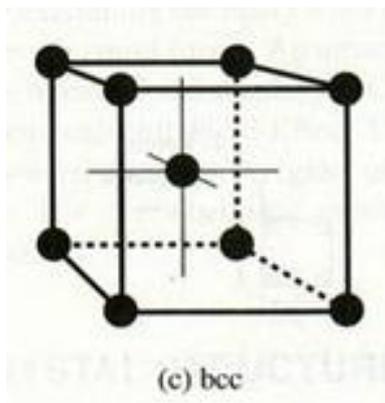


Figura 2.2 Estructura cristalina BCC

Fuente:(Tripod)

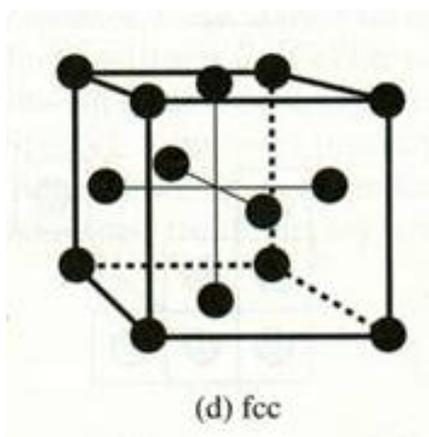


Figura 2.3 Estructura cristalina FCC

Fuente:(Tripod)<http://dongualo.tripod.com/analogica/cristalinas.htm>

2.1.3. DIAGRAMA DE FASES DEL HIERRO-CARBURO

El diagrama de fases en equilibrio es un mapa que permite identificar la relación que existe entre la temperatura, composición y fases presentes en una aleación bajo condiciones de calentamiento y enfriamiento relativamente lento. El diagrama de fases hierro – carburo es el de mayor aplicación ya que representa las aleaciones más frecuentes y utilizadas tecnológicamente como son el acero y otras aleaciones ferrosas que poseen

un contenido de carbono máximo del 4.3% en peso y con ello llevar a cabo algún tratamiento térmico que permita tener un material con una constitución metálica definida con propiedades mecánicas específicas. En este diagrama podemos apreciar primero la máxima solubilidad de carbono cuando se encuentra a diferentes temperaturas, por ejemplo, la solución de ferrita α presenta una solubilidad máxima de carbono del 0.0218% a una temperatura de 727°C donde presenta una estructura cristalina BCC. A la temperatura donde se forma la austenita hasta la temperatura de equilibrio de 1148°C, presenta una estructura cristalina FCC con una solubilidad máxima de carbono del 2.11% y a una temperatura de 1495°C presenta una solubilidad máxima de carbono del 0.09% donde el hierro tiene una estructura cristalina BCC.

Este cambio de solubilidad de carbono en cada una de las fases se da principalmente por los vacíos intersticiales que presenta cada estructura cristalina por lo que en la fase austenítica con una estructura cristalina FCC, disuelve en mayor medida los átomos de carbono que en la fase de ferrita BCC lo que hace posible endurecer el acero cuando se aplica un tratamiento térmico. Existen aleaciones que son totalmente o parcialmente insolubles en estado sólido que con frecuencia estas aleaciones para una determinada concentración, presentan un punto de solidificación total a una temperatura constante. Este punto se conoce como punto eutectoide donde se produce la formación de dos sólidos como la ferrita α y cementita Fe_3C a una concentración de 0.77% de carbono a una temperatura eutectoide de 727°C.

Los aceros que tienen un contenido de carbono de 0.77% en peso se los llama aceros eutectoides que presenta como constituyente perlita pura mientras que, para materiales cuyo contenido de carbono sea menor a 0.77% en peso se los denomina aceros hipoeutectoides teniendo como constituyentes perlita y ferrita y para aceros con un contenido mayor a 0.77% se los llama hipereutectoide que presenta perlita y cementita como constituyentes metálicos.

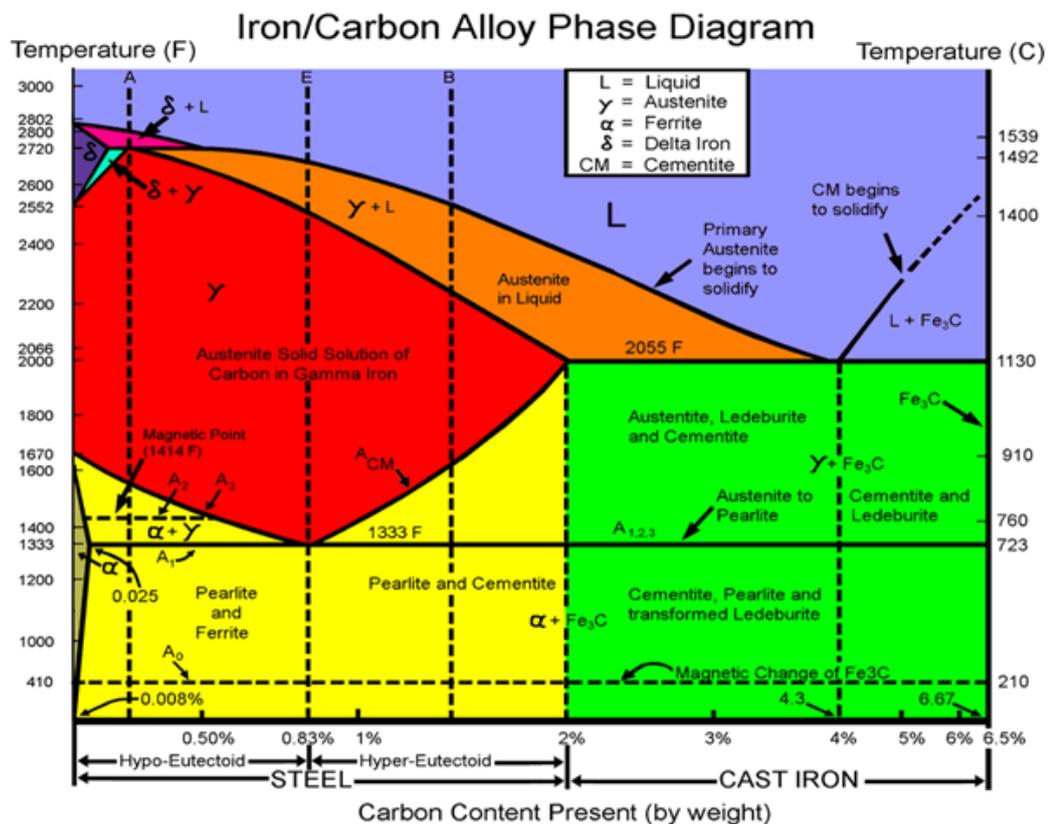


Figura 2.4 Diagrama de fases hierro – carbono

Fuente: (puentelar)

2.1.4. ALEACIONES FERROSAS

Los aceros son aleaciones ferrosas que están constituidos principalmente de hierro y carbono con un máximo de 2% en peso aunque la mayoría de los aceros que se producen tienen un contenido máximo de 0.2% en peso de carbono. Este tipo de aleaciones son los más utilizados en el mercado ya que son de bajo costo y también por su gran aplicabilidad por las propiedades mecánicas que presentan.

Existe otro tipo de aleación ferrosa como es el hierro colado que tiene un contenido de carbono comprendido entre 2% y 4.3% pero su aplicabilidad es limitada ya que es una aleación muy frágil. Las aleaciones ferrosas presentan también otros elementos denominados componentes secundarios presentándose en menor cantidad formando parte de la composición química y de acuerdo al porcentaje en peso de cada uno, tienen influencia en el comportamiento mecánico. Entre los elementos que posee el acero son: el manganeso, cromo, níquel, molibdeno, cobre, vanadio, titanio, niobio, plomo, aluminio, calcio como elementos metálicos; silicio, boro, azufre y fósforo como elementos no metálicos.

Clasificación de los aceros

El acero se clasifica de acuerdo al contenido de carbono que presenta en la composición química y demás aleaciones metálicas y no metálicas presentes en la aleación y de acuerdo al porcentaje en peso, permiten tener un amplio rango de propiedades mecánicas clasificándose de la siguiente manera:

Aceros al carbono

Los aceros al carbono constituyen el 90% total de la producción debido a que al aumentar el contenido de carbono, permite mejorar las propiedades mecánicas. Según el contenido del carbono se pueden encontrar aceros de bajo contenido de carbono con un máximo de 0.25% con una resistencia mecánica hasta 55 kg/mm^2 (539 MPa) con una dureza máxima de 160 HB, son fácilmente soldables, dúctiles y tenaces. Estos aceros son utilizados para fabricar carrocería de automóviles, perfiles estructurales, tuberías. Al ser un acero de bajo contenido de carbono, presenta ferrita α y perlita como constituyentes metálicas.

Los aceros de medio contenido de carbono presentan concentraciones de carbono entre 0.25% a 0.60% en peso con una resistencia de 75 kg/mm^2 (735 MPa) con una dureza hasta 300 HB. Por su contenido de carbono pueden ser tratados térmicamente por templado y revenido mejorando así las propiedades mecánicas. Estos aceros se utilizan principalmente para elementos que requieren una elevada resistencia mecánica, resistencia al desgaste y tenacidad como por ejemplo, transmisiones, cilindros de motores, ejes, pernos, tornillos.

Por último los aceros que tienen un alto contenido de carbono que varía entre 0.6% y 1.4% en peso siendo estos más resistentes que el resto de aceros al carbono con 80 kg/mm^2 (780 MPa), son menos dúctiles y son utilizados principalmente para fabricar herramientas de corte.

Aceros aleados

A diferencia de los aceros al carbono, los aceros aleados se caracterizan por mejorar las propiedades mecánicas con la inserción de cantidades importantes de otros elementos metálicos como el níquel, cromo, vanadio, cobre, molibdeno, titanio, niobio o elevar el contenido de elementos no metálicos como el fósforo, silicio y azufre. La aplicación de estos aceros se utiliza para elementos mecánicos que requieran mayor dureza, mayor resistencia a la corrosión, al desgaste, impacto, altas temperaturas y que tengan una mayor penetración de temple.

Aceros de alta resistencia y baja aleación

Los aceros de alta resistencia y baja aleación son especialmente utilizados en la industria automotriz ya que proporciona mejores propiedades mecánicas que un acero convencional. Comúnmente este tipo de aceros son de bajo contenido de carbono con un contenido de manganeso mayor de 1.5% en peso y dependiendo del porcentaje de otros elementos metálicos como el niobio, vanadio o titanio en concentraciones menores al 0.1% en peso, pueden darle al acero una mayor resistencia mecánica, mayor tenacidad, ductilidad. Elementos como el cobre, silicio, níquel y fósforo aumentan la resistencia a la corrosión.

La aplicación de los aceros de alta resistencia y baja aleación se da para el diseño y construcción de engranes y ejes.

Aceros inoxidables

El acero inoxidable es una aleación de hierro carbono, cromo y otros elementos aleantes como el níquel, molibdeno, manganeso, silicio, titanio. Tiene una concentración mínima del 11% en peso de cromo que junto con el oxígeno, forma una capa de alta resistencia que evita la corrosión del acero en muchos ambientes lo que hace que este material sea muy versátil. Los aceros inoxidables se clasifican de acuerdo a la microestructura que pueden ser martensíticos, ferríticos o austeníticos.

Aceros Balísticos

El acero para placas de blindaje debe ser fuerte, duro y robusto no debe trisarse cuando es sometido a un impacto rápido y fuerte. El acero de estas características es producido a partir de bolas de acero fundido de tamaño propio y laminándolos en placas del grosor requerido. La laminación y forjado homogeniza la estructura granular del acero, removiendo las imperfecciones que reducirían la resistencia del acero. La laminación también elonga la estructura granular en el acero formando largas líneas, las que permiten que la tensión a la que es sometido el acero cuando está bajo carga sean dispersadas a través del metal y que no se concentren en un sólo punto.

Tipos de fundiciones

Las fundiciones al igual que los aceros, están compuestas básicamente de hierro y carbono pero difieren en el contenido de carbono que oscila entre el 2% al 4.3% en peso. Al poseer un alto contenido de carbono, hace que estos materiales sean frágiles y por ende las propiedades mecánicas son inferiores con relación a los aceros de uso común. Estas aleaciones pasan al estado líquido entre 1150°C y 1300°C siendo la técnica de fundición la mejor para fabricar piezas geométricas. Como constituyentes, las fundiciones presentan cementita que bajo ciertas condiciones se descompone en ferrita y grafito.

Fundición blanca

La fundición blanca o hierro blanco tiene un contenido de carbono relativamente bajo que oscila entre 2.5% y 3% en peso y 1.5% en peso de silicio. Debido a la cantidad de cementita como constituyente principal, hace que este tipo de fundiciones sean extremadamente duras pero a la vez son demasiado frágiles al grado que son prácticamente difíciles de maquinar por lo que su aplicación se limita para superficies que requieran de alta dureza, resistente al desgaste sin un alto grado de ductilidad. Se funde a partir de los 1100°C, presenta una dureza Brinell entre 375 y 600, resistencia a la tracción entre 130 y 500 MPa y resistencia a la compresión entre 1.4 y 1.7 GPa.

Fundición gris

La fundición gris presenta un contenido de carbono comprendido entre 3.25% y 3.50% en peso con un porcentaje en peso de silicio de 1.8 a 2.3%. El grafito presente en la estructura aparece principalmente en forma de hojuelas rodeadas por una matriz de ferrita, perlita o martensita que presenta propiedades interesantes ya que las hojuelas de grafito permiten amortiguar las vibraciones causadas por fricciones internas y en cuanto a la maquinabilidad actúan como rompedoras de viruta. Por las características antes señaladas, hace que este material sea de uso común en la industria especialmente para la construcción de bastidores, monobloques de motores y estructuras de máquinas herramientas.

2.1.5. COMPOSICIÓN QUÍMICA

La presencia de elementos metálicos y no metálicos en la composición química del acero permite que tenga características mecánicas y metalográficas específicas para una determinada aplicación. Estos elementos se pueden encontrar en porcentaje en peso mediante un análisis de composición química cuya interpretación permite determinar el tipo de acero al que corresponde y los principales elementos que forman la aleación.

El acero balístico para la construcción de tanques de guerra o vehículos que requieran tener una protección pasiva, están hechos de un acero de alta dureza cumpliendo con las especificaciones de la norma MIL-A 46100 con durezas en el rango de 400 y 534 Brinell. Destacándose en la composición química los componentes mostrados en la siguiente figura.

Figura 2.5 Composición química del Acero Balístico

ELEMENT	COLUMN A MAXIMUM LIMIT for DECLARED CHEMISTRY (WEIGHT PERCENT)	COLUMN B ^{2/} ALLOWABLE RANGE for FUTURE PRODUCTION LOTS (WEIGHT PERCENT)
Carbon	0.32	+0 , - 0.05
Manganese	NONE REQUIRED, HOWEVER IF: ≤ 1.00 > 1.00	± 0.15 ± 0.20
Phosphorus	0.020 ^{2/}	^{2/}
Sulfur	0.010 ^{2/}	^{2/}
Silicon	NONE REQUIRED, HOWEVER IF: ≤ 0.60 > 0.60 to ≤ 1.00 > 1.00	± 0.10 ± 0.15 ± 0.20
Nickel	NONE REQUIRED ^{2/}	± 0.25
Chromium	NONE REQUIRED, HOWEVER IF: ≤ 1.25 ^{2/} > 1.25	± 0.15 ± 0.25
Molybdenum	NONE REQUIRED, HOWEVER IF: ≤ 0.20 ^{2/} > 0.20	± 0.035 ± 0.075
Vanadium	NONE REQUIRED ^{2/}	± 0.075
Boron	0.003	^{2/}
Copper	0.25 ^{2/}	^{2/}
Nitrogen	0.03 ^{2/}	^{2/}
Titanium	0.10 ^{2/}	^{2/}
Zirconium	0.10 ^{2/}	^{2/}
Aluminum	0.10 ^{2/}	^{2/}
Lead	0.10 ^{2/}	^{2/}
Tin	0.02 ^{2/}	^{2/}
Antimony	0.02 ^{2/}	^{2/}
Arsenic	0.02 ^{2/}	^{2/}

Fuente: (Norma MIL-DTL- 12560H, 2007)

Cada uno de los aleantes afecta de manera significativa en las propiedades mecánicas del acero por lo que es de gran importancia tener un conocimiento de cada uno de los elementos que lo conforman y cómo estos afectan de acuerdo al porcentaje en peso presentes en el material.

Carbono.- el carbono es una de las aleaciones más importantes en la composición química del acero ya que durante el proceso de solidificación,

es el formador de diferentes constituyentes metálicos tales como cementita, perlita, esferoidita, bainita, martensita. De acuerdo al contenido de carbono, se puede realizar cambios en la microestructura para otorgándole un amplio rango de propiedades mecánicas como resistencia, dureza y ductilidad. Tal es el caso de la ductilidad y la tenacidad que decrece cuando aumenta el contenido de carbono, mientras que la dureza actúa proporcionalmente al contenido de carbono.

Manganeso.- al igual que el carbono, el manganeso es un elemento que se presenta en todos los aceros comerciales. Como características metalográficas tenemos que el manganeso reduce la temperatura a la cual se forma la martensita por lo que aumenta la posibilidad de tener austenita retenida en aceros templados, también es formador de perlita fina. En cuanto a las características mecánicas, el manganeso aumenta ligeramente la resistencia de la ferrita y en gran medida aumenta la dureza.

Fósforo.- al igual que el azufre, es considerado como un elemento perjudicial en aleaciones de acero ya que disminuye severamente la tenacidad y la ductilidad, aunque aumenta la resistencia y la templabilidad del acero. El fósforo puede ser añadido deliberadamente para mejorar la maquinabilidad o para darle mayor resistencia a la corrosión.

Azufre.- es considerado como un elemento perjudicial en las aleaciones de acero ya que deteriora la calidad de la superficie y causa

dificultad en la soldadura formando porosidades. Al reaccionar con el manganeso, previene la formación de sulfuros de hierro en los bordes de grano. En algunos aceros el azufre es añadido hasta un 0.25% con el fin de mejorar la maquinabilidad.

Silicio.- el silicio es uno de los principales elementos desoxidantes usados en el proceso de fabricación de aceros. En cantidades menores de silicio (0.05%) aumenta ligeramente la resistencia al óxido sin causar una grave pérdida de ductilidad, mientras que en mayor cantidad de silicio comprendida entre 0.15-0.30% en peso, aumenta la resistencia del acero al óxido. Para aceros que tienen alto contenido de silicio, generalmente son difíciles de procesar.

Níquel.- esta aleación es utilizada principalmente en aceros de baja aleación. Como características mecánicas, el níquel mejora la tenacidad a bajas temperaturas, endurece a la ferrita y como característica principal cuando el níquel se combina con el cromo y con el molibdeno, le dan al acero alta resistencia, tenacidad y ductilidad. Cuando al acero se le somete a un proceso de enfriamiento luego de un tratamiento térmico, el níquel reduce la formación de grietas.

Cromo.- el cromo es usado en aceros de bajo contenido de carbono para aumentar la resistencia a la corrosión y al óxido, aumenta la resistencia a temperaturas altas, aumenta la templabilidad y aumenta la resistencia a la abrasión en aceros de alto contenido de carbono.

Molibdeno.- el molibdeno está presente en el acero entre 0.15% a 0.30%. Cuando el acero se encuentra en un proceso de solidificación, la cantidad presente en el acero permite incrementar la templabilidad y retardar la formación de perlita como constituyente metálico. En cuanto a las propiedades mecánicas, el molibdeno es el único elemento aleante que permite incrementar la resistencia a la tracción del acero a temperaturas altas y también aumenta la resistencia a la fluencia.

Vanadio.- el vanadio permite controlar el crecimiento del grano del acero cuando se le somete a un tratamiento térmico mejorando así la resistencia y tenacidad especialmente para aceros templados y revenidos. La templabilidad del acero se incrementa cuando el vanadio presente en el acero llega hasta un 0.05% en peso, mientras que para aceros que presentan mayor cantidad de vanadio, la templabilidad se reduce debido a que forma carburos que son difícilmente solubles en la austenita.

Boro.- El boro es un elemento de aleación potente y económica que permite incrementar considerablemente la templabilidad cuando se añade a un acero completamente desoxidado, sobre todo en grados con un bajo contenido de carbón. La cantidad de boro que se añade es mínima. Suele ser de entre un 0,005 y un 0,003%. Esto no afecta a la resistencia de la ferrita y, por tanto, no se sacrifica la ductilidad, la formabilidad o la capacidad de mecanizado en el estado recocido.

Cobre.- la cantidad de cobre presente en el acero oscila entre 0.2% a 0,5% en peso. Como característica se tiene que el cobre mejorar la resistencia a la corrosión atmosférica pero al mismo tiempo, es un elemento perjudicial cuando el acero se lo somete a un proceso de trabajo en caliente ya que durante el proceso, el cobre se incrusta en los bordes de grano.

Nitrógeno.- El Nitrógeno puede agregarse a algunos tipos de acero, para promover la formación de austenita.

Titanio.- Básicamente, el Titanio se utiliza para estabilizar y desoxidar acero, aunque debido a sus propiedades, pocas veces se usa en soldaduras.

Aluminio.- esta aleación permite controlar el tamaño de grano cuando el acero se le somete a un proceso de tratamiento térmico o cuando se utiliza para un proceso de trabajo en caliente. Los aceros que presentan un tamaño de grano fino tienen una gran tenacidad.

2.1.6. MICROESTRUCTURA DE LA ALEACIÓN HIERRO – CARBONO

Constituyentes metálicos

Un examen micrográfico permite identificar los microconstituyentes que presenta el material estableciendo de manera práctica y sencilla el comportamiento mecánico que tuviere el material cuando se utilice para un fin específico. Al realizar este tipo de ensayos se puede tener información

muy valiosa en cuanto a la historia completa del material cuando ha pasado por procesos de tratamiento mecánico y térmico. Entre los constituyentes metálicos que se puede encontrar en un acero son los siguientes:

Ferrita.- los aceros ferríticos se obtienen solamente cuando en su composición química presentan un porcentaje bajo de carbono. Los aceros ferríticos se caracterizan por presentar límites de ferrita en su microestructura y microscópicamente se muestra como granos poligonales claros. En aceros que tienen un contenido de carbono menor al 0.6%, la ferrita se presenta con una red o malla que limita los granos de perlita, mientras que, en aceros con un contenido de carbono entre 0,6 a 0,85% de carbono se presenta en forma de agujas o bandas circulares orientados en la dirección de los planos cristalográficos de la austenita. En cuanto a las propiedades mecánicas, al presentar una solubilidad máxima del 0.0218% a una temperatura de 727°C tienen una buena ductilidad, dureza de 90 Brinell y una resistencia a la tracción de 28 kg/mm² (272,4 MPa) con un alargamiento del 40%. Estos aceros al cristalizar en una estructura BCC, presentan una transición de dúctil a frágil cuando existe una disminución de temperatura o cuando se aumenta la velocidad de deformación.

Austenita.- A temperaturas comprendidas entre 1394°C y 912°C durante el proceso de solidificación se presenta el hierro en su segunda transformación alotrópica denominada hierro gama. En esta fase, el hierro presenta una estructura cristaliza FCC permitiendo que la máxima

solubilidad en estado sólido del carbono sea 2.11% a una temperatura de 1148°C. Como características mecánicas, los aceros austeníticos presentan gran ductilidad, maleabilidad, plasticidad con una dureza que alcanza los 300 Brinell, resistencia a la tracción de 100 kg/mm² (980 MPa) con un alargamiento del 30%.

Cementita.- conocido también como carburo de hierro (Fe₃C), contiene 6.67% en peso de carbono. Entre sus características mecánicas presenta una dureza Brinell de 700 HB cristalizando en una red ortorrómbica dándole una característica de un material muy duro pero frágil. En aceros con un contenido de carbono mayor al 0,9%, se presenta la cementita de un blanco brillante formando una red que envuelve a la perlita. En una matriz de ferrita, la cementita se presenta en forma de glóbulos o granos dispersos en toda la matriz.

Martensita.- la martensita se forma por un proceso de enfriamiento rápido desde un estado austenítico.

Como propiedades mecánicas presenta una dureza entre 50 y 68 HRC, resistencia a la tracción de 170 a 250 kg/mm² (1666 – 2450 MPa) con un alargamiento que varía entre 0,5 a 2,5%. Dependiendo de la cantidad de carbono que presente el acero, la microestructura de la martensita cambia, por ejemplo, para aceros que tienen un contenido de carbono menores a 0.6% en peso, presentan una forma de cintas mientras que para aceros mayores a 0.6% de carbono tiene una forma laminar. La estructura cristalina

de la martensita es una red tetragonal debida por la inserción de átomos de carbono haciendo que el material sea sumamente duro pero a la vez frágil.

Perlita.- la estructura cristalina llamada perlita es el resultado de un proceso de enfriamiento lento de un acero eutectoide (0.77% en peso de carbono) justo por debajo de la temperatura eutectoide donde se forma una estructura laminar de placas alternas de ferrita alfa en un 88% y cementita en un 12%. Como características mecánicas presentan una dureza Brinell de 250 HB, resistencia a la tracción de 80 kg/mm^2 (784 MPa) con un alargamiento del 15%.

Bainita.- la bainita es una estructura cristalina intermedia entre perlita y la martensita que se obtiene por una transformación isotérmica realizado en aceros eutectoides en condición austenítica por un proceso de temple en caliente desde los 550°C hasta los 250°C . Durante el proceso de temple en caliente en ese rango de temperaturas, se producen dos tipos de estructura entre la cuales se destaca la Bainita superior compuesta por una matriz de ferrita a una temperatura comprendida entre 550°C y 350°C mientras que la Bainita inferior se logra entre 350°C a 250°C con un aspecto similar a la martensita. Presenta una dureza entre 40 a 60 HRC.

Para determinar el tipo de constituyentes metálicos, es necesario definir el tamaño de la muestra y el tipo de corte que se deba realizar para

no alterar la microestructura y para lograrlo, se realiza un proceso normalizado aplicado en laboratorio bajo las siguientes normas:

- (ASTM E 3 – 01, 2005): Guía estándar para la preparación de muestras metalográficas.

El objetivo principal de la norma es revelar los diferentes constituyentes y estructura de metales y aleaciones por medio de un examen metalográfico que implica la selección de probetas metalográficas haciendo referencia a la parte más representativa del material para el análisis. Una sección transversal perpendicular al eje axial permite tener información sobre la variación de la estructura desde el centro a la superficie, distribución de inclusiones no metálicas, corrosión, mientras que, una sección longitudinal paralela al eje axial revela la cantidad de inclusiones presente en el acero, el grado de deformación plástica de acuerdo a la distribución granular e información del tipo de tratamiento térmico realizado. También hace referencia al tamaño de la probeta con un área superficial entre 12 a 25 mm² así como también los procedimientos de corte, desbaste y pulido en la que se especifica el tipo de lija a utilizar, refrigerante y el tiempo de pulido para lograr un acabado tipo espejo y poder facilitar el análisis al exponer la muestra a un microscopio metalúrgico.

- (ASTM E 407 – 07, 2005)Práctica estándar de micro ataque para metales y aleaciones.

Esta norma provee de diferentes soluciones químicas y procedimientos que se clasifican en tres tablas diferentes para realizar un ataque químico a metales y aleaciones. La Tabla N°1 es una lista alfabética de metales y aleaciones con el respectivo ataque químico correspondiente.

La Tabla N°2 es un listado numérico de soluciones químicas que están relacionadas con la tabla anterior en el que se indica la composición y el procedimiento general para realizar un ataque químico. Por último la Tabla N°3 contiene una lista alfabética de las soluciones químicas con su respectivo código de referencia.

Formación del grano en el acero

La forma y el tamaño de grano se definen durante la transición que sufre el metal al cambio de fases de líquido a sólido bajo un proceso de solidificación que se inicia con la formación de núcleos estables en la primera fase llamada nucleación para luego pasar a una segunda fase en la que crece el núcleo hasta dar origen a cristales finalizando con el crecimiento granular. La nucleación se da cuando existe una liberación de energía, es decir, que a medida que los átomos pierden energía durante el proceso líquido – sólido, esta es disipada al exterior en forma de calor hasta alcanzar una temperatura por debajo del punto de congelación y lograr una frontera estable en el cual se formen pequeños núcleos. A medida que el metal se solidifica, los átomos tienden a perder energía formando nuevos núcleos o se unen a aquellos ya existentes constituyendo cristales en sus

tres direcciones. El crecimiento de los núcleos dependerá la forma en la que se disipe el calor del metal para generar un crecimiento planar o dendrítico.

Un crecimiento planar se da cuando el líquido se enfría a la misma temperatura o por encima de la temperatura de solidificación aproximadamente 1538°C. Este paso es de vital importancia ya que durante la solidificación, las protuberancias que puedan surgir durante el proceso, sean disueltas parcialmente por el líquido hasta formar soluciones homogéneas. En un crecimiento dendrítico pasa todo lo contrario ya que al sub-enfriar el líquido por debajo de la temperatura de solidificación, empiezan a formar soluciones sólidas que crecen en forma de ramificaciones llamadas dendritas. Estas dendritas crecerán una vez que el líquido alcance la temperatura de solidificación para posteriormente seguir un crecimiento planar.

Tamaño de Grano.

El factor principal para determinar el tamaño de grano se da principalmente por la rapidez de enfriamiento del acero. A velocidades bajas de enfriamiento, los átomos que pierdan energía, se unirán a los núcleos ya formados estableciendo una estructura granular de grano grueso, mientras que, a elevadas velocidades de enfriamiento, los átomos formará una gran cantidad de núcleos formando una estructura granular de grano pequeño dando lugar a un tamaño de grano fino.

El tamaño del grano tiene un importante efecto en las propiedades mecánicas del metal, por ejemplo, los materiales que presenten un tamaño de grano fino en su estructura, mostraran mayor resistencia al impacto, mayor dureza, mayor resistencia a la tracción y se distorsionan menos durante el temple así como también son menos susceptibles al agrietamiento en comparación a aquellos materiales de grano grueso.

Existen diferentes procedimientos para determinar el tamaño de grano para materiales y aleaciones que son recomendados por la norma ASTM E 112 como son el método de comparación de imagen que también se menciona en la norma INEN 1481:87, método planimétrico y por el método de intersección.

El método por comparación de imagen es un procedimiento en el cual se realiza un barrido a toda la superficie del material con una amplitud de 100X, se toma la mejor muestra y se compara con un patrón de estructura similar seleccionando el tamaño de grano por el número correspondiente al índice del patrón coincidente. La norma ASTM E 112 presenta en la tabla1, una sugerencia para seleccionar una carta de comparación para cada material, por ejemplo, para aceros ferríticos se toma en cuenta la carta número 1 para un lente con aumento de 100X. El número o índice de tamaño de grano ASTM se puede obtener mediante la siguiente ecuación:

$$N = 2^{n-1} \qquad 2.1$$

Donde:

N = es el número de granos por pulgada cuadrada

n = es el número de referencia al índice de tamaño de grano ASTM

A pesar de que este es un método de prueba y error, maneja una precisión ± 1 unidad de tamaño de grano.

El método planimétrico es un método en el cual se traza una circunferencia que tenga un área de 5000 mm^2 ($d= 79.8\text{mm}$) de la mejor imagen que se pueda obtener del microscopio. Una vez trazado el círculo, se cuenta el número de granos presentes dentro del círculo y se cuentan los granos que son intersecados por la línea de la circunferencia aplicando la siguiente fórmula:

$$N_A = f * \left(N_{\text{Inside}} + \frac{N_{\text{Intercepted}}}{2} \right) \quad 2.2$$

Donde:

N_A = es el tamaño promedio de grano por mm^2

f = es el factor multiplicativo de Jeffrie

N_{Inside} = es el número de granos dentro del círculo trazado

$N_{\text{Intercepted}}$ = es el número de granos interceptados por la línea de circunferencia.

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.

Para tener una buena exactitud en el resultado, la norma establece que el número de granos dentro del círculo trazado debe ser aproximadamente de 50 con el cual se logra una precisión $\pm 0,25$ unidades de tamaño de grano.

El método por intersección es un procedimiento mediante el cual se traza en una fotomicrografía, una o más líneas rectas en el cual se cuenta el número de intersecciones tomando en cuenta que si los extremos de la línea no interseca completamente al grano, se tomará como medio grano. La cantidad de granos por milímetro será obtenida mediante la división entre la cantidad promedio de granos intersecados y la longitud de la línea en milímetros. La exactitud de este método puede llegar a un $\pm 0,25$ unidades de tamaño de grado dependiendo del número de líneas que se utilice, por ejemplo, la norma hace referencia a cuatro líneas en diferentes posiciones con las respectivas medidas en milímetros o se puede tomar una de las líneas como patrón y trazar otras tres líneas paralelas con la misma longitud.

El tamaño de grano G , resultará de la siguiente ecuación:

$$G = 10.00 + 2 \log_2^* N_L \quad 2.3$$

Donde:

N_L = es la cantidad de granos por milímetro.

2.2. PROPIEDADES MECÁNICAS

Las características mecánicas de un material están estrechamente relacionadas con las características metalográficas en cuanto al tamaño de grano, composición química, tratamiento térmico que posee el material para mejorar el comportamiento mecánico. Muchos materiales cuando están en servicio, están sujetos a fuerzas y cargas cuyas propiedades mecánicas, que previamente deben ser estudiados, son necesarias cuantificar para diseñar elementos mecánicos de tal forma que los esfuerzos a los que vaya a estar sometido, no sean excesivos y el material no se fracture.

Existen diferentes tipos de ensayos mecánicos que se le somete a un material para determinar el comportamiento mecánico pero que para este documento, se realizarán ensayos de tracción y ensayos de dureza para determinar las principales propiedades mecánicas. Los resultados que se obtengan de estos ensayos serán comparados con otro material y así poder determinar el acero que se asemeje al que se utilizado en la carrocería.

2.2.1. MÓDULO DE ELASTICIDAD

En un diagrama esfuerzo–deformación que se la obtiene mediante un ensayo de tracción, la relación entre esfuerzo (σ) y deformación unitaria (ϵ) se la conoce como el módulo de elasticidad o módulo de Young que no es más que la pendiente de la recta en la zona elástica cuya ecuación viene representada por la ley de Hooke.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad 2.4$$

El valor del módulo de elasticidad indica la rigidez que presenta el material, puesto que un material más rígido requerirá de una fuerza mayor para deformarlo en el rango elástico. Generalmente, el valor del módulo de elasticidad varía ligeramente cuando se añade al material elementos de aleación o cuando se somete a un tratamiento térmico, sin embargo, este valor cambia significativamente cuando existen incrementos de temperatura.

A nivel atómico, el módulo de elasticidad está relacionado con las fuerzas de unión entre átomos del material ya que los enlaces atómicos actúan como resortes que necesitan de una fuerza para separar los átomos o alargar el enlace entre los mismos desde la posición de equilibrio que son representados de la siguiente manera:

$$F = S_o * (r - r_o) \quad 2.5$$

Donde:

S = rigidez del enlace atómico

r_o = es el radio atómico

Si tomamos en consideración el esfuerzo que se necesita para separar los átomos en una unidad de área en una celda unitaria cúbica simple, se tiene la siguiente expresión matemática:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{S_o * (r - r_o)}{r_o^2} \quad 2.6$$

De esta ecuación se puede dar cuenta de lo siguiente:

$$\varepsilon = \frac{r - r_o}{r_o} \quad 2.7$$

Reemplazando la ecuación de la deformación unitaria en la ecuación de esfuerzo, se obtiene que:

$$\sigma = \frac{S_o}{r_o} * \varepsilon \quad 2.8$$

Donde:

$E = \frac{S_o}{r_o}$ = es el módulo de Young o módulo de elasticidad.

Los valores de rigidez de enlace atómico S_o vienen representados en la siguiente tabla por lo que el módulo de elasticidad resultará un valor estimado.

Tabla 2.1. Módulo de elasticidad para diferentes tipos de enlaces

Tipo de enlace	$S_o, \text{N}\cdot\text{m}^{-1}$	E estimado a partir de $(S_o/r_o), \text{GN}/\text{m}^2$
Covalente, enlace, C - C	180	1000
Iónico puro, enlace, Na - Cl	9 - 21	30 - 70
Metálico puro, enlace, Cu - Cu	15 - 40	30 - 150
Puente de hidrógeno, H ₂ O	2	8
De van der Waals (ceras, muchos polímeros)	1	2

Fuente: (Mangonon, 2001)

2.2.2. MÓDULO DE POISSON

En un ensayo de tracción, un cuerpo se deformará en dirección de la fuerza axial, sin embargo, cuando este elemento de prueba se deforma axialmente, también existen deformaciones laterales que tienen una relación constante con respecto a las deformaciones longitudinales siempre y cuando se encuentre dentro del rango elástico. Por esta razón, el módulo de Poisson se define como la relación que existe entre la deformación unitaria transversal y la deformación unitaria axial que sufre el material cuando es sometida a una fuerza axial representada en la siguiente ecuación:

$$\mu = -\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_a} = \frac{\frac{\Delta d}{d_o}}{\frac{\Delta l}{l_o}} \quad 2.9$$

2.2.3. RESISTENCIA A LA FLUENCIA

La resistencia a la fluencia se define como el esfuerzo correspondiente al límite elástico en un diagrama esfuerzo-deformación, es decir, cuando realizamos un ensayo de tracción, al metal se le somete una fuerza de forma progresiva en el cual tiende a sufrir un alargamiento y una reducción en su área transversal.

Cuando el material se encuentra en una zona elástica, actúa como un resorte, es decir, que regresa a las medidas originales cuando se quita la fuerza aplicada, pero si continuamos aplicando esta fuerza, el material llega a un punto en donde empieza una transición entre la zona elástica y la zona

plástica que al momento de retirar la fuerza en ese punto, el metal queda deformado plásticamente. Ese punto de transición se la conoce como punto de fluencia y la fuerza en ese punto se la conoce como resistencia a la fluencia. Para determinar este valor se utiliza un método convencional a partir del diagrama esfuerzo – deformación en la que se traza una línea paralela a la porción inicial del comportamiento elástico del material a una distancia del 0,2% respecto del origen. El valor que se obtiene del esfuerzo de fluencia, es aquel en la que la recta corta a la curva esfuerzo – deformación.

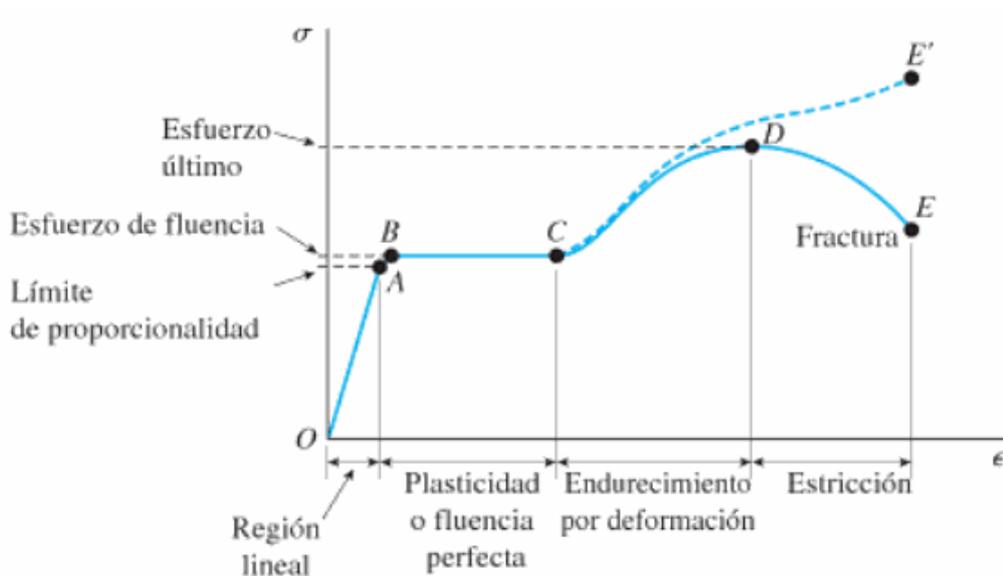


Figura 2.6 Esfuerzo de fluencia por el método convencional

Fuente: (James M. Gere, 2000)

2.2.4. RESISTENCIA A LA TRACCIÓN

La resistencia a la tracción se define como el esfuerzo máximo obtenido en un diagrama esfuerzo-deformación. Al realizar un ensayo de tracción, al aplicar una carga de manera progresiva, pasa de una zona elástica a una zona plástica cuya deformación no permanece uniforme y en algún punto del material se deformará más que en otras. Este punto de

transición donde empieza la estricción o a formarse un cuello de botella, será la resistencia máxima obtenida ya que al reducirse el área transversal, se requerirá una fuerza menor para continuar con la deformación del material hasta llegar al punto de fractura.

2.2.5. TENACIDAD

La tenacidad de un material se define como el área bajo la curva en un diagrama esfuerzo-deformación unitaria que representa la energía que absorbe el material antes de fracturarse.

$$U = \int_0^{\varepsilon_f} \sigma d\varepsilon \quad 2.10$$

2.2.6. DUCTILIDAD

La ductilidad es el porcentaje de deformación que presenta un material antes de que se produzca la fractura, que para los diseñadores, es un valor importante en cuanto a la elongación que tenga el material cuando se le someta a procesos mecánicos como extrusión y laminado.

La elongación o porcentaje de alargamiento es la diferencia entre marcas antes y después del ensayo permitiendo de esta manera saber cuánto se estiró el material durante la prueba.

$$\varepsilon = \frac{l - l_o}{l_o} * 100 \quad 2.11$$

La reducción de área o porcentaje *de adelgazamiento* describe la disminución del área transversal durante el ensayo.

$$RA = \frac{A_o - A_F}{A_o} * 100 \quad 2.12$$

2.2.7. DUREZA

La dureza es la oposición que ofrecen los materiales a alteraciones como la penetración, la abrasión, el rayado, la cortadura, las deformaciones permanentes; entre otras. También puede definirse como la cantidad de energía que absorbe un material ante un esfuerzo antes de romperse o deformarse. Mediante ensayos de dureza, se puede también pronosticar con exactitud otras propiedades del material tales como la resistencia última a la tracción, resistencia a la fatiga y la resistencia a la abrasión por fricción solamente con tener datos de dureza.

Existen varios procedimientos para medir la dureza de un material en la que se deben tomar en consideración dos aspectos importantes en cada uno de los equipos como es el tipo de penetrador y la carga aplicada. Para un ensayo de dureza Rockwell se utiliza el método de medición de la profundidad del penetrador en el cual se utiliza un penetrador de diamante cónico cuando se trata de materiales duros que están dentro de una escala C, mientras que, para materiales suaves que se encuentran dentro de una

escala B, se utiliza una esfera de acero con un diámetro de 1/16". La carga aplicada para un ensayo de dureza Rockwell va desde 15 kgf hasta 150 kgf.

Para el ensayo de dureza Brinell se utiliza el método de medición del área cuyo penetrador es una esfera de acero de 10 mm de diámetro. En este ensayo se aplican cargas que van desde 500 kgf hasta 3000 kgf. En el caso de los aceros, la resistencia última mínima está relacionada directamente con el índice de Dureza Brinell cuya fórmula es:

$$S_u = \begin{cases} 0.45BHN & Ksi \\ 500BHN & \text{---} Psi \end{cases} \quad 2.13$$

2.3. TRATAMIENTOS TÉRMICOS

El tratamiento térmico es un proceso que permite modificar la microestructura del material mediante procesos de calentamiento y enfriamiento lento para obtener propiedades mecánicas deseadas como la resistencia a la tracción, dureza, ductilidad, tenacidad. El proceso consiste en calentar a los metales o aleaciones en estado sólido a temperaturas preestablecidas, mantener a esa temperatura durante un intervalo de tiempo hasta que se forme la estructura cristalina deseada y posteriormente enfriarlo a una velocidad conveniente para obtener un tamaño de grano óptimo con propiedades mecánicas específicas.

2.3.1. RECOCIDO

El tratamiento térmico por recocido consiste en calentar al metal a una temperatura adecuada, mantenerla durante un tiempo determinado y luego enfriarlo lentamente

El recocido se emplea básicamente para reducir la dureza y fragilidad; alterar la microestructura para obtener las propiedades mecánicas deseadas; ablandar el material y con ello mejorar la maquinabilidad; para recristalizar los metales que son trabajados en frío; aliviar los esfuerzos residuales inducidos después de haber sometido al metal a un proceso de trabajo en frío.

Para el caso de los aceros, existen tres tratamientos de recocido con el fin de lograr aplicaciones específicas manejando ciertos rangos de temperatura.

El Recocido subcrítico o llamado también recocido de proceso, permite aliviar esfuerzos y llevar al metal a un proceso de recristalización cuando el material es sometido a trabajos en frío. Para aliviar esfuerzos, se le somete al metal a una temperatura inferior al de recristalización, mantenerlo a esta temperatura durante un período de tiempo y luego enfriarlo lentamente de manera uniforme. Esta temperatura se da en un rango de 595°C y 675°C.

En un proceso de recristalización, el metal es calentado a una temperatura entre 11°C a 22°C inferior a la temperatura crítica, mantenerla a esa temperatura durante un período de tiempo y enfriarla normalmente por aire

con el fin de recuperar la estructura de grano original cuando este ha pasado por un proceso de trabajo en frío.

El Recocido completo es un proceso mediante el cual se lleva al acero a una estructura idónea para llevar a tratamientos posteriores a piezas de acero forjadas. El acero se lleva a una temperatura de austenitización completa que se da a 962°C , mantenerla a esa temperatura y luego llevarla a un enfriamiento lento por debajo de la temperatura crítica más baja formado así una estructura cristalina llamada perlita.

2.3.2. TEMPLADO

El templado consiste en calentar el acero a una temperatura en donde la ferrita se transforma en austenita y mediante un enfriamiento rápido hasta una temperatura menor o igual a 200°C , la austenita se transforma en martensita obteniendo un endurecimiento total del acero proporcionándole mayor dureza y resistencia mecánica. Posterior a este proceso se realiza comúnmente un revenido con el fin de aliviar las tensiones internas formadas durante el temple.

A más de mejorar las propiedades mecánicas, se da la transformación alotrópica del hierro que pasa de una estructura cristalina FCC, a una estructura tetragonal centrada en las caras (TCC) característica principal de la martensita debido a la deformación que se produce en la red cristalina por la inserción de los átomos de carbono. Por esta razón se debe el aumento

de la dureza en el acero precisamente a la tensión que se produce en los cristales.

2.3.3. CEMENTADO

El cementado es un proceso de endurecimiento superficial que le proporciona al acero diferentes propiedades mecánicas a más de la dureza superficial. Las cantidades de carbono depositadas en la superficie otorgará al acero mayor resistencia a la compresión y resistencia a la fatiga mientras que el núcleo proporcionará dureza y tenacidad. Este proceso se realiza para aleaciones de acero de bajo contenido de carbono menores al 0.3% en peso en un ambiente líquido o gaseoso a una temperatura adecuada logrando en la superficie un constituyente martensítico o perlítico muy duro después de un proceso de enfriamiento, mientras que, en el interior del material puede tener un constituyente perlítico, bainítico, martensítico o incluso ferrítico dependiendo del contenido de carbono depositado. Para ello, el acero se calienta a una temperatura controlada en un rango de 850°C y 950°C aunque también se la puede llevar a temperaturas entre 790°C a 1095°C dependiendo de la dureza superficial al que se quiere llegar. Por lo general la dureza que se obtiene al realizar este proceso está comprendida entre 57 a 62 HRC en la superficie y 25 a 45 HRC en el núcleo. Luego de realizar el proceso de endurecimiento, se realiza un templado a una temperatura comprendida entre 120°C a 180°C con el fin de mejorar la tenacidad y prevenir posibles cambios en las propiedades mecánicas.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA DE ENSAYOS Y PROCESO DE EXTRACCIÓN DE PROBETAS

Para poder caracterizar el acero empleado en la protección pasiva de la carrocería del PANHARD-AML 90 se realizó ensayos de caracterización metalográfica, mecánica y validación balística los resultados de los respectivos ensayos se encontraran en los capítulos continuos. Para que dichas pruebas tengan validación se utilizaron los criterios de métodos de pruebas estándar en productos de acero de la norma ASTM A 370-07 la cual provee de parámetros importantes que se tienen en consideración como las dimensiones de las probetas y condiciones en las cuales se deben efectuar los ensayos con la finalidad de obtener resultados óptimos además se consideraron los criterios expuestos para aceros balísticos empleados en vehículos de combate en las normas MIL-A-12560H (MR) y MIL-A-46100D (MR) los resultados obtenidos de los ensayos serán comparados con las exigencias que demandan dichas normas.

3.1. SELECCIÓN DE CORTE PARA PROBETAS

Dentro de la selección del corte para las probetas se debe tomar en cuenta ciertos parámetros como las altas temperaturas en esa zona de

trabajo, los cristales del material ganan energía de tal manera que se reordenan los granos cristalinos tratando siempre de permanecer estables y como consecuencia de ese nuevo ordenamiento, se produce un cambio en las propiedades mecánicas y metalográficas del material. Existen diferentes procesos para cortar un material ya sea por un corte térmico, discos de corte u otros procesos que son muy utilizados en la industria sin embargo se debe tomar en como la opción más apropiada la cual afecte menos las propiedades del material. Existen varios métodos de corte los cuales se detallaran a continuación.

3.1.1. CORTE CON GAS OXICOMBUSTIBLE

El corte con gas oxicombustible o también llamado oxicorte con sus siglas en ingles OFC, es un tipo de corte térmico que separa el material mediante una reacción química del oxígeno con el metal base a temperaturas elevadas cuya temperatura se mantiene por una flama de gas que arde en oxígeno.

El corte por este método se basa principalmente cuando el oxígeno en estado puro se combina con el hierro (oxidación del acero) cuando este se calienta hasta una temperatura de inflamación de 1100°C aproximadamente. Para lograr el oxicorte, se requiere precalentar el metal hasta una temperatura adecuada para comenzar el proceso. Cuando se llega a ese punto, se inyecta un chorro de oxígeno para combustionar el metal. Esta combustión es una reacción química exotérmica que genera calor el cual es aprovechado para continuar con el corte por fusión del metal.

Con este método es posible cortar materiales de acero de bajo contenido de carbono, hierros fundidos y piezas de acero colado con un espesor máximo de 300 mm dejando una ranura entre 1.5 mm a 10 mm. Cuando existe la presencia de elementos aleantes en concentraciones altas, puede afectar la capacidad de corte del material; el manganeso, silicio, fósforo y azufre en concentraciones normales, afectan poco la capacidad de corte debido a que estos elementos funden a temperaturas menores que sus óxidos.

Los efectos en la metalurgia del acero por este método va desde la transformación de la perlita en carburos esferoizados en la ferrita hasta la transformación de microconstituyentes más duros que depende mucho de ciertas variables como por ejemplo, la velocidad de corte, la velocidad de enfriamiento, el contenido de carbono y elementos de aleación presentes en el acero. La zona afectada por el calor con las siglas en inglés HAZ, puede llegar entre 0,8 a 6,4 mm de profundidad en planchas de acero con espesores entre 9,5 a 150 mm. La siguiente tabla muestra una aproximación en milímetros y en pulgadas sobre la zona afectada por el calor del material base.

Tabla 3.8 Aproximación de la HAZ por oxicorte

Espesor de la placa		HAZ	
mm	in	mm	In
Aceros de bajo contenido de carbono			
<13	<1/2	<0,8	<1/32
13	1/2	0,8	1/32
150	6	3,2	1/8
Aceros de alto contenido de carbono			
<13	<1/2	<0,8	<1/32
13	1/2	0,8 – 1,6	1/32 – 1/16
150	6	3,2 – 6,4	1/8 – 1/4

Fuentes: (ASM Handbook. Welding, Brazing and Soldering volume 6. 9ed, 2004)

3.1.2. CORTE POR ARCO DE PLASMA

El corte con plasma con sus siglas en inglés PAC, es un proceso de corte por arco restringido que utiliza una tobera calibrada para la constricción de un gas ionizado que se encuentra a muy alta temperatura para fundir un área localizada del metal base y que al mismo tiempo elimina el metal fundido por un chorro de gas que sale a alta velocidad. Una columna de plasma puede alcanzar temperaturas de hasta 27000°C en la zona más caliente y hasta 16650°C en la zona de corte. Los gases usados para crear plasma es un factor importante, no solo por los aspectos técnicos, sino por los costos de operación que eso representa. Entre los gases más usados en la industria se encuentra el aire comprimido, oxígeno, nitrógeno y una combinación de argón e hidrógeno en una mezcla de 80% y 20%

respectivamente. Los equipos que utilizan aire comprimido como gas, tienen un costo más barato, proporciona cortes más rápidos y pueden utilizarse en la mayoría de los materiales eléctricamente conductivos como el aluminio, latón, bronce, cobre, acero galvanizado, acero revestido o pintado.

Los efectos metalúrgicos que se obtiene por este método son menos dañinos a comparación de un proceso realizado por oxicorte, por ejemplo, si las profundidades de la zona afectada por el calor por un material que ha sido cortado por oxicorte son alrededor del 1,78 mm, en un proceso de corte por plasma la profundidad de la zona afectada por el calor será tan solo de 0,51mm, es decir, aproximadamente 3,5 veces menor la profundidad de la zona afectada por el calor en el metal base. Esta zona tendrá un efecto general en cuanto a la resistencia, resistencia a la corrosión y la susceptibilidad al agrietamiento de la superficie. Claro está que las profundidades antes señaladas dependen mucho de varios factores que deben ser tomados en cuenta como la intensidad de corriente y la velocidad del plasma aunque de esta también depende de otros factores como el tipo de gas a utilizar, presión, corriente eléctrica, tamaño y forma del orificio y la distancia de la boquilla a la pieza de trabajo.

3.1.3.ELECTROEROSIÓN CON ALAMBRE

El corte por electroerosión con alambre, es un proceso de corte térmico que se obtiene por una descarga eléctrica entre un alambre de diámetro pequeño y la pieza de trabajo. Este método es conocido como

corte por descarga eléctrica con alambre o corte por hilo con sus siglas en inglés EDWC que utiliza un alambre que actúa como un electrodo que puede ser de materiales como latón, cobre, tungsteno y molibdeno o alambres recubiertos con zinc o latón con un diámetro que varía entre 0,076 y 0,30 mm, La selección del diámetro del alambre dependerá de la anchura de ranura y del tipo de acabado que se desea tener, por ejemplo, alambres con un diámetro de 0,30mm es utilizado para cortes de desbaste, mientras que, alambres con un diámetro de 0,20 mm son utilizados para cortes de acabado. El principio de funcionamiento de una máquina de corte por electroerosión es cuando un alambre suministrado por un carrete de alimentación, avanza lentamente y de forma continua cortando la pieza de trabajo y se conecta con un carrete de recuperación para lograr un corte constante. Los materiales que se pueden cortar por este método deben ser eléctricamente conductivos y deben tener un espesor máximo de 300 mm. La zona afectada por el calor presenta una profundidad inferior a 0,03 mm lo cual hace que este proceso sea una muy buena alternativa a pesar de que es un corte electro – térmico además de que no produce cambios significativos sobre las propiedades mecánicas.

3.1.4. CORTE POR CHORRO DE AGUA

El corte por chorro de agua es un proceso de índole mecánica, mediante el cual se consigue cortar cualquier material, haciendo impactar sobre éste un chorro de agua a gran velocidad que produce el acabado deseado. Este tipo de proceso fluctúa entre 60000 psi y 90000 psi. El chorro de agua contiene partículas abrasivas que impactan al material cortándolo.

Puede cortar materiales con una dureza elevada; así, espesores de hasta 8 pulgadas de acero inoxidable son cortados. Es un proceso revolucionario que hoy en día es de máxima utilidad y comienza a ser un recurso habitual a la hora de mecanizar piezas, es bastante simple pero a la vez muy complejo. Resulta una herramienta muy versátil y cuya aplicación es extensible a prácticamente todos los trabajos industriales(Wikipedia).Al ser un procedimiento de corte en frío resulta especialmente interesante, ya que esta demandado en todas las aplicaciones en las que el material no se pueda ver afectado por el calor. Existen numerosas ventajas que hacen de éste un producto puntero en el mundo industrial, respecto a otros métodos más limitados.



Figura 3.1 Corte por chorro de agua

Fuente: David Díaz

El dispositivo consiste en un chorro de agua a presión, cuyo diámetro de la boquilla oscila entre 0,08 mm a 0,45 mm de diámetro, por el cual, sale

una mezcla de agua y abrasivo lanzado a una presión muy elevada, capaz de cortar cualquier tipo de material. Uno de los elementos más importantes es la boquilla por la que sale el chorro, de ella depende la cohesión del chorro que condiciona en gran medida la viabilidad técnica de la aplicación, pues si el chorro es cónico se pierde poder de corte, precisión, calidad y las características de corte en seco(Wikipedia).

La presión del chorro de agua es otra de las características más importantes del proceso, es aportada por un sistema de una bomba dotada con un intensificador de ultra presión que hacen que ésta pueda llegar hasta 4000 bares de presión, dependiendo del objeto de trabajo, existe la opción de trabajar a menos presión, sobre unos 2000 bares, o incluso trabajar sin el abrasivo, pero esto se utiliza en materiales de poca dureza que no necesitan del abrasivo para ser cortadas , o con el fin de trabajar piezas que por ejemplo, no quieran ser cortadas, sino únicamente marcadas, por ejemplo, hacer carteles metálicos en los que las letras y figuras plasmadas estén elaboradas por chorro de agua a baja presión, que no llegue a cortar pero marque, obteniendo en este ámbito de trabajo sorprendentes resultados como podemos comprobar en la imagen. Pero por lo general se trabaja en altas presiones como la de 4000 bares, a pesar de que muchas veces no es necesario por el espesor a cortar, ya que con mucha menos presión se realizaría el mismo corte y con las mismas condiciones, pero lo que hace que se trabaje normalmente a máxima presión es el hecho de agilizar el proceso ya que esto le aporta más rapidez al corte, el corte puede ir desde minutos a horas.

La velocidad de corte es de máxima importancia, y esta dependerá de factores como la presión de la bomba y la capacidad del intensificador, diámetro de la tobera, cantidad y calidad de abrasivo y del espesor de la pieza. En referencia a valores de velocidad encontramos que todo este sistema de aporte de presión permite que el líquido salga por el orificio a una velocidad de 1000 metros por segundo.

El motivo de añadirle abrasivo al agua es debido a que un simple chorro de agua no sería capaz de desarrollar cortes como los actuales en los materiales más duros, por ello se le aporta este abrasivo, mezcla de arcillas y vidrios, que dota al sistema de un aumento de posibilidades de corte infinito. En relación al espesor de la pieza a cortar cabe decir que sirve desde 5 mm, que es cuando empezaría a ser rentable usar este método, hasta espesores de 200 mm en cualquier material, llegando incluso a los 400 mm. La máquina está dotada de una balsa, sobre la que se proyecta el chorro de agua, y la cual sujeta las piezas mediante una reja que mantiene el material en la superficie de trabajo, pero que permite que la mezcla de agua y el material eliminado se deposite dentro de la misma, evitando así que el líquido proyectado caiga fuera de la zona de corte, e incluso que salpique, pudiéndose reciclar el abrasivo para ser reutilizado de nuevo.

Como característica del proceso cabe destacar además, que el proceso de corte no afecta a los materiales porque no los endurece ni deforma, de esta manera es un método que en diversos casos puede ser más útil que el láser o el plasma cuando los trabajos sea imprescindible un buen acabado. Es un proceso de corte extremadamente versátil, no hay

afectación térmica durante el proceso. Además, prácticamente cualquier material puede ser cortado. Es importante destacar que las operaciones secundarias luego del proceso son casi nulas con la presencia de poca o ninguna rebaba.

Ventajas:

- Al no haber herramientas de corte, no existe el problema de desgaste de la misma.
- Corte de excelente calidad, en la mayoría de casos no se necesita un acabado posterior.
- Universal, ya que la misma máquina puede cortar una enorme variedad de materiales.
- Proceso sin exfoliación ni desgarros.
- Apta para mecanizar perfiles intrincados.
- Proceso sin aporte de calor.
- Inexistencia de tensiones residuales debido a que el proceso no genera esfuerzos de corte.
- No genera contaminación ni gases.
- El mecanizado lo puede realizar el mismo ingeniero que ha diseñado la pieza, ya que no requiere de trabajo manual bruto, simplemente programar la máquina, ubicar la pieza y recogerla una vez terminada.
- Reutilización de piezas procedentes de otros trabajos, abaratando de esta manera los costes finales.
- Si se compara con los sistemas de plasma, oxicorte y láser, al ser estos tres con aporte de calor, y el agua no, el corte por agua permite

un trabajo sin afectar a ninguna zona del material sobre el cual trabaja.

- Si se compara únicamente con el laser, el chorro por agua permite corta espesores muchos mayores.

Desventajas:

- No existen muchas, pero por destacar alguna se podría decir que el agua en comparación al corte por plasma es más lento. El corte por agua solo puede trabajar en dos dimensiones, impidiendo de esta forma el trabajo en más ejes.

3.2 SELECCIÓN DE CORTE

A continuación se seleccionará el tipo de corte a realizarse en la plancha de acero balístico con una matriz de decisión comparando cada uno de los procesos en base a los siguientes parámetros mostrados en la siguiente tabla.

Tabla 3.9 Matriz de decisión selección de corte

Matriz de decisión para tipo de corte					
Parámetros	Ponderación	Oxicorte	Plasma	Electrohilo	Chorro de agua
Calidad del corte	10	2	6	10	8
Costo operación	20	20	15	5	10
ZAT	50	0.6	2	40	50
Disponibilidad	20	20	20	10	10
Total	100	42.6	43	65	78

Fuente: David Díaz

Cada uno de los parámetros evaluados tienen un grado de ponderación del 1 al 100 siendo 1 = baja importancia a 100 =sumamente importante.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la matriz de decisión, el proceso de corte de agua lleva la cabecera y fue elegido para el corte de las probetas debido a que dicho corte no afecta de manera térmica a las probetas ni cambia las propiedades mecánicas (ZAT).

Para la caracterización de un material es fundamental tener las propiedades mecánicas sin ninguna alteración debido al corte ya que dichas propiedades juegan un rol crucial para determinar el acero que fue empleado en la carrocería del PANHARD AML-90.

CAPÍTULO 4

CARACTERIZACIÓN METALOGRAFICA

4.1. INTRODUCCIÓN

La metalografía es una herramienta muy utilizada en ciencia de los materiales que permite estudiar y caracterizar diferentes materiales con ayuda de distintas técnicas realizadas en laboratorio que se inicia desde la preparación de la muestra con procesos de desbaste y pulido hasta la realización de un ataque químico para revelar y observar con un microscopio metalúrgico, los microconstituyentes del material que posteriormente servirán para un análisis e interpretación de los mismos.

En este capítulo se desarrollarán diferentes procesos para poner en manifiesto el acero con el que es utilizado para la construcción de la carrocería de las partes pasivas del tanque PANHARD AML-90al revelar la estructura micrográfica, composición química, inclusiones y otras técnicas como la chispa característica que nos permita extraer los suficientes datos para determinar a qué acero corresponde y saber a qué procesos mecánicos que ha sido sometido el material.

Para cada uno de los ensayos realizados, se especificarán las normas que fueron aplicadas, así como también y de manera detallada, los diferentes procedimientos para la elaboración de las probetas y los pasos a seguir en cada ensayo. Los resultados que se obtengan, serán mostrados al final de cada ensayo realizado.

4.2. EQUIPOS UTILIZADOS

Los equipos de laboratorio utilizados para la caracterización metalográfica de los diferentes elementos estructurales del PANHARD AML-90 fueron los siguientes:

Pulidora manual

Marca: Buehler Handimet I

Modelo: 16 – 31 – 1471

Serie: 326 – HG – 7039

Utilidad: permite realizar un proceso de desbaste fino con las 4 superficies planas que posee el equipo con lijas 150, 240, 360, 600 y 1000

Pulidora de disco

Marca: Buehler Ecomet I

Características: Velocidad de giro 360 rpm

Disco de nylon

Alúmina 0,03 micrones (abrasivo)

Utilidad: dar un acabado tipo espejo a las superficies planas de las muestras.

Microscopio metalúrgico

Marca: Olympus

Características: Lente ocular 10X

Lente objetivo: 5X, 10X, 20X, 40X

Amplificación: 2000X

Cantidad de luz: variable

Utilidad: observar los microconstituyentes e inclusiones del material con diferentes amplificaciones de 100X, 200X y 400X

4.3. ESTRUCTURA MICROGRÁFICA

4.3.1. NORMAS A APLICAR

Para identificar los microconstituyentes presentes en el acero, se utilizarán diferentes normas que contienen la información necesaria para la selección y preparación de probetas, procedimiento de ensayo y ataque químico adecuado para revelar la microestructura del acero. Entre las normas que se hace referencia son las siguientes:

- (ASTM E 3 – 01, 2005) ASTM E 3 – 01: Guía estándar para la preparación de muestras metalográficas.
- (ASTM E 407 – 07, 2005): Práctica estándar de micro ataque para metales y aleaciones.

4.3.2. PREPARACIÓN DE MUESTRAS

La preparación de las muestras se realizará conforme indica la norma ASTM E 3 – 01 para diferentes elementos estructurales del panel. Esta norma no especifica un tamaño específico pero si se menciona un área superficial comprendida entre 12 a 25 mm².

Desbaste y pulido

Una superficie en lo posible exenta de rayas se consigue al seguir una secuencia progresiva de desbaste empezando con lijas de tengan un mayor tamaño de grano abrasivo como un 150, hasta una lija de menor tamaño abrasivo como una lija número 1000. Para mejores resultados, los papeles abrasivos no deben estar desgastados ya que su efectividad en el desbaste no sería el correcto y como resultado se tendría una superficie pobre. Un aspecto a tomar en cuenta durante el proceso, es controlar el flujo de agua durante el desbaste porque muy poca cantidad del mismo producirá una excesiva acumulación de pequeñas partículas del material lo que reducirá la calidad de la preparación, así mismo, una excesiva cantidad de flujo hará que la muestra patine sobre la superficie del papel abrasivo lo que también resultaría una pobre calidad de la superficie de la muestra.

Con lo expuesto anteriormente y una vez colocadas las muestras en baquelita, se realiza el siguiente proceso para obtener una superficie en lo posible exenta de rayas resumida en los siguientes pasos:

- Pulir las muestras en un solo sentido con diferentes abrasivos en presencia de agua empezando con una lija de numeración 150, 280, 360, 600 terminando con una lija de 1000.

- Se debe aplicar una presión firme y uniforme para lograr que toda la superficie esté en contacto en cada uno de los papeles abrasivos.
- De preferencia, llevar a cabo el proceso en una sola dirección para no generar curvaturas en la superficie.
- Al hacer el cambio del papel abrasivo, rotar la muestra 90° para darnos cuenta de cómo va el proceso de desbaste.
- Este procedimiento se realiza para todas las probetas.
- Llevar las muestras a los discos de nylon con la respectiva alúmina para terminar con el proceso de pulido y conseguir un acabado tipo espejo.

4.3.3. PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO MICROGRÁFICO

En este punto se revelará la microestructura del acero cuyas imágenes proyectadas por el microscopio, dependerán del estado en la que se encuentren los lentes y de las condiciones en las que esté la superficie de la muestra luego de haber pasado por un proceso de desbaste y pulido.

Las imágenes obtenidas serán captadas por una cámara que a su vez estará conectada a una tarjeta de video del computador para proyectarlas en un software que permita guardar las mejores imágenes de la microestructura para su posterior análisis. Los pasos a seguir son los siguientes:

- Preparar la solución para el ataque químico en proporciones que indica la norma (ASTM A 407 – 07, 2007). Por lo general se utiliza nital al 3% en una proporción de 3 ml de ácido nítrico (HNO_3) en 100 ml de etanol al 95%.

- Una vez preparada la solución, verter una porción del mismo en una cápsula y sumergir la superficie de la muestra durante 2s aproximadamente para no dañar la superficie.
- Esperado ese tiempo, enjuagar con abundante agua y secar con una secadora para evitar que la superficie de la muestra se dañe.
- Observar en el microscopio metalúrgico los constituyentes metálicos del acero con aumentos de 100X, 200X y 400X para el respectivo análisis.

En caso de que la microestructura no esté bien definida, se debe atacar nuevamente durante un tiempo prudencial para que la superficie de la muestra no se quemé y repetir el mismo procedimiento hasta que la microestructura esté bien definida.

4.3.4. RESULTADOS

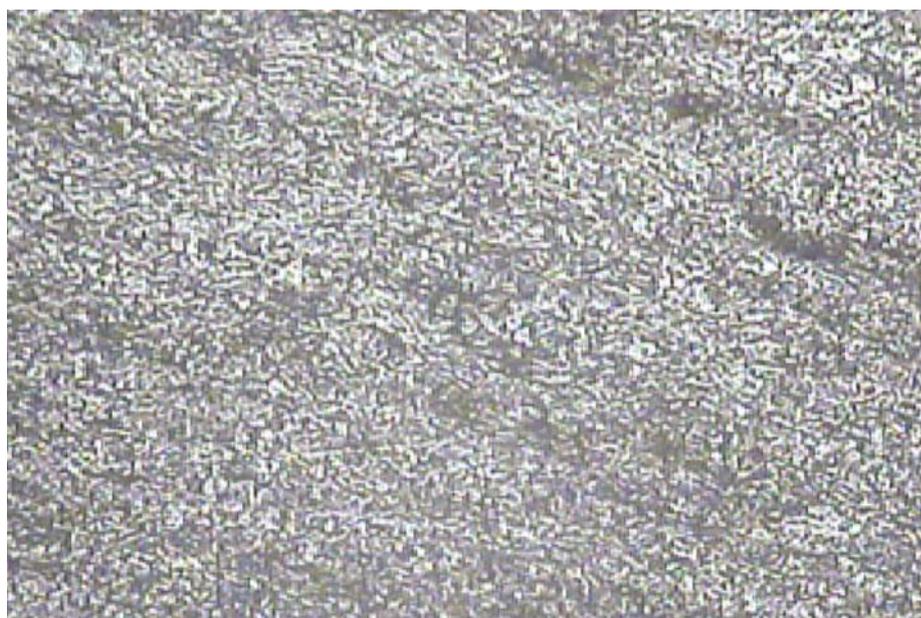


Figura 3.1 Microestructura PANHARD AML-90 200X

Fuente: David Díaz



Figura 3.2 Microestructura PANHARD AML-90 100X

Fuente: David Díaz

4.4. COMPOSICIÓN QUÍMICA

4.4.1. NORMAS A APLICAR

Para el análisis de composición química, se contó con el apoyo del Adelca, el Espectrómetro de Chispa marca AMETEK modelo SPECTROMAXx Metal Analyzer. El material de prueba se vaporiza mediante descarga por chispas. Los iones desprendidos durante este proceso son excitados y emiten luz. Esta se conduce a los sistemas ópticos, donde se miden mediante la técnica CCD. El aparato ya contiene datos de calibración memorizados. Los valores medidos se comparan con estos datos. Los valores medidos se convierten en valores de porcentaje que se indican en la pantalla. CCD es un detector electrónico fotosensible. Este detecta y

convierte la luz en cargas eléctricas. Por otra parte, la norma estándar que más se aproxima para un análisis de composición química de materiales metálicos es la ASTM A 415 – 99, aunque cabe recordar que toda la información se puede encontrar en los manuales de la máquina.



Figura 3.3 Espectrómetro de masas

Fuente: David Díaz

4.4.2. PREPARACIÓN DE MUESTRAS

El tamaño de las muestras no se especifica en ninguna norma pero por requerimientos propios de la máquina, las muestras deben tener máximo una dimensión de 30 mm de ancho, 30 mm de largo con un espesor propio del material. Para lograr esas dimensiones, se realizó el corte de chorro y se lijo con la finalidad de tener una superficie plana en lo posible sin rayaduras para lograr resultados confiables. Para obtener resultados más confiables se realizaron 3 descargas de chispas en cada una de las dos probetas sobre

distintas partes y al final se obtuvo un promedio, el cual nos da un valor más cercano a la verdadera composición química del acero.

4.4.3. PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO DE COMPOSICIÓN QUÍMICA

- Calibrar el equipo mediante los procedimientos y parámetros que indica el manual de la máquina.
- Montar la muestra en el sistema óptico de la máquina y generar las chispas necesarias hasta conseguir una buena quema.
- Los resultados que se obtenga de la máquina, serán analizados por medio de un software en la que se indican los componentes en porcentajes en peso.

4.4.4. RESULTADOS

A continuación se encuentran los resultados obtenidos por el Espectrómetro de Chispa de Adelca.

Programa: Fe-01-F1
 Comentario: Orienta-Copia
 Chispeo(s) individual(es)

08/08/2013 04:51:12
 119788
 Elementos: Concentración Tipo Corregida -> SAE-1029

Area Id: Pruebas AceroBalistico Quality:
 Heat Id: Sample:

Orden de Pro:
 Turno:

No	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cu %	Cr %	Ni %	Mo %
1	0.245	0.268	0.567	0.0111	0.0035	0.113	2.292	1.747	0.565
2	0.263	0.270	0.572	0.0117	0.0035	0.114	2.296	1.758	0.569
3	0.270	0.267	0.559	0.0115	0.0031	0.113	2.250	1.754	0.558
4	0.284	0.268	0.572	0.0120	0.0035	0.114	2.303	1.764	0.564
5	0.292	0.267	0.563	0.0111	0.0026	0.113	2.271	1.731	0.553
6	0.287	0.270	0.575	0.0114	0.0035	0.114	2.309	1.768	0.574

No	Al %	Co %	Ti %	Nb %	V %	W %	Pb %	B %	Sn %
1	0.0062	0.0343	<0.001	<0.004	0.110	<0.010	<0.0030	0.0015	0.0128
2	0.0072	0.0366	<0.001	<0.004	0.111	<0.010	<0.0030	0.0016	0.0141
3	0.0068	0.0353	<0.001	<0.004	0.108	<0.010	<0.0030	0.0015	0.0134
4	0.0066	0.0356	<0.001	<0.004	0.110	<0.010	<0.0030	0.0016	0.0140
5	0.0068	0.0350	<0.001	<0.004	0.108	<0.010	<0.0030	0.0014	0.0110
6	0.0061	0.0361	<0.001	<0.004	0.112	<0.010	<0.0030	0.0016	0.0141

No	Zn %	As %	Bi %	Ca %	Ce %	Zr %	La %	Fe %	C.E. %
1	<0.002	0.0215	<0.002	0.0007	<0.0030	<0.002	0.003	93.99	0.636
2	<0.002	0.0240	<0.002	0.0037	<0.0030	<0.002	0.003	93.93	0.656
3	<0.002	0.0226	<0.002	0.0007	<0.0030	<0.002	0.003	94.01	0.657
4	<0.002	0.0232	<0.002	0.0007	<0.0030	<0.002	0.003	93.91	0.678
5	<0.002	0.0172	<0.002	0.0008	<0.0030	<0.002	0.003	94.01	0.680
6	<0.002	0.0234	<0.002	0.0006	<0.0030	<0.002	0.003	93.88	0.682

Figura 3.4 Resultado de la composición química

Fuente: Adelca

En la tabla se puede observar el promedio de los datos obtenidos en el laboratorio.

Tabla 4.1 Composición química del acero PANHARD AML-90

Metales	%
Carbon (C)	0.273
Silicio (Si)	0.268
Manganeso (Mn)	0.568
Fosforo (P)	0.0115
Azufre (S)	0.0033
Cobre (Cu)	0.114
Cromo (Cr)	2.287
Niquel (Ni)	1.754
Molibdeno (Mo)	0.564
Aluminio (Al)	0.0066
Cobalto (Co)	0.0355
Titanio (Ti)	<0.001
Niobio (Nb)	<0.004
Vanadio (V)	0.11
Wolfranio (W)	<0.010
Plomo (Pb)	<0.0030
Boro (B)	0.0015
Estaño (Sn)	0.0133
Cinc (Zn)	<0.002
Arsénico (As)	0.022
Bismuto (Bi)	<0.002
Calcio (Ca)	0.0012
Cerio (Ce)	<0.0030
Circonio (Zr)	<0.002
Lantano (La)	0.003
Hierro (Fe)	93.96

Fuente: Departamento de Metalurgia Extractiva Adelca

4.5. CARACTERÍSTICA DE CHISPA

4.5.1. NORMAS A APLICAR

No existe una norma para realizar un proceso de caracterización por chispa, pero se tiene una guía que se utiliza en el laboratorio de Metalurgia

en el cual hace referencia a las características que presenta el acero cuando es colocado en una piedra de esmeril.

4.5.2. PREPARACIÓN DE MUESTRAS

Las muestras para realizar este ensayo deben ser cortadas con del corte a chorro cuyo tamaño permita sujetar con facilidad la probeta sin representar algún riesgo.

4.5.3. PROCEDIMIENTO PARA EL ENSAYO DE CHISPA

- Utilizar de preferencia gafas protectoras.
- Evitar acercarse demasiado a la piedra del esmeril.
- Colocar el flexómetro en dirección de la chispa.
- Acercar el acero a la piedra del esmeril para obtener una chispa.
- Tomar imágenes del procedimiento con ayuda de una cámara fotográfica.

4.5.4. RESULTADOS



Figura 3.5Ensayo de chispa

Fuente: David Díaz

CAPÍTULO 5

CARACTERIZACIÓN MECÁNICA

5.1. INTRODUCCIÓN

Este capítulo pretende realizar un estudio sobre las propiedades mecánicas que presenta el acero de la carrocería de las partes pasivas del vehículo PANHARD AML-90 así como definir las curvas características que expliquen el comportamiento del acero y los valores de resistencia bajo la acción de influencias externas. Estos valores de resistencia y el rendimiento del material bajo condiciones de carga, se logra realizando diferentes ensayos mecánicos pero en especial, realizar un ensayo a tracción nos permite definir muchas de estas propiedades como la resistencia última a la tensión, resistencia a la fluencia, porcentaje de elongación, entre otras, permitiendo establecer una base para poder comparar con otros materiales y determinar qué tipo de acero es al que corresponde.

Para ello se realizarán ensayos de tracción, dureza e impacto en la que se especificarán las normas y los procedimientos a realizar en cada ensayo y se detallarán también los equipos y el procedimiento para la fabricación de las probetas

5.2. EQUIPOS UTILIZADOS

5.2.1 EQUIPOS UTILIZADOS PARA EL CORTE Y ACABADOS

Los equipos que fueron utilizados para el corte de las probetas de acuerdo a las distintas dimensiones y geometrías requeridas para cada uno de los respectivos ensayos son los siguientes:

Cortadora por chorro de agua	Características técnicas:	
	Marca:	Shenyang Head Science & Technology Corporation
	Modelo:	HEAD 2030B
	Serie:	11 A -105
	Tipo de fuente:	corriente constante
	Tipo de corriente:	corriente continua (DC)
	Voltaje de entrada	200 – 600V
	Presión de operación continua	330 Mpa
	Max Presión de operación:	380 Mpa
	Utilidad:	Este equipo se utilizara para el corte de las probetas con las distintas dimensiones y geometrías para cada ensayo respectivamente.

5.2.2 EQUIPOS UTILIZADOS PARA ENSAYOS MECÁNICOS

Máquina de ensayos universales	Marca:	MTS
	Modelo:	810 -14 -2
	Manual:	MRM – 30
	Capacidad Max:	500 KN
	Ciclos:	60 Hz
	Tipo de motor:	SC
	Potencia del motor:	40HP
	Voltaje:	230V
	Velocidad máxima del motor:	1675 rpm
	Utilidad:	Este equipo de laboratorio permite realizar ensayos de tracción.
Calibrador	Características técnicas:	
	Marca:	Fowler
	Modelo:	s/n
	Serie:	87962
	Rango:	0 – 150 mm
	Apreciación:	0,01 mm
	Utilidad:	Esta herramienta de medición se utilizará para tomar todas las medidas de las probetas de tal manera que cumplan con las especificaciones que pide la norma para los ensayos mecánicos que se realicen en laboratorio.

Durómetro Rockwell	Características técnicas:	
	Marca:	Rams
	Modelo:	10RR10
	Serie:	s/n
	Capacidad máxima:	100B, 100C
	Apreciación:	1B, 1C
Utilidad:	El durómetro Rockwell nos permite medir la dureza de materiales suaves en escala Rockwell B (RB) y para materiales duros en escala Rockwell C (RC).	

5.2 ENSAYOS MECANICOS

5.2.1 ENSAYO DE TRACCION

La prueba de tracción es uno de los más utilizados en el área de mecánica de materiales debido a que se obtienen las propiedades mecánicas principales del material como la resistencia última a la tracción, porcentaje de alargamiento, resistencia a la fluencia, módulo de Young entre otras propiedades que pueden ser aplicados para el diseño de distintos elementos mecánicos además del comportamiento que tiene el material bajo un diagrama esfuerzo-deformación con solo aplicar una fuerza axial.

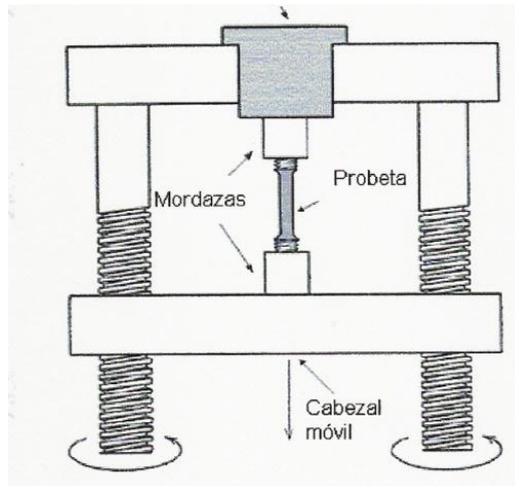


Figura 5.1 Ensayo de Tracción

Fuente: (Askeland, 2004)

La selección de la geometría y el tamaño de la probeta será de vital importancia para los resultados que se desea obtener, por ejemplo, si la probeta es de una geometría plana quiere decir que ese material va a ser utilizado para ser una placa delgada o una lámina mientras que para una geometría con sección redonda será utilizado para piezas forjadas y barras extruidas.

La galga extensométrica es uno de los instrumentos adicionales en un ensayo de tracción ya que al aplicar una carga axial a una probeta en la máquina universal de ensayos, se aprecia que la probeta sufre una deformación dentro del rango elástico cuyos valores pueden ser analizados estadísticamente.

5.2.1.1 NORMAS A APLICAR

Para realizar un ensayo a tensión, las probetas deberán ser seleccionadas y fabricadas de acuerdo a las siguientes normas:

- ASTM A 370 – 07a “Métodos de prueba estándar y definiciones para ensayos mecánicos para materiales de acero”.
- ASTM E 8 – 03 “Métodos de prueba estándar para un ensayo a tensión de materiales metálicos”
- NTE ISO 377: 2009: Acero y productos de acero. Localización y preparación de muestras para ensayos mecánicos.

5.2.1.2 FABRICACIÓN DE PROBETAS

La norma ASTM A 370 – 07a proporciona las dimensiones que debe tener la probeta con sus respectivas tolerancias. Se la puede complementar con la norma ASTM E 8 – 03 en el cual hace referencia a los procedimientos a tomar en cuenta para la determinación de las propiedades mecánicas del material como por ejemplo la velocidad que se utiliza para realizar un ensayo a tracción.

Antes de proceder con la extracción de las probetas, se debe realizar una inspección a todo el material tomando en cuenta deformaciones o procesos de manufactura realizados anteriormente. La soldadura al ser un proceso de fusión localizada, la zona fundida tendrá un cambio en la estructura granular que se extiende a lo largo de cierta distancia en el metal base conocida como HAZ (zona afectada por el calor). Así mismo los gases disueltos por el proceso, reaccionan con los elementos que compone la

pieza, más aún elementos del propio material base pueden reaccionar entre sí formando compuestos diferentes a los originales por tal razón las probetas se han extraído donde no existen cordones de soldadura.

Las probetas que se lograron extraer de la puerta de la carrocería del vehículo PANHARD AML-90 fueron 15 sus dimensiones se pueden observar en la Tabla 5.1y en la Figura 5.2 así mismo descripción de su elaboración de la probeta se encuentra detallada en la Tabla 5.2.

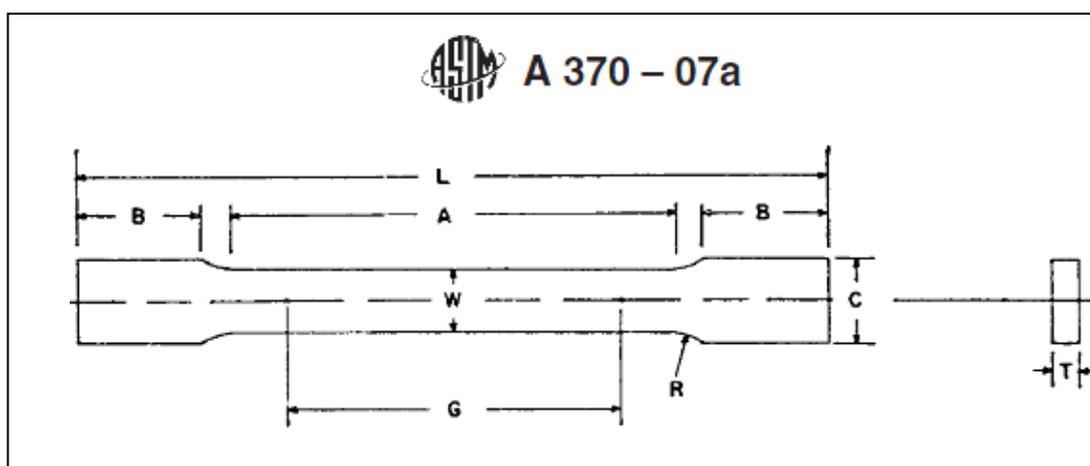


Figura 5.2 Probeta para ensayo de tracción

Fuente: (ASTM A370-07a, 2007)

Tabla 5.1 Dimensión proporcional de una probeta estándar para muñón

	Dimensiones (mm)
G	50,0 ± 0,010
W	12,5 ± 0,25
T	espesor del material
R	Mínimo 13 mm
L	200
A	60
B	50
C	20

Fuente: ASTM A370-07^a

Tabla 5.2 Tabla de procesos para probetas para ensayo de tracción

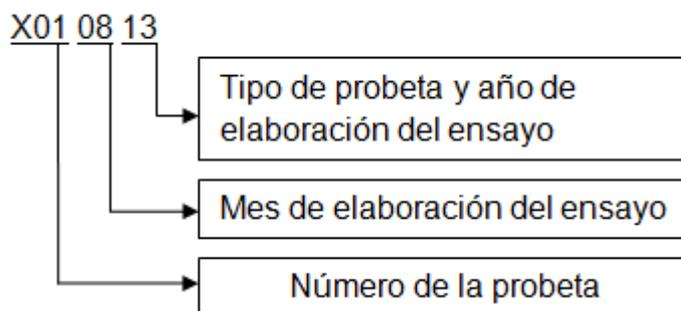
Nombre: Probeta Ensayo de tracción		Código: X151111M	Cant. : 15
Material: s/n		T. aproximando: 7 h	
Nº	Descripción	Máquinas y Herramientas	
1	Se genera un origen o inicio y mediante el chorro de agua se corta por medio del chorro que sigue la trayectoria de la probeta dibujada en Autocad	Maquina de corte por chorro de agua	
2	Verificación de medidas	Calibrador, trazador	
3	Extracción de probetas	Martillo de goma	
4	Fresar superficies irregulares	Fresadora, fresa 17 mm	
5	Trazo de medidas según norma	Calibrador, trazador	
6	Verificar medidas	Calibrador Digital	
7	Marcar según norma	Calibrado, punzón, martillo	

Fuente: David Díaz

5.2.1.3 PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

El procedimiento utilizado fue en base al manual de la máquina universal de ensayos del laboratorio de Mecánica de Materiales en el cual, se detalla las condiciones generales de ensayo. Los demás pasos fuera del manual, se detallan de la siguiente manera:

- Tomar las medidas tanto en ancho como en espesor de la garganta de la probeta con un calibrador y micrómetro respectivamente especialmente en el centro de la misma, ya que es esa sección debe presentar las tolerancias mínimas para que la rotura se realice entre marcas de la parte central de la probeta y con ello lograr mejores resultados.
- Con un calibrador tomar las medidas entre marcas de la parte central de la probeta.
- Codificar cada una de las probetas para poder identificarlas luego del ensayo. Cada probeta presenta una numeración la cual describe el tipo de probeta en este caso se ha designado la letra X para representar a las probetas de tracción seguido por el número de la probeta, el mes y el año en que se realizó el ensayo. Se puede ver en la parte de abajo la identificación de las probetas.



- Se toma la medida del peso del cabezal de la máquina aplicando una fuerza hasta que el mismo se mueva. Este valor servirá para restar de los valores que se obtenga en cada ensayo.
- El procedimiento de aplicación de carga se realizará de acuerdo al manual de la máquina.
- Culminado el ensayo, se retiran los pedazos de la mordaza y se mide la elongación entre marcas con un calibrador cuyas puntas estén de manera perpendicular a la superficie de la probeta. Esta medición se logra uniendo los pedazos de manera manual procurando que coincidan las partes fracturadas.
- Dar lectura de la fuerza de acuerdo a lo que indica el dial de la máquina. Este dato es la resistencia última a la tracción que tiene el material.
- Los demás datos como la resistencia a la fluencia se toman de acuerdo a la gráfica que da la máquina. En algunas gráficas es fácilmente determinar la resistencia de fluencia porque presenta dos puntos de fuerza tanto superior como inferior pero se toma este último debido a que el material en ese punto empieza a fluir en el rango plástico, por otro lado, la gráfica que presenta por ejemplo el bulón, no se determina de forma

directa la resistencia a la fluencia sino que se traza una línea paralela a la recta en el rango elástico de tal manera que el cruce entre la recta y la curva característica del material será el punto de fluencia.

5.2.1.4 RESULTADOS

Los resultados del ensayo de tracción se puede observar en la Tabla 5.3. En el ensayo 8 probetas de las 15 se rompieron fuera de marcas como se puede observar en la Figura 5.3. La rotura fuera de marcas se debe a dos principales motivos. El primero es debido a que el acero balístico posee una gran dureza y por lo tanto es difícil su maquinabilidad razón por la cual no fue fácil obtener las dimensiones requeridas por la norma ASTM A 370 – 07a. En consecuencia la sección central del las probetas X030813, X040813, X060813, X070813, X080813 y X090813 eran mayor que en los extremos; por tal motivo la rotura se produjo en los extremos. Sin embargo estos datos no fueron ya que pueden colaborar dando un valor valido a la resistencia de la fluencia y la resistencia última. El segundo motivo es que dos de las probetas X050813 y X100813 fueron afectadas por la soldadura en consecuencia sus propiedades mecánicas fueron alteradas además de no romperse dentro de marcas estas no cumplieron con la resistencia a la fluencia para aceros balísticos dando bajos resultados de resistencia de 514.6 y 613.23 Mpa respectivamente.

Tabla 5.3 Resultados Ensayo de Tracción

# Probeta	Area	Voltage	Carga	Esfuerzo	Elongación	Observaciones
	a x b (mm ²)	(v)	(kg)	(Mpa)	%	
X010813	145.4	7.5	18750	1263.7	16.7	N/A
X020813	143.5	7.45	18625	1271.9	16.8	N/A
X030813	127.5	6.55	16375	1258.6	N/A	Rotura fuera de marcas
X040813	127.1	6.55	16375	1262.2	N/A	Rotura fuera de marcas
X050813	120.9	2.54	6350	514.62	N/A	Rotura por soldadura
X060813	125.2	6.43	16075	1258.4	N/A	Rotura fuera de marcas
X070813	124.9	6.49	16225	1272.6	N/A	Rotura fuera de marcas
X080813	123.9	6.55	16375	1295.7	N/A	Rotura fuera de marcas
X090813	123.4	6.35	15875	1261.1	N/A	Rotura fuera de marcas
X100813	123.9	3.1	7750	613.24	N/A	Rotura por soldadura
X110813	151.3	7.77	19425	1258.3	18.48	N/A
X120813	151.5	7.86	19650	1270.7	16.74	N/A
X130813	152.5	7.86	19650	1263.1	16.82	N/A
X140813	152.1	7.78	19450	1253.2	18.48	N/A
X150813	151.7	7.77	19425	1254.8	18.8	N/A

Fuente: David Díaz



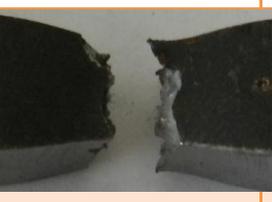
Figura 5.3 Probetas del Ensayo de Tracción rotas dentro y fuera de marcas

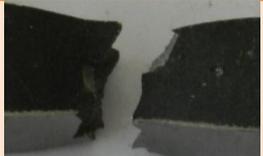
Fuente: David Díaz

Tabla 5.4 Tabla de Imágenes de las Probetas del Ensayo de Tracción

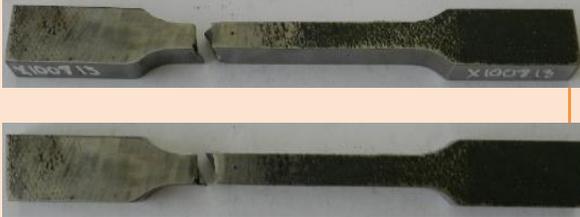
	ZOOM OUT	ZOOM IN	Observaciones
X010813			N/A
			

Continuación Tabla →

	ZOOM OUT	ZOOM IN	Observaciones
X020 8 13			N/A
X030 8 13			Rotura fuera de marcas
X040 8 13			Rotura fuera de marcas
X050 8 13		 	Rotura debido a que la probeta fue afectada por la soldadura

	ZOOM OUT	ZOOM IN	Observaciones
X060 8 13			Rotura fuera de marcas
X070 8 13			Rotura fuera de marcas
X080 8 13			Rotura fuera de marcas
X090 8 13			Rotura fuera de marcas

Continuación Tabla →

	ZOOM OUT	ZOOM IN	Observaciones
X100 8 13			Rotura debido a que la probeta fue afectada por la soldadura
X110 8 13			N/A
X120 8 13			N/A
X130 8 13			N/A

	ZOOM OUT	ZOOM IN	Observaciones
X140 8 13			N/A
X150 8 13			N/A

Fuente: David Díaz

Se puede apreciar mejor los resultados obtenidos del ensayo de tracción para las probetas que se rompieron dentro y fuera de marcas en la Figura 5.4 existe una ligera diferencia entre los resultados de la resistencia a la fluencia a excepción de los valores de las probetas X050813 y X100813 los cuales fueron alterados debido efectos de la soldadura.

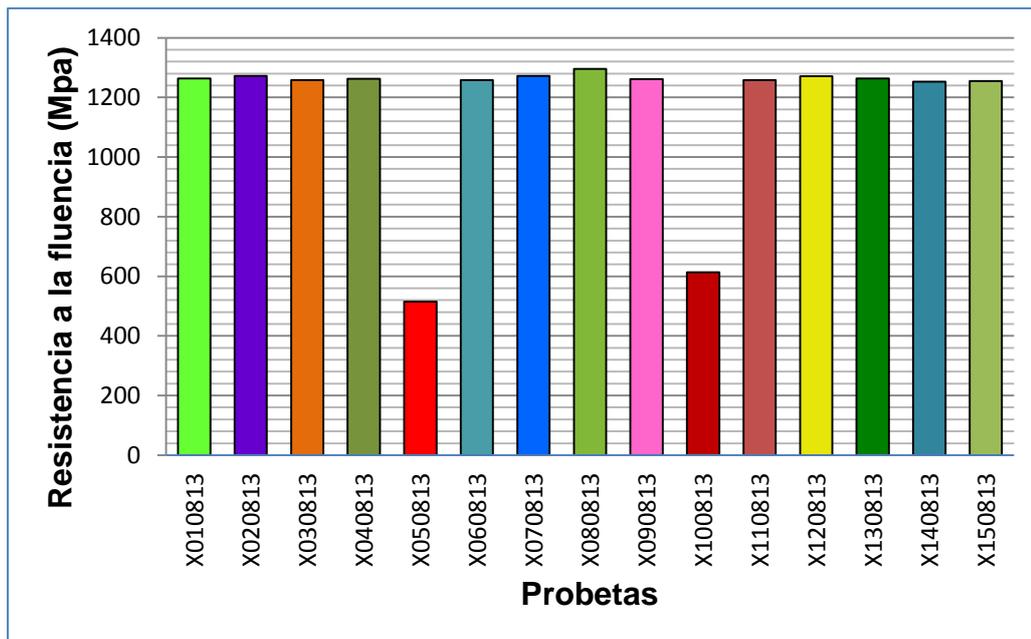


Figura 5.4 Grafica de Resultados del Ensayo de Tracción

Fuente: David Díaz

Con la finalidad de obtener resultados más acertados para la determinación de las características mecánicas del material se decidió descartar los datos de las probetas X050813 y X100813 ya que fallaron debido a la alteración de sus propiedades mecánicas por la soldadura. Así mismo para obtener el valor promedio del porcentaje de elongación se descartaron las probetas que se rompieron fuera de marcas en la Tabla 5.5 se podrán observar dichos resultados.

Tabla 5.5 Resultados Ensayo de Tracción omitiendo los valores de las probetas X050813 y X100813

# Probeta	Resistencia a la Fluencia		Resistencia última		Elongación
	(Mpa)	(Ksi)	(Mpa)	(Ksi)	%
X010813	1264	183.29	1348.27	195.55	16.7
X020813	1272	184.48	1333.2	193.36	16.8
X030813	1259	182.54	1348.93	195.65	N/A
X040813	1262	183.06	1352.14	196.11	N/A
X060813	1258	182.51	1341.87	194.62	N/A
X070813	1273	184.57	1372.01	198.99	N/A
X080813	1296	187.93	1380.52	200.23	N/A
X090813	1261	182.91	1331.84	193.17	N/A
X110813	1258	182.5	1315.18	190.75	18.48
X120813	1271	184.3	1315.99	190.87	16.74
X130813	1263	183.19	1319.89	191.43	16.82
X140813	1253	181.76	1309.95	189.99	18.48
X150813	1255	182	1312.05	190.3	18.8
Media	1265	183.46	1337.065	193.92	17.545714
Desviación Estándar	11.12	1.6125	22.81715	3.3093	0.9803206

Fuente: David Díaz

Los resultados de los ensayos de tracción omitiendo los valores de las probetas X050813 y X100813 se puede apreciar en la Figura 5.4

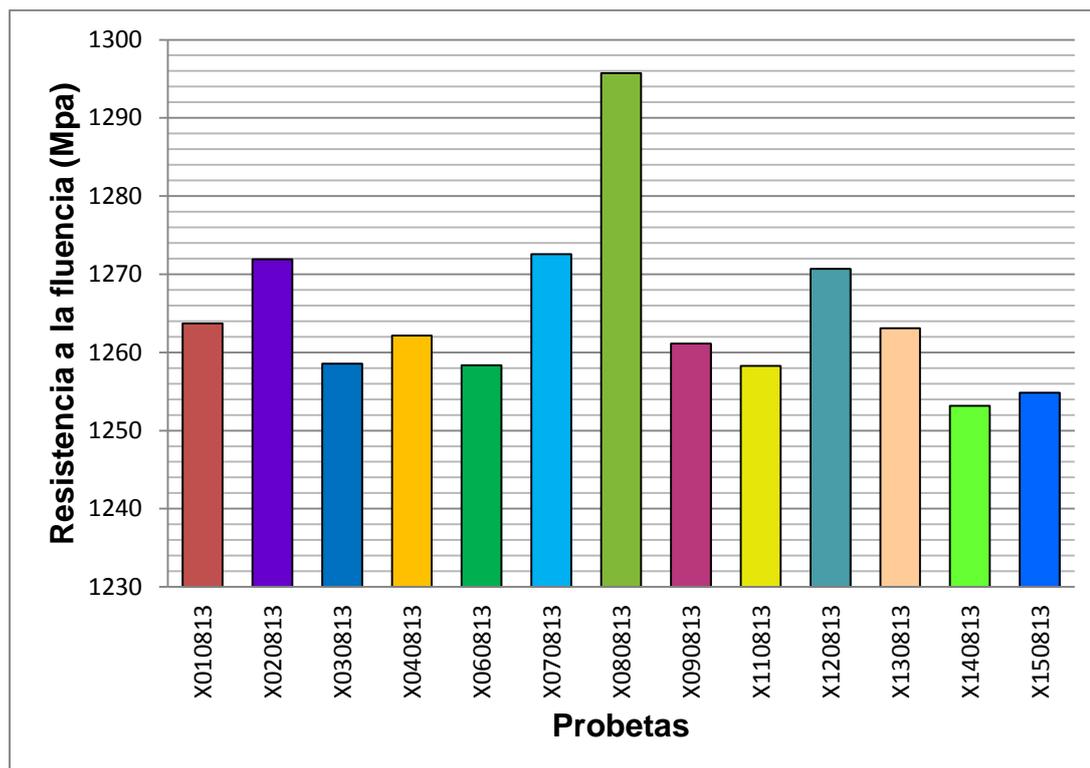


Figura 5.4 Grafica de Resultados del Ensayo de Tracción de Probetas rotas dentro y fuera de marcas

Fuente: David Díaz

$$3\sigma = 3 * 11.12 = 33.36 \text{ Mpa}$$

$$\sigma = 1265 \pm 33.36 = (1231.64\text{Mpa} - 1298.36\text{Mpa})$$

$$3\sigma = 3 * 0.98 = 2.94\%$$

$$\sigma = 17.54 - 2.94 = 14.6\%$$

5.2.2 ENSAYO DE DUREZA

Para medir la dureza de un material se han desarrollado diferentes técnicas que utilizan un pequeño penetrador que se introduce sobre la superficie del material bajo condiciones de carga y velocidad de penetración

controlada cuyos resultados se la puede obtener de forma directa o midiendo el tamaño de la huella resultante y calcular el valor de la dureza adquirida.

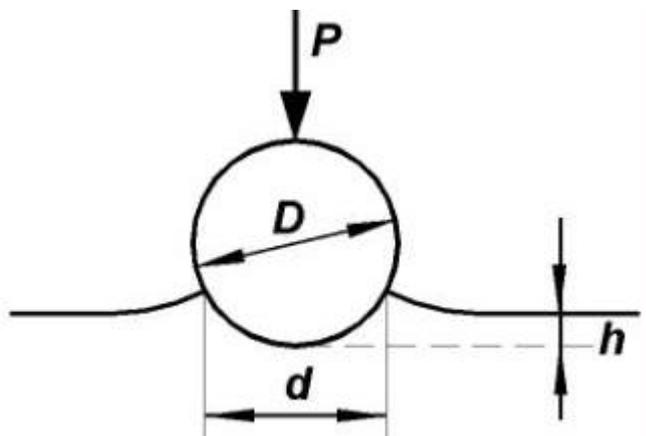


Figura 5.5 Ensayo de dureza Brinell

Fuente: <http://www.utp.edu.co/~gcalles/Contenidos/DurezaHB.htm>

Una de las técnicas más utilizadas es el ensayo de dureza Brinell que opera con una esfera de acero templado de 10 mm de diámetro bajo una carga constante que suele ser entre 500 kgf y 3000 kgf durante un determinado tiempo entre 10 a 30 segundos sobre la superficie. El cálculo de la dureza se la puede obtener mediante la siguiente ecuación:

$$HB = BHN = \frac{2F}{(\pi * D[D - \sqrt{D^2 - d^2}])} \left[\frac{kg}{mm^2} \right] \quad 5.1$$

Donde:

F = es la carga aplicada

D = es el diámetro del penetrador

d = es el diámetro de la huella

Otra forma para determinar la dureza Brinell es con el uso de tablas que se la puede encontrar en la norma ASTM A 370 – 07 el cual muestra valores que han sido previamente calculadas con una esfera de diámetro 10 mm para diferentes diámetros de huella que van desde 2 mm hasta 6.99 mm en intervalos de 0,01 con una carga específica que va desde 500 kgf hasta 3000 kgf en intervalos de 500 kgf.

El cálculo de la dureza del material empleado en el PANHARD AML - 90 es por medio de un ensayo de dureza Rockwell. Este ensayo se utiliza con más frecuencia debido a que se obtiene de manera automática mediante la medición de la profundidad de penetración para luego convertirlo en un valor de dureza. En este ensayo de dureza se utilizo un cono de diamante debido a la alta dureza del material.

5.2.2.1 NORMAS A APLICAR

La norma que se aplicará para realizar un ensayo de dureza Rockwell será bajo los procedimientos que indica la norma ASTM E 18 – 05: Método de prueba estándar para ensayo de dureza y dureza superficial de materiales metálicos.

5.2.2.2 FABRICACIÓN DE PROBETAS

La norma ASTM E 18 – 05 no especifica las dimensiones que debe tener la probeta para realizar este ensayo sin embargo por recomendación del laboratorio se asignaron las dimensiones de 30 mm de largo por 30 mm de ancho. Para lograr mejores resultados, la superficie la probeta se sometió

a un proceso de desbaste con papeles abrasivos con numeración 240 y 360 para poder eliminar óxidos e irregularidades superficiales. En cada proceso se utilizó un flujo continuo de agua para no alterar la condición original del material por calentamiento consecuencia del desbaste.

5.2.2.3 PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

Antes de proceder con la medición de la dureza de los materiales en estudio, se debe primero calibrar el Durómetro Rockwell del laboratorio de Mecánica de Materiales de la siguiente manera:

- Colocar la placa de calibración en el porta muestra
- Verificar que el selector de carga se encuentra en la escala B
- Verificar que el penetrador sea el correcto, para una escala Rockwell B se utiliza una esfera de diámetro 1/16"
- Acercar la probeta hasta que haga contacto con la esfera o hasta que el indicador del dial se mueva ligeramente.
- A partir de allí, girar dos vueltas y colocar el indicador en la posición cero del dial.
- Empujar el aplicador de carga hacia atrás lentamente
- Esperar entre 10 a 15 segundos hasta que la esfera deje de penetrar en la placa de calibración.
- Regresar el aplicador de carga a la posición inicial lentamente y dar lectura del resultado. Esta lectura debe estar entre $88,16 \pm 1$.
- Si la lectura se encuentra dentro del valor establecido, el Durómetro Rockwell estará calibrada, caso contrario se deberá regular el selector de

caga en + o – y realizar el mismo procedimiento hasta lograr la lectura que marca la placa de calibración.

Calibrado el Durómetro Rockwell, se procede con la toma de al menos cinco datos de cada uno de las probetas de los diferentes elementos estructurales del panel mediante el siguiente procedimiento:

- Colocar la probeta en el porta muestra
- Acercar la probeta hasta que haga contacto con la esfera o hasta que el indicador del dial se mueva ligeramente.
- A partir de allí, girar dos vueltas y colocar el indicador en la posición cero del dial.
- Empujar lentamente el aplicador de carga hacia atrás
- Esperar entre 10 a 15 segundos hasta que la esfera deje de penetrar en la probeta.
- Regresar el aplicador de carga a la posición inicial lentamente
- Dar lectura del dial en la escala seleccionada.
- Realizar el mismo procedimiento de al menos 6 lecturas.

5.2.2.4 RESULTADOS

Los resultados del ensayo de dureza se pueden ver a continuación en la Tabla 5.16 y en la Figura 5.6

Tabla 5.6 Resultados ensayo de dureza

# Medición	Dureza Rockwell C Scale,150 Kgf Load,Diamond Penetrator	Dureza Brinell,3000 Kgf Load 10 mm Ball	Resistencia Ultima (Ksi)
1	43	400	180
2	42	390	175.5
3	43	400	180
4	42	390	175.5
5	42	390	175.5
Promedio	42.4	394	177.3
Desviación Estándar	0.489897949	4.89897949	2.20454077
Media	42	390	175.5

Fuente: David Díaz

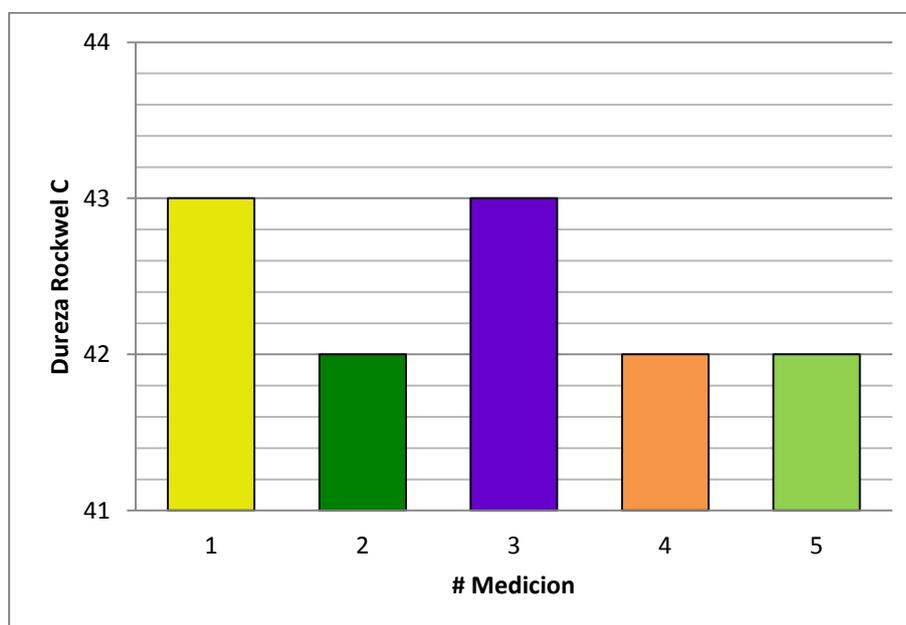


Figura 5.6 Ensayo de dureza Brinell

Fuente: David Díaz

5.2.4 ENSAYO DE IMPACTO

En elementos sometidos a efectos exteriores instantáneos o variaciones bruscas de las cargas, las que pueden aparecer circunstancialmente, su falla se produce generalmente, al no aceptar deformaciones plásticas o por fragilidad, aun en aquellos metales considerados como dúctiles. En estos casos es conveniente analizar el comportamiento del material en experiencias de choque o impacto.

El ensayo de tracción estático nos da valores correctos de la ductilidad de un metal, no resulta preciso para determinar su grado de tenacidad o fragilidad, en condiciones variables de trabajo. Los ensayos de choque determinan, pues, la fragilidad o capacidad de un material de absorber cargas instantáneas, por el trabajo necesario para introducir la fractura de la probeta de un solo choque, el que se refiere a la unidad de área, para obtener lo que se denomina resiliencia. Este nuevo concepto, tampoco nos ofrece una propiedad definida del material, sino que constituye un índice comparativo de su plasticidad, con respecto a las obtenidas en otros ensayos realizados en idénticas condiciones, por lo que se debe tener muy en cuenta los distintos factores que inciden sobre ella. Resumiendo se puede decir que el objeto del ensayo de impacto es el de comprobar si una maquina o estructura fallará por fragilidad bajo las condiciones que le impone su empleo, muy especialmente cuando las piezas experimentan concentración de tensiones, por cambios bruscos de sección, maquinados incorrectos, fileteados, etcétera, o bien verificar el correcto tratamiento térmico del material ensayado(GFELDST).

5.2.4.1 NORMAS A APLICAR

Para realizar un ensayo a tensión, las probetas deberán ser seleccionadas y fabricadas de acuerdo a las siguientes normas:

- ASTM A 370 – 07a “Métodos de prueba estándar y definiciones para ensayos mecánicos para materiales de acero”.
- ASTM E 23 – 03 “Métodos de prueba estándar para un ensayo de impacto para probetas con muesca de materiales metálicos”

5.2.4.2 FABRICACIÓN DE PROBETAS

La norma ASTM A 370 – 07a proporciona las dimensiones que requieren las probetas para el ensayo Charpy V-notch con sus respectivas tolerancias y orientación del maquinado ya sea transversal o longitudinal. Se la puede complementar con la norma ASTM E 23 en el cual hace referencia a las dimensiones que se requiere para las probetas, detalle de equipos utilizados en esta práctica, consideraciones que se deben tener en cuenta en el ensayo de impacto así mismo habla del rango de tolerancia en las dimensiones el aspecto físico de la rotura una vez realizado el ensayo de impacto.

Antes de proceder con la extracción de las probetas, se debe realizar una inspección a todo el material tomando en cuenta deformaciones o procesos de manufactura realizados anteriormente. La soldadura al ser un proceso de fusión localizada, la zona fundida tendrá un cambio en la

estructura granular que se extiende a lo largo de cierta distancia en el metal base conocida como HAZ (zona afectada por el calor por tal razón las probetas se han extraído donde no existen cordones de soldadura.

Las probetas que se lograron extraer de la puerta de la carrocería del vehículo PANHARD AML-90 fueron 12 en donde 6 de ellas fueron maquinadas en sentido longitudinal y las otras 6 en sentido transversal sus tolerancias y dimensiones se pueden observar en la Tabla 5.17 y en la Figura 5.7 así mismo descripción de su elaboración de la probeta se encuentra detallada en la Tabla 5.18.

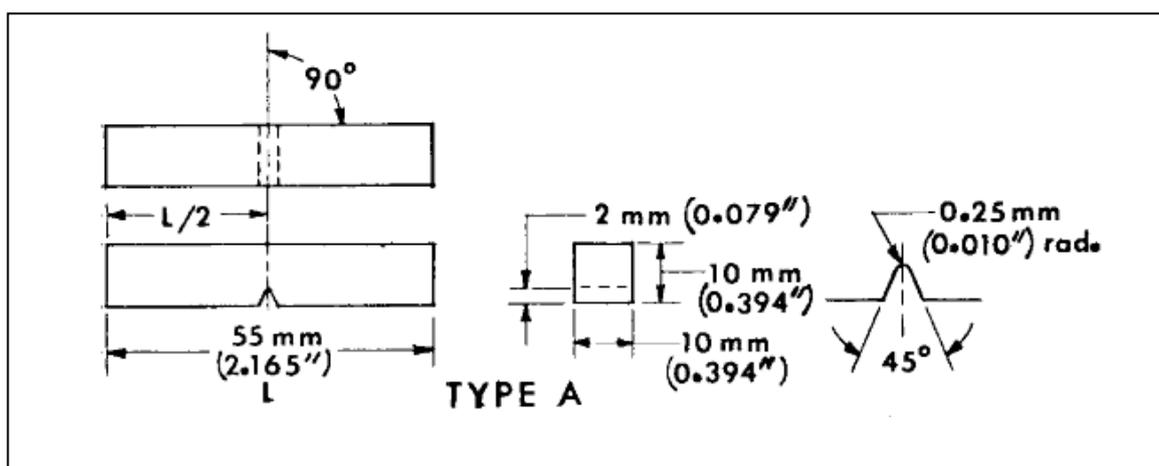


Figura 5.7 Charpy V-Notch

Fuente: David Díaz

Tabla 5.7 Tolerancias para probetas Charpy V-notch

TOLERANCIAS	
Longitud de la muesca hasta el borde	$90 \pm 2^\circ$
Los lados adyacentes	$90^\circ \pm 10 \text{ min}$
Dimensiones de sección transversal	$\pm 0.075 \text{ mm}$
Longitud(L)	$+0, -2.5 \text{ mm}$
Centro de la muesca (L/2)	$\pm 1 \text{ mm}$
Angulo de la muesca	$\pm 1^\circ$
Radio de la muesca	$\pm 0.025 \text{ mm}$
Profundidad de la muesca tipo A	$\pm 0.025 \text{ mm}$

Fuente: ASTM E-23

Tabla 5.8 Tabla de procesos para probetas para ensayo de tracción

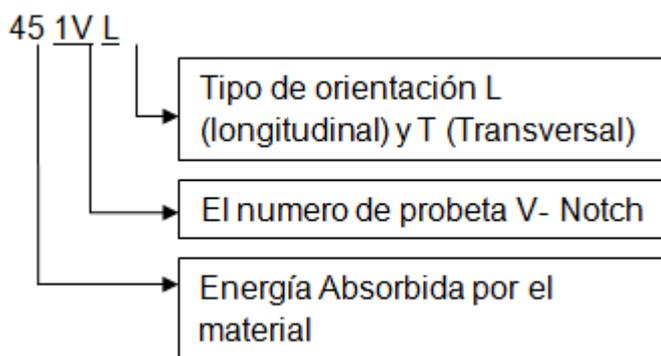
Nombre: Probeta Ensayo de Impacto		Código: V-NOTCH	Cant. : 12
Material: s/n		T. aproximando: 4 h	
Nº	Descripción	Máquinas y Herramientas	
1	Se genera un origen o inicio y mediante el chorro de agua se corta por medio del chorro que sigue la trayectoria de la probeta dibujada en Autocad	Maquina de corte por chorro de agua	
2	Verificación de medidas	Calibrador, trazador	
3	Extracción de probetas	Martillo de goma	
4	Fresar superficies irregulares y Fresado de muesca	Fresadora, fresa 15 mm y 10mm	
5	Trazo de medidas según norma	Calibrador, trazador	
6	Verificar medidas	Calibrador Digital	

Fuente: David Díaz

5.2.4.3 PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

El procedimiento utilizado fue en base al manual de la máquina universal de ensayos del laboratorio de Mecánica de Materiales en el cual, se detalla las condiciones generales de ensayo. Los demás pasos fuera del manual, se detallan de la siguiente manera:

- Se coloca la probeta con la muesca en los apoyos del péndulo.
- Con la seguridad respectiva se sube el martillo a la posición más elevada.
- Se libera el péndulo este descenderá he impactar la probeta en la muesca rompiéndola.
- Codificar cada una de las probetas para poder identificarlas luego del ensayo. Cada probeta presenta una numeración la cual los dos primeros números describen la energía absorbida, el numero siguiente representa el numero de ensayo, la V representa que es una probeta con muesca y la ultima letra representa el tipo de orientación en la que se maquino. Se puede ver en la parte de abajo la identificación de las probetas. 451VL



- Se toma la medida de la escala graduada y se tabulan los valores.
- Se espera un tiempo prudente hasta que el péndulo pierda velocidad.
- Culminado el ensayo, se recogen los pedazos de la probeta.

5.2.4.4 RESULTADOS

Los resultados del ensayo de impacto se puede observar en la Tabla 5.19 y 5.20. En el ensayo se realizaron 6 probetas en cada una de las distintas orientaciones transversal y longitudinal

Tabla 5.9 Resultados Ensayo de Impacto V-NOTCH Longitudinal

Ensayo Charpy Longitudinal				
# Probeta	Energía almacenada (Kg m)	Energía almacenada (pie -lb)	Energía almacenada (Joule)	Resiliencia (J/mm²)
451VL	4.6	33.2718	45.11036	0.5638795
412VL	4.2	30.3786	41.18772	0.5148465
463VL	4.7	33.9951	46.09102	0.57613775
454VL	4.6	33.2718	45.11036	0.5638795
435VL	4.7	33.9951	46.09102	0.57613775
436VL	4.4	31.8252	43.14904	0.539363
PRIMEDIA	4.53333333	32.7896	44.4565867	0.555707333
Desviación Estándar	0.19663842	1.42228566	1.92835429	0.024104429

Fuente: David Díaz

$$3\sigma = 3 * 1.93 = 5.79 J$$

$$\sigma = 44.45 \pm 5.79 = (38.66 J - 50.24 J)$$

Tabla 5.10 Resultados Ensayo de Impacto V-NOTCH Transversal

Ensayo Charpy Transversal				
# Probeta	Energía almacenada (Kg m)	Energía almacenada (pie -lb)	Energía almacenada (Joule)	Resilencia (J/mm²)
391VT	4	28.932	39.226	0.49033
492VT	5	36.165	49.033	0.6129125
413VT	4.2	30.379	41.188	0.5148465
454VT	4.6	33.272	45.11	0.5638795
455VT	4.6	33.272	45.11	0.5638795
466VT	4.7	33.995	46.091	0.57613775
Promedio	4.51666667	32.669	44.293	0.55366429
Desviación Estándar	0.360092581	2.60455	3.53128	0.044141049

Fuente: David Díaz

$$3\sigma = 3 * 3.53 = 10.59 J$$

$$\sigma = 44.3 \pm 10.59 = (33.71 J - 54.89 J)$$

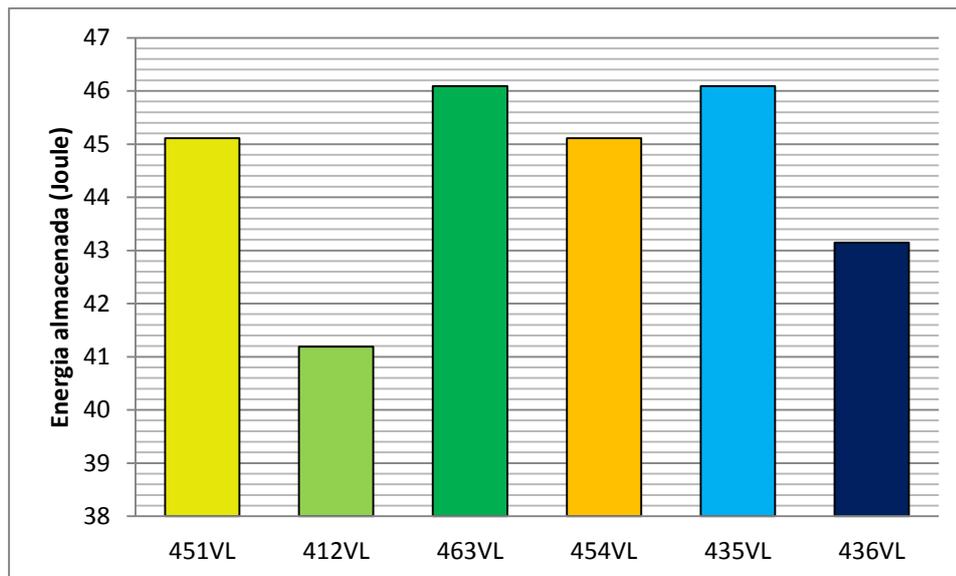


Figura 5.8 Resultados Ensayo de Impacto V-NOTCH Longitudinal
Fuente: David Díaz

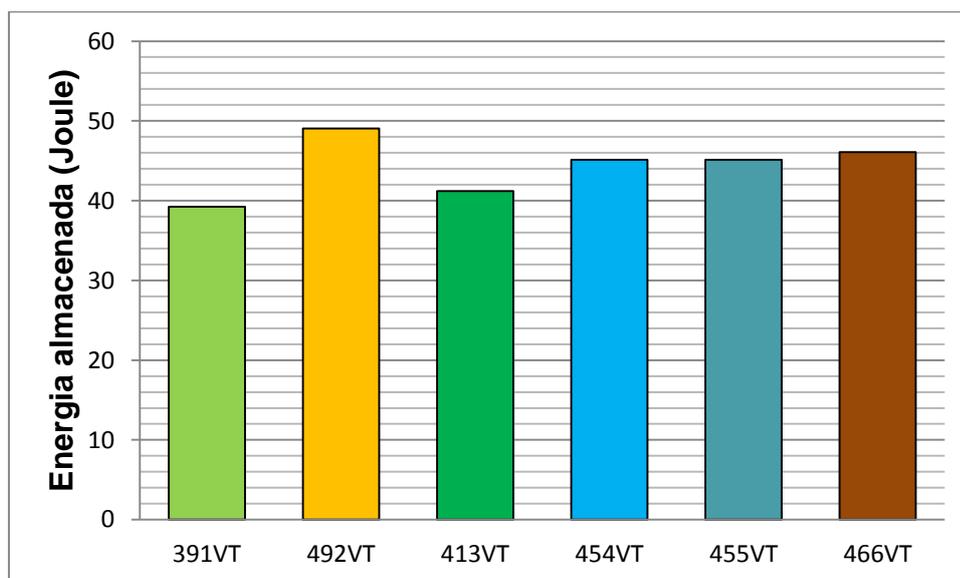


Figura 5.9 Resultados Ensayo de Impacto V-NOTCH Transversal
Fuente: David Díaz

5.2.5 PRUEBAS BALISTICAS

Con el objetivo de validar y clasificar la clase de blindaje que posee el material empleado en la carrocería del Panhard AML-90 se realizaron respectivas pruebas balísticas en el polígono de tiro de Santa Bárbara a 200 metros de distancia con una temperatura ambiente de 20 grado centígrados. Debido a la limitación del material y cantidad de munición limitada no se pudo proseguir a realizar la prueba balística fundamentándose en la sección 3.2. Requisitos balísticos de la norma MIL 12560 donde indica como requisito mínimo para que el material sea considerado como aceptable con su espesor especificado deberá tener al menos 4 impactos con penetraciones parciales. Así mismo las dimensiones del material de prueba que son especificado en la tabla IX de la norma MIL 12560 no se pudo cumplir a cabalidad con la especificación de las dimensiones de 12 x 36 plg debido a la limitación de material. Se dio acabo 4 dispararos con 3 distintos tipos de municiones cuyos resultados cada impacto balísticos fue realizado a 0 grados y el material de prueba fue empotrado en sus 4 lados para tener resultados más óptimos.

TABLE IX. Ballistic test plate sizes and corresponding test projectiles for first article and acceptance testing.

Nominal thickness range, inches	Minimum size ^{1/} 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 ^{2/}	---	---

Figura 5.10 Dimensiones de la plancha de acero blindado para pruebas balísticas

Fuente: David Díaz



Figura 5.11 Cañón para simular disparar municiones de calibre .50

Fuente: David Díaz

Los resultados de los impactos balísticos se muestran a continuación

Impacto balístico con munición perforante

Una munición perforante está hecha de un núcleo de acero endurecido, carburo de tungsteno o uranio empobrecido rodeado de un material más blando, tal como cobre o aluminio perfora una chapa de acero SAE 1040, 1045 o similar, con un espesor de 22 mm y de dureza Brinell 321-375,



Figura 5.12 Impacto de munición perforante calibre .50

Fuente: David Díaz



Figura 5.13 Impacto de munición perforante calibre .50

Fuente: David Díaz

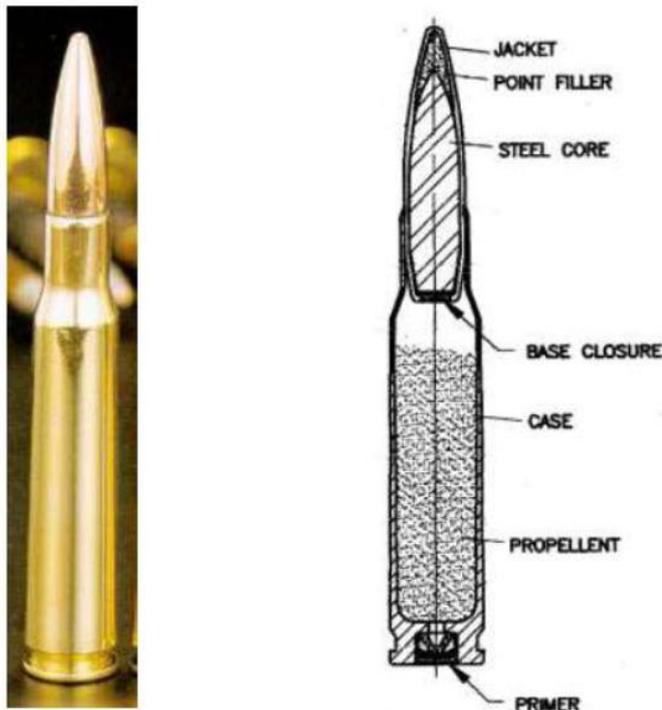


Figura 5.14 Munición perforante calibre .50

Fuente: MIL-C-3066C

Impacto balístico con munición incendiaria trazadora

Muchas balas perforantes llevan un componente incendiario o explosivo y también pueden contener un material indicador tal como fósforo o magnesio. Los indicadores se cargan cada 5 balas y muestran al artillero dónde van sus balas.

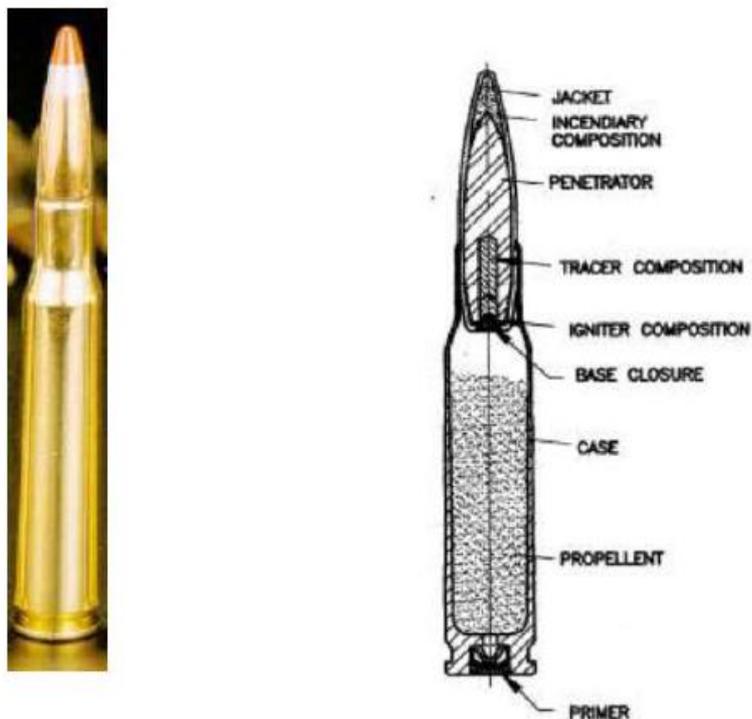


Figura 5.15 Impacto de munición incendiaria trazadora calibre .50

Fuente: (MIL-C-3066C, 2005)



Figura 5.16 Impacto de munición incendiaria trazadora calibre .50

Fuente: David Díaz



Figura 5.17 Vista lateral del trauma del Impacto munición incendiaria trazadora calibre .50

Fuente: David Díaz



Figura 5.18 Corte munición explosiva perforante calibre .50

Fuente: http://www.municion.org/12_7/FlbG.jpg

Impacto balístico con munición ordinaria núcleo de plomo

Las balas ordinarias están hechas de plomo rodeado por una pared delgada de cobre. Cuando se golpea un objeto sólido, se aplanan y pierden penetración.



Figura 5.19 Munición ordinaria núcleo de plomo calibre .50

Fuente: David Díaz



Figura 5.20 Munición ordinaria núcleo de plomo calibre .50

Fuente: David Díaz

En la siguiente tabla a continuación se muestra los resultados de los Impactos balísticos de las 4 municiones.

Tabla 5.11 Resultados de los impactos balísticos

	Impacto balístico con munición ordinaria núcleo de plomo		Impacto balístico con munición núcleo de plomo explosiva	Impacto balístico con munición perforante
Diámetro de Impacto	9.63	9.51	10.1	16.38
Perforación	No	No	Si	Si
Deformación	4.48	4.52	N/A	N/A

Fuente: David Díaz

CAPÍTULO 6

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y SOLUCION TECNOLÓGICA

6.1.INTRODUCCIÓN

Realizados los respectivos ensayos en los laboratorios de Metalurgia y Mecánica de Materiales, en este capítulo se procederá a analizar los resultados obtenidos y de acuerdo a las características se encontrara un acero equivalente en el mercado local para el reemplazo y modificaciones que se realicen en el vehículo PANHARD AML-90. A partir de una caracterización metalográfica se podrá cuantificar el tamaño de grano de

forma manual según lo que indica la norma ASTM E 112 por el método planimétrico. Por otro lado, el uso del microscopio electrónico permitirá observar con mayor detenimiento la estructura del grano en el material y con los resultados que se obtenga de composición química, identificar y comparar elementos de aleación que se encuentren con mayor representatividad en el material.

Por último una caracterización mecánica permitirá determinar de forma cuantitativa la resistencia que tienen el material al aplicar una carga axial de tal forma que sirva de complemento de los resultados anteriores con el fin de seleccionar de manera más sencilla el acero equivalente s para modificaciones futuras en el PANHARD AML-90.

6.2. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN METALOGRÁFICA

6.2.1 ESTRUCTURA MICROGRÁFICA

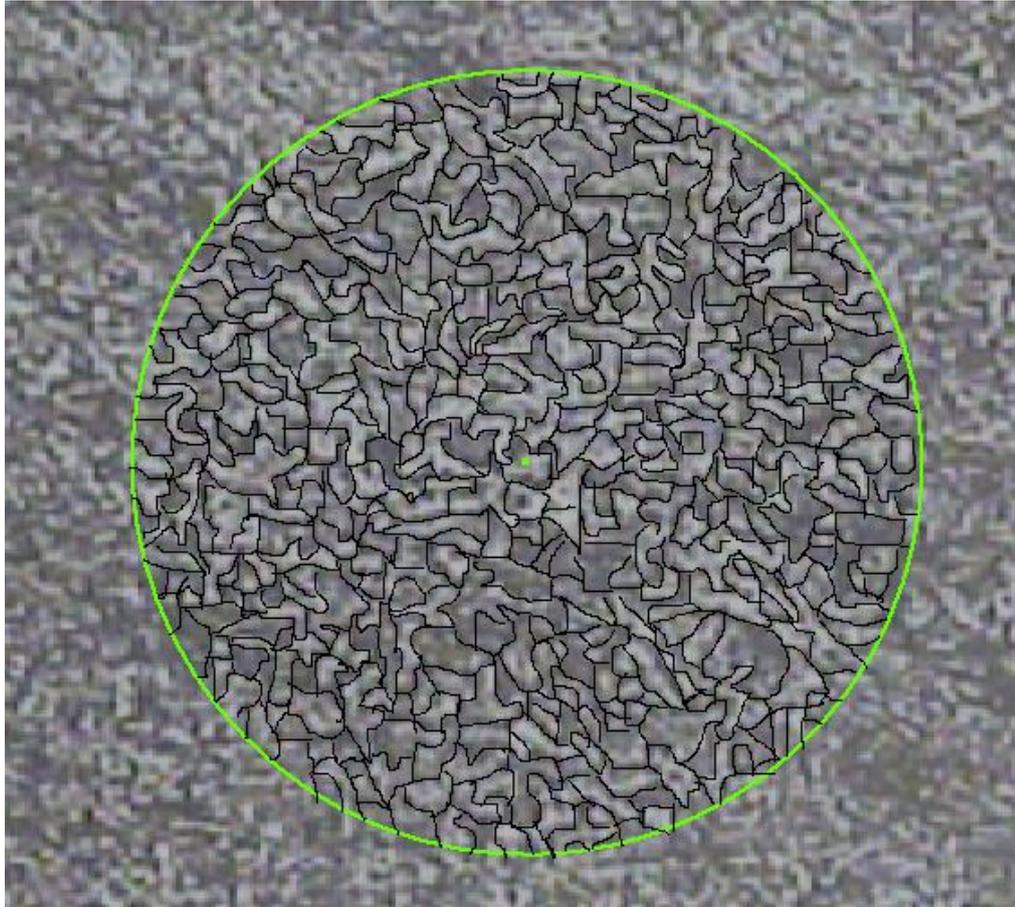


Figura 6.1 Micrografía del acero empleado en la carrocería del PANHARD AML-90 200X

Fuente: David Díaz

Aplicando el método planimétrico se trazo una circunferencia de área de 5000 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

$$N_A = f * \left(N_{\text{inside}} + \frac{N_{\text{Interceptal}}}{2} \right) \quad 7.1$$

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

Donde:

$N_A = 2616$ es el tamaño grano promedio de grano por mm^2

f = es el factor multiplicativo de Jeffrie 8

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

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

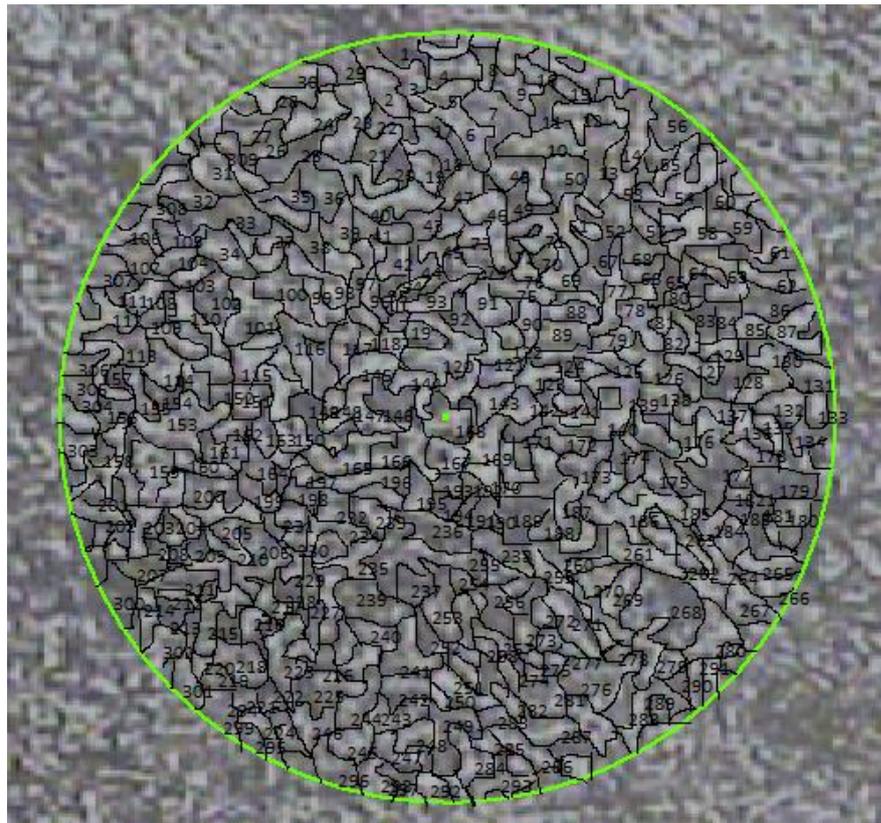


Figura 6.2 Micrografía del acero empleado en la carrocería del PANHARD AML-90 200X conteo de granos

Fuente: David Díaz

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 mm^2 (un círculo con un diámetro de 79.8-mm) ($f = 0.0002 M^2$)

Aumento Utilizado	Multiplicador Jeffries, f , para obtener granos/ 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 6.3 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.

$$d \text{ prom} = \frac{1}{(NA)^{\frac{1}{2}}} \quad 7.2$$

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

$$G = \frac{\text{Log } NA}{\text{Log } 2} - 2.95 = \frac{2616}{\text{Log } 2} - 2.95 = 8.4 \quad 7.3$$

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, μm	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 6.4 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.

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

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

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

Donde σ_0 : esfuerzo movimiento de dislocaciones

Ky: Coeficiente de fortalecimiento

$d^{\frac{1}{2}}$: Diámetro de grano

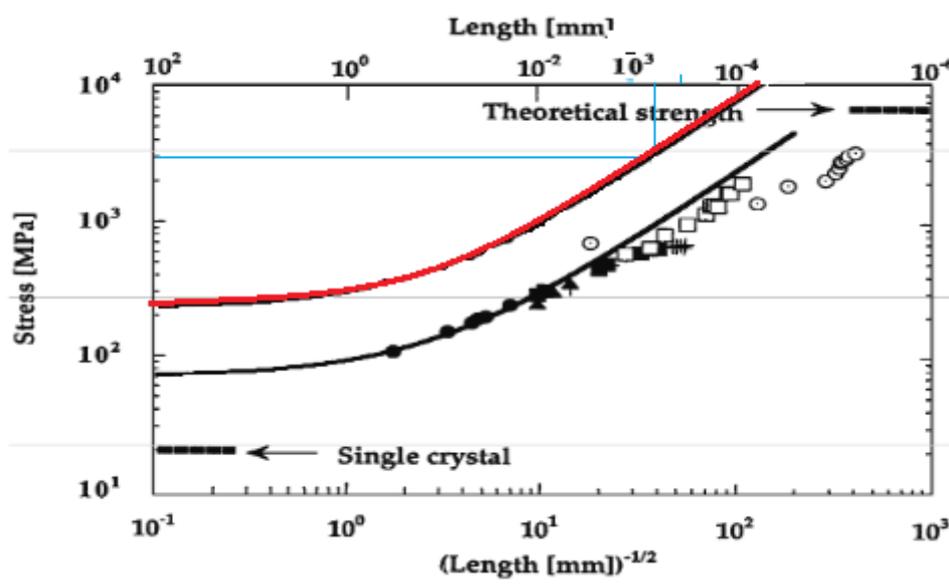


Figura 6.5 Esfuerzo vs diámetro de grano

Fuente: TR Smith

De manera especulativa se pueden determinar las constantes del material Ky y σ_0 de manera gráfica haciendo referencia a la figura 6.5 Esfuerzo vs diámetro de grano para aceros haciendo una extrapolación se pueden obtuvieron $Ky = 132.836 \text{ Mpa mm}^{\frac{1}{2}}$ 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 2.38×10^{-2} versus 1.955×10^{-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.

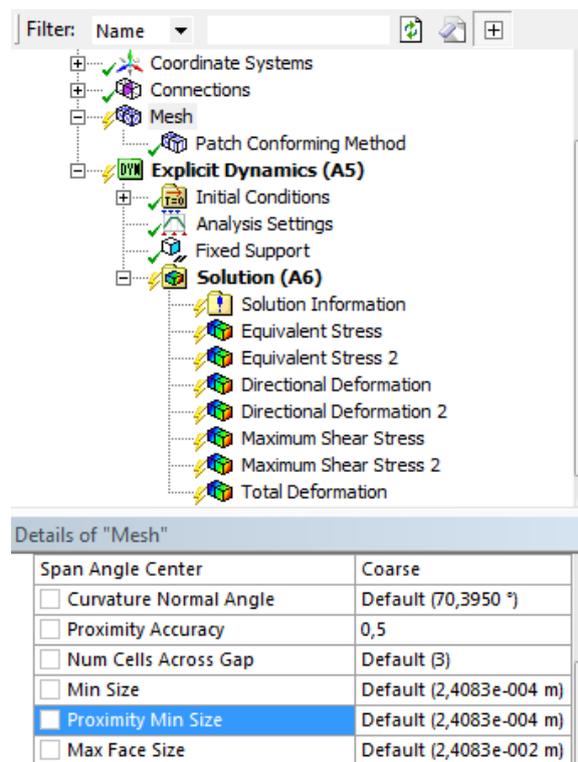


Figura 6.6 Tamaño de grano ANSYS

Fuente: David Díaz

6.2.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA

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

Tabla 6.1 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	-
Fosforo (P)	0,0115	0,02
Azufre (S)	0,0033	0,01
Cobre (Cu)	0,114	0,25
Cromo (Cr)	2,287	-
Niquel (Ni)	1,754	-
Molibdeno (Mo)	0,564	-
Aluminio (Al)	0,0066	0,1
Cobalto (Co)	0,0355	-
Titanio (Ti)	<0.001	0,1
Niobio (Nb)	<0.004	-
Vanadio (V)	0,11	-
Wolframio (W)	<0.010	-
Plomo (Pb)	<0.0030	-
Boro (B)	0,0015	0,003
Estaño (Sn)	0,0133	-
Cinc (Zn)	<0.002	-
Arsénico (As)	0,022	-
Bismuto (Bi)	<0.002	-
Calcio (Ca)	0,0012	-
Cerio (Ce)	<0.0030	-
Circonio (Zr)	<0.002	-
Lantano (La)	0,003	-
Hierro (Fe)	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% en peso con una resistencia de 75kg/mm^2 (735 MPa) con una dureza hasta 300 HB. Por su contenido de carbono pueden ser tratados térmicamente por templado y revenido mejorando así las propiedades mecánicas.

6.2.3 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA

Tabla 6.2 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 Última (Mpa)	Resistencia Última (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 ²)		
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 6.3 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

6.3 EQUIVALENCIA DEL ACERO DEL PANHARLD AML-90 CON LAS EXISTENTES EN EL PAÍS Y SOLUCION LOCAL

Una vez caracterizado el acero empleado en el PANHARD AML -90 se comparo con los aceros con características similares.

Tabla 6.4 Equivalencia del acero de la carrocería del PANHARD AML-90

Acero Panhard AML-90	AISI 4130 (Temp 315 C)	AISI 4340(T emp 425 C)	AISI 1141 Q&T 315 C	AISI 4320 SOQ T 300	AISI 4820 SOQT 450	AISI 415 0 OQ T 100 0	
Yield Strength(Mpa)	1265	1380	1360	1280	1230	1270	1250
Brinell Hardness	390	380	430	415	429	415	401
% elongación	16.7	11	10	9	13	13	11
Charpy Test (Joules)	4.53						

Fuente: David Díaz

Lamentablemente los aceros presentados no se encuentran en Ecuador o no se tiene una disponibilidad inmediata razón por la cual se busco un acero local que se encuentre disponible en la ciudad de Quito.

Figura 6.4 Aceros locales con características similares a las del Panhard AML-90.

Typical mechanical properties and carbon equivalent

Steel grade	Thickness	Yield strength $R_{p0,2}$ N/mm ²	Tensile strength R_m N/mm ²	Elongation A_5	Impact strength Charpy-V -40°C longitude	Hardness range HBW	CEV
400	5 – 12 mm	1000	1250	10	40 J	360–420	0,45
400	12 – 30 mm	1000	1250	10	30 J	380–450	0,45
400	30 – 60 mm	1100	1400	8	30 J	380–480	0,56
450	5 – 30 mm	1200	1450	8	25 J	425–475	0,50
450	30 – 60 mm	1200	1450	8	25 J	425–475	0,58
500	5 – 60 mm	1250	1600	8	25 J	450–530	0,64

Fuente: ACEROS BOHLER

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 6.5 Comparación Aceros locales con acero Panhard AML-90.

Resistencia a la Fluencia (Mpa)	PANHARD AML - 90	CHR ONIT 400	DIFERENCIA %	CHR ONIT 450	DIFERENCIA %	CHR ONIT 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 6.6 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 6.7 Matriz de decisión

Resistencia a la Fluencia(Mpa)	PONDERACION	CHRONIT 400	CHRONIT 450	CHRONIT 500
	35	35	35	35
Dureza (HB)	20	20	20	20
Charpy Impacto (Joule)	35	30	20	20
Elongación %	10	8	5	5
Total	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.

CAPÍTULO 7

SIMULACION DE IMPACTO BALISTICO

7.1 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 número de pruebas de tiro lo cual implica material de prueba, municiones, un tirador que esté capacitado para efectuar las pruebas balísticas y el empleo de 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.

7.2. 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.

Evaluado 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.

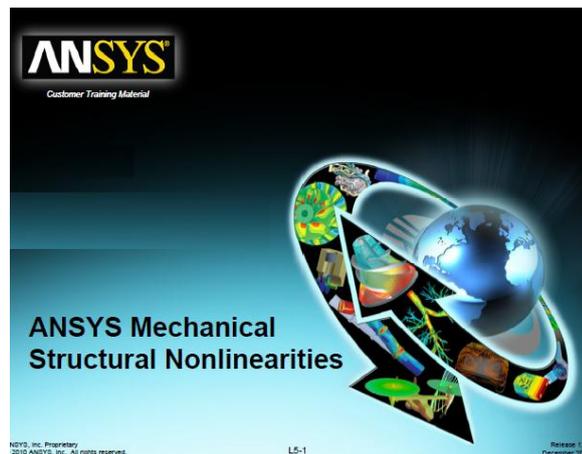


Figura 7.1 ANSYS Mechanical

Fuente: Ansys

7.3 MODELO MATEMATICO Y PARAMETROS APLICADOS EN LA SIMULACION BALISTICA

7.3.1 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

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

Fuente: David Díaz

Para la simulación balística se tomaron en cuenta como condiciones de frontera la velocidad de la bala de 890 m/s en eje z que es la velocidad óptima de impacto para un bala calibre .50, el empotramiento de la plancha de acero en sus cuatro lados que simula a como se efectúan los ensayos balísticos, las propiedades respectivas del núcleo de la bala y su ojiva y finalmente las propiedades mecánicas 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:

ε = Resistencia plástica efectiva

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

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

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

Th = Temperatura no dimensional normalizada

A = Esfuerzo de fluencia

B = Constante de endurecimiento

C = Razon constante de resistencia

n = Coeficiente de endirecimiento

m = Coeficiente de ablandamiento termico

Tabla 7.2 Parámetros Johnson –Cook para el acero balístico

Parámetros	Simbología	Unidades	
Densidad	δ	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

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	7986	kg m ⁻³		
3	Specific Heat	477	J kg ⁻¹ ...		
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 ⁻¹		
17	Parameter S1	1.49			
18	Parameter Quadratic S2	0	s m ⁻¹		

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 <u>1</u> / 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 <u>2</u> /	---	---

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\

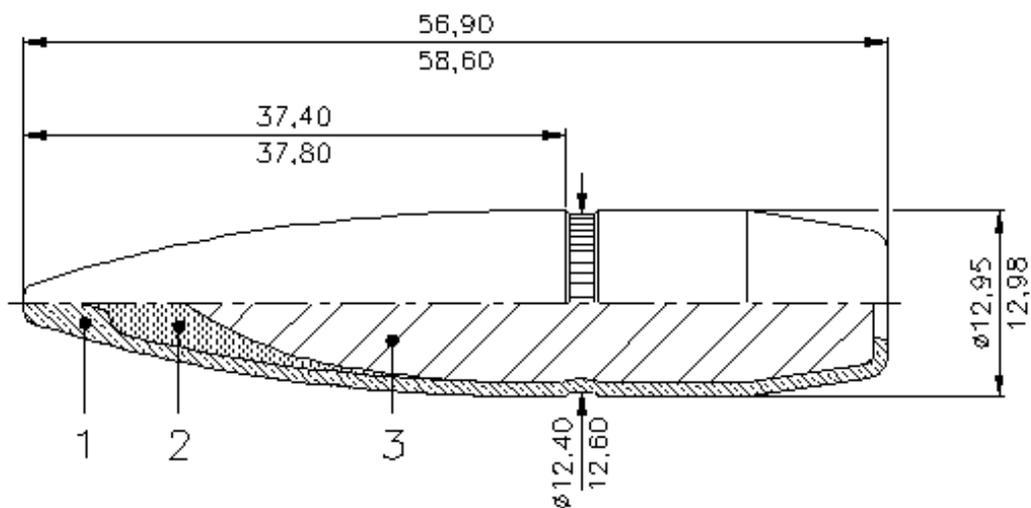


Figura 7.4 Dimensiones Munición calibre.50

Fuente: Compañía Brasileira de cartuchos CBC

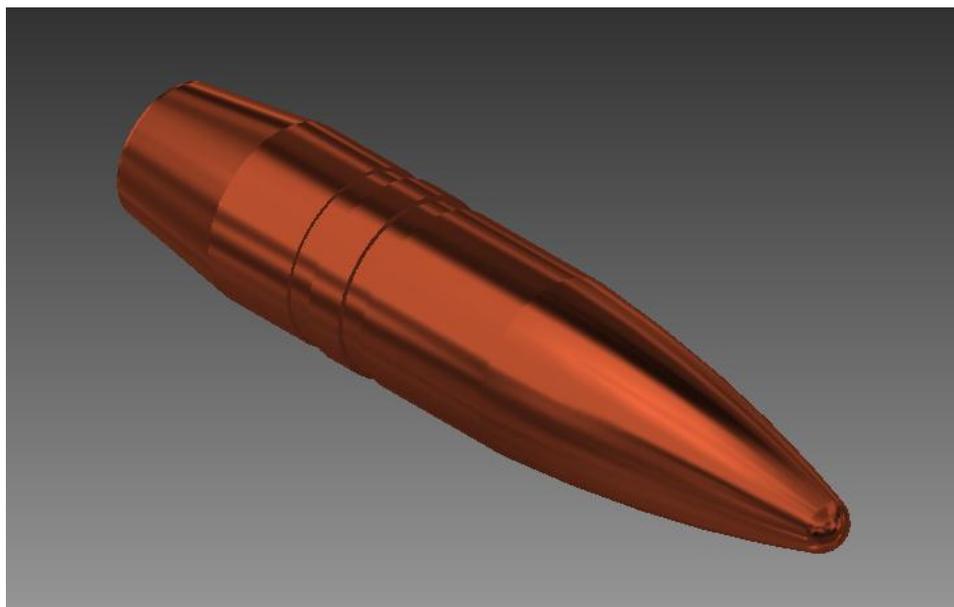


Figura 7.5 Calibre.50 Isometría Autodesk Inventor

Fuente: David Díaz

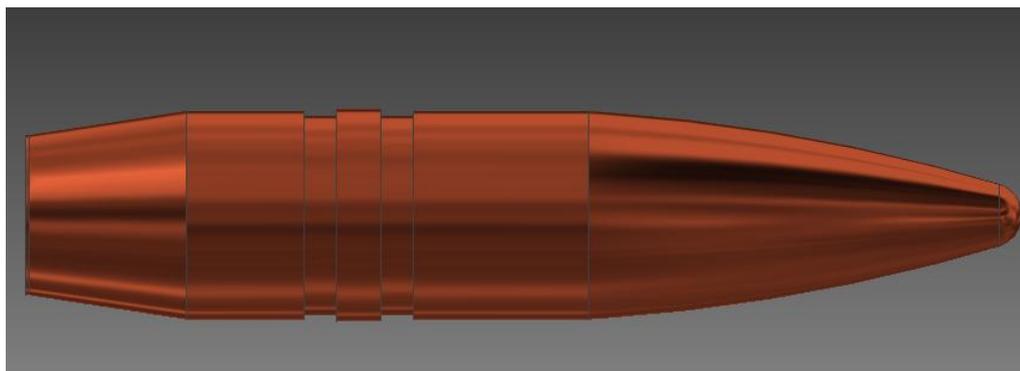


Figura 7.6 Calibre.50 Vista Lateral Autodesk Inventor

Fuente: David Díaz

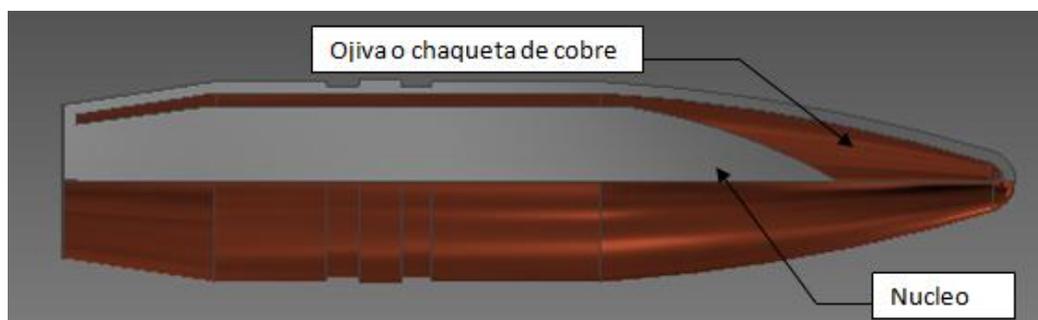


Figura 7.7 Calibre.50 Vista Lateral Corte Autodesk Inventor

Fuente: David Díaz

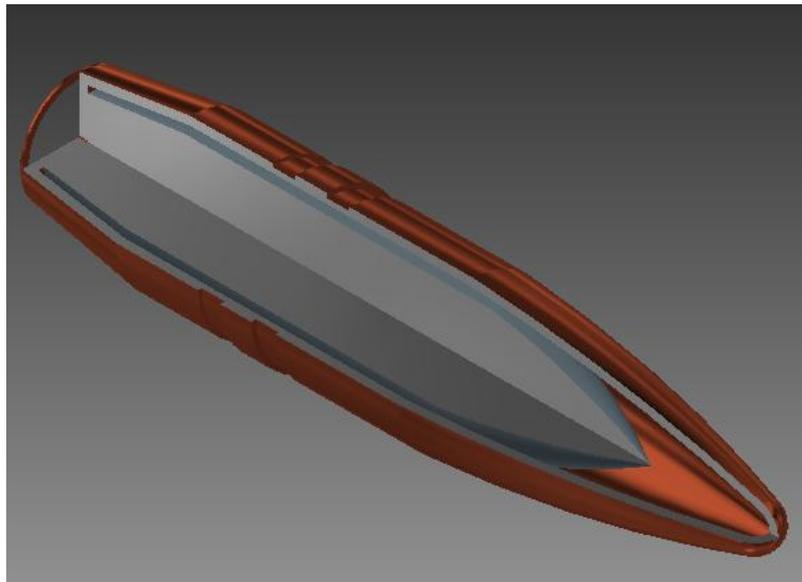


Figura 7.8 Calibre.50 Vista Isométrica Corte Autodesk Inventor

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 característicos de cada material.

Figura 7.9 Propiedades mecánicas y de impacto del cobre

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

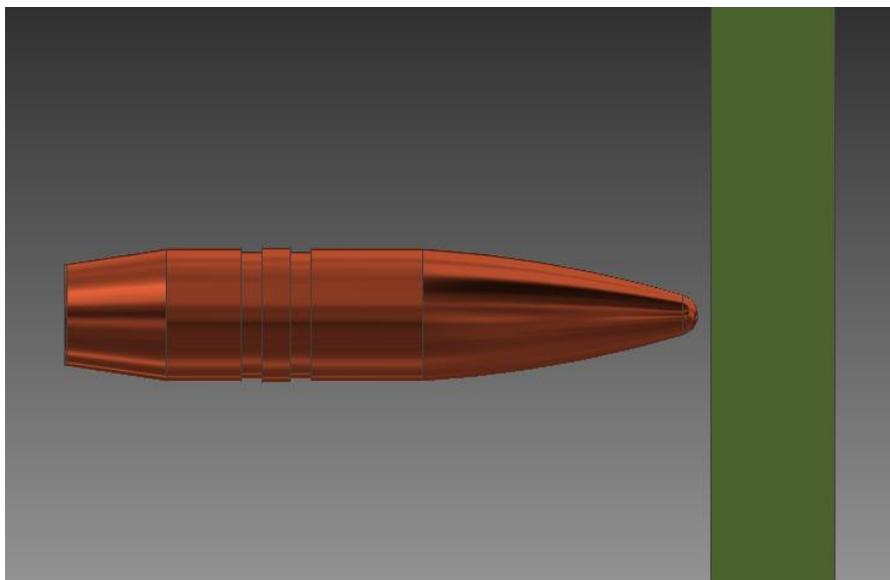
Fuente: David Díaz

Figura 7.10 Propiedades mecánicas y de impacto del núcleo de plomo

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

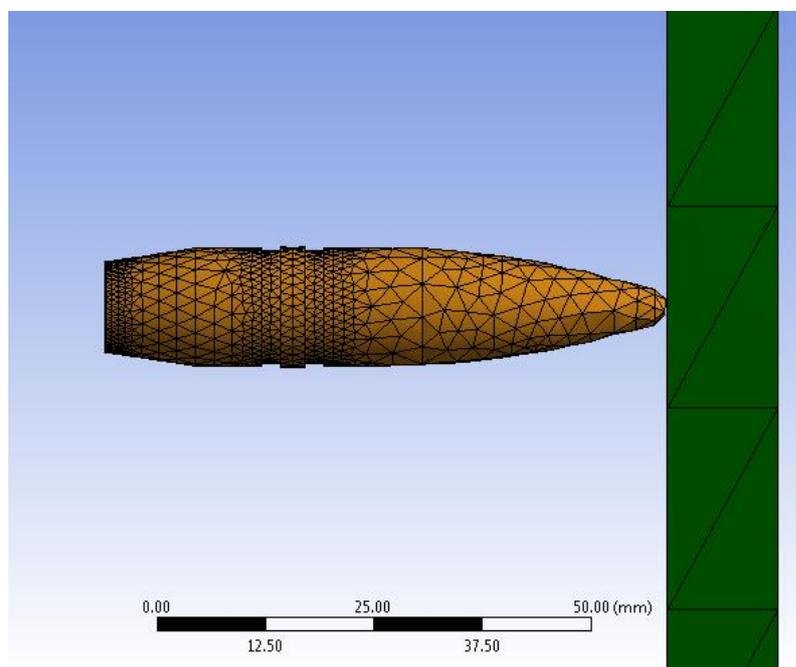
Fuente: David Díaz

Una vez ingresadas las condiciones de frontera se importó 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 ensamble 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.

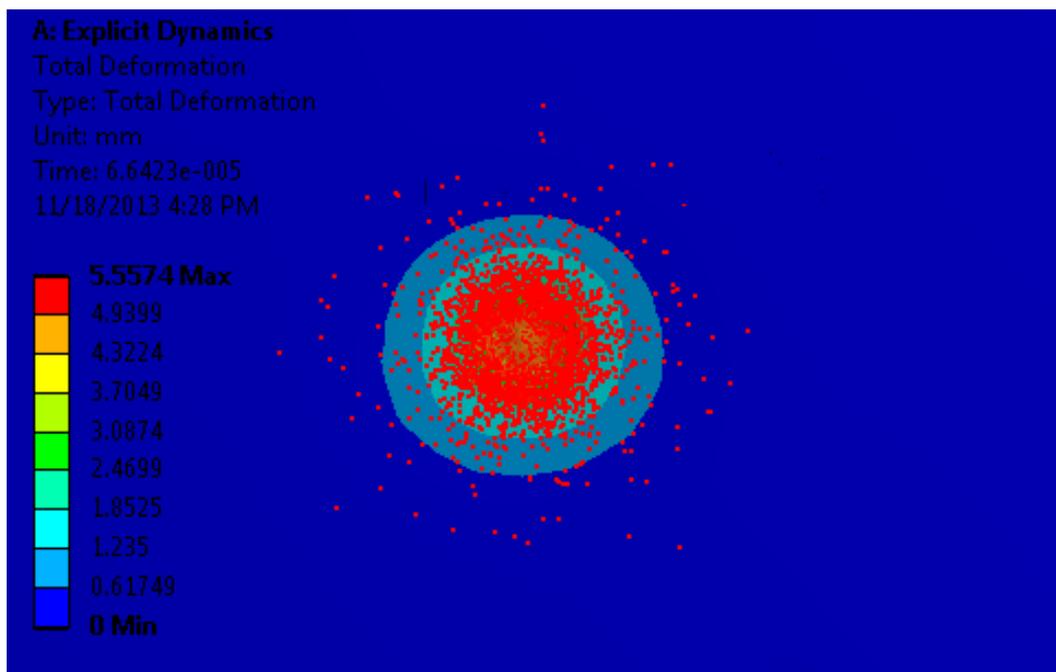


Figura 7.14 Vista Frontal de la Deformación Total Acero Balístico

Fuente: David Díaz

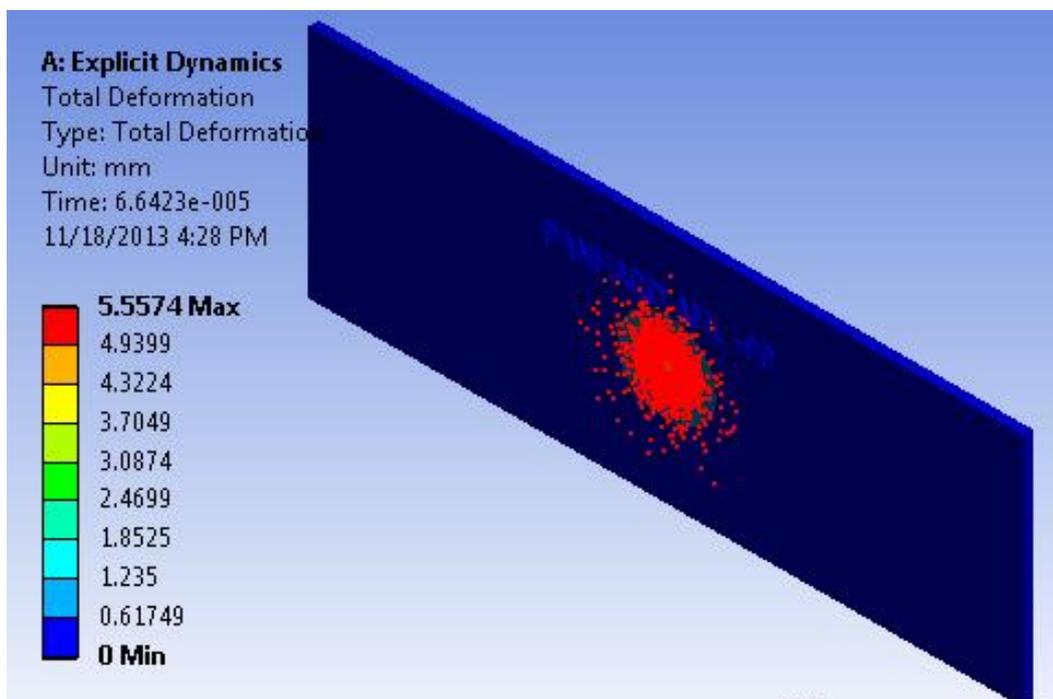


Figura7.15 Vista Isométrica de la Deformación Total Acero Balístico

Fuente: David Díaz

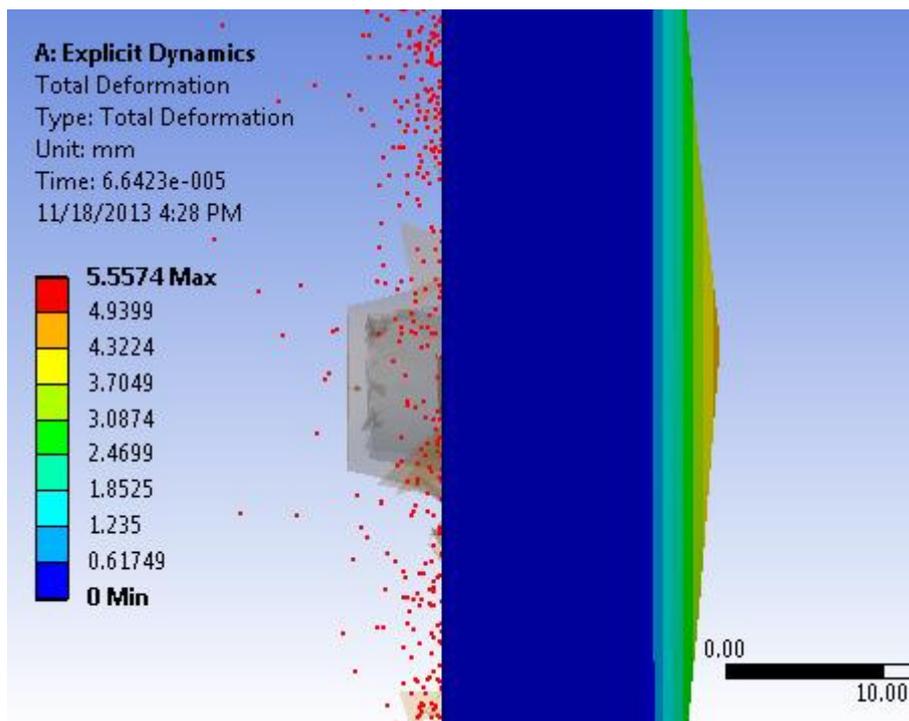


Figura 7.16 Vista Lateral de la Deformación Total Acero Balístico

Fuente: David Díaz

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

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

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

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

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

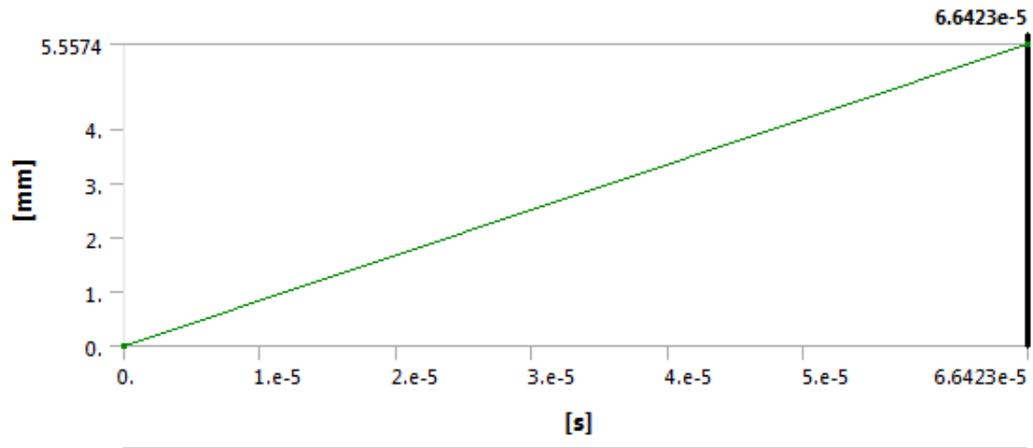


Figura 7.17 Grafica de Resultados de la Deformación Total Acero Balístico

Fuente: David Díaz

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 6.64e-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.

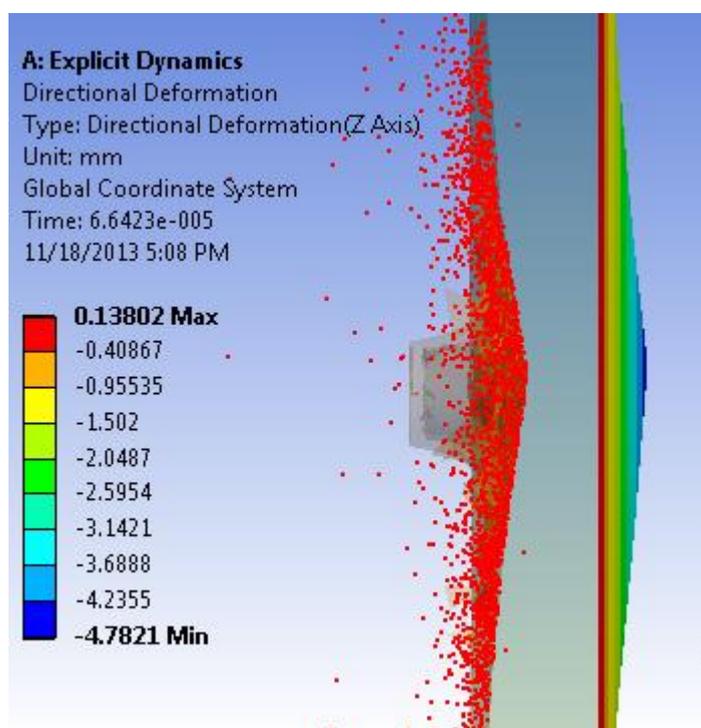


Figura 7.18 Vista Lateral de la Deformación Direccional Acero Balístico

Fuente: David Díaz

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

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

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

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

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

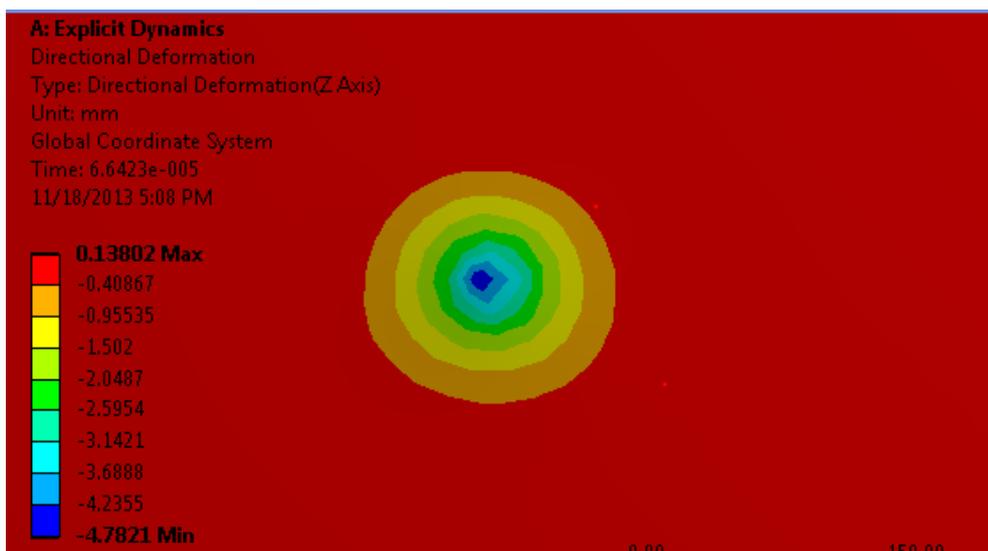


Figura 7.19 Vista Frontal de la Deformación Direccional Acero Balístico
Fuente: David Díaz

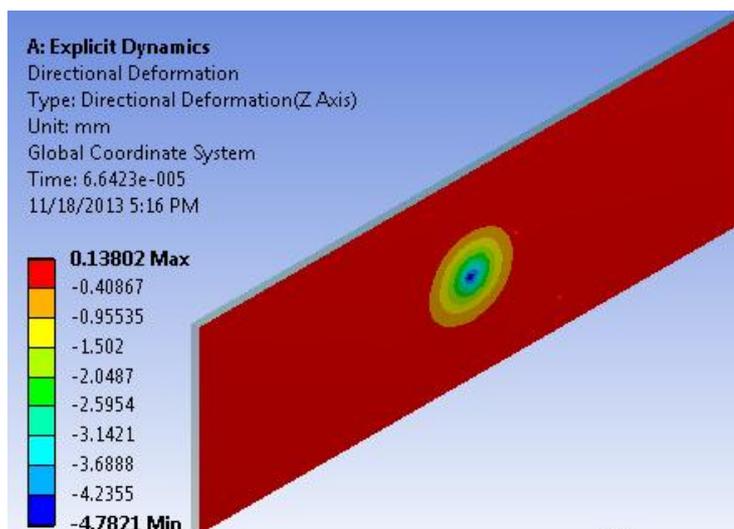


Figura 7.15 Vista Isométrica de la Deformación Direccional Acero Balístico

Fuente: David Díaz

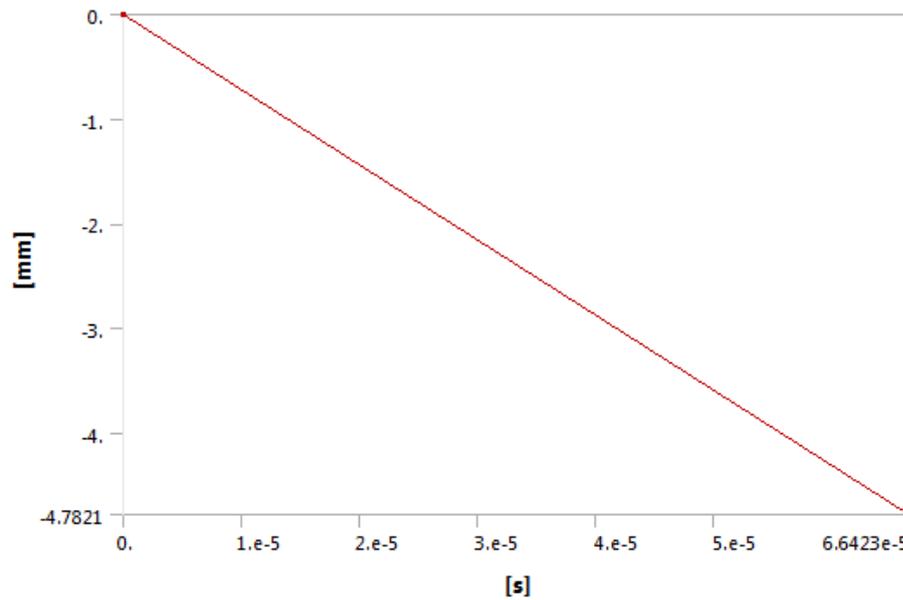


Figura 7.20 Grafica de Resultados de la Deformación Direccional Acero Balístico

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 6.64×10^{-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 recibe el impacto de la bala y para la cara paralela trasera de la plancha de acero con la finalidad de comparar los resultados.

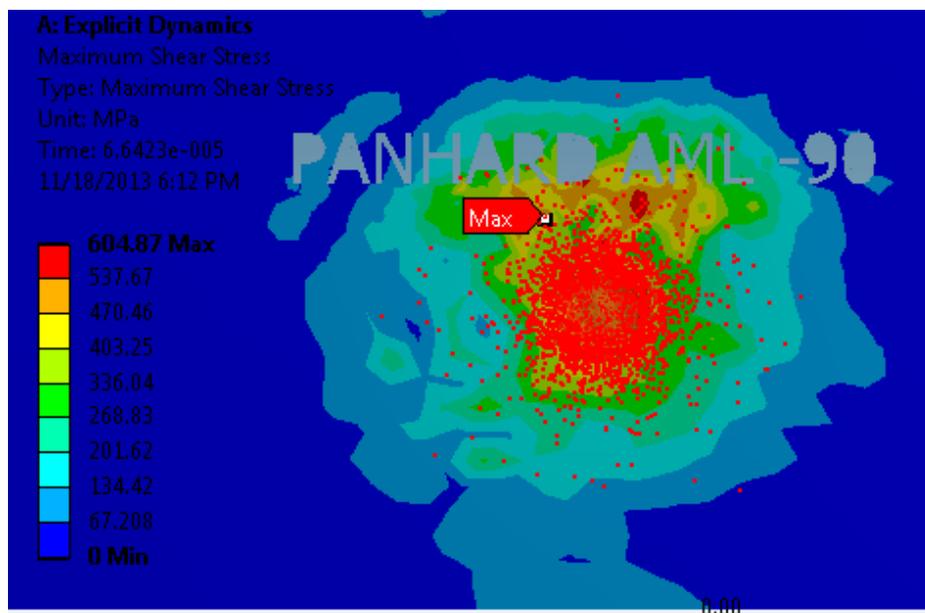


Figura 7.21 Vista Frontal Esfuerzo Cortante Máximo aplicado en la cara frontal del Acero Balístico

Fuente: David Díaz

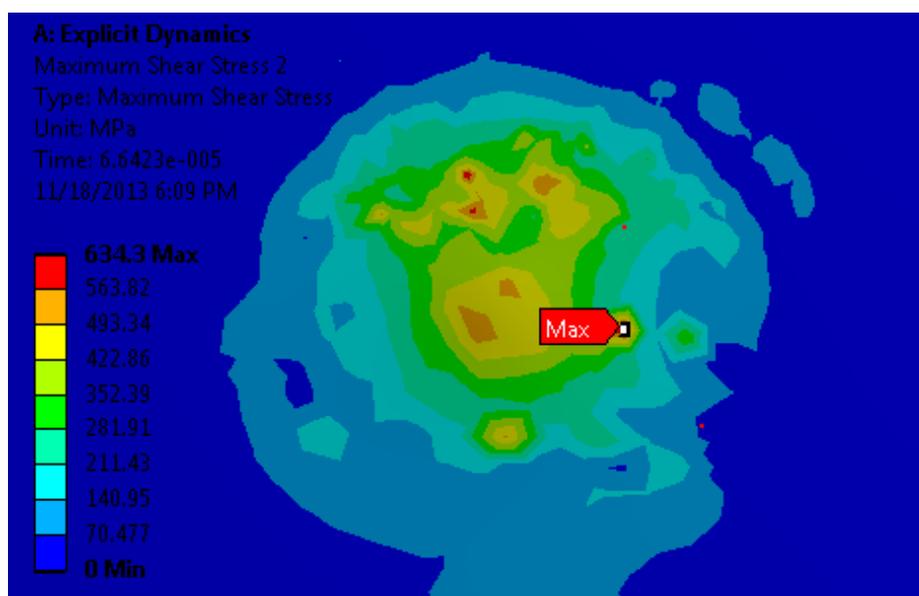


Figura 7.22 Vista Frontal Esfuerzo Cortante Máximo aplicado en la cara trasera del Acero Balístico

Fuente: David Díaz

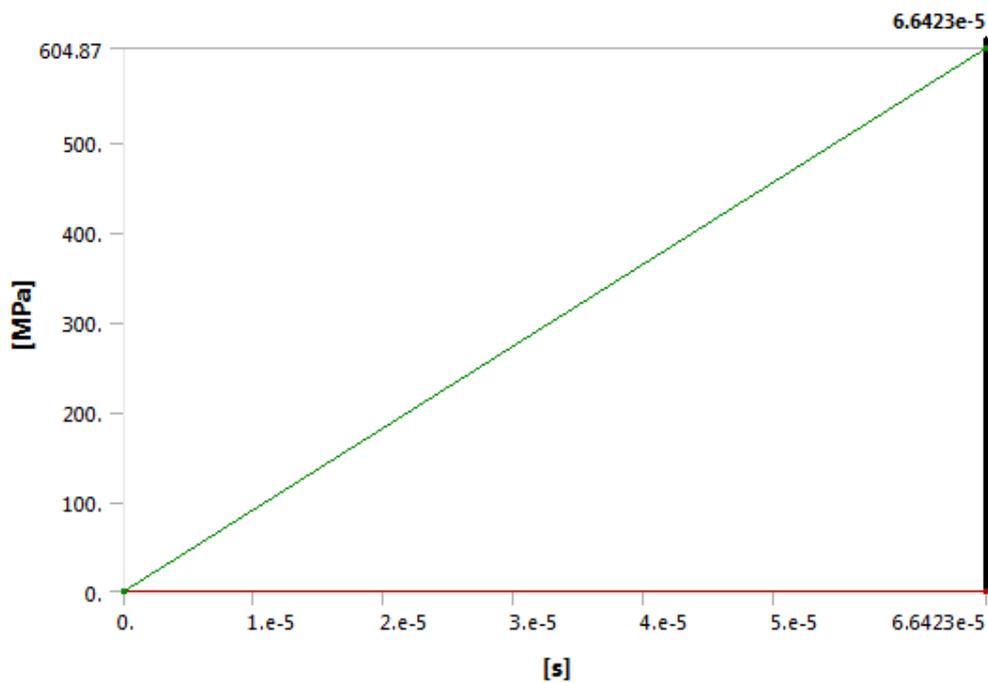


Figura 7.23 Grafica de Resultados Esfuerzo Cortante Máximo Acero Balístico en la cara frontal

Fuente: David Díaz

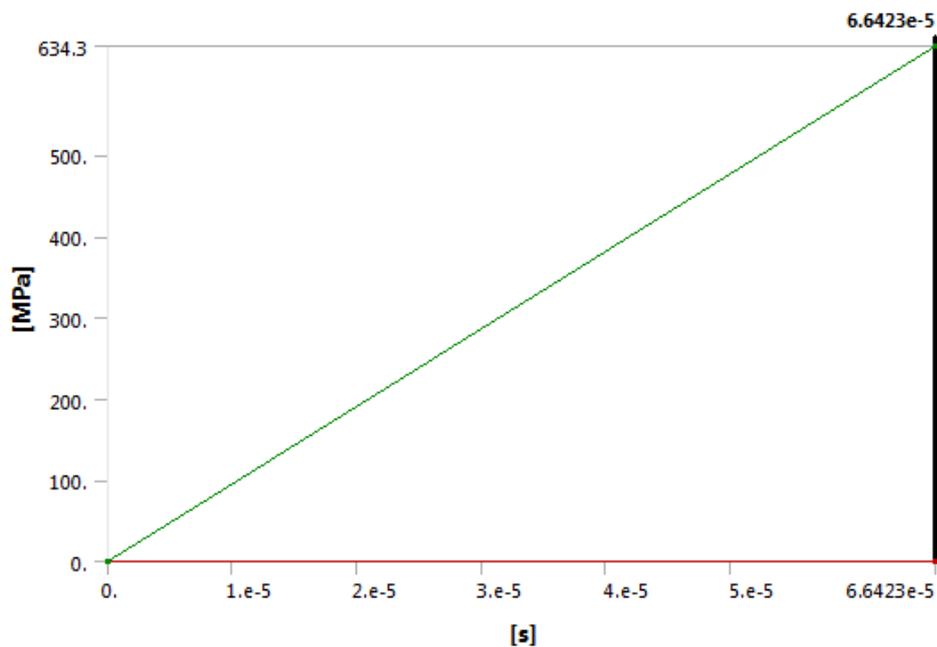


Figura 7.24 Grafica de Resultados Esfuerzo Cortante Máximo Acero Balístico en la cara trasera

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

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

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

Cara trasera

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

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

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.

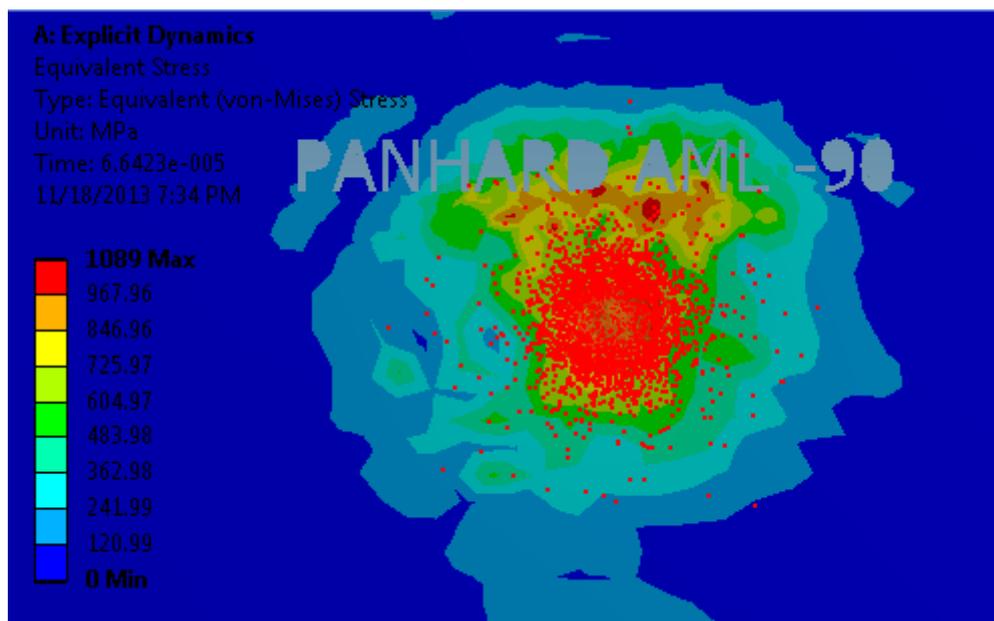


Figura 7.25 Vista Frontal Esfuerzo Equivalente Von -Mises Acero Balístico Cara Frontal

Fuente: David Díaz

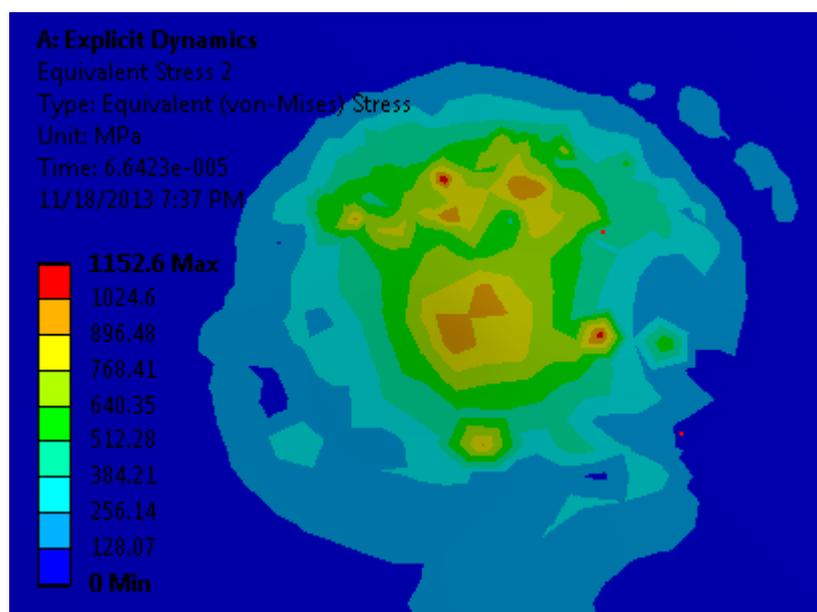


Figura 7.26 Vista Trasera Esfuerzo Equivalente Von -Mises Acero Balístico Cara Trasera

Fuente: David Díaz

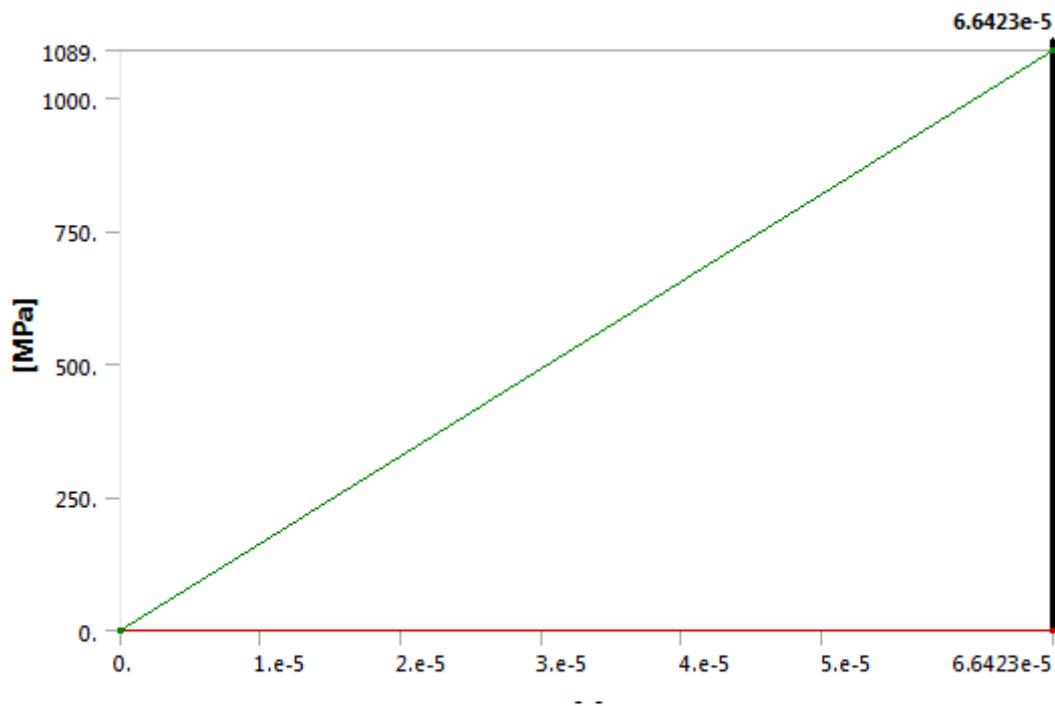


Figura 7.27 Grafica de Resultados Esfuerzo Equivalente Von -Mises Acero Balístico Cara Frontal

Fuente: David Díaz

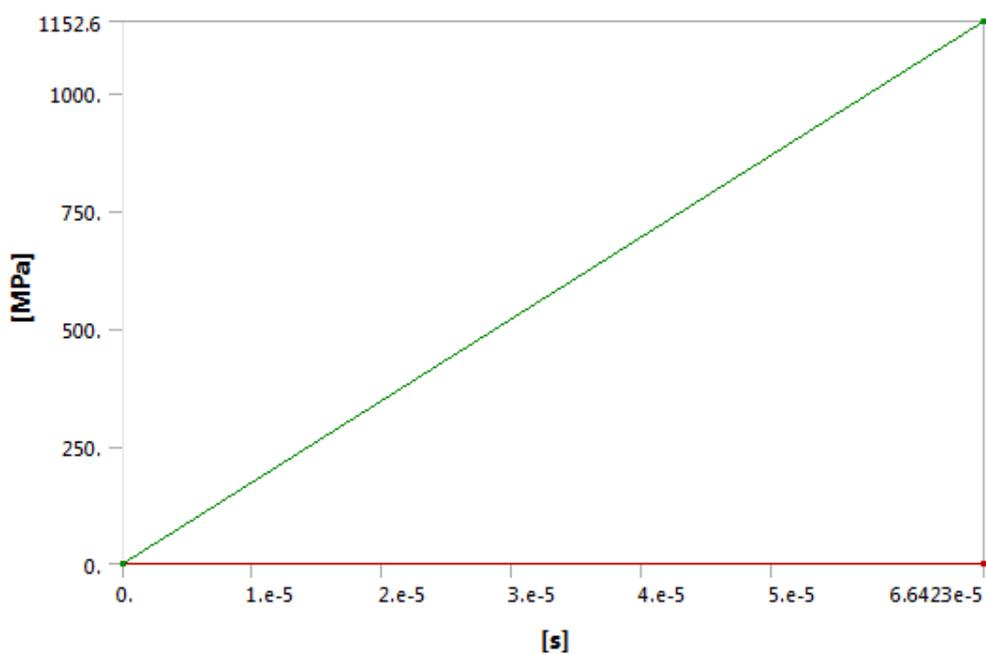


Figura 7.28 Grafica de Resultados Esfuerzo Equivalente Von -Mises Acero Balístico Cara Trasera

Fuente: David Díaz

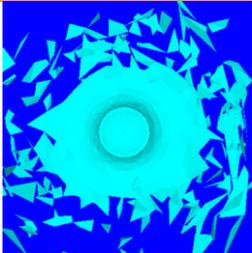
7.4.4.1 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

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 7.3 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 %
					
Perforación	No	No	-	No	-
Deformación Direccional	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.

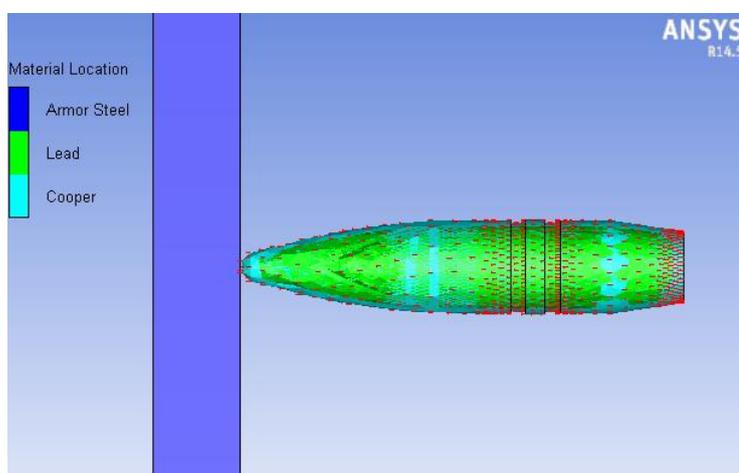


Figura 7.29 Simulación de impacto balístico munición con núcleo de plomo calibre .50

Fuente: David Díaz

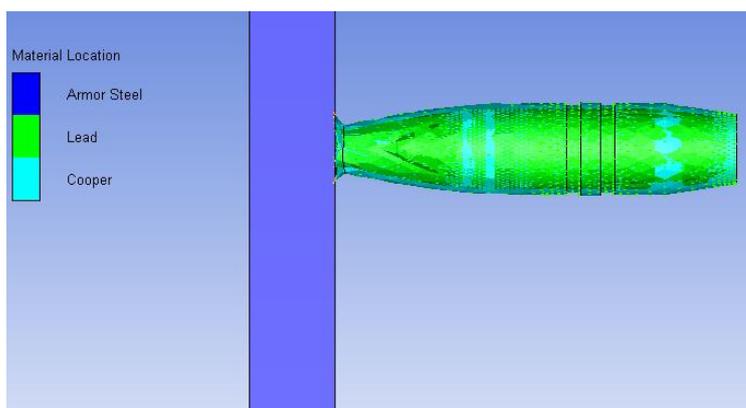


Figura 7.30 Simulación de impacto balístico munición con núcleo de plomo calibre .50

Fuente: David Díaz

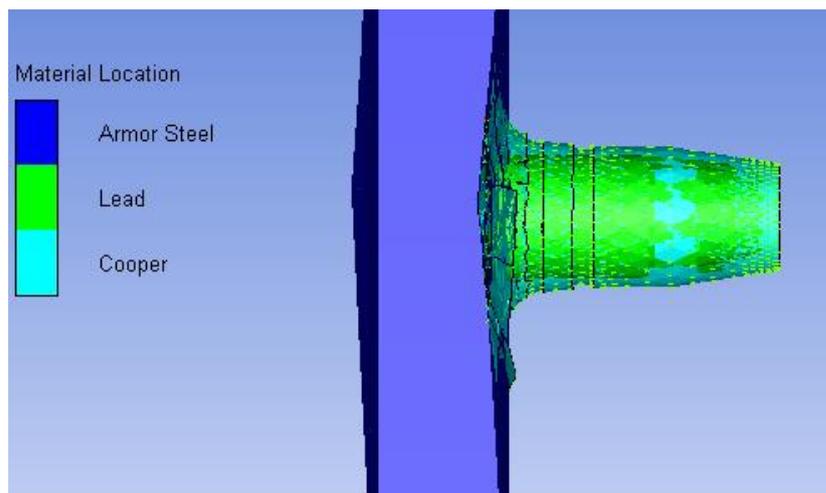


Figura 7.31 Simulación de impacto balístico munición con núcleo de plomo calibre .50

Fuente: David Díaz

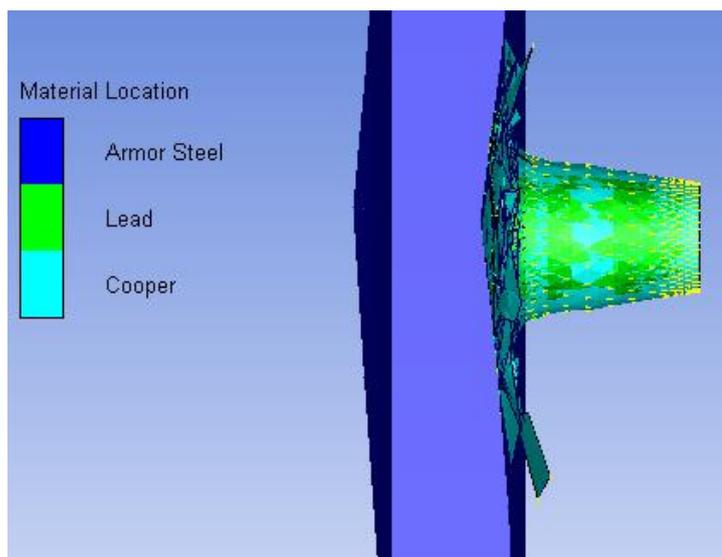


Figura 7.32 Simulación de impacto balístico munición con núcleo de plomo calibre .50

Fuente: David Díaz

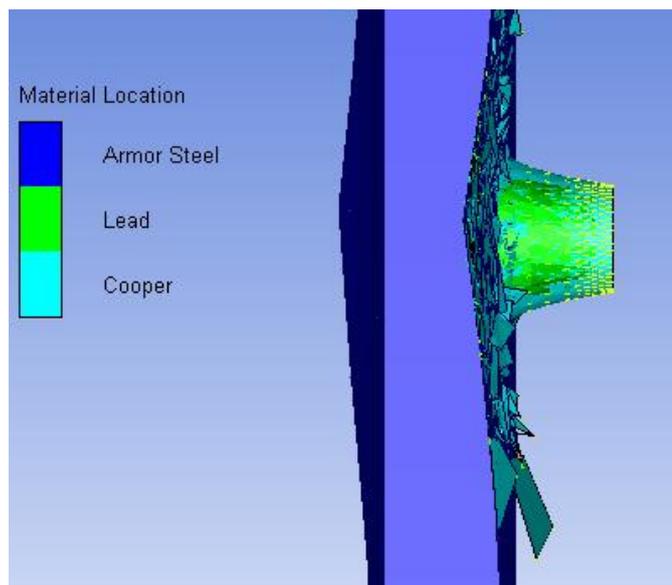


Figura 7.33 Simulación de impacto balístico munición con núcleo de plomo calibre .50

Fuente: David Díaz

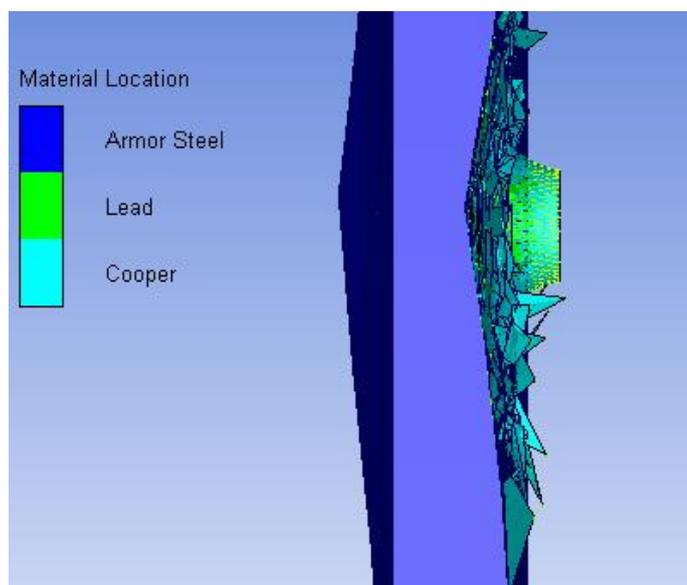


Figura 7.34 Simulación de impacto balístico munición con núcleo de plomo calibre .50

Fuente: David Díaz

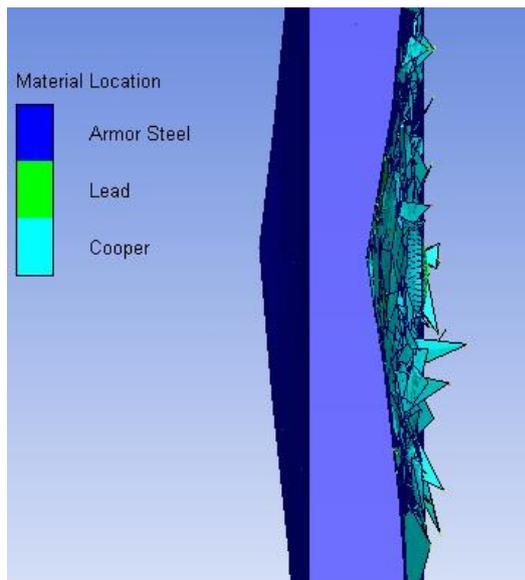


Figura 7.35 Simulación de impacto balístico munición con núcleo de plomo calibre .50

Fuente: David Díaz

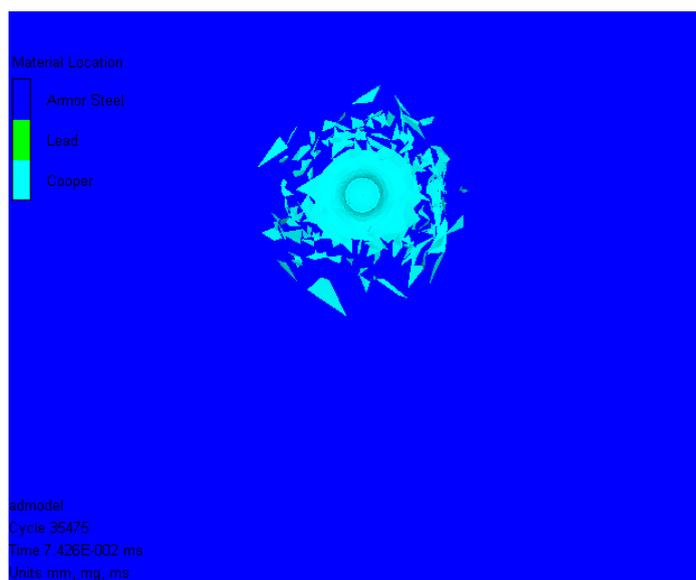


Figura 7.36 Simulación de impacto balístico vista frontal munición con núcleo de plomo calibre .50

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.

Contorno grafico de la presión ejercida al impacto balístico

Por medio de esta interfaz se puede medir la presión ejercida entre la bala y la plancha de acero balístico. En las siguientes figuras se podrá apreciar el distinto comportamiento del material a distintos ciclos.

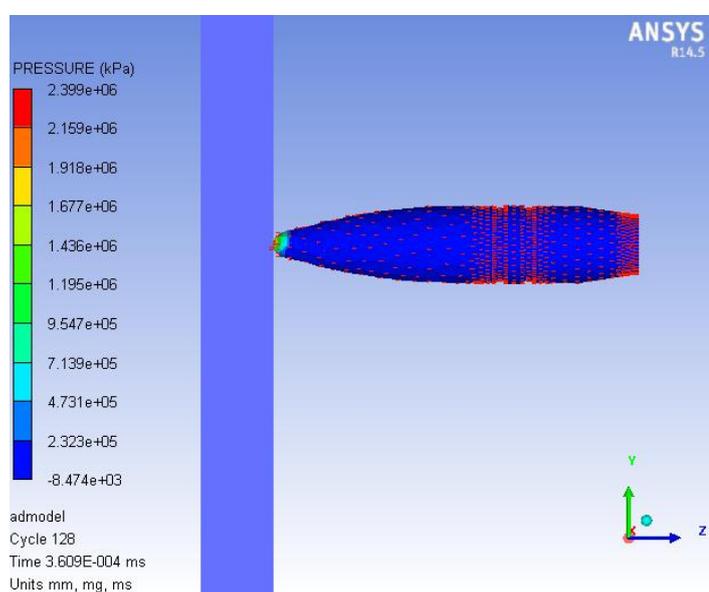


Figura 7.37 Contour Plot Presión entre la munición y la placa de acero blindado

Fuente: David Díaz

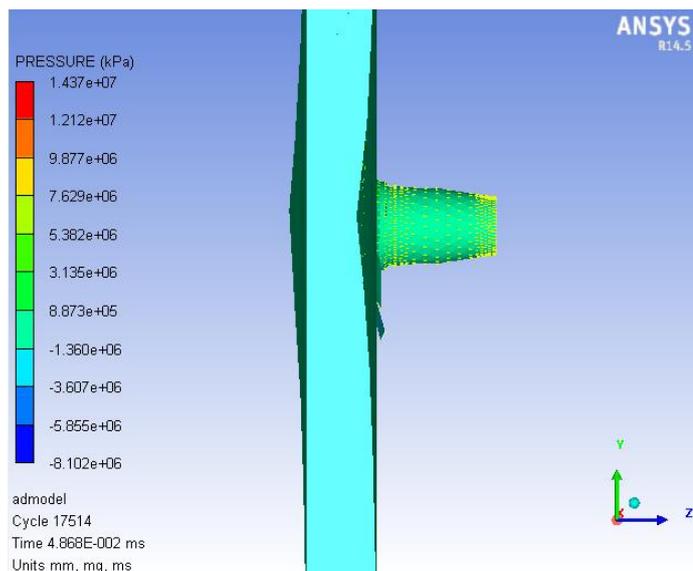


Figura 7.38 Contour Plot Presión entre la munición y la placa de acero blindado

Fuente: David Díaz

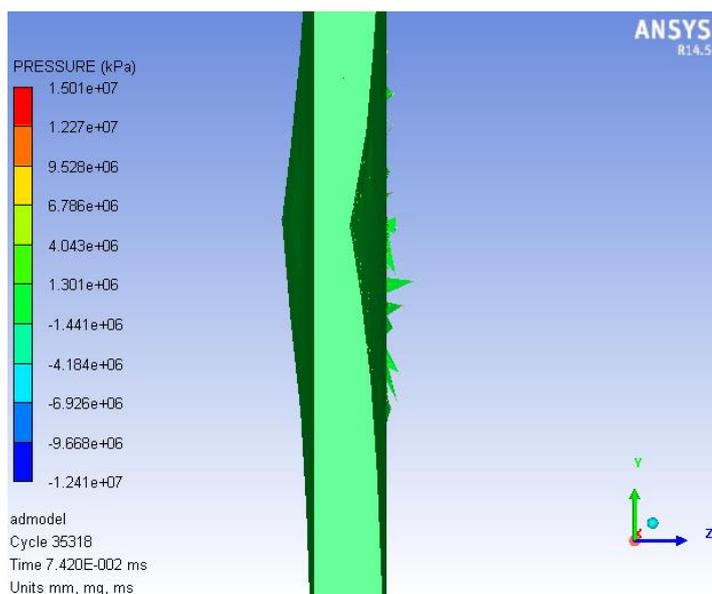


Figura 7.39 Contour Plot Presion entre la munición y la placa de acero blindado

Fuente: David Díaz

Esta interfaz nos muestra al final de la simulación balística una presión máxima entre los materiales correspondiente a $4.043 \text{ e}6 \text{ Kpa}$.

Contorno grafico de la presión ejercida al impacto balístico

A través de esta interfaz se puede medir la resistencia que ponen los distintos elementos al ser sometidos al impacto balístico.

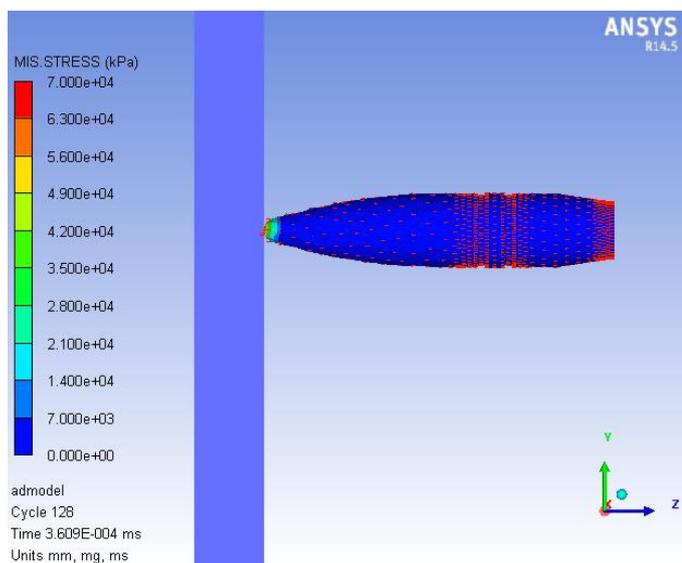


Figura 7.40 Contour Plot Miss Stress entre la munición y la placa de acero blindado

Fuente: David Díaz

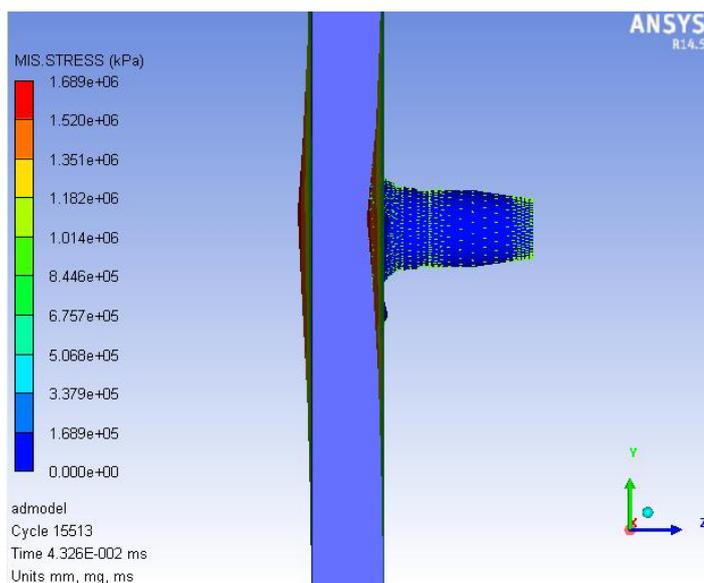


Figura 7.41 Contour Plot Miss Stress entre la munición y la placa de acero blindado

Fuente: David Díaz

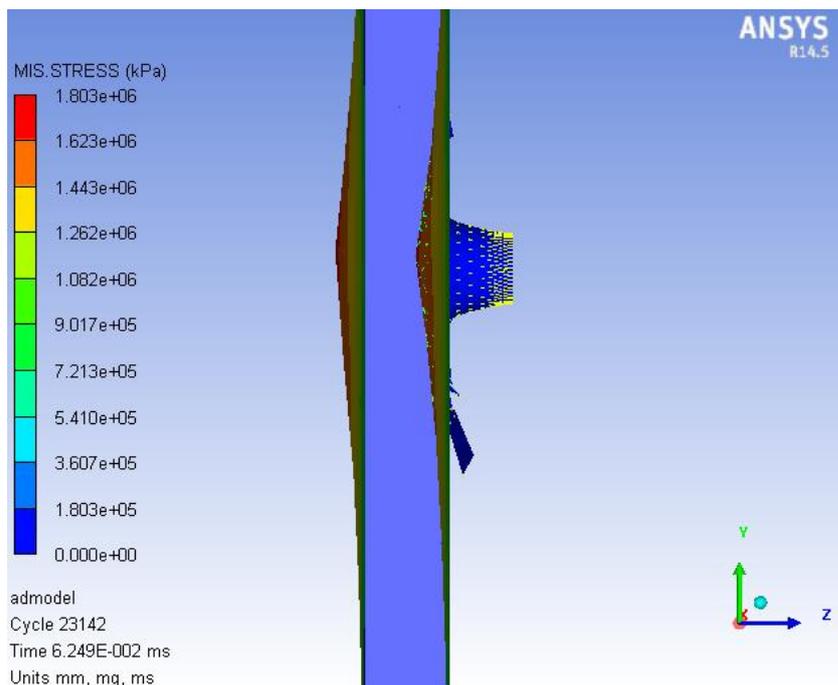


Figura 7.42 Contour Plot Miss Stress entre la munición y la placa de acero blindado

Fuente: David Díaz

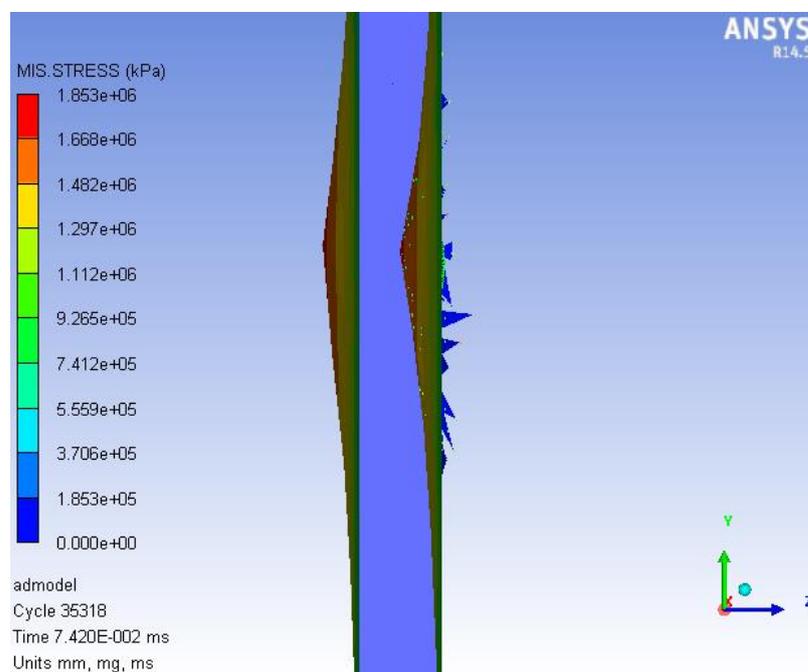


Figura 7.43 Contour Plot Miss Stress entre la munición y la placa de acero blindado

Fuente: David Díaz

CAPÍTULO 8

ANÁLISIS ECONÓMICO

8.1. COSTOS

8.1.1. COSTOS DIRECTOS

Tabla 8.1 Costos directos de materiales

Descripción	Unidad	Valor Total
Acero balístico	u	0,00
Corte por chorro de agua	u	350
Maquinado y tolerancias finales	u	50
Corte por plasma	u	20
Total materiales		420

Fuente: David Díaz

Tabla 8.2 Costos directos de probetas

PROBETAS				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unit.	Valor Total
E. Tracción	u	15	13,44	201.6
E. Charpy	u	6	8.5	51
E. Dureza	u	6	5	30
Total probetas				282.6

Fuente: David Díaz

Tabla 8.3 Costos directos ensayos de laboratorio

ENSAYOS DE LABORATORIO				
Descripción	Unidad	Cantida	Precio	Valor
		d	Unit.	Total
Espectrometría de chispa	u	6	44,80	268,80
Total ensayos				268,80

Fuente: David Díaz

Tabla 8.4 Total costos directos

COSTOS DIRECTOS	
Descripción	Valor
Materiales	420
Probetas	282.6
Ensayos de laboratorio	268,80
Total Costos Directos	971.4

Fuente: David Díaz

8.1.2. COSTOS INDIRECTOS

Tabla 8.5 Costos indirectos

COSTOS INDIRECTOS	
Útiles de oficina	50
Combustible	60
Transporte traslado plancha de acero blindado	30
Normas	40
Suministros varios	60
Total Costos Indirectos	240

Fuente: David Díaz

8.1.3. COSTO TOTAL

Tabla 8.6 Costos totales

COSTO TOTAL	
Costos Directos	971.4
Costos Indirectos	240
Subtotal	1211,4
Imprevistos	50
Total	1261.4

Fuente: David Díaz

CAPÍTULO 9

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1. 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 dos de las probetas del ensayo de tracción se descubrió que 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 a si 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.En el caso de usar alguna variante de esta munición como trazadora o perforante existirá penetración por parte de la munición.

9.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar los cortes de las modificaciones 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 en cuenta que la carrocería del PANTHARD AML-90 solo resistirá municiones ordinarias.

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://tecnologiasselectividad.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

Sangolquí, 2013 – 04 – 18

LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO

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

ELABORADO POR:

Sr. David Ricardo Díaz Hernández

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Ing. Ángelo Villavicencio

DIRECTOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA