



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Máster

DISEÑO Y ANÁLISIS DE LOS TANQUES M₁A₂ ABRAMS Y
PANZER V PANTERA ANTE EL IMPACTO DE UN PROYECTIL

DESIGN AND ANALYSIS OF THE M₁A₂ ABRAMS AND PANZER
V PANTHER TANKS UNDER PROJECTILE IMPACT

Autor

Rubén José Fernández Blanc

Director

Luis Castejón Herrero

Máster de Ingeniería Industrial

Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza
Diciembre 2025

RESUMEN

El presente Trabajo Fin de Máster aborda el estudio del carro de combate desde un enfoque histórico, tecnológico y de ingeniería, centrado en el análisis en dos modelos representativos de distintas épocas: el Panzer V Panther alemán y el M1A2 Abrams estadounidense.

El objetivo principal es comprender la evolución del diseño de blindaje a lo largo del tiempo, así como evaluar su comportamiento frente a impactos balísticos mediante herramientas de simulación numérica.

En la primera fase, se realiza una revisión teórica sobre definición, clasificación y componentes principales de los carros de combate, analizando la evolución de los materiales empleados y las estrategias de protección utilizadas.

Posteriormente se desarrolla el modelado tridimensional de ambos tanques en SolidWorks, con el fin de obtener geometrías precisas que sirvan como base para el análisis estructural. Para el diseño del Panzer V Panther se ha acudido a documentación de fuente abierta, pero en el caso del M1A2 Abrams, al ser un carro de combate actual la información es confidencial, por lo que se ha diseñado partiendo de una maqueta a escala reproduciendo pieza a pieza en 3D.

En la última parte, se lleva a cabo una simulación de impacto balístico del proyectil AP M72 de 75 mm sobre blindajes de ambos vehículos, utilizando el software Abaqus/Explicit. Se comparan diferentes materiales, el acero estructural S355 y el acero de alta dureza Armox 500T, así como modelos de comportamiento plástico simple y el modelo avanzado de Johnson-Cook.

Los resultados muestran una mayor resistencia y capacidad de absorción de energía en el Armox 500T, confirmando su superioridad en aplicaciones de protección balística. El modelo de Johnson Cook demuestra una aproximación mayor a la realidad frente a impactos balísticos que el modelo clásico de deformación plástica.

El trabajo concluye destacando la importancia de integrar el diseño asistido por ordenador con la simulación numérica para el estudio de blindajes modernos, y propone futuras líneas de investigación orientadas a la validación experimental y al uso de materiales compuestos con configuraciones multicapa.

ÍNDICE

MEMORIA.....	4
1. INTRODUCCIÓN.....	5
1.1. ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN.....	5
1.2. OBJETO Y ALCANCE DEL PROYECTO.....	6
2. MARCO TEÓRICO DEL CARRO DE COMBATE.....	7
2.1. DEFINICIÓN.....	7
2.2. EVOLUCIÓN HISTÓRICA.....	7
2.3. CLASIFICACIÓN DE LOS CARROS DE COMBATE.....	9
2.4. COMPONENTES PRINCIPALES.....	10
2.5. BLINDAJE EN CARROS DE COMBATE.....	11
2.5.1. MATERIAL DEL BLINDAJE.....	11
2.5.1.1. ACEROS BLINDADOS.....	11
2.5.1.2. BLINDAJES COMPUESTOS.....	14
2.5.2. ENSAMBLAJE.....	15
2.5.3. PROTECCIÓN ADICIONAL.....	16
2.6. BALÍSTICA E IMPACTO DE PROYECTILES.....	19
2.6.1. PARTES DE UN PROYECTIL.....	20
2.6.2. TIPOS DE PROYECTILES EMPLEADOS CONTRA BLINDAJES.....	21
2.6.3. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA PENETRACIÓN.....	24
2.7. SIMULACIÓN APLICADA AL ANÁLISIS BALÍSTICO.....	25
3. ESTUDIO DEL PANZER V PANTHER.....	26
3.1. CONTEXTO HISTÓRICO Y DESARROLLO.....	26
3.2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS.....	28
4. ESTUDIO DEL M1A2 ABRAMS.....	32
4.1. CONTEXTO HISTÓRICO Y DESARROLLO.....	32
4.2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS.....	34
5. DISEÑO Y MODELADO EN SOLIDWORKS.....	38
5.1. DISEÑO DEL PANZER V.....	38
5.2. DISEÑO DEL M1A2 ABRAMS.....	40
6. ANÁLISIS ANTE EL IMPACTO DEL PROYECTIL M72 75mm.....	46
6.1. SIMULACIÓN EN ABAQUS EXPLICIT.....	47
6.2. ANÁLISIS COMPARATIVO.....	47
7. CONCLUSIONES.....	52
8. BIBLIOGRAFÍA.....	53
ANEXOS.....	54

ANEXO I: FICHA TÉCNICA DE ACEROS UTILIZADOS EN BLINDAJES	55
ANEXO II: GUÍA PASOS ABAQUS	57
ANEXO III: RESULTADOS SIMULACIÓN DE IMPACTO EN TANQUE PANZER V PANTHER	65
ANEXO IV: RESULTADOS SIMULACIÓN DE IMPACTO EN TANQUE M1A2 ABRAMS.....	77

MEMORIA

*DISEÑO Y ANÁLISIS DE LOS TANQUES
M1A2 ABRAMS Y PANZER V PANTERA
ANTE EL IMPACTO DE UN PROYECTIL*

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN

Desde su aparición en la Primera Guerra Mundial, el carro de combate se ha convertido en una de las piezas centrales en la estrategia moderna militar. Fue ideado para superar la guerra de trincheras integrando en un solo sistema movilidad, potencia de fuego y protección, convirtiéndose rápidamente en la clave para la superioridad táctica. A lo largo del siglo XX, los avances en materiales, mecánica y armamento impulsaron una evolución constante que fue aún más notoria durante la Primera y Segunda Guerra Mundial ya que era un factor decisivo para la victoria.

En este recorrido histórico, he escogido dos modelos que reflejan esta evolución. Por un lado, el Panzer V Panther, diseñado por Alemania durante la Segunda Guerra Mundial, supuso una revolución en el empleo de blindajes inclinados y en la búsqueda de un equilibrio entre potencia de fuego, movilidad y protección. Por otro, el M1A2 Abrams, carro de combate principal de los Estados Unidos, representa la culminación de décadas de innovación, integrando blindaje compuesto, sistemas electrónicos avanzados y soluciones de ingeniería orientadas a maximizar la supervivencia en el campo de batalla contemporáneo. El contraste entre ambos refleja la evolución del diseño, geometrías y materiales de mediados del siglo XX hasta la integración de tecnologías complejas en la actualidad.

Paralelamente, el estudio del comportamiento del blindaje frente a impactos de proyectiles constituye un área de investigación clave en la ingeniería militar. El análisis de los mecanismos de penetración, deformación y disipación de la energía no es solo esencial para el desarrollo de carros de combate, sino también para aplicaciones civiles de seguridad, diseño de materiales de alta resistencia y protección de infraestructuras. En este contexto, la simulación por ordenador y el análisis numérico permiten reproducir fenómenos complejos, ofreciendo una primera impresión para realizar ensayos experimentales.

La motivación de este trabajo reside en mi pasión en la Segunda Guerra Mundial y en los carros de combate. El interés en la comparativa entre un tanque de la Segunda Guerra Mundial y uno actual reside en el análisis del impacto balístico sobre blindajes. Este enfoque integra una perspectiva histórica y tecnológica, contribuyendo al conocimiento sobre diseño y blindaje, y reforzando la importancia de la ingeniería aplicada en la evolución y mejora de los sistemas de defensa.

Además, el presente estudio responde a la vinculación de los conocimientos adquiridos durante el máster con una aplicación práctica de gran complejidad, donde convergen áreas como la mecánica de materiales, dinámica de impacto y diseño estructural. De esta manera, se contribuye tanto a la formación académica como al desarrollo de análisis útiles para futuros proyectos de investigación en ingeniería de defensa y seguridad.

1.2. OBJETO Y ALCANCE DEL PROYECTO

El presente Trabajo Fin de Máster tiene como objeto el análisis comparativo del diseño estructural y de la protección balística de dos carros de combate representativos en la historia militar: el Panzer V Panther y el M1A2 Abrams. Mediante este análisis se pretende comprender las dos filosofías de diseño, los materiales empleados en los blindajes y las soluciones técnicas adoptadas en cada época, para finalmente evaluar el comportamiento de estos sistemas frente al impacto de proyectiles mediante metodologías de simulación.

El objetivo central consiste en examinar las diferencias y similitudes entre ambos modelos, atendiendo a sus diseños, materiales empleados, geometría de blindaje, movilidad y sistemas de armamento, para posteriormente trasladar estos conocimientos al análisis estructural y balístico.

El alcance del trabajo abarca tres grandes bloques. En primer lugar, se desarrolla el marco teórico de los carros de combate, que incluye su definición, clasificación, evolución histórica y descripción de los principales subsistemas que lo componen, con especial atención al blindaje y la interacción con proyectiles. En segundo lugar, se aborda un estudio comparativo detallado de los modelos seleccionados, analizando su diseño y geometría. Finalmente, se plantea un análisis del impacto de proyectiles sobre el blindaje de cada tanque mediante simulaciones y obteniendo los resultados de penetración, energía absorbida y deformación ante diferentes escenarios de impacto.

Es importante señalar que el alcance de este trabajo se limita a un análisis académico y técnico, basado exclusivamente en información de dominio público. No se pretende reproducir datos clasificados ni realizar una réplica exacta de los vehículos en cuestión, sino aproximar su comportamiento mediante modelos representativos que permitan poner en práctica herramientas de ingeniería avanzada. Asimismo, el estudio se centrará en el análisis estructural del blindaje y no abarcará aspectos logísticos, operativos ni estratégicos de los vehículos.

2. MARCO TEÓRICO DEL CARRO DE COMBATE

2.1. DEFINICIÓN

Un carro de combate, o tanque, es un vehículo blindado de combate diseñado para la batalla en primera línea de frente. Su primera aparición fue en la Primera Guerra Mundial para romper líneas enemigas y fue evolucionando para ser capaz de enfrentarse a otros blindados enemigos. Su diseño integra de manera equilibrada tres características principales: movilidad, potencia de fuego y protección.^[1]

El carro de combate se distingue por ser un vehículo con capacidad de hacer frente tanto a blindados como fortificaciones. El cañón principal, de gran calibre, proporciona una elevada capacidad ofensiva, mientras que el blindaje, le permite resistir impactos de proyectiles, cargas huecas y municiones explosivas. A esto se le suma la movilidad sobre cadenas u orugas, que le permite la posibilidad de operar en terrenos difíciles y superar obstáculos donde otros vehículos quedarían limitados.

No obstante, los carros de combate no pueden entenderse de manera aislada. Forma parte de un sistema más amplio que intervienen la infantería, artillería, aviación y sistemas de apoyo logístico. De esta forma, conforma un sistema de armas que combina ingeniería mecánica, materiales, electrónica y táctica militar, convirtiéndose en un campo de estudio de especial interés para la ingeniería de defensa y seguridad.

2.2. EVOLUCIÓN HISTÓRICA

El desarrollo del carro de combate está fuertemente ligado a la evolución de la guerra terrestre y los avances tecnológicos en materiales, armamento y motorización. Su primera aparición fue en la Primera Guerra Mundial, como respuesta directa a la guerra de trincheras, caracterizada por posiciones estáticas y fortificadas difíciles de superar. Los primeros modelos, como el británico Mark I (1916) (Figura 1), se diseñaron para abrir brechas en líneas enemigas, proteger a la infantería y superar obstáculos como trincheras y alambradas. Resultaron ser rudimentarios y lentos, pero demostraron el potencial de este nuevo concepto de vehículo militar.^[3]



Figura 1: Mark I. Fuente: Wikipedia.

Durante la Segunda Guerra Mundial, el carro de combate adquirió un papel fundamental en la estrategia militar. La aparición de modelos como el Panzer IV (Figura 2) y Panther V en Alemania, el T-34 soviético (Figura 3) o el M4 Sherman estadounidense (Figura 4) consolidó la importancia del blindaje inclinado, la movilidad mejorada y la producción en masa como factores clave. En esta etapa se produjo una carrera armamentística que buscaba equilibrar potencia de fuego y protección, lo que derivó en vehículos más pesados, cañones de mayor calibre y blindajes más resistentes. Un ejemplo del empleo del tanque como elemento decisivo en operaciones rápidas y contundentes fue en la guerra relámpago (Blitzkrieg) alemana donde la táctica militar propició una victoria rápida y contundente.



Figura 2: Panzer IV. Fuente: Wikipedia



Figura 3: T-34. Fuente: Wikipedia



Figura 4: M4 Sherman. Fuente: Wikipedia

La Guerra Fría supuso un gran salto en la concepción del carro de combate. Los avances en metalurgia y materiales compuestos dieron lugar a blindajes más eficaces frente a proyectiles perforantes y cargas huecas. Modelos como el Leopard 1 alemán (Figura 5), Challenger I británico (Figura 6), T-72 (Figura 7) y T-80 soviético y el M1A1 Abrams estadounidense (Figura 8) reflejaron la consolidación del carro de combate principal (MBT, Main Battle Tank).



Figura 5: Leopard 1. Fuente: Portierramaryaire.com



Figura 6: Challenger I. Fuente: keymilitary.com



Figura 7: T-72. Fuente: fdra.blogspot.com



Figura 8: M1A1 Abrams. Fuente: unosedentaydos.mforos.com

En las últimas décadas, el carro de combate ha continuado evolucionando en respuesta a nuevas amenazas. El empleo de blindajes reactivos y sistemas de protección activa (APS) ha permitido contrarrestar misiles antitanque y proyectiles de alta penetración, mientras que los sistemas de control de tiro, visión térmica y la integración de sistemas de mando y control han incrementado su eficacia en combate.

2.3. CLASIFICACIÓN DE LOS CARROS DE COMBATE

Los carros de combate pueden clasificarse de diversas formas: peso, rol, derivados y especializados (Tabla 1). Estas categorías reflejan la evolución militar y los avances tecnológicos derivados de las necesidades tácticas de la época. A lo largo del tiempo, los ejércitos han desarrollado modelos adaptados a misiones concretas y permite comprender los requerimientos de movilidad, protección y potencia de fuego necesarios.^[2]

POR PESO	POR ROL	DERIVADOS	ESPECIALIZADOS
-Tanqueta	-Carro de combate	-Cazacarros	-Carro anfibio
-Carro ligero	-Carro de mando	-Cañón de asalto	-Carro lanzallamas
-Carro medio	-Carro de entrenamiento	-Artillería autopropulsada	-Carro de observación de artillería
-Carro pesado	-Carro de infantería	-Artillería antiaérea autopropulsada	-Carro de desminado
-Carro super-pesado	-Carro de caballería	-Transporte blindado de personal	-Carro lanzapuentes
	-Carro de reconocimiento	-Vehículo de combate de infantería	-Carro de recuperación
	-Carro de combate principal		-Carro de ingenieros

Tabla 1: Clasificación de los carros de combate. Fuente: WikiTanks.com

La amplia clasificación de los carros de combate muestra la variedad de diseños y funciones que estos vehículos han demostrado desde su creación. Aunque la mayoría de los ejércitos han optado por el concepto de carro de combate principal (MBT), capaz de integrar movilidad, protección y potencia de fuego en un solo sistema.

2.4. COMPONENTES PRINCIPALES

Los componentes principales de un carro de combate genérico actual son los siguientes:

1. Periscopio	Lentes que permiten ver al tripulante fuera del carro desde dentro
2. Mantelete del cañón	Blindaje móvil que protege la base del tubo del cañón donde éste entra en la torre.
3. Arma coaxial	Ametralladora montada junto al cañón principal
4. Extractor de humo	Parte del cañón que expulsa los gases de la recámara después del dispar.
5. Cañón	Arma principal usada para disparar proyectiles.
6. Ópticas del conductor	Conjunto de ventanas/periscopios que permiten al conductor ver el exterior.
7. Escotilla del conductor	Abertura por la que el conductor entra y sale.
8. Glacis	Placa frontal inclinada del casco en la parte delantera más expuesta y muy blindada.
9. Oruga del carro	Banda continua de eslabones que distribuye el peso y permite el movimiento.
10. Municiones de ametralladora	Cartuchos donde se almacena la munición de la ametralladora.
11. Ametralladora del comandante	Ametralladora cercana a la cúpula del comandante.
12. Escotilla o cúpula	Torre pequeña giratoria donde se sitúa el comandante e incluye su escotilla.
13. Torreta	Estructura giratoria que aloja el cañón principal, la artillería secundaria y parte de la tripulación
14. Anillo de la torreta	Zona entre la torreta y el casco que permite la rotación y sella la unión.
15. Casco	Cuerpo principal del tanque (hull) que contiene motor, tripulación y transmisión.
16. Toma de aire del motor:	Entrada para suministrar aire al motor y sistemas de ventilación.
17. Compartimiento del motor:	Zona trasera (o lateral) donde está instalado el motor y sistemas de propulsión.
18. Falda lateral	Placas adicionales a los lados de la suspensión/orugas que protegen contra proyectiles.
19. Piñón de transmisión	Rueda dentada que impulsa la oruga transmitida por el motor.
20. Enlace	Eslabón individual que forma parte de la oruga, varios unidos forman la cadena.
21. Rueda	Elemento de la suspensión que soporta y guía la oruga sobre el tren de rodaje.

En la Figura 9 se muestra la localización de cada uno de los componentes:

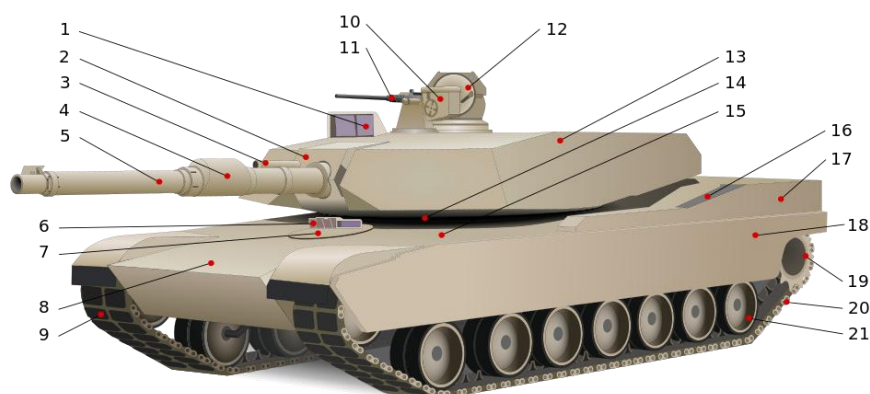


Figura 9: Componentes principales de un carro de combate. Fuente: Wikipedia.

2.5. BLINDAJE EN CARROS DE COMBATE

El blindaje de los vehículos militares ha ido evolucionando desde el acero macizo hasta sistemas multicapa complejos que combinan materiales con comportamientos mecánicos distintos. El diseño y selección de estos responde a la necesidad de maximizar la protección con el menor peso posible, asegurando la fabricación, durabilidad y costes aceptables. A continuación, se describen la evolución de los materiales empleados en blindajes:

2.5.1. MATERIAL DEL BLINDAJE

2.5.1.1. ACEROS BLINDADOS

El blindaje principal de los carros de combate de la Segunda Guerra Mundial estaba hecho de acero, posteriormente aparecerían blindajes compuestos, pero el acero sigue siendo el componente principal hasta día de hoy. Sus características varían dependiendo de su composición y del tipo de templado para endurecerlo.^{[4] [5] [6] [7]}

- Acero de alta dureza (HSS – High hardness Steel)

Este tipo de acero es de los más duros que existen con una dureza de 500 en la escala Brinell o más. Su desventaja es que pierde flexibilidad que conlleva a:

- No hay maleabilidad que hace que solo pueda producir placas rectas sin curvas
- Limitado a un cierto grosor
- Difícil aguante de la sujeción ante impacto y difícil de soldar por lo que eran atornilladas o remachadas
- Poca flexibilidad y alta dureza que tendían a fracturarse cuando estaban sometidas bajo estrés.

Fue el primer tipo de acero en ser usado en los tanques de la Primera Guerra Mundial con una dureza entre 420 y 650 HB y con placas de entre 8 y 14 mm de grosor ya que no existían armas antitanques.



Figura 10: Mark IV. Fuente: guerra-acorazada.blog

Sin embargo, en la época de entre guerras se hizo necesario aumentar el grosor de las placas así que no quedo otra opción que reducir la dureza de las placas de blindaje.

- **Blindaje laminado homogéneo (RHA – Rolled Homogeneous Armor):**

Tipo de armadura hecha de planchas de acero con una determinada composición que son laminadas en caliente para mejorar sus propiedades. Se produce pasando barras de acero fundido por rodillos de laminado en caliente hasta obtener el espesor requerido. El laminado y posterior forjado alinean la estructura interna del acero en líneas estructurales largas que permiten que la tensión a la que se somete fluya por todo el metal y no se concentre en un área. Este acero suele tener una dureza entre los 320 y 380 HB con unas placas de entre 75 y 250 mm de grosor. (Figura 11)

Este tipo de blindaje fue el más común en los carros de combate y vehículos blindados hasta el final de la Segunda Guerra Mundial mostrando buenas cualidades frente proyectiles perforantes clásicos.

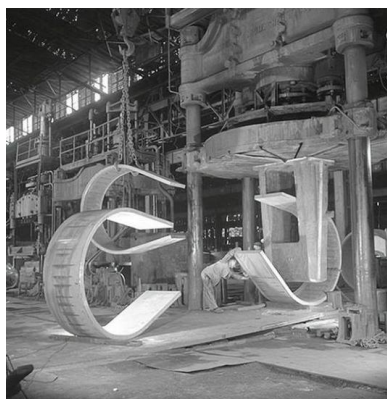


Figura 11: Acero laminado torreta Tiger I. Fuente: guerra-acorazada.blog

- **Blindaje homogéneo moldeado (CHA – Casted Homogeneous Armor):**

Formado por piezas de acero fundido en moldes (acero colado). Este proceso de fabricación permite crear piezas curvas y complejas, ahorrando soldadura, atornillado o remachado para las uniones. Además, se acelera el proceso de fabricación pudiendo crear grandes secciones de una sola pieza, abaratando sus costes y mejorando su resistencia balística. La desventaja frente al RHA es que no se alinea ni compacta la estructura interna del acero, pudiendo contener imperfecciones que reducen su resistencia. Su ventaja es que es más dúctil, pudiéndose deformar más sin llegar a ser penetrado y su alta moldeabilidad facilitando el aumento de producción. Es el acero más blando utilizado con una dureza entre 220 y 300 HB. (Figura 12)

Fue un tipo de blindaje ampliamente utilizado en la producción en masa de tanques de los Aliados durante la Segunda Guerra Mundial como el T-34 soviético y el M4 Sherman estadounidense, especialmente en las torretas. También fue usado para los manteletes de los blindados alemanes, como el Panther o los tipo Saukopf.



Figura 12: Chasis Panzer 68 de acero colado. Fuente: guerra-acorazada.blog

- **Blindaje de cara endurecida o estratificado (FHA – Face Hardened Armor):**

Blindaje hecho de acero laminado al que se le aplica un tratamiento de endurecido en la capa exterior a base de cementación al carbono y otros componentes (acero cementado/acero de alto carbono). La cementación endurece la superficie sin modificar su núcleo, creando una pieza formada por dos materiales con propiedades diferentes. El núcleo de acero con bajo índice de carbono es tenaz y resistente a la fatiga, mientras que la superficie con mayor concentración aporta mayor dureza. El proceso consta en recubrir las partes a cementar con materia rica en carbono durante varias horas a temperaturas altas (900°C). Luego se le aplica el tratamiento térmico correspondiente, temple y revenido. Posee una dureza de 600 HB en la superficie y una dureza de 400 HB en el interior. Con placas de hasta 20 mm de espesor. La principal desventaja que existe frente al RHA es que eran más caros de producir y difíciles de soldar.

Este tipo de blindaje fue utilizado para blindar buques de guerra y acorazados a finales del siglo XIX, sin embargo, en la Segunda Guerra Mundial no fue habitual en los carros de combate. (Figura 13)



Figura 13. Placa 20mm acero cara endurecida Panzer III. Fuente: guerra-acorazada.blog

Una evolución de este tipo de acero fue el **Acero Duplex** a partir de los años 60, formado de dos placas de acero de distinta aleación y dureza, colocadas una sobre otra unidas por un proceso de laminación. La capa dura ofrece resistencia mientras que la blanda absorbe el impacto. La desventaja es que no se pueden obtener unos grosores elevados en su fabricación.

- **Acero colado al alto vacío y electroescórico (VIM – Vacuum Induction Melting, ESR – Electro-Slag Remelting):**

El proceso consiste en fundir el acero usando una corriente eléctrica dentro de una cámara al vacío con baño de materiales específicos. Resulta un acero de gran pureza y calidad con una dureza superior a 500 HB, pero también flexible y fácil de soldar. La desventaja es su limitación de grosor y su coste. Son los tipos de aceros usados en la actualidad en algunas partes del carro de combate. (Figura 14)

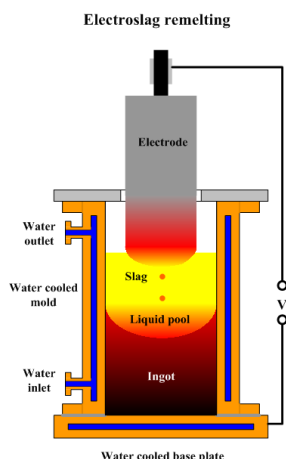


Figura 14. Proceso de fabricación acero electroescórico. Fuente: jaiganeshsteel.com

2.5.1.2. BLINDAJES COMPUESTOS

Los carros de combate han ido evolucionando hasta utilizar materiales compuestos que obtienen todas esas ventajas para garantizar la protección de los tripulantes. Los blindajes compuestos están formados de aleaciones de tungsteno, titanio o incluso uranio, incluyendo capas internas de materiales cerámicos y revestimientos de Kevlar en el interior para evitar el astillamiento (descascarillado de la superficie interna del punto de impacto generando su fragmentación en astillas que se proyectan al interior del compartimento). Esta combinación de materiales permite reducir el peso ofreciendo una mejor protección.

Las cerámicas (alúmina, carburo de silicio, carburo de boro) aportan dureza extrema pero su principal limitación es su fragilidad, por eso se integran con materiales de respaldo dúctiles que frenan y contienen la fragmentación.

El uso de materiales poliméricos y fibras avanzadas como fibras de aramida (Kevlar), polietileno de alto peso molecular (UHMWPE) y otras fibras sintéticas se emplean como respaldo de absorción de energía. Estos materiales presentan alta relación resistencia/peso y evitan el astillamiento. (Figura 15)

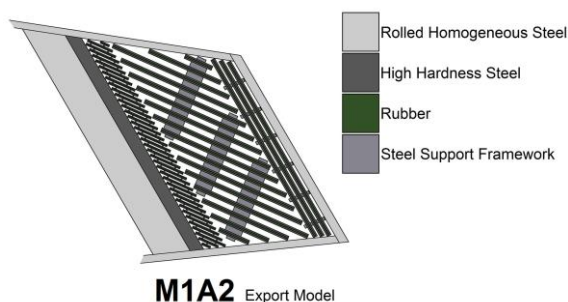


Figura 15: Blindaje compuesto M1A2 Abrams. Fuente: vietnam.vn

2.5.2. ENSAMBLAJE

- Atornillado y remachado

El atornillado y remachado era la forma más sencilla de ensamblar el blindaje, sin embargo, resultaba en una unión débil y los impactos provocaban que los tornillos y remaches salieran disparados al interior como metralla. (Figura 16)



Figura 16: M3 Lee. Fuente: WikiTanks.

- Soldadura

La fabricación del carro de combate mediante soldadura era un proceso complejo entre los años 30 y 40 pero ofrecían la ventaja al ser una unión más resistente ante los impactos. Los aceros FHA eran difíciles de soldar, en cambio los RHA y CHA era el método utilizado de unión. (Figura 17)



Figura 17: Jagdpanzer. Fuente: WikiTanks

2.5.3. PROTECCIÓN ADICIONAL

- Inclinción

El blindaje inclinado ofrece la ventaja de aumentar el espesor efectivo ya que el proyectil tiene que atravesar mayor sección para ser perforado y la posibilidad de rebote al impactar. El inconveniente era la disminución de espacio del tanque.

Para calcular ese espesor relativo(x) se puede calcular dividiendo el espesor de la placa(w) entre el seno del ángulo.^[8]

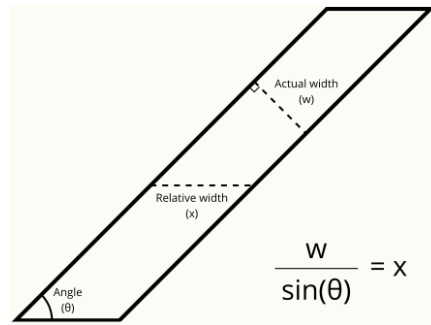


Figura 18: Cálculo espesor relativo. Fuente: panzerworld.com

Además del ángulo de inclinación del blindaje hay que sumar el ángulo de incidencia del proyectil. El ángulo resultante será mayor por lo que el espesor relativo aumentará provocando una mayor protección.^[9]

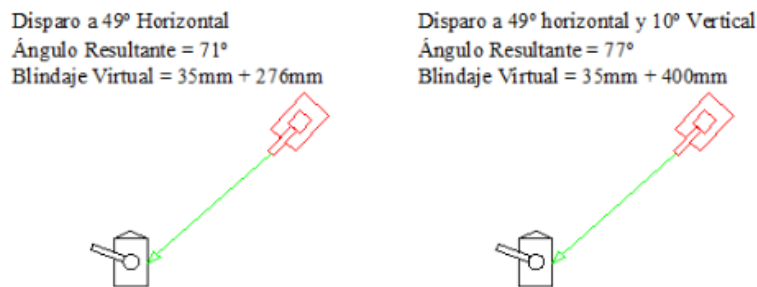


Figura 19: Ángulo resultante. Fuente: WoldOfArmor.

Ángulo Vertical	Ángulo Horizontal															
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
5	7	11	16	21	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
9	10	13	17	22	26	31	36	41	46	51	55	60	65	70	75	80
10	11	14	18	22	27	31	36	41	46	51	56	61	65	70	75	80
14	15	17	20	24	28	33	37	42	47	51	56	61	66	71	75	80
15	16	18	21	25	29	33	38	42	47	52	56	61	66	71	76	80
20	21	22	25	28	32	36	40	44	48	53	57	62	67	71	76	81
25	25	27	29	32	35	38	42	46	50	54	59	63	67	72	76	81
30	30	31	33	36	38	41	45	48	52	56	60	64	69	73	77	81
35	35	36	38	40	42	45	48	51	55	58	62	66	70	74	78	82
40	40	41	42	44	46	48	51	54	57	61	64	67	71	74	79	82
45	45	46	47	48	50	52	55	57	60	63	66	69	73	76	79	83
47	47	48	49	50	52	54	56	59	61	64	67	70	73	77	80	83
50	50	51	52	53	54	56	58	61	63	66	68	71	74	77	80	84
52	52	53	54	55	56	58	60	62	64	67	69	72	75	78	81	84
53	53	54	54	56	57	59	60	63	65	67	70	72	75	78	81	84
55	55	56	56	57	59	60	62	64	66	68	71	73	76	79	81	84
56	56	57	57	58	60	61	63	65	67	69	71	74	76	79	82	84
60	60	61	61	62	63	64	66	67	69	71	73	76	78	80	83	85
65	65	65	66	67	67	69	70	71	73	74	76	78	80	82	84	86
70	70	70	71	71	72	73	74	75	76	77	79	80	82	83	85	87
72	72	72	73	73	74	74	75	76	77	79	80	81	82	84	85	87
75	75	75	76	76	76	77	78	79	79	80	81	83	84	85	86	87
80	80	80	80	81	81	81	82	82	83	84	84	85	86	87	87	88

Tabla 2: Obtención del ángulo resultante. Fuente: WoldOfArmor.

- Blindaje espaciado

La idea es provocar la debilitación del proyectil para que no penetre en la armadura principal. Esta debilitación se debe a la ralentización de la velocidad del proyectil disminuyendo su capacidad de penetración, desestabilizándolo, provocando malos ángulos de impacto y a la liberación del estrés tras atravesar la primera placa que provoca la fragmentación del proyectil.

El blindaje espaciado ligero se utilizó en la Segunda Guerra Mundial por los tanques alemanes y fue evolucionando hasta convertirse en blindaje espaciado pesado utilizado dentro del chasis del tanque.



Figura 20: Blindaje espaciado Panzer III. Fuente: WikiTanks



Figura 21: Blindaje espaciado T-72B. Fuente: guerra-acorazada.blog

- Blindaje reactivo

Tipo de protección adicional para vehículos blindados modernos que reacciona al impacto del proyectil para reducir el daño que pueda causar en el blindaje principal. Los primeros prototipos aparecieron en la Guerra Fría en los años 60.

Existen varios tipos de protecciones reactivas, el más común es el blindaje reactivo explosivo (ERA), pero también existen diseños de blindaje reactivo explosivo autolimitante (SLERA) y blindaje reactivo no explosivo (NERA).

o Blindaje reactivo explosivo (ERA):

Consiste en módulos tipo sándwich formados por un par de placas metálicas rellenas de explosivo, el cual reacciona al impacto explotando hacia el exterior para impedir la penetración en el blindaje. (Figura 22)

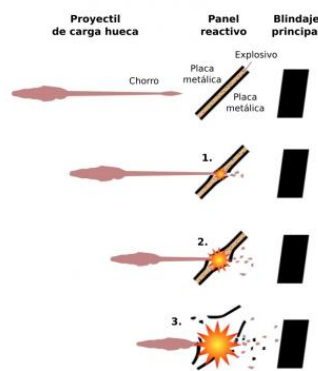


Figura 22. Blindaje ERA. Fuente: WikiTanks

- **Blindaje reactivo no explosivo (NERA):**

La idea es mantener la acción reactiva, pero sin usar explosivos. Para ello se alternan capas de metal con materiales compuestos y elásticos (caucho, cerámica o polímeros) que se deforman y absorben el impacto.

El tipo de blindaje más común en la OTAN y aliados es el blindaje Chobham donde intercala varias capas de blindaje reactivo no explosivo con elastómero, entre dos capas de blindaje de acero.

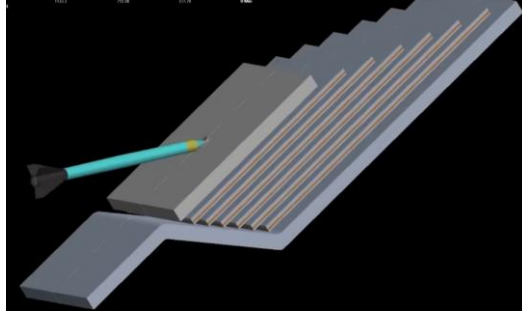


Figura 23: Blindaje Chobham. Fuente: La Armeria (YouTube)

- **Blindaje reactivo explosivo autolimitante (SLERA):**

Mismo principio que el NERA, pero con una pequeña cantidad de explosivo que no genera una detonación violenta.

- **Blindaje añadido e improvisado**

El blindaje añadido consiste en placas adicionales laminadas, atornilladas o soldadas en su armadura. (Figura 24)

El blindaje improvisado consiste en añadir elementos como trozos de cadena, sacos, madera, hormigón, etc. (Figura 25)



Figura 24: Blindaje añadido. Fuente: WikiTanks



Figura 25: Blindaje improvisado. Fuente: WikiTanks

2.6. BALÍSTICA E IMPACTO DE PROYECTILES

La balística es la ciencia que estudia el comportamiento de sus proyectiles desde su lanzamiento hasta su impacto y los efectos que produce sobre un blanco. En el contexto de diseño de vehículos blindados, su estudio resulta esencial, ya que determina la eficacia ofensiva del proyectil como defensiva del blindaje. Se puede dividir en 3 ramas:

- **Balística interior:** Estudia los fenómenos que se producen en el interior del arma de fuego, desde que el percutor hiere al fulminante y termina hasta que el proyectil abandona la boca del arma de fuego. Es el caso de diseño de armas de fuego.
- **Balística exterior:** Estudia las trayectorias y los efectos perturbadores del medio ambiente sobre el proyectil. Es el análisis de lo que ocurre con el proyectil desde que abandona la boca del cañón hasta que hace blanco, o bien agota su impulso y cae.
- **Balística de efecto/terminal:** Estudia los efectos causados por el choque del proyectil contra un cuerpo, así como los mecanismos de daño y penetración resultantes. Es el caso de blindajes, se distinguen varios modos de fallo y deformación:
 - Penetración por deformación plástica: El proyectil induce una gran deformación en el material hasta abrir un canal de penetración.
 - Fractura frágil o fragmentación: El material no puede deformarse plásticamente y se rompe de forma brusca.
 - Perforación y astillamiento (spalling): El material se fractura parcialmente, proyectando fragmentos hacia el interior del vehículo.
 - Erosión de proyectiles: En impactos hiper-veloces, tanto el proyectil como el objetivo pueden erosionarse mutuamente hasta disipar la energía.

2.6.1. PARTES DE UN PROYECTIL

Dentro de la munición para la artillería de un tanque, podemos encontrar varios tipos distintos, según la función que desempeñarán. De forma general, podemos decir que un proyectil consta de las siguientes partes, indicadas en la Figura 26 (algunos elementos no se encuentran presentes en todos los proyectiles, o bien están situados en otros lugares): ^{[10] [11]}

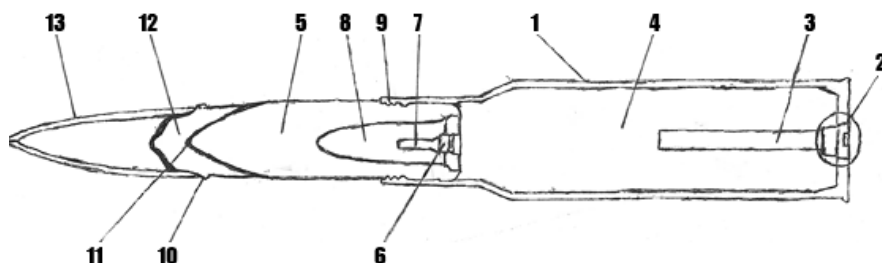


Figura 26: Partes de un proyectil. Fuente: blog.portierramaryaire.com

- 1) **Vaina:** Carcasa exterior formada por aleación de latón, acero, aluminio o plástico.
- 2) **Fulminante y pistón del fulminante:** Compuesto explosivo sensible a la fricción calor o choques bruscos. Inicialmente fabricado con fulminato de mercurio, aunque fue sustituido por compuestos menos corrosivos.
- 3) **Carga de transmisión:** Pequeña carga de material explosivo que es detonada cuando el fulminante se ha activado por impacto del percutor.
- 4) **Carga impulsora:** Formada por compuesto como pólvora negra, corditas, nitrocelulosa con baja velocidad de detonación.
- 5) **Cuerpo del proyectil:** Formado por acero de alta dureza.
- 6) **Espoleta:** Provoca la detonación de la carga de un proyectil en el momento que interesa. La espoleta más conocida es la de percusión que se divide en dos tipos:
 - a. De ojiva: Espoleta en la parte delantera, donde el retardo de la explosión es casi inexistente. Utilizado en proyectiles explosivos.
 - b. De culote: Espoleta en la parte trasera, donde hay retardo de la explosión. Utilizada en proyectiles penetrantes.
- 7) **Detonador:** Pequeña carga de explosivo usada para hacer detonar la carga de explosivo más grande.
- 8) **Carga de explosivo principal:** Localizada en la cavidad interior del cuerpo, formado por alto explosivo (TNT, Hexógeno o RDX...). En algunos proyectiles penetrantes no existe y son completamente macizos.
- 9) **Banda de rozamiento:** Permite evitar que los gases de propulsión salgan antes que el proyectil del tubo del cañón y provoca un giro de rotación que permite al proyectil estabilizarse en el vuelo.
- 10) **Banda de conducción:** Banda o anilla muy fina de metal, diseñada para sostener la parte delantera del proyectil durante el trayecto por el ánima del cañón, colocada justo detrás de la ojiva del proyectil. Sirve para evitar que cabecee provocando una pérdida de eficacia de alcance y perforación.
- 11) **Ojiva:** Punta redondeada o afinada del proyectil.
- 12) **Capacete o sombrerete de perforación:** Pieza de metal (hierro o acero blando) colocada sobre la punta del cuerpo del proyectil, de forma plana que favorece la penetración ante blindaje inclinado.
- 13) **Capacete o sombrerete balístico:** Pieza de metal aerodinámica, de material ligero y hueco como aluminio, cuya misión es mejorar la aerodinámica del proyectil aumentando el alcance y la penetración.

2.6.2. TIPOS DE PROYECTILES EMPLEADOS CONTRA BLINDAJES

Los proyectiles se diseñan según la naturaleza del objetivo y el principio físico de daño:

- **Antiblindaje perforante:**
 - **AP (Armor-Piercing / Perforante)**

Proyectil antiblindaje perforante macizo, de punta endurecida, diseñado para perforar blindaje por deformación y esfuerzo cortante. (Figura 27)

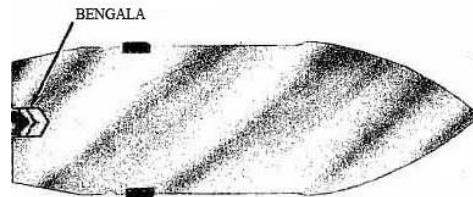


Figura 27: Proyectil AP. Fuente: blog.portierramaryaire.com

- **APC (Armor-Piercing Capped / Perforante con sombrerete)**

Proyectil antiblindaje perforante con una capa de material blando en la punta para mejorar la resistencia al impacto. Desarrollado en 1898 de uso naval y no fue utilizado en carros de combate. (Figura 28)

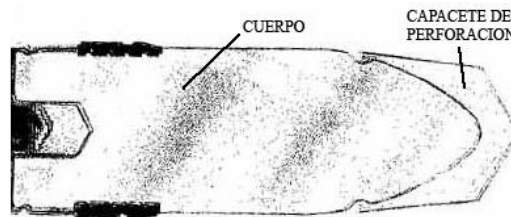


Figura 28: Proyectil APC. Fuente: blog.portierramaryaire.com

- **APBC (Armor-Piercing Ballistic Capped / Perforante con capuchón balístico)**

Proyectil antiblindaje perforante al que se le añade capuchón ligero en forma de cono hueco para mejorar la aerodinámica a la punta del proyectil AP. (Figura 29)

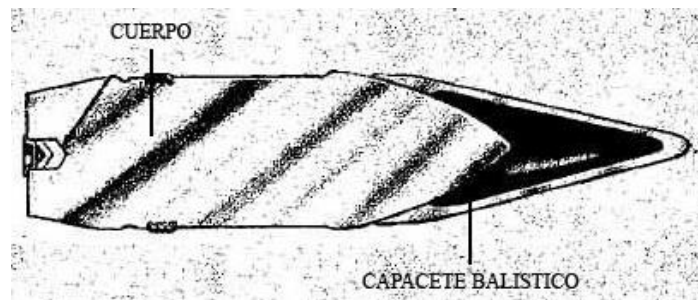


Figura 29: Proyectil APBC. Fuente: blog.portierramaryaire.com

- **APCBC (Armor-Piercing Capped, Ballistic Capped / Perforante con sombrerete y capuchón balístico)**

Proyectil antiblindaje perforante que combina el APC con el APBC para mejorar el vuelo y la fiabilidad en el impacto. Fue utilizado masivamente en la Segunda Guerra Mundial. (Figura 30)

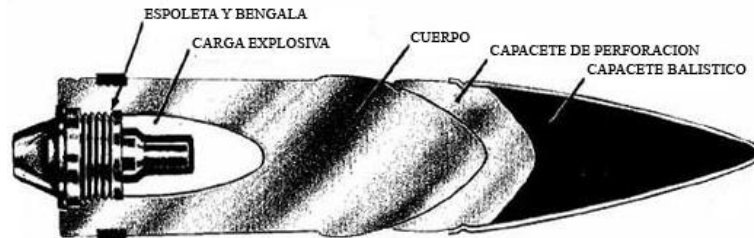


Figura 30: Proyectil APCBC. Fuente: blog.portierramaryaire.com

- **APCR/HVAP (Armor-Piercing Composite Rigid / Perforante compuesto rígido)**

Proyectil antiblindaje perforante compuesto de un núcleo de metal duro de alta densidad (carburo de tungsteno), rodeado de una carcasa de material más ligero (aleación de aluminio). (Figura 31)

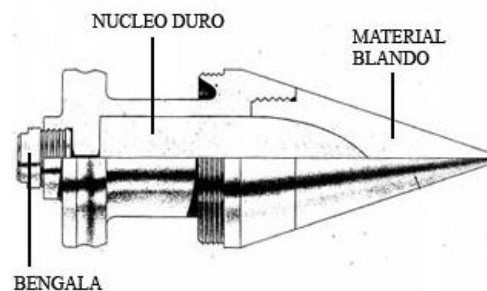


Figura 31: Proyectil APCR. Fuente: blog.portierramaryaire.com

- **APDS (Armor-Piercing Discarding-Sabot / Perforante con Sabot Desechable)**

Proyectil antiblindaje perforante subcalibrado y estabilizado por giro equipado con un sabot o casquillo desechable que se desprende en el momento del disparo al salir por la boca del cañón. (Figura 32)



Figura 32: Proyectil APDS. Fuente: WikiTanks

- **APFSDS (Armor-Piercing Fin-Stabilised Discarding-Sabot / Perforante estabilizada por aletas y sabot desechable)**

Proyectil antiblindaje perforante subcalibrado, con sabot o casquillo desechable. Es estabilizado mediante aletas, para darle mayor precisión. Fue diseñado a principios de los años 60 y son utilizados en la actualidad. (Figura 33)



Figura 33: Proyectil APFSDS. Fuente: WikiTanks

- **Antiblindaje explosivo:**

- **APHE (Armor-Piercing High-Explosive / Perforante Alto Explosivo)**

Proyectil antiblindaje explosivo, que estalla justo cuando penetra el blindaje, aumentando el efecto de astillamiento. (Figura 34)

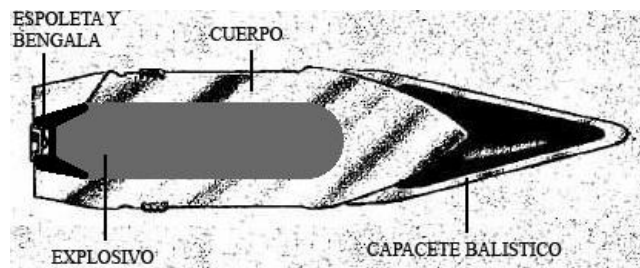


Figura 34: Proyectil APHE. Fuente: blog.portierramaryaire.com

- **HEAT (High Explosive Anti-Tank / Alto Explosivo Anti Tanque)**

Proyectil antiblindaje explosivo que utiliza energía química de carga hueca y su efecto Munroe para atravesar el blindaje de un carro de combate. Se utilizaron en la Segunda Guerra mundial y tras el blindaje reactivo y espaciado se desarrolló la munición de cargas huecas en tándem llamadas T-HEAT que son usadas en la actualidad. (Figura 35)

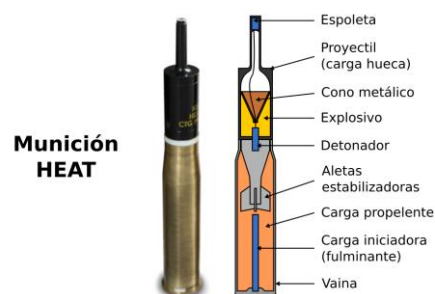


Figura 35: Proyectil HEAT. Fuente: WikiTanks

- **HESH/HEP (High Explosive Squash Head / Alto Explosivo de Cabeza Deformable)**

Proyectil antiblindaje explosivo efectivo tanto para blindados como para edificios e infantería. La ojiva está llena de un explosivo plástico dúctil y una espoleta de acción retardada maximizando el efecto de astillamiento. Se diseñó en la Guerra Fría pero ya ha quedado obsoleto. (Figura 36)

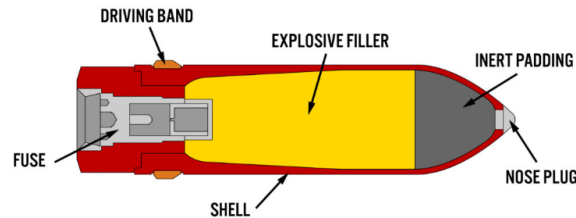


Figura 36: Proyectil HEAT. Fuente: Warthunder.com

- **Explosivo:**

- **HE (High Explosive / Alto Explosivo)**

Proyectil explosivo para atacar fortificaciones enemigas, grupos de infantería o vehículos con poco blindaje. Detona en el momento de impacto y tiene amplio radio de acción por onda de choque de la explosión y fragmentos generados. (Figura 37)

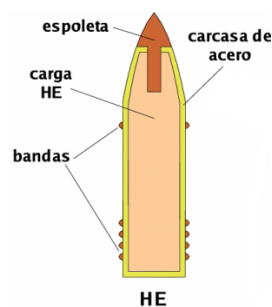


Figura 37: Proyectil HE. Fuente: WikiTanks

2.6.3. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA PENETRACIÓN

La capacidad de penetración de un proyectil depende de los siguientes parámetros:

- Velocidad de impacto y energía cinética.
- Densidad y dureza del penetrador.
- Ángulo de incidencia efectivo.
- Propiedades mecánicas y microestructurales del blindaje
- Existencia de capas, huecos o estructuras compuestas.

2.7. SIMULACIÓN APLICADA AL ANÁLISIS BALÍSTICO

Para el estudio del comportamiento del impacto del proyectil contra el blindaje se va a utilizar un modelo en elementos finitos (FEM-explicit) con el programa ABAQUS debido a su capacidad de resolver grandes deformaciones, altas velocidades y contacto no lineal.

Se va a simular secciones representativas del tanque en lugar del vehículo entero para reducir el coste computacional. El tipo de elemento a utilizar son sólidos hexaédricos (brick) y tetraédricos para las geometrías más complejas. La malla se utilizará con tamaños muy pequeños en la zona de impacto y gradualmente aumentará conforme se aleje del área de impacto.

El modelo de **Jonhson-Cook**^{[12] [13]} reproduce el comportamiento del material sujeto a grandes deformaciones, altas temperaturas y velocidades de deformación. Este modelo tiene en cuenta las condiciones más relevantes para el estudio como son las propiedades de: elasticidad, plasticidad, viscosidad y térmicas. Así, la **tensión de fluencia** definida por este modelo es:^{[14] [15]}

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0})(1 - T_H^m) \quad (Ec 1)$$

donde

$$T_H = \frac{T - T_0}{T_f - T_0} \quad (Ec 2)$$

Siendo ε la deformación plástica efectiva, $\dot{\varepsilon}$ la velocidad de deformación plástica efectiva, $\dot{\varepsilon}_0$ la velocidad de deformación de referencia tomada, T_f siendo la temperatura de fusión del material y T_0 la temperatura ambiente.

Las constantes del modelo son A,B,C,m y n. A representa el límite elástico a temperatura ambiente en condiciones de baja velocidad de deformación. B y n representan el efecto de endurecimiento por deformación del material. C y m representan sensibilidad del material a la velocidad de deformación y a la temperatura, respectivamente.

El **criterio de fallo de Johnson-Cook** se define por la siguiente ecuación:

$$\bar{\varepsilon}_f = [D_1 + D_2 e^{(D_3 \eta)}] \left[1 + D_4 \ln \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right] [1 + D_5 T_H] \quad (Ec 3)$$

Donde

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} \quad (Ec 4)$$

Siendo $\bar{\varepsilon}_f$ la deformación equivalente a la fractura, η la relación del estrés de presión adimensional (tensión triaxial), σ_m el promedio de las tres tensiones normales y $\bar{\sigma}$ el estrés equivalente de Von Mises.

3. ESTUDIO DEL PANZER V PANTHER

3.1. CONTEXTO HISTÓRICO Y DESARROLLO

El Panzer V, más conocido comúnmente como Panther, fue un carro de combate medio alemán desplegado durante la Segunda Guerra Mundial en los Frentes Oriental Y Occidental de Europa desde mediados de 1943 hasta el final de la guerra en 1945 (Figura 38). Fue creado para contrarrestar al tanque soviético T-34 y reemplazar los Panzer III y IV. Sin embargo, al Panzer IV, el carro más numeroso del Ejército Alemán, no logró reemplazarlo completamente y sirvieron juntos hasta el final de la guerra.^{[16] [17] [18]}

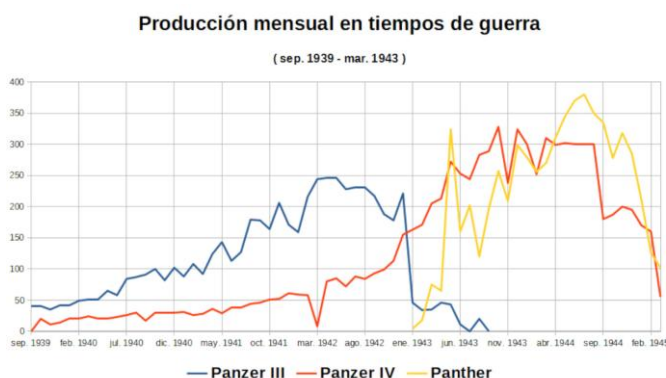


Figura 38: Producción mensual Panzer III, IV y V. Fuente: WikiTanks.

Está considerado uno de los mejores carros de combate de la Segunda Guerra Mundial por su excelente combinación de potencia de fuego, protección y gran movilidad. Disponía del mismo motor que el carro pesado Tiger, pero tenía una armadura frontal más eficiente (blindaje inclinado), era más ligero y rápido y portaba un cañón de alta velocidad, aunque de menor calibre, ofrecía mayor penetración de blindajes. Su desventaja fue una armadura lateral débil, que le hacía vulnerable a flanqueos y debido a su diseño apresurado tenía fallos mecánicos.

La idea del diseño era crear un carro de combate medio de 30 toneladas capaces de superar a los T-34 soviéticos. Para ello las compañías MAN y Daimler-Benz compitieron por hacerse con la fabricación. (Figura 39)

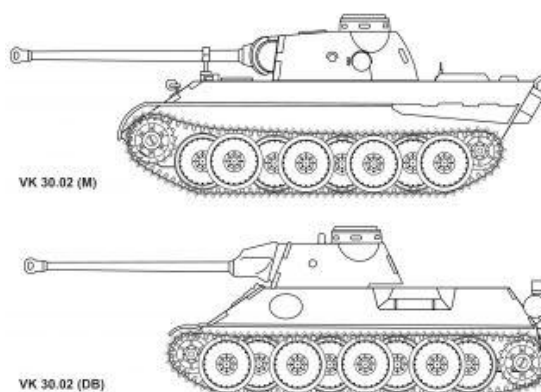


Figura 39: Prototipos MAN y Daimler-Benz. Fuente: WikiTanks.

Finalmente se decidió por el modelo de MAN por su motor y torreta ya existentes que provocaba un ahorro en coste y tiempo, aunque el diseño de Daimler-Benz era superior. Como la producción se retrasó por falta de recursos, se incluyó a otros fabricantes. (Figura 40)



Figura 40: Línea producción Panzer V en 1944. Fuente: Wikipedia.

	1943	1944	1945	Total
MAN	582	1.378	70	2.030
Daimler-Benz	543	1.175	211	1.929
Henschel	130			130
MNH	460	1.230	174	1.864
Demag	50			50
Total	1.765	3.783	455	6.003

Tabla 2: Ejemplares de Panzer V producidos por año y compañía. Fuente: WikiTanks

Los primeros Panther fabricados fueron designados como Panther Ausf. D. con 842 ejemplares entre enero y septiembre de 1943. La segunda versión fue denominada Panther Ausf. A. entre agosto de 1943 y mayo de 1944 con 2200 unidades completadas. Finalmente, llegó el Panther Ausf. G, la última versión de Panther producida entre 1944 y el final de la guerra, con 2953 unidades producidas. (Tabla 3)

Variante	Inicio producción	Fin producción	Cantidad
Prototipos (V1 y V2)	Sep. 1942	Sep. 1942	2
Preserie (Ausf.D1)	Fin. 1942	Fin. 1942	20
Ausf. D (Ausf.D2)	Ene. 1943	Sep. 1943	842
Ausf. A	Ago. 1943	Ago. 1944	2.200
Ausf. G	Mar. 1944	Abr. 1945	~2.961
PzBfWg Panther	May. 1943	Abr. 1945	329
Total	Ene. 1943	Abr. 1945	~6.003

Tabla 3: Ejemplares de Panzer V producidos por año y variante. Fuente: WikiTanks.

- **Movilidad**

Al ser un carro de combate medio, se caracteriza por su facilidad de moverse por el campo de batalla y rapidez.

En la tabla 5, se muestran las características del motor, transmisión y suspensión:

 Motor	Maybach HL 230 P30 V12 de 23,1 litros, 700 CV		 Potencia/peso	15,5 CV/t
 Combustible	730 litros, gasolina		 Altura suelo	56 cm
 Transmisión	ZF AK 7-200 sincronizada, 7 velocidades, 1 reversa		 Diámetro de giro mínimo	7,6 m
 Dirección	MAN, diferencial controlado mediante palancas			
 Rodaje	8 ruedas dobles intercaladas (por lado)		 Presión sobre el terreno	0,88 kg/cm ²
 Cadenas	66 cm (ancho) y 3,92 m de contacto/suelo			
 Suspensión	Barras de torsión dobles		 Pendiente máx.	30°
 Amortiguación	En las 2 primeras y últimas ruedas			
	Por carretera	Campo a través	Superación de obstáculos	
 Velocidad máx.	46-55 km/h	30 km/h	 Verticales	90 cm
 Consumo	280 l/100 km	700 l/100 km	 Zanjas	2,45 m
 Autonomía	250 km	100 km	 Vadeo	1,9 m

Tabla 5: Movilidad Panzer V. Fuente: WikiTanks

- **Armamento**

El cañón del Panzer V, supuso una ventaja en cuanto a perforación se refiere, solo superados por los Sherman Firefly.

En la tabla 6, se resumen las características de potencia de fuego de un Panther Ausf. A:

Cañón	7,5 cm KwK 42			Ángulo de elevación	+20° a -8° (manual)				
Calibre	75 mm	Largo	525 cm (L/70)	Giro torreta	360° en 15 seg. (hidráulica y manual)				
Mira	TZF 12a (monocular) (5 o 2,5x - 28° o 14°)			Cadencia de disparo	6 disparos/min				
Munición	79 proyectiles 75x640 mm R De tipo APCBC-HE, HE y APCR			Alcance	9.850 m (máximo)				
Contra una placa de blindaje de acero inclinada 30°									
Munición	Tipo	Peso proyectil	Velocidad de salida	Penetración en mm según distancia					
				100 m	500 m	1.000 m	1.500 m	2.000 m	2.500 m
PzGr. 39/42	APCBC-HE-T	6,8 kg	925 m/s	138	124	111	99	89	
PzGr. 40/42	APCR	4,75 kg	1.120 m/s	194	174	149	127	106	
Armamento secundario		2 o 3 ametralladoras MG 34 con 5.100 balas 7,92 mm en total <ul style="list-style-type: none"> • Una coaxial al cañón en el mantelete • Otra en el casco con soporte esférico y mira KZF 2 • Otra antiaérea en la cúpula del comandante (opcional) 							

Tabla 6: Potencia de fuego Panzer V. Fuente: WikiTanks

- **Tripulación:**

La tripulación del Panther está formada por (Tabla 7):

	Ubicación	Función principal	Equipo
Comandante	Torreta	Dirección y observación	Cupula, periscopios, radio (en coordinación)
Artillero	Torreta (delante/derecha)	Apuntar y disparar cañón	Visor del cañón, reguladores de tiro
Cargador	Torreta (izquierda)	Carga de munición	Almacenamiento de proyectiles, mecanismos de carga
Operador radio / Ametrallador	Casco frontal (derecha)	Radio y ametralladora de casco	Equipo radio, MG de casco, visores frontales
Conductor	Casco frontal (izquierda)	Conducción y maniobra	Periscopios, mandos de conducción

Tabla 7: Tripulación del Panzer V. Fuente: WikiTanks.

En la figura 43, se puede apreciar la localización de la tripulación en el interior del tanque:

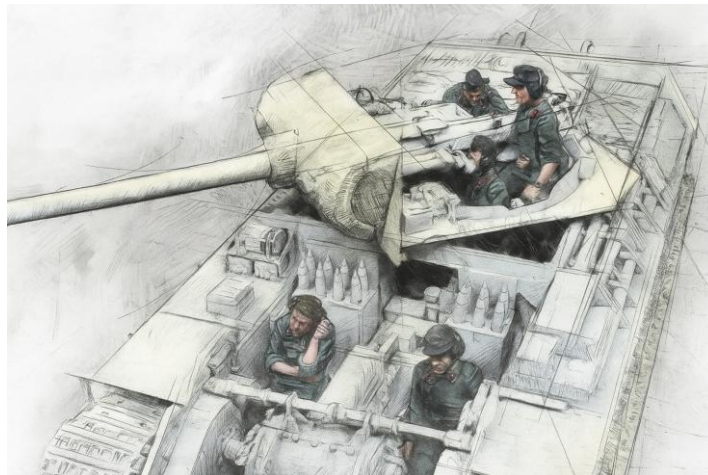


Figura 43: Tripulación del Panzer V. Fuente: super-hobby.es

4. ESTUDIO DEL M1A2 ABRAMS

4.1. CONTEXTO HISTÓRICO Y DESARROLLO

El M1A2 Abrams representa décadas de evolución en el diseño de carros de combate modernos convirtiéndose en el carro de combate principal del ejército de los Estados Unidos. Su origen se remonta a los años 70, cuando el ejército de los Estados Unidos identificó la necesidad de sustituir los M60 Patton por un nuevo carro capaz de superar los blindados soviéticos. Recibe su nombre en homenaje al general Creighton Abrams, comandante en jefe de las tropas estadounidenses en Vietnam de 1968 a 1972, y jefe de Estado Mayor del Ejército de los Estados Unidos de 1972 a 1974. [19] [20] [21]

Hay tres versiones operativas principales de Abrams, M1, M1A1 y M1A2, existiendo una intermedia que fue el M1A1 SA siendo una actualización de los M1A1 a los paquetes del M1A2. (Figura 44)

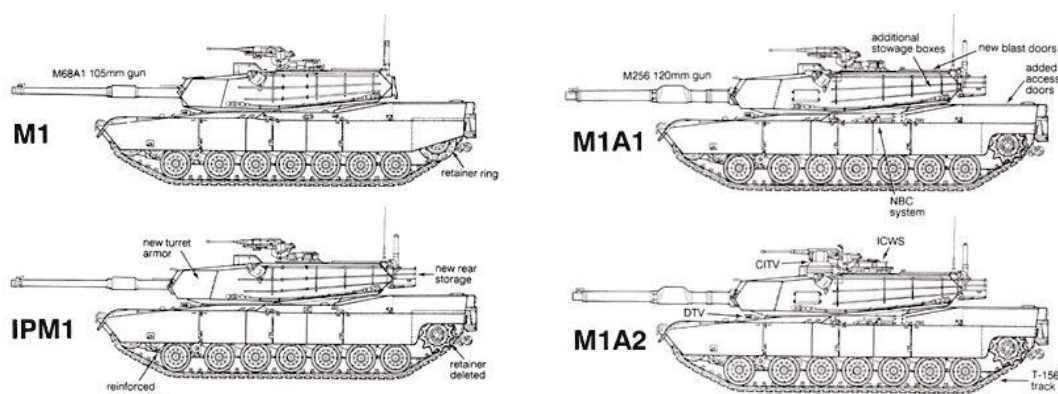


Figura 44: Versiones del M1 Abrams. Fuente: Pinterest.com

El M1 Abrams (1985) fue armado con el cañón M68A1 de 105 mm y ánima estriada Royal Ordnance L7 y con el primer blindaje Chobham que consistía en una combinación de placas de metal, bloques de cerámica y un espacio vacío.

En 1986 comenzó a producirse una versión actualizada, el M1A1 Abrams, que llevaba: el cañón de ánima lisa M256 de 120 mm desarrollado por la empresa Rheinmetall AG de Alemania para el tanque Leopard 2; un blindaje mejorado con uranio empobrecido y otros materiales clasificados; y un sistema de protección NBQ.

El M1A2 surgió en 1992 incorporando un visor térmico independiente para el comandante, una estación de armamento, un equipo de navegación y posicionamiento y un equipo completo digital de controles, pantallas con un bus de datos y blindaje compuesto de segunda generación de uranio empobrecido. Con el avance del tiempo surgieron paquetes de mejoras que se fueron incorporando:

- **SEP (System Enhancement Package) (1999):**

Se incorporó una nueva mira térmica de artillero de segunda generación y una actualización los componentes de armadura de uranio empobrecido de tercera generación con revestimiento de grafito.

- **SE Pv2 (2007):**

Se agregó la estación de ametralladora operada remotamente como arma secundaria estándar, pantallas a color, interfaces mejoradas, un nuevo sistema operativo, teléfono de infantería como equipamiento estándar, una transmisión mejorada para una mayor durabilidad, y posibilidad de mejorar el blindaje lateral con el kit de blindaje reactivo explosivo ARAT del paquete TUSK (Tank Urban Survival Kit) diseñado para la supervivencia urbana en la Guerra de Irak. (Figura 45)



Figura 45: Paquete SEPv2 M1A2 Abrams. Fuente: Wikipedia.

- **SE Pv3(2017):**

Se mejoró la eficiencia de consumo de combustible, nuevo sistema de gestión del estado del vehículo (VHMS), sistemas electrónicos modulares (LRM) para facilitar el mantenimiento y una unidad de energía auxiliar (APU) para hacer funcionar la electrónica con el motor apagado, mejores comunicaciones y redes, un enlace de datos ADL para emplear municiones de explosión en el aire, un FLIR mejorado que usa infrarrojos de onda larga y media y la estación de armas remota de bajo perfil CROWS. En cuanto a protección incorporó un paquete de blindaje contra explosivos improvisados, un paquete de blindaje de nueva generación (NGAP) con más protección balística pasiva agregada a las caras de la torreta, junto con nuevos montajes de armadura reactiva explosiva ARAT y sistemas de protección activa Trophy instalados en los lados de la torreta.

- **SE Pv4:** Actualmente se encuentra en desarrollo.

El Abrams ha mostrado su eficiencia en diferentes conflictos, incluyendo la Guerra del Golfo (1991), Guerra de Bosnia-Herzegovina y Kosovo (1992-1995), Guerra de Irak (2003-2011), Guerra de Afganistán (2001-2021), Guerra civil de Yemen (2014-actualidad) y la Guerra ruso-ucraniana (2022-actualidad).

4.2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

- Dimensiones y peso:

Las dimensiones del M1A2 Abrams son de 9,77m incluyendo cañón y de 7,93m solo el casco, una anchura de 3,66m y una altura de 2,44m. El peso varía según los paquetes entre 62 y 66 toneladas. (Figura 46)

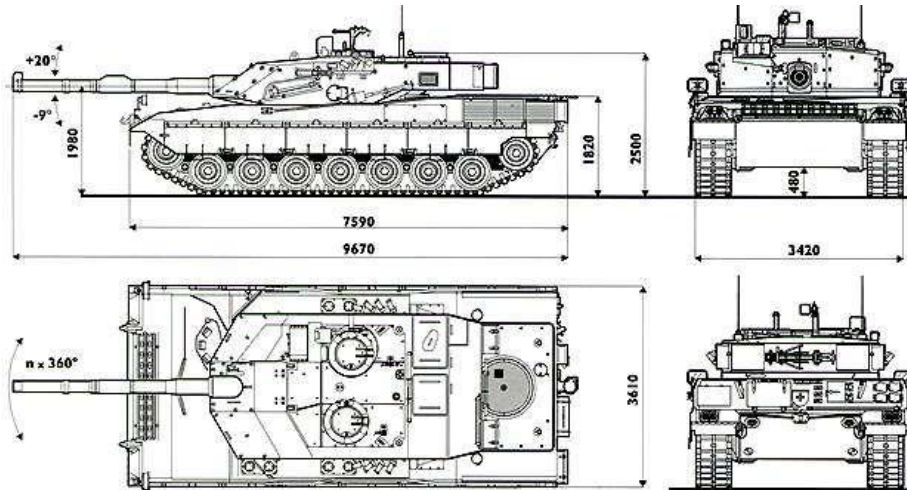


Figura 46: Dimensiones del M1A2 Abrams. Fuente: Pinterest.com

- Blindaje:

El blindaje del Abrams se caracteriza por disponer de un blindaje Chobham, un blindaje compuesto formado por azulejos cerámicos entre una matriz metálica y elementos elásticos. (Figuras 47 y 48)

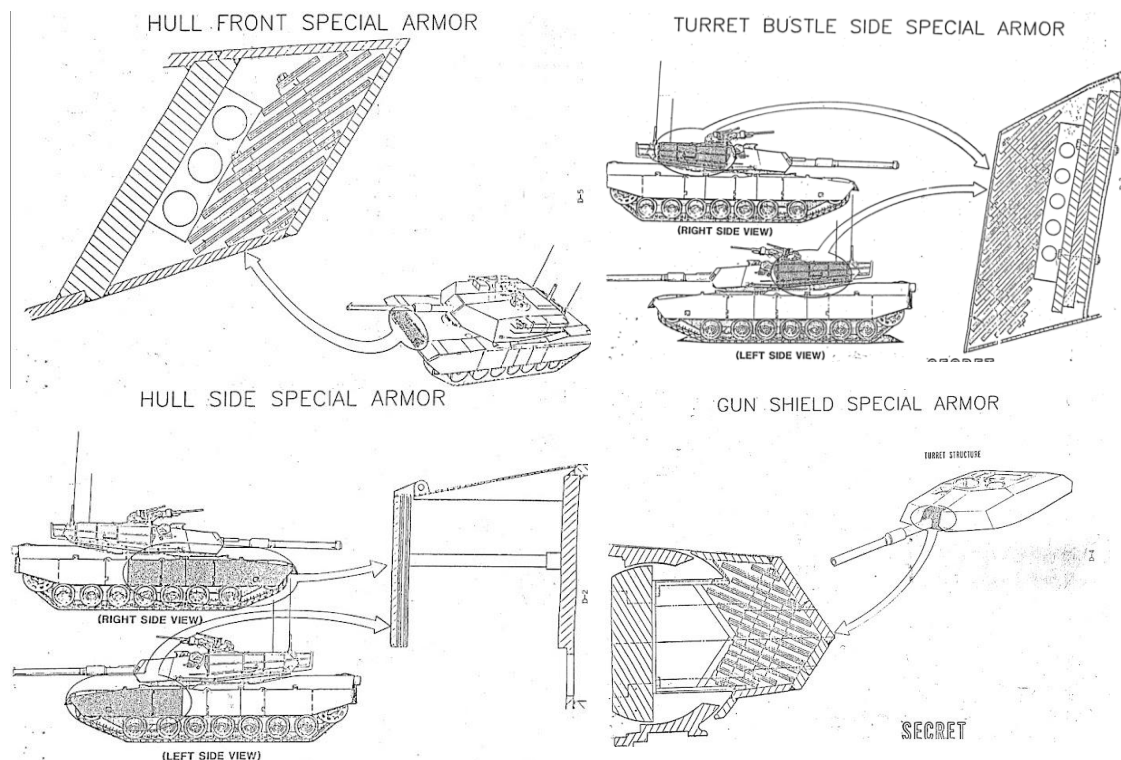


Figura 47: Blindaje del M1A2 Abrams. Fuente: Wikipedia

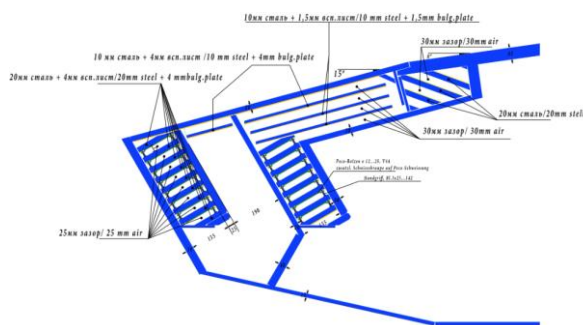


Figura 48: Glacis del M1A2 Abrams. Fuente: quora.com^[22]

- Movilidad

El empleo de una turbina de gas es una de las características más distintivas del Abrams. Aunque presenta un alto consumo de combustible y complejidad en mantenimiento, proporciona una relación potencia/peso muy elevado, bajo nivel de vibraciones y una aceleración suave y rápida, lo que favorece la maniobrabilidad y la estabilidad del sistema de tiro incluso en movimiento. (Tabla 8)

	Avco Lycoming AGT1500 Turbina de gas, 1.500 CV		25,4 CV/t	
	1.909 litros, multicomcombustible		48 cm	
	Allison DDA X-1100-3B, automática			
	Manillar de dirección			
	7 ruedas dobles independientes (por lado)		0,96 kg/cm ²	
	63,5 cm (ancho)			
	Barras de torsión		60% (frontal), 40% (lateral)	
	Amortiguadores rotativos			
	Por carretera	Campo a través	Superación de obstáculos	
	67 km/h			100 cm
	450 l/100 km	~890 l/100 km		2,7 m
	465 km	50-200 km		1,2 m (2 m con prep.)

Tabla 8: Movilidad M1A2 Abrams. Fuente: WikiTanks

- **Armamento**

El cañón M256 proporciona alta precisión a largo alcance y capacidad de penetración superior frente a blindajes modernos. La combinación de su sistema de control digital y estabilización avanzada permite disparos precisos incluso con el tanque en movimiento, algo que lo diferencia de los carros de generaciones anteriores.

En la Tabla 9, se muestra las características de potencia de fuego del Abrams:

Cañón	Watervliet Arsenal M256 (licencia Rheinmetall)			Ángulo de elevación	-9° a +20° (eléctrico)				
Calibre	120 mm	Largo	L/44	Giro torreta	360° en 9 seg. (hidráulico)				
Mira	Mira térmica con telémetro láser			Cadencia de disparo	8,5 disparos/min				
Munición	40 proyectiles			Alcance	3.000 m (efectivo)				
Contra una placa de blindaje de acero RHA									
Munición	Tipo	Peso proyectil	Velocidad de salida	Penetración en mm según distancia					
				100 m	500 m	1.000 m	1.500 m	2.000 m	2.500 m
M829A1 <i>Silver Bullet</i>	APFSDS (uranio)	(con sabot) 9 kg	1.575 m/s					>540	
M829A2	APFSDS (uranio)	9 kg	1.675 m/s						
M829A3 <i>Super Sabot</i>	APFSDS (uranio)	10 kg	1.555 m/s					800	
M830A1	HEAT-MP-T	11,4 kg	1.140 m/s	>480	>480	>480	>480	>480	
Armamento secundario	Ametralladora coaxial M240 de 7,62 mm Ametralladora media M240 de 7,62 mm en la escotilla del cargador Ametralladora pesada M2HB de 12,7 mm en la escotilla del comandante								

Tabla 9: Potencia de fuego M1A2 Abrams. Fuente: WikiTanks.

- Tripulación

La tripulación del Abrams está formada por (Tabla 10):

	Ubicación	Función principal	Equipo
Comandante	Derecha en la torreta	Coordinación y observación	CITV, IVIS, comunicaciones
Artillero	Delante del comandante	Disparo y puntería	Sistema de tiro, telémetro láser
Cargador	Izquierda en la torreta	Carga de munición y apoyo	Almacenamiento de munición, M240
Conductor	Frontal del casco	Movilidad del tanque	Turbina, transmisión, visores frontales

Tabla 10: Potencia de fuego M1A2 Abrams. Fuente:WikiTanks

En la Figura 49, se puede apreciar la localización en el interior del tanque:

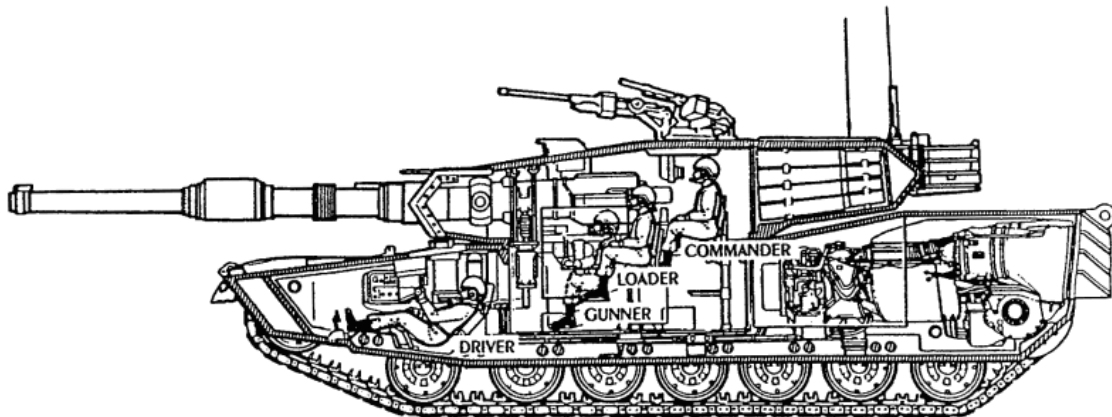


Figura 49: Ubicación tripulación en el M1A2 Abrams

5. DISEÑO Y MODELADO EN SOLIDWORKS

Para el diseño de los carros de combate, se ha usado el programa SolidWorks, que permite generar modelos CAD precisos y de manera intuitiva. El proceso de modelado se ha centrado en reproducir las configuraciones de los blindajes, más que en la reproducción exacta de todos los componentes mecánicos, para posteriormente exportar el 3D a otro programa de simulación de impacto como es ABAQUS.

5.1. DISEÑO DEL PANZER V

El modelado se inició a partir de los planos bidimensionales y esquemáticos técnicos obtenidos de la bibliografía histórica y fuentes abiertas. Las proporciones del tanque no son exactas, sino aproximadas ya que en el diseño se ha ido variando la geometría para que todos los componentes encajen perfectamente sin interferencias.^[23]

En este caso, solo se ha diseñado el blindaje externo ya que es el objeto de este análisis, obviando componentes internos del vehículo.

El diseño del blindaje se divide en los siguientes componentes principales:

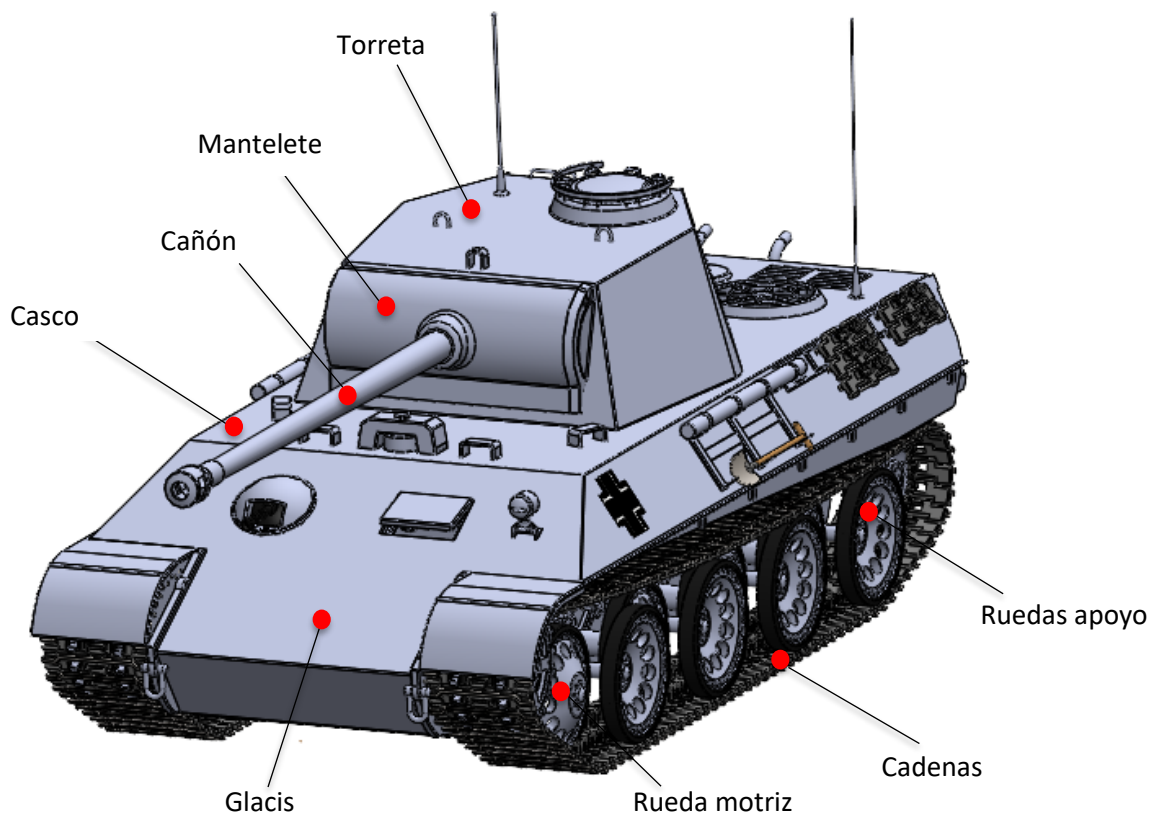


Figura 50: Partes principales del Panzer V. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestran los diferentes componentes por separado (Figuras 51, 51 y 52):

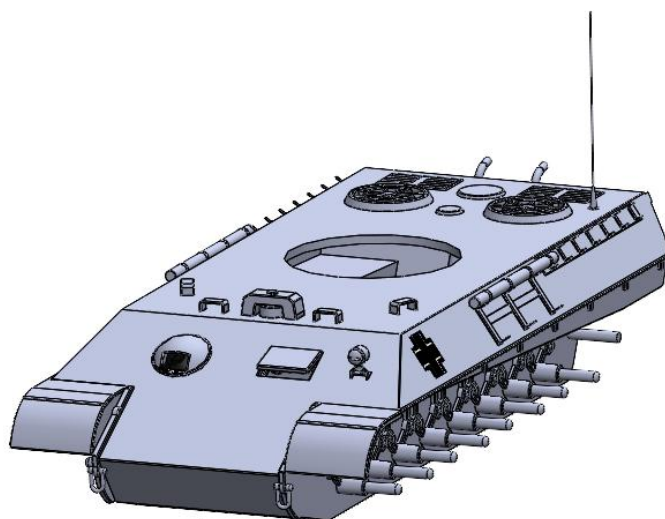


Figura 51: Casco (hull) del Panzer V. Fuente: Elaboración propia.

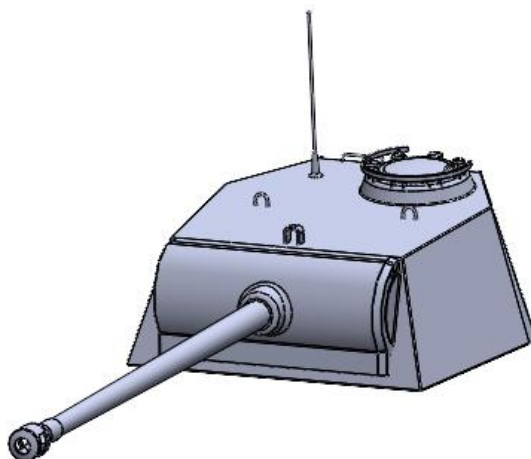


Figura 52: Torreta y cañón de 75mm KwK 42 del Panzer V. Fuente: Elaboración propia.



Figura 53: Ruedas y orugas del Panzer V. Fuente: Elaboración propia.

5.2.DISEÑO DEL M1A2 ABRAMS

La información necesaria para el diseño del blindaje del M1A2 Abrams es confidencial, por lo que para su diseño se realizó dibujando pieza a pieza una maqueta a escala 1/35 de la marca RFM. El diseño no es una copia idéntica de la realidad, sino una aproximación de la geometría del blindaje. (Figuras 54 y 55) ^[24]



Figura 54: Maqueta a escala 1/35 del tanque M1A2 Abrams. Fuente: RFM

Además, como se ha explicado anteriormente, los tanques modernos tienen materiales compuestos, espaciados e inclinados de manera que maximiza la protección de la tripulación. Esta información tampoco es accesible al público por lo que se ha decidido realizar el blindaje con acero de alto límite elástico de manera lo más sencilla posible para su posterior análisis.

En este caso, la maqueta contiene el interior, por lo que el diseño es más completo que el modelo del Panzer V.

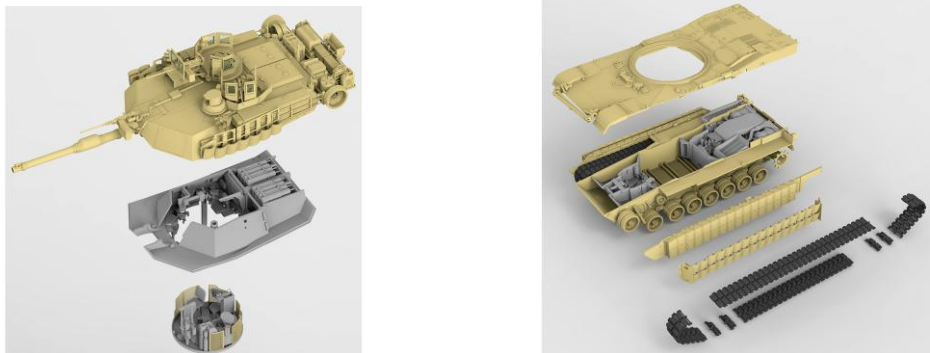


Figura 55: Interior maqueta a escala 1/35 del tanque M1A2 Abrams. Fuente: RFM

El diseño se divide en los siguientes componentes (Figura 56):

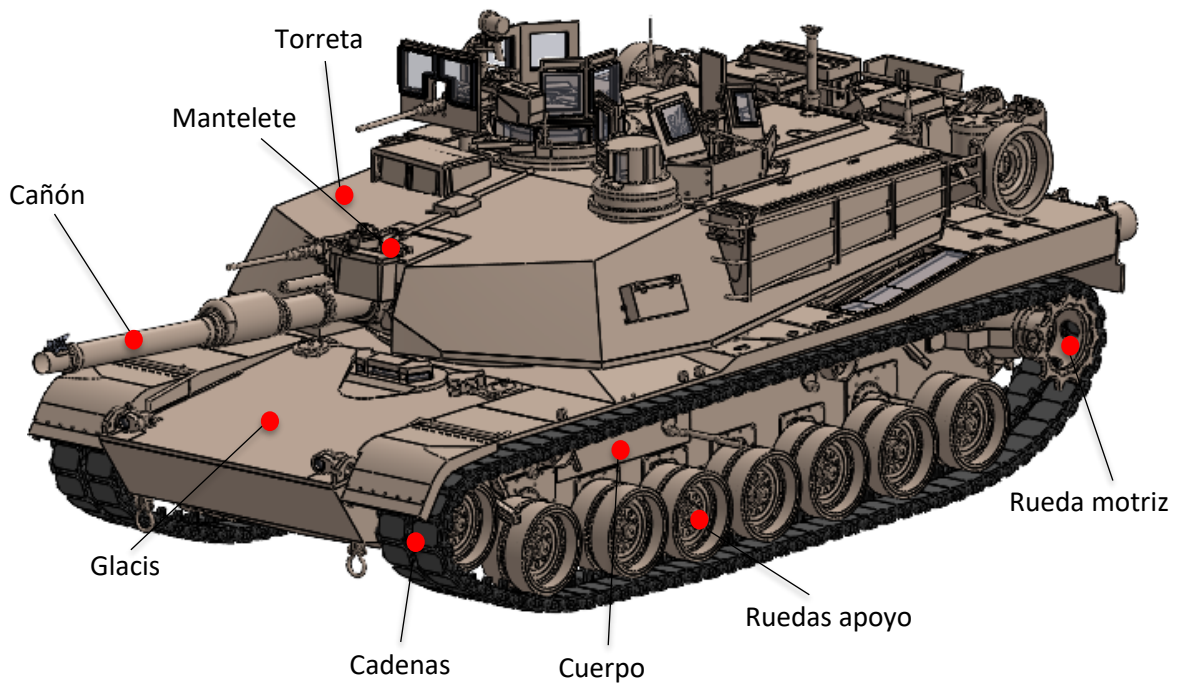


Figura 56: Partes principales del M1A2 Abrams. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se detallan los diferentes componentes del casco por separado (Figuras 57, 58 y 59):

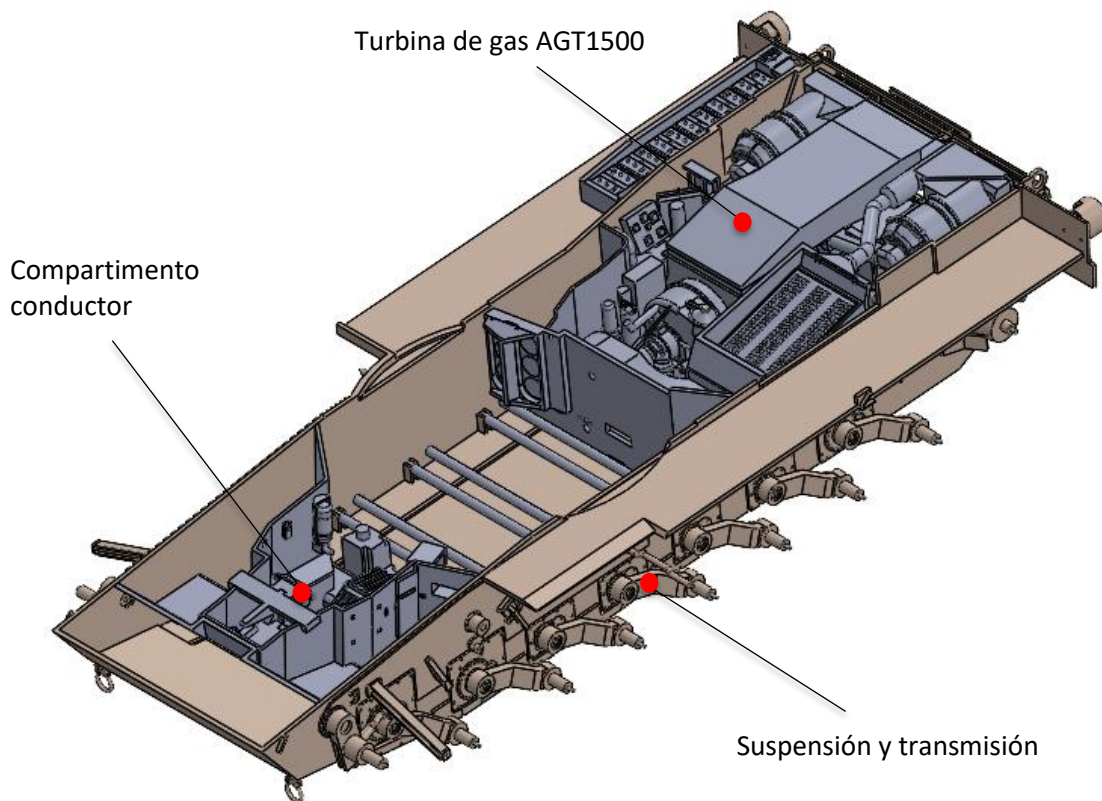


Figura 57: Casco inferior del M1A2 Abrams. Fuente: Elaboración propia.

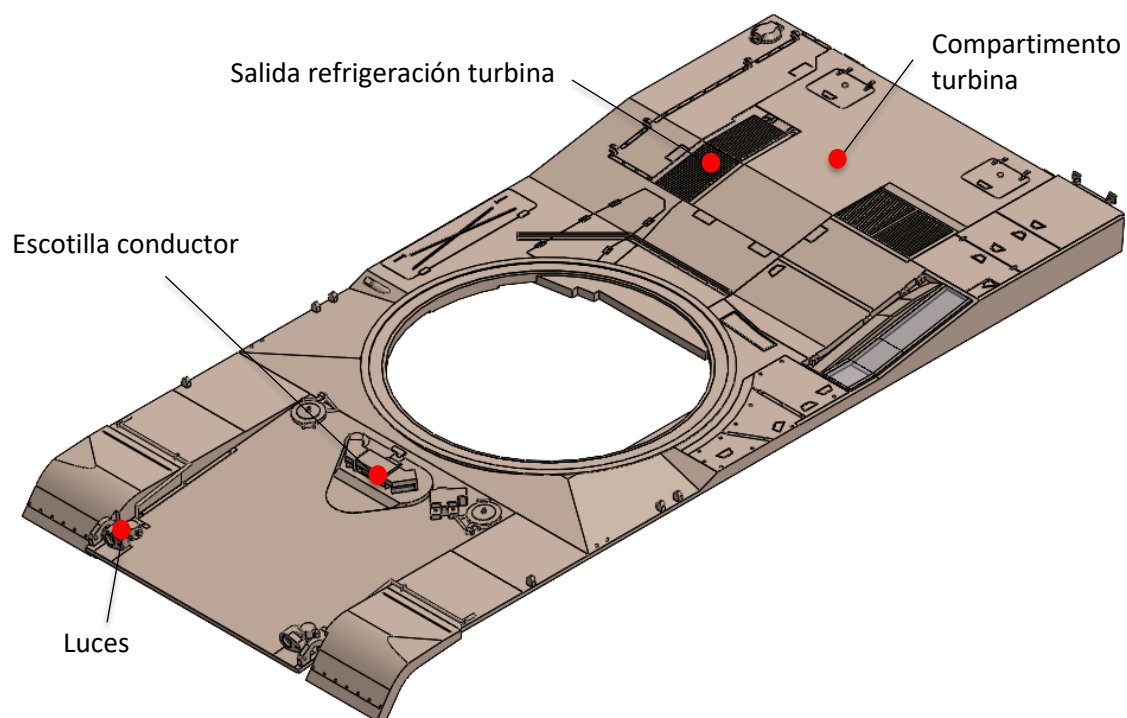


Figura 58: Casco superior del M1A2 Abrams. Fuente: Elaboración propia.

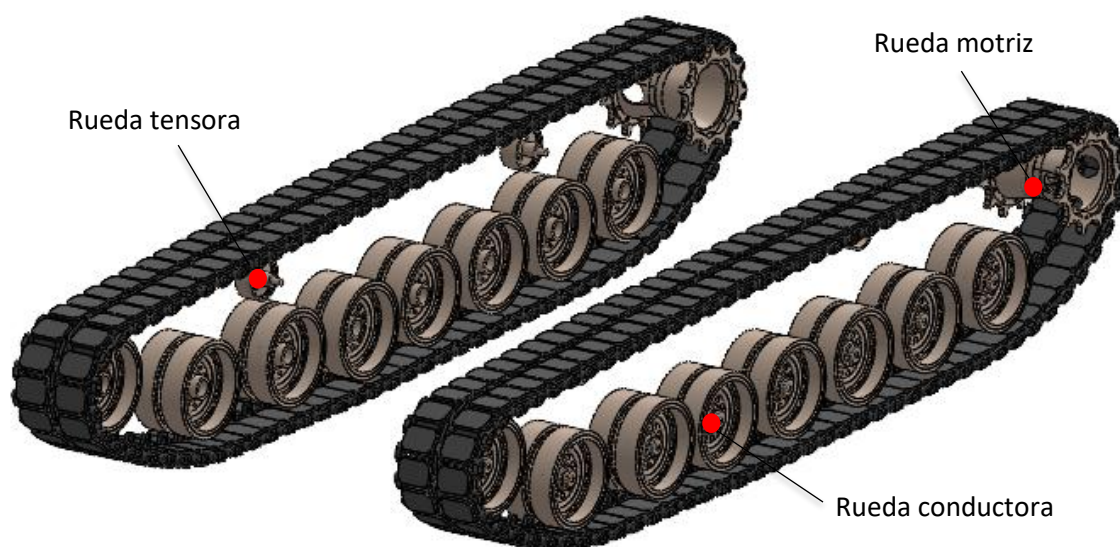


Figura 59: Ruedas y orugas del M1A2 Abrams. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 60, se puede ver el diseño de la torreta superior del M1A2 Abrams:

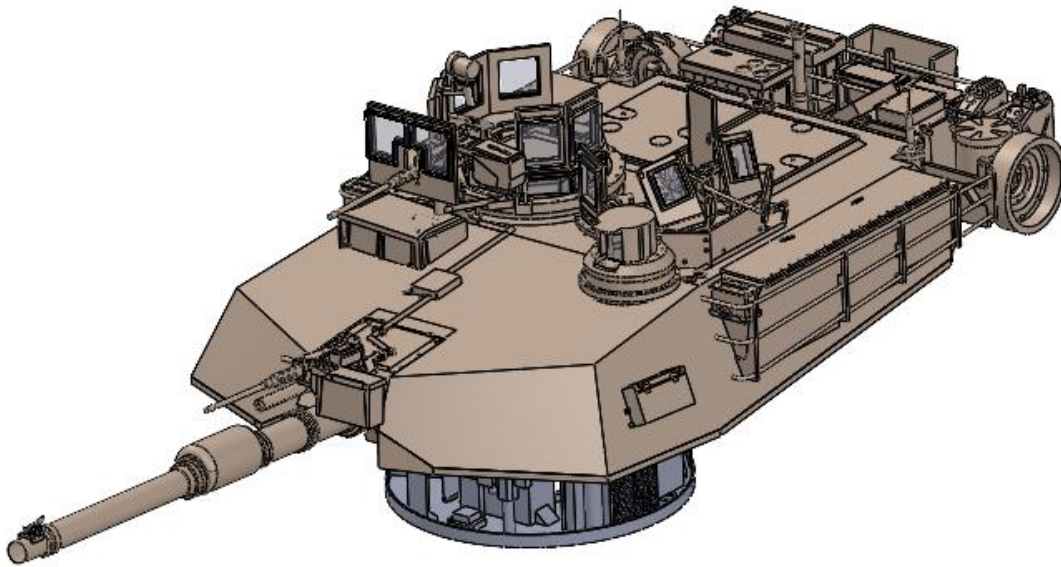


Figura 60: Torreta del M1A2 Abrams. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el interior de la torreta (Figuras 61, 62, 63 y 64):

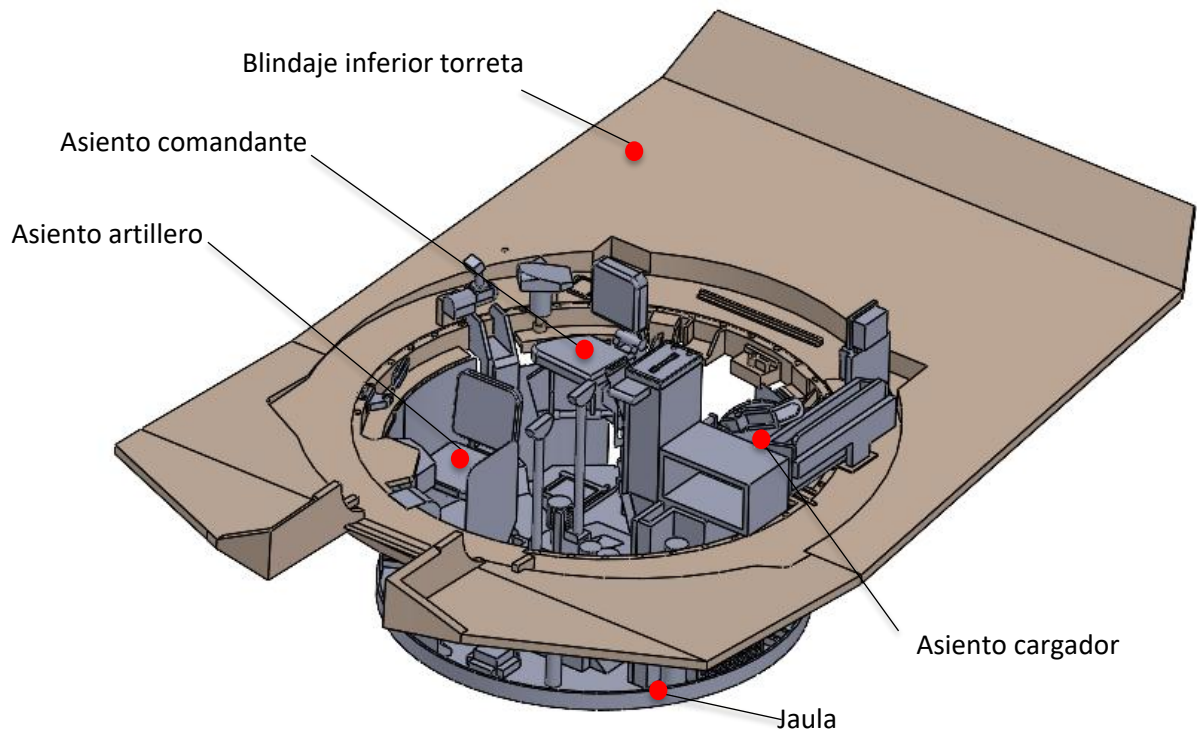


Figura 61: Torreta inferior del M1A2 Abrams. Fuente: Elaboración propia.

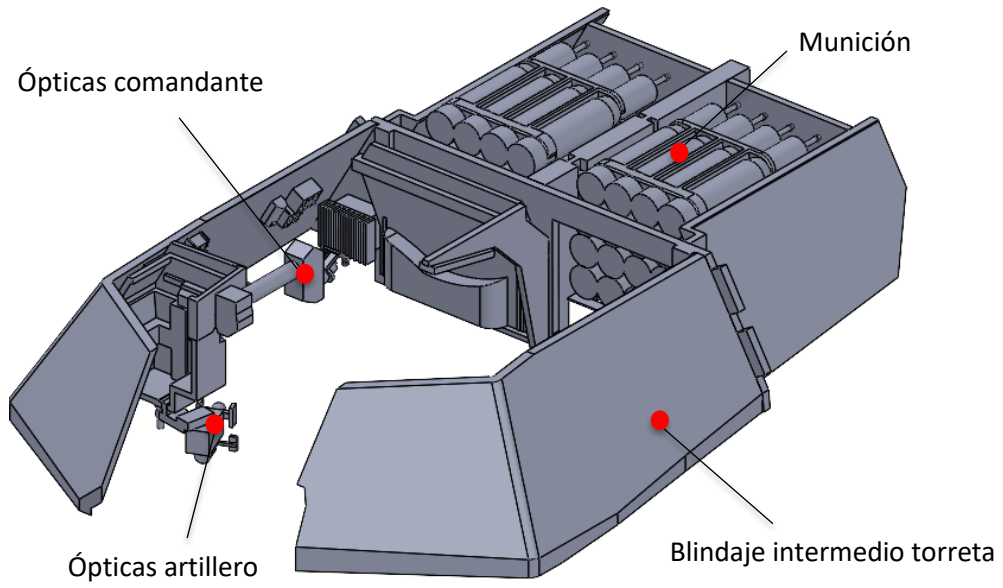


Figura 62: Torreta media del M1A2 Abrams. Fuente: Elaboración propia.

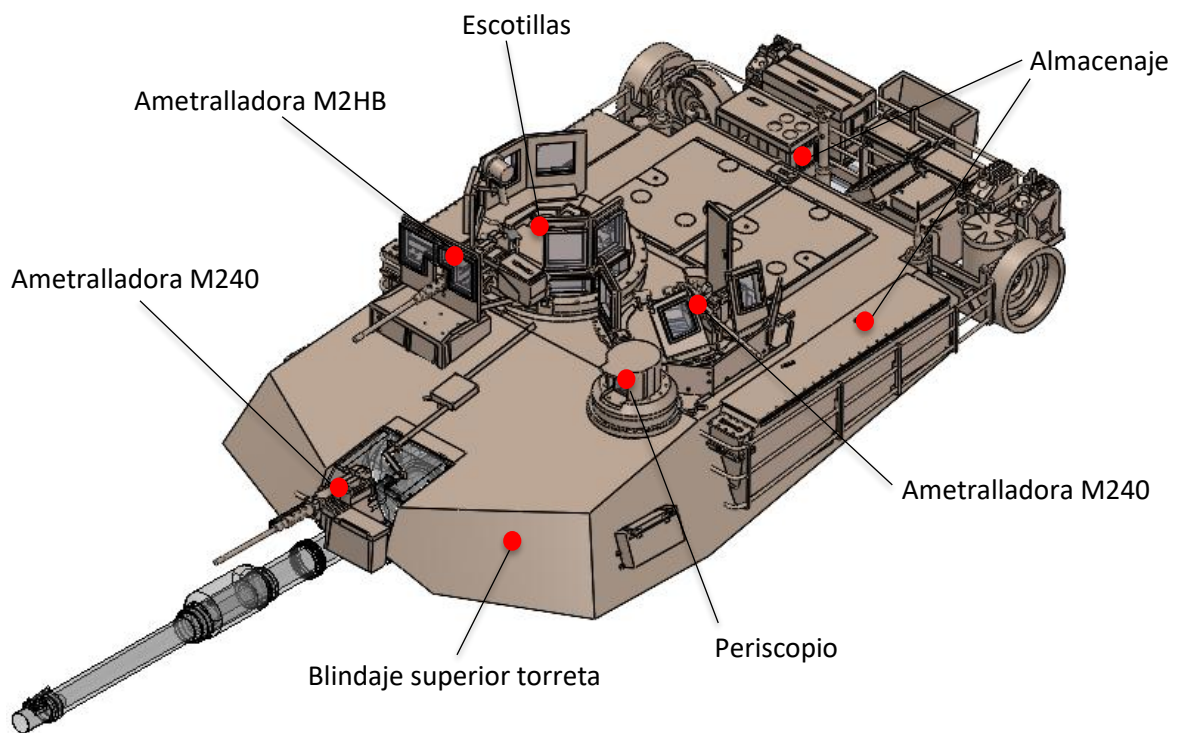


Figura 63: Torreta superior del M1A2 Abrams. Fuente: Elaboración propia.

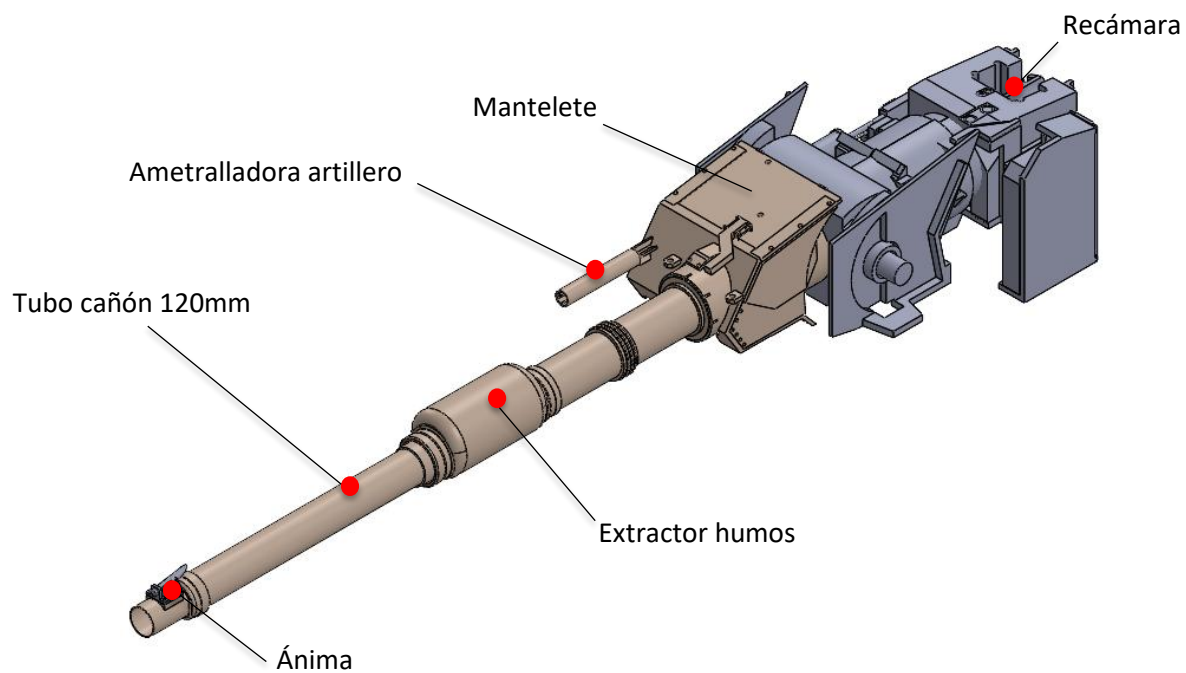


Figura 64: Cañón Rheinmetall 120 mm del M1A2 Abrams. Fuente: Elaboración propia.

6. ANÁLISIS ANTE EL IMPACTO DEL PROYECTIL M72 75mm

En este capítulo se evaluará mediante simulaciones en ABAQUS las partes más representativas e importantes de ambos tanques diseñadas en SolidWorks frente al impacto del mismo proyectil.

El proyectil escogido es una munición de 75 mm AP M72. Su elección se debe a la simplicidad de ser un proyectil perforante y su conocimiento de dimensiones y materiales utilizados para su fabricación. Fue una de las municiones perforantes más utilizadas por los norteamericanos en la Segunda Guerra Mundial. Era un proyectil macizo y endurecido diseñado para perforar blindajes por energía cinética. La velocidad de salida era de unos 600 m/s con un peso de 6,5 kg utilizado principalmente en los cañones de 75mm M3 de los tanques M4 Sherman.^[25]

En la Figura 65, se muestran las dimensiones utilizadas para su diseño.^{[26] [27]}

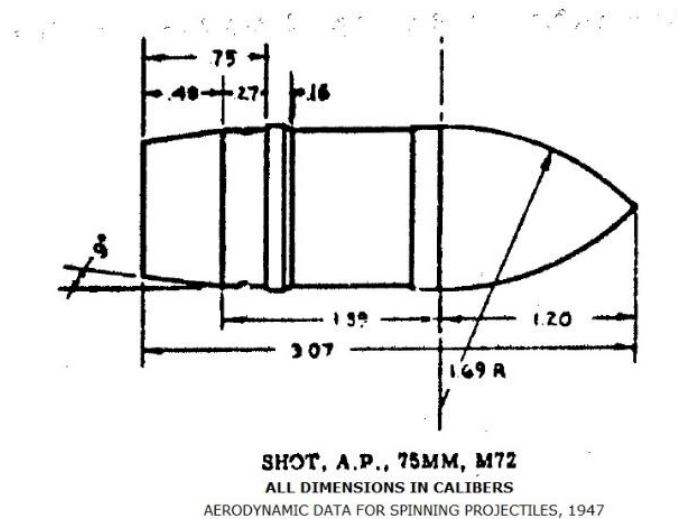


Figura 65: Plano munición 75mm M72 AP. Fuente: forum.cartridgecollectors.org

Y se diseña en SolidWorks para posteriormente introducirlo en ABAQUS:

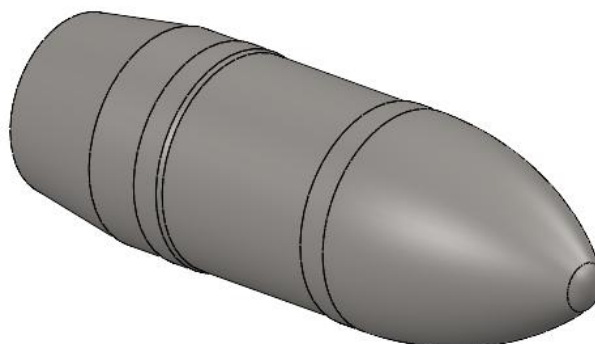


Figura 66: Munición 75mm M72 AP. Fuente: Elaboración propia.

Las zonas de impacto seleccionadas son aquellas que es más probable el impacto del proyectil que son: glacis, mantelete y lateral del casco. Para cada una de ellas se estudiarán diferentes ángulos de impacto y el efecto de la temperatura mediante Johnson-Cook.

El proyectil se considera con una rigidez muy superior al blindaje simplificando el cálculo considerándolo sólido rígido.

Las tablas de propiedades de materiales utilizados en el blindaje de los tanques están detalladas en el Anexo I.

6.1. SIMULACIÓN EN ABAQUS EXPLICIT

El estudio de impacto de un proyectil sobre blindaje requiere del uso de herramientas numéricas capaces de representar fenómenos no lineales, que incluyen grandes deformaciones, altas velocidades de deformación, incrementos de temperatura y fractura o fallo del material. En este contexto, el módulo Abaqus/Explicit y el modelo de Johnson Cook constituyen una combinación utilizada en el campo de la balística computacional y análisis de penetración.

Se van a realizar para cada parte del tanque (glacis, lateral y mantelete) dos simulaciones siendo una de ellas con el ángulo más probable de impacto y otra con un ángulo más desfavorable, y además, para cada una de ellas analizando el efecto de la temperatura aplicando o no el modelo de Johnson-Cook.

Los pasos realizados en ABAQUS para la importación del CAD, localización, asignación de material, aplicación de condiciones de contorno, mallado y simulación se detallan en el Anexo II.

6.2. ANÁLISIS COMPARATIVO

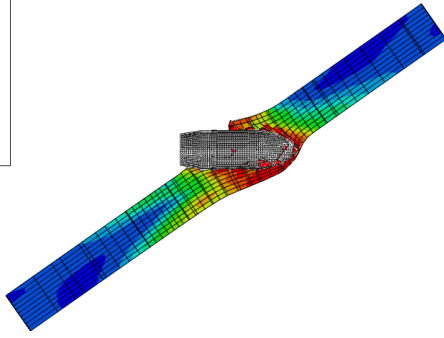
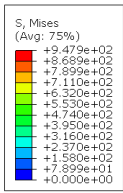
En este apartado se pretende analizar los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas del impacto del proyectil AP M72 de 75 mm sobre los blindajes de los tanques Panzer V Panther y M1A2 Abrams.

Dado que las simulaciones y resultados gráficos se incluyen en los Anexos III y IV, se va a realizar una síntesis de estos.

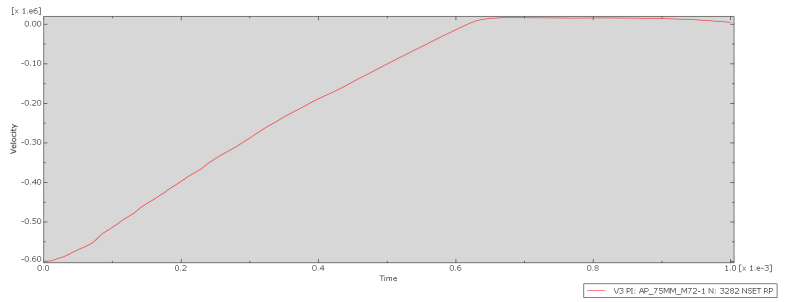
Del análisis de las simulaciones se observa que:

Glacis:

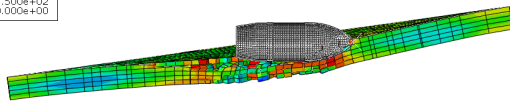
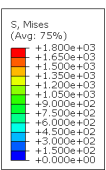
- El glacis del Panzer V está peor optimizado ya que requiere mucho más espesor para detener el proyectil 85 mm espesor a 55º frente a 45 mm espesor a 8º. Esto es debido a que una mayor angulación hace que aumente el espesor efectivo además de ser un material más resistente.
- En ambos modelos favorables se produce una penetración parcial debido a que la tensión de VM es superior al límite de rotura, pero a medida que va penetrando la energía cinética del proyectil disminuye frenándolo hasta detenerlo.



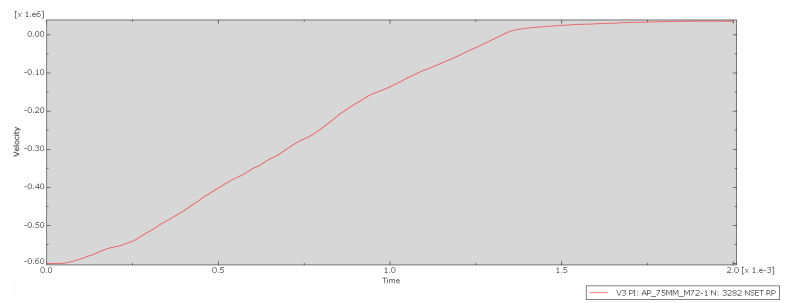
Step: Step-1
 Increment 1094: Step Time = 1.0000E-03
 Primary Var: S, Mises
 Deformed Var: U_Deformation Scale Factor: +1.000e+00



Glacis 55° sin JC del Panzer V. Anexo III, Simulación 1

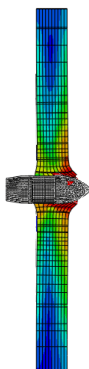
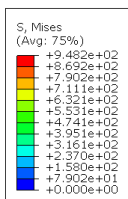


Step: Step-1
 Increment 778: Step Time = 1.0000E-03
 Primary Var: S, Mises
 Deformed Var: U_Deformation Scale Factor: +1.000e+00

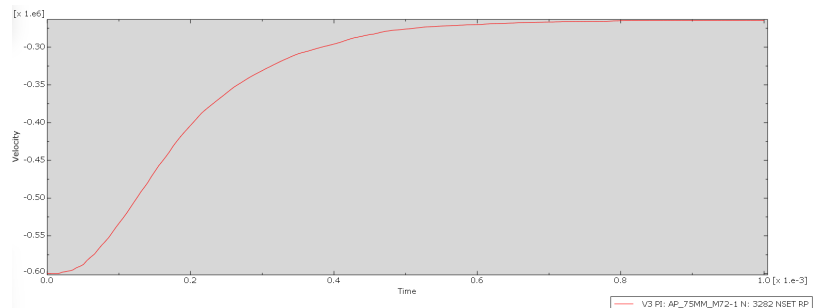


Glacis 8° sin JC del M1A2 Abrams. Anexo IV, Simulación 13

- En los casos más desfavorables que el proyectil impacta perpendicularmente, no se consigue detener.



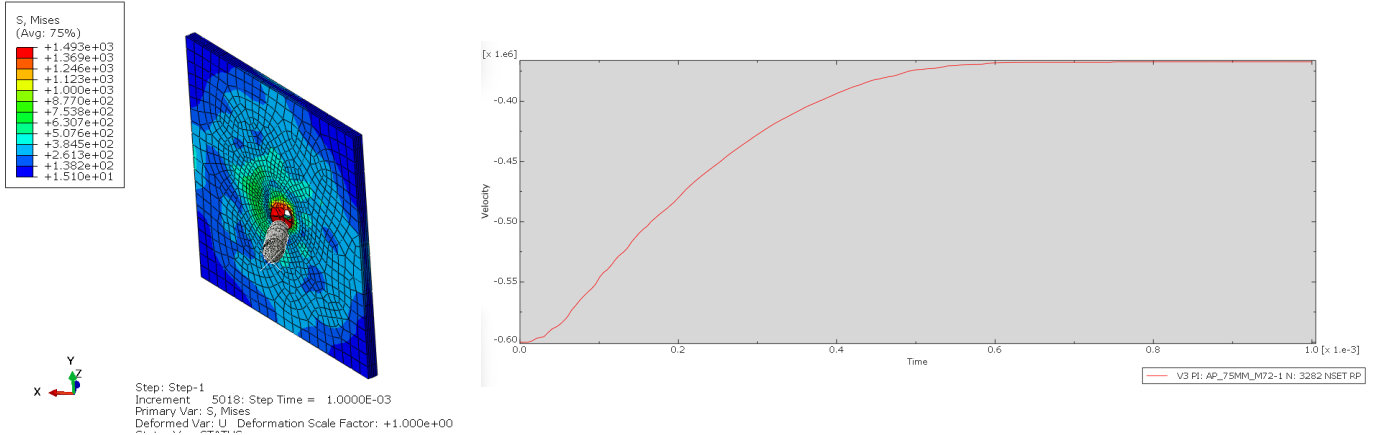
Step: Step-1
 Increment 331: Step Time = 3.5084E-04
 Primary Var: S, Mises
 Deformed Var: U_Deformation Scale Factor: +1.000e+00



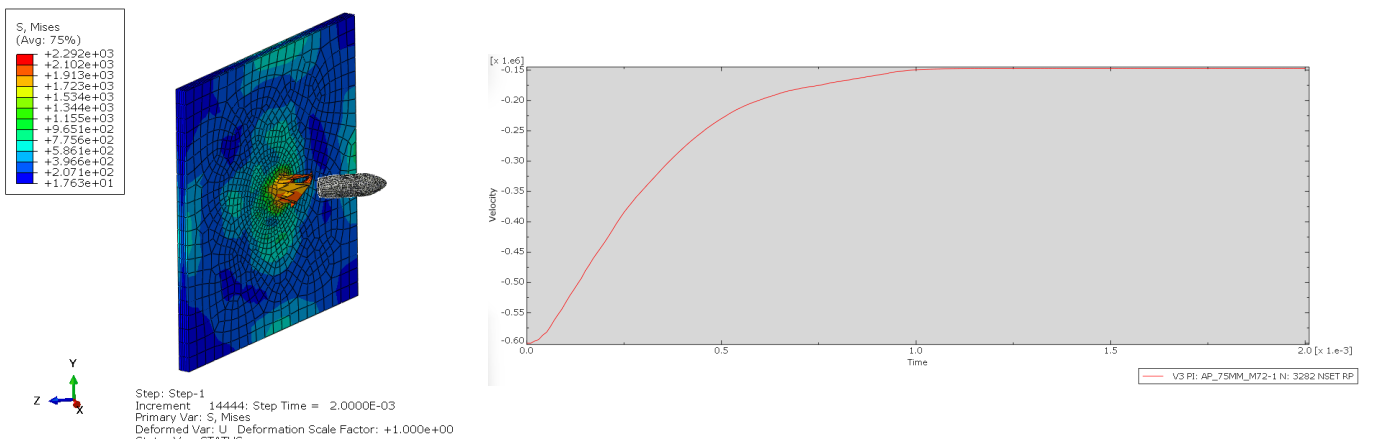
Glacis 90° sin JC Panzer V. Anexo III, Simulación 3

Lateral:

- En ambos tanques no se consigue detener el proyectil debido a un menor espesor en el blindaje (40 mm en ambos tanques), aunque en el M1A2 Abrams, al tener un material más resistente consigue frenarlo más que en el Panzer V.



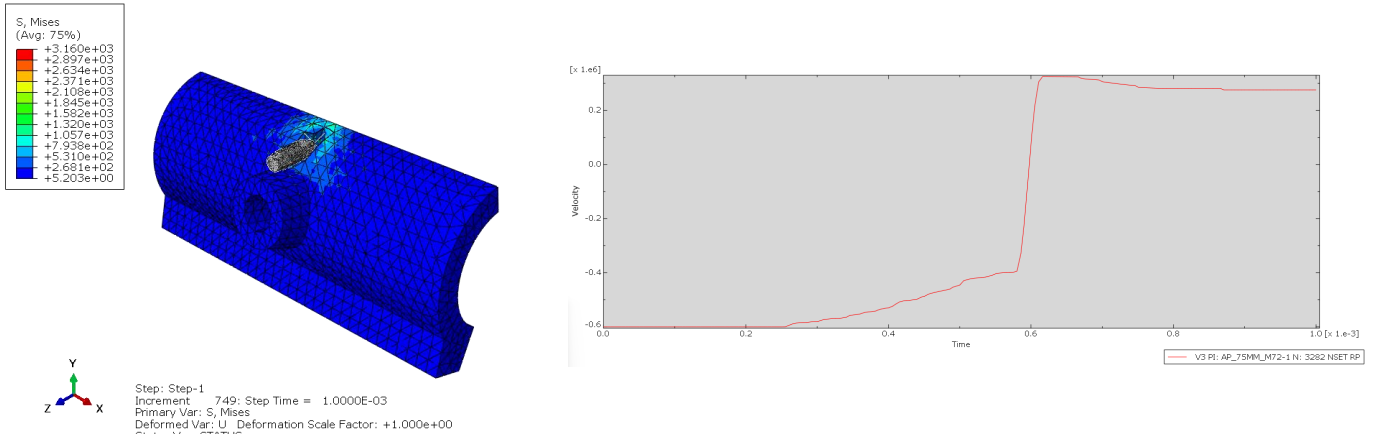
Lateral 45º con JC del Panzer V. Anexo III, Simulación 6



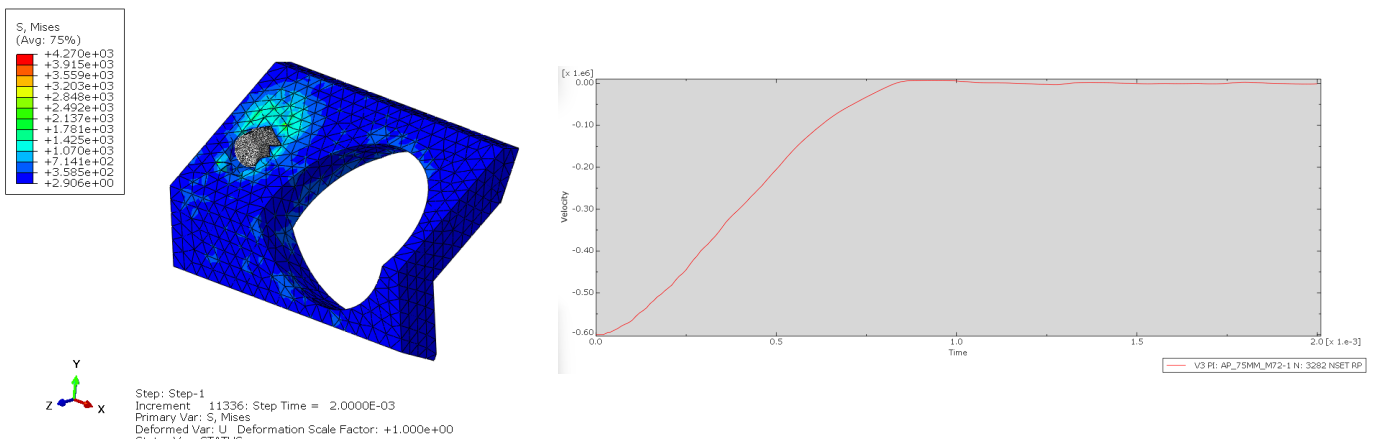
Lateral 45º con JC del M1A2 Abrams. Anexo IV, Simulación 18

Mantelete:

- El mantelete del Panzer V está mejor optimizado, consiguiendo detener el proyectil en el impacto favorable debido a la curvatura aumente su espesor efectivo, en cambio el M1A2 Abrams no consigue detener el proyectil salvo en una situación. En el caso de impacto perpendicular no se consigue detener en ninguno de los dos tanques.



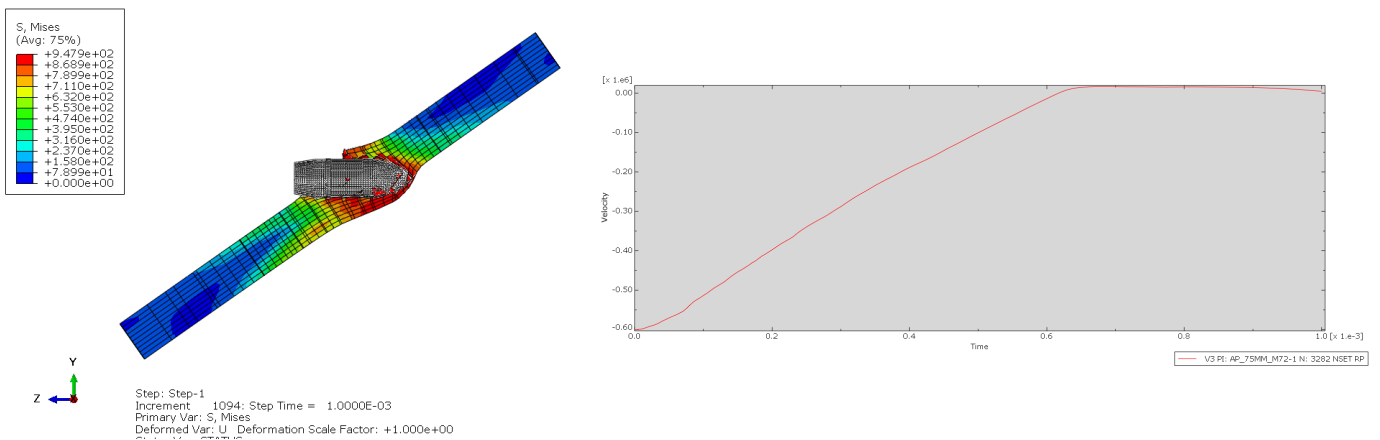
Mantelete 20º con JC del Panzer V. Anexo III, Simulación 10



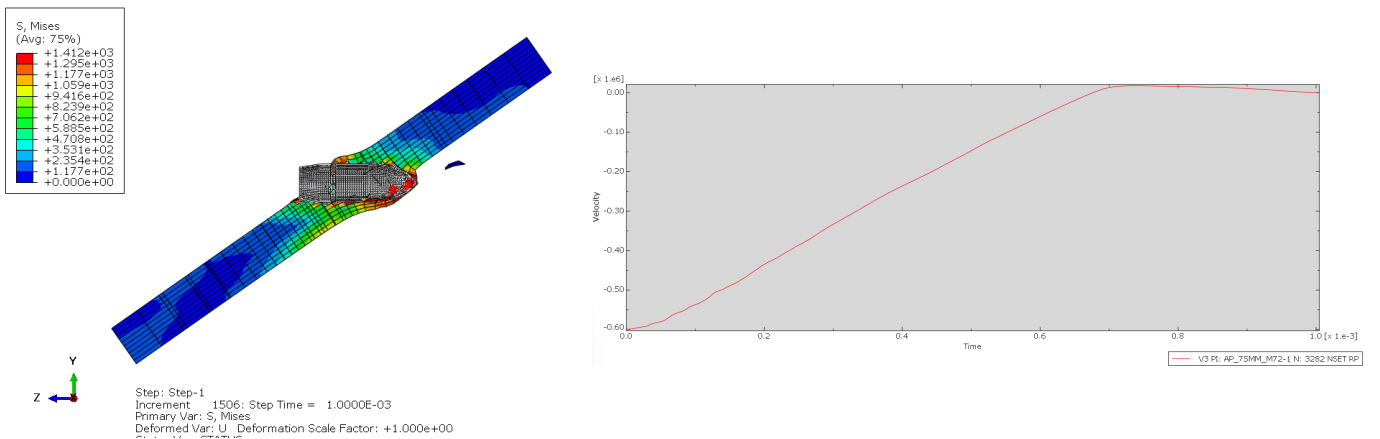
Mantelete 20º con JC del M1A2 Abrams. Anexo IV, Simulación 18

Efecto de JC:

- Se puede observar como en las simulaciones con el modelo de Johnson Cook el proyectil se frena más que sin él (menor profundidad de penetración). Añade tres efectos en la tensión de fluencia:
 - o Endurecimiento por deformación plástica
 - o Dependencia de la velocidad de deformación
 - o Efecto de la temperatura
- Aparición de fractura (spall): Rotura local y pérdida de material.
- Existe similitud entre ambas situaciones, siendo el modelo de Johnson Cook más realista en la simulación balística.



Glacis 55º sin JC del Panzer V. Anexo III, Simulación 1



Glacis 55º con JC del Panzer V. Anexo III, Simulación 2

7. CONCLUSIONES

El presente trabajo ha tenido como objetivo el estudio global del carro de combate desde una perspectiva histórica, tecnológica y de ingeniería, complementando el análisis teórico con la simulación numérica de impactos balísticos. Mediante este enfoque, se ha buscado comprender la evolución de los blindajes, la influencia del diseño con dos referentes históricos: el Panzer V Panther alemán de la Segunda Guerra Mundial y el M1A2 Abrams estadounidense actual.

El análisis histórico reveló como el Panzer V representó un salto tecnológico en su época al introducir un glacis frontal inclinado, combinando espesor y geometría para mejorar su resistencia balística. Su diseño influyó a diseños de tanques posteriores, al demostrar que la inclinación del blindaje es un factor determinante. En contraposición, el M1A2 Abrams representa la guerra actual en el diseño de carros de combate, con blindajes compuestos multicapa, electrónica avanzada y sistemas de control que maximizan la protección.

En la fase de diseño y modelado 3D en SolidWorks, se lograron reproducir las geometrías principales de ambos tanques, lo que permitió comparar directamente sus principales partes del blindaje y criterios en su diseño. Este proceso fue el más costoso pero esencial para preparar los modelos utilizados posteriormente en las simulaciones numéricas.

En cuanto al análisis de impacto balístico, se estudió el comportamiento del proyectil AP M72 de 75mm contra partes representativas de ambos blindajes (glacis, lateral casco y mantelete). Mediante Abaqus/Explicit, se llevaron a cabo simulaciones con diferentes configuraciones de materiales, contrastando el acero estructural S355 con el acero de alta resistencia ArmoX 500T, aplicando tanto el modelo de plasticidad clásica como el modelo de Johnson-Cook con daño dúctil. Los resultados demostraron que el modelo de JC es más realista, al incorporar efectos de velocidad de deformación y temperatura. También se demostró como el ArmoX 500T mostró una capacidad de absorción y resistencia al daño superior al acero estructural, confirmando su idoneidad en aplicaciones balísticas.

Para concluir, este trabajo demuestra que la ingeniería moderna aplicada a vehículos blindados combina el conocimiento histórico, el diseño asistido por ordenador y la simulación numérica avanzada para optimizar el rendimiento y la protección. Los resultados obtenidos sientan las bases para futuros estudios más detallados que incluyan comportamiento térmico durante el impacto, uso de materiales compuestos multicapa o la validación experimental de los modelos empleados.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] https://es.wikipedia.org/wiki/Carro_de_combate
- [2] https://wikitanks.com/index.php?title=Carro_de_combate
- [3] https://es.wikipedia.org/wiki/Historia_del_carro_de_combate
- [4] https://wikitanks.com/index.php?title=Tipos_de_blindaje
- [5] <https://www.guerra-acorazada.blog/blindajes-de-acero-parte-1-de-2-tipos/>
- [6] <https://www.guerra-acorazada.blog/blindajes-de-acero-parte-2-de-2/>
- [7] https://www.youtube.com/watch?v=N36N5V_fmTA
- [8] <https://panzerworld.com/relative-armor-thickness>
- [9] <https://sites.google.com/site/worldofarmor/blindaje-y-protecci%C3%B3n/evoluci%C3%B3n-de-los-blindajes>
- [10] https://blog.portierramaryaire.com/arts/proyectiles_tanque_1.php
- [11] https://wikitanks.com/index.php?title=Categor%C3%ADa:Tipos_de_munici%C3%B3n
- [12] <https://caeassistant.com/blog/abaqus-johnson-cook-model-video/>
- [13] <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/cook-model>
- [14] <https://e-archivo.uc3m.es/rest/api/core/bitstreams/d2c4dc61-f8e9-4449-8d7d-69d3241cb61e/content>
- [15] <https://www.rlmm.org/ojs-files/journals/1/articles/1055/submission/review/1055-4761-1-RV.pdf>
- [16] <https://wikitanks.com/index.php?title=Panther>
- [17] https://es.wikipedia.org/wiki/Panzer_V_Panther
- [18] https://tanks-encyclopedia.com/ww2/germany/panzer-v_panther.php
- [19] https://wikitanks.com/index.php?title=M1_Abrams
- [20] https://es.wikipedia.org/wiki/M1_Abrams
- [21] <https://id3486.securedata.net/fprado/armorsite/abrams.htm>
- [22] <https://www.quora.com/Why-is-the-upper-glacis-plate-of-the-M1-and-M1A2-Sep-V3-Abrams-so-thin>
- [23] Panther Tank Manual: Panzerkampfwagen V Panther (SdKfz 171) (Haynes Enthusiasts' Manual)
- [24] <http://www.ryefield-model.com/thread-737-2.html>
- [25] https://www.bulletpicker.com/cartridge_-75mm-ap_-m72.html
- [26] <https://forum.cartridgecollectors.org/t/unknown-projectile-approx-75mm/23348/6>
- [27] <https://es.scribd.com/document/218067554/AERODYNAMIC-DATA-FOR-SPINNING-PROJECTILES-pdf>
- [28] <https://steelprogroup.com/es/high-strength-structural-steel/s355/>
- [29] <https://www.ssab.com/en/brands-and-products/armox/product-offer/armox-500t>

ANEXOS

*DISEÑO Y ANÁLISIS DE LOS TANQUES
M1A2 ABRAMS Y PANZER V PANTERA
ANTE EL IMPACTO DE UN PROYECTIL*

ANEXO I: FICHA TÉCNICA DE ACEROS UTILIZADOS EN BLINDAJES

Acero utilizado para el blindaje del Panzer V:

Propiedades físicas					
Propiedad	S355JR/J0	S355J2	S355K2	S355N	S355M
Densidad	7,85 g/cm ³ / 0,284 lb/pulgada ³	7,85 g/cm ³ / 0,284 lb/pulgada ³	7,85 g/cm ³ / 0,284 lb/pulgada ³	7,85 g/cm ³ / 0,284 lb/pulgada ³	7,85 g/cm ³ / 0,284 lb/pulgada ³
Punto de fusión	1425–1540 °C / 2597–2800 °F	1425–1540 °C / 2597–2800 °F	1425–1540 °C / 2597–2800 °F	1425–1540 °C / 2597–2800 °F	1425–1540 °C / 2597–2800 °F
Punto de ebullición	~3000 °C / ~5432 °F	~3000 °C / ~5432 °F	~3000 °C / ~5432 °F	~3000 °C / ~5432 °F	~3000 °C / ~5432 °F
Conductividad térmica	50 W/m·K / 289 BTU/(hr·ft·°F)	49 W/m·K / 283 BTU/(hr·ft·°F)	49 W/m·K / 283 BTU/(hr·ft·°F)	47 W/m·K / 272 BTU/(hr·ft·°F)	46 W/m·K / 265 BTU/(hr·ft·°F)
Conductividad eléctrica	6,99 MS/m ² / 6,99 MS/m	6,80 MS/m / 6,80 MS/m	6,80 MS/m / 6,80 MS/m	6,50 MS/m / 6,50 MS/m	6,40 MS/m / 6,40 MS/m
Capacidad calorífica específica	480 J/(kg·K) / 0,114 BTU/(lb·°F)	480 J/(kg·K) / 0,114 BTU/(lb·°F)	480 J/(kg·K) / 0,114 BTU/(lb·°F)	490 J/(kg·K) / 0,117 BTU/(lb·°F)	490 J/(kg·K) / 0,117 BTU/(lb·°F)
Coefficiente de dilatación térmica	12 × 10 ⁻⁶ /K / 6,7 × 10 ⁻⁶ /°F	11,9 × 10 ⁻⁶ /K / 6,6 × 10 ⁻⁶ /°F	11,9 × 10 ⁻⁶ /K / 6,6 × 10 ⁻⁶ /°F	11,7 × 10 ⁻⁶ /K / 6,5 × 10 ⁻⁶ /°F	11,5 × 10 ⁻⁶ /K / 6,4 × 10 ⁻⁶ /°F
Resistividad eléctrica	142 nΩ·m / 142 nΩ·m	145 nΩ·m / 145 nΩ·m	145 nΩ·m / 145 nΩ·m	150 nΩ·m / 150 nΩ·m	152 nΩ·m / 152 nΩ·m

Datos tras el tratamiento QT (enfriamiento rápido y revenido)

Propiedad	S355JR/J0 (QT)	S355J2 (de larga duración)	S355K2 (QT)	S355N (QT)	S355M (QT)
Resistencia a la tracción	750 a 950 MPa / 108 800 a 137 800 psi	800–1000 MPa / 116 000–145 000 psi	800–1000 MPa / 116 000–145 000 psi	850–1100 MPa / 123 250–159 500 psi	850–1100 MPa / 123 250–159 500 psi
Límite elástico	500 a 650 MPa / 72 500 a 94 300 psi	550 a 700 MPa / 79 800 a 101 500 psi	550 a 700 MPa / 79 800 a 101 500 psi	600–750 MPa / 87 000–108 800 psi	600–750 MPa / 87 000–108 800 psi
Módulo elástico	210 GPa/30 458 ksi	210 GPa/30 458 ksi	210 GPa/30 458 ksi	210 GPa/30 458 ksi	210 GPa/30 458 ksi
Relación de Poisson	0,27–0,30	0,27–0,30	0,27–0,30	0,27–0,30	0,27–0,30
Dureza Brinell	230–300 HB	240–320 HB	240–320 HB	260–340 HB	260–340 HB
Dureza Rockwell	95–100 HRB (aprox.)	96–102 HRB (aprox.)	96–102 HRB (aprox.)	98–104 HRB (aprox.)	98–104 HRB (aprox.)
Dureza Vickers	240–300 alto voltaje	250–320 V	250–320 V	280–340 VH	280–340 VH
Alargamiento	10–14%	8–12%	8–12%	6–10%	6–10%

Figura 67: Acero S355. Fuente: steelprogroup.com^[28]

Acero utilizado para el blindaje del M1A2 Abrams:



Data sheet 195es Armox® 500T 2025-03-10

Armox® 500T

Descripción general del producto

Blindaje de gran dureza con propiedades de resistencia excelentes.

Armox® 500T es la chapa de acero de protección más resistente del mundo, con una dureza nominal de 500 HBW, para su uso en vehículos, edificios y muchas otras aplicaciones.

Entre las ventajas de Armox® 500T se incluyen:

- El mejor acero de protección del mercado
- Gran facilidad de mecanizado
- Soluciones optimizadas
- Perfecto equilibrio entre dureza/resistencia, para una protección conjunta contra los impactos y las explosiones
- Experiencia en protección balística de SSAB

Ofrece a los diseñadores de vehículos, la posibilidad de crear nuevos modos para aumentar el grado de protección mediante diseños más ligeros. Armox® 500T no ha sido concebido para aplicarle un tratamiento térmico posterior.

Rango de dimensiones

Armox® 500T está disponible en espesores comprendidos entre 3.0 – 130.0 mm. Consulte con SSAB la disponibilidad de otras dimensiones.

Propiedades mecánicas

Espesor (mm)	Dureza (HBW)	Límite de elasticidad $R_{p0.2}$ (min MPa)	Tensión de rotura R_m (MPa)	Elongación A_5 (min %)
3.0 - 80.0	480 - 540	1250	1450 - 1800	8
80.1 - 130.0	470 - 540	1200	1450 - 1800	—

Ensayos mecánicos

Ensayo de dureza Brinell acorde con la norma EN ISO 6506-1 por cada tratamiento térmico individual.

Ensayo de impacto Charpy acorde con la norma EN ISO 148-1 por cada serie y para grosores desde 6 mm.

Ensayo de tracción acorde con la norma EN ISO 6892-1 por cada serie y para grosores.

Ensayo de ultrasonidos

De conformidad con EN 10160 Clase E₃S₃ fen grosores de hasta 80 mm y E₁S₂ para > 80 mm.

Propiedades de impacto

Espesor (mm)	Ensayo transversal, mín. energía de impacto, Charpy V probetas 10x10 mm ¹⁾
3.0 - 80.0	32 J / -40 °C
80.1 - 130.0	20 J / -40 °C

¹⁾ Media de tres ensayos. Transversal al sentido de laminación. Valor mínimo único 70 % de media especificada. Para espesores de chapa de menos de 12 mm, se usan probetas de Charpy V de tamaños inferiores. El valor mínimo especificado es en ese caso proporcional al área transversal de la probeta.

Composición química (análisis de colada)

C ¹⁾ (max %)	Si ¹⁾ (max %)	Mn ¹⁾ (max %)	P (max %)	S (max %)	Cr ¹⁾ (max %)	Ni ¹⁾ (max %)	Mo ¹⁾ (max %)	B ¹⁾ (max %)
0.32	0.40	1.20	0.010	0.003	1.0 ¹⁾	1.80 ¹⁾	0.70	0.005

¹⁾ Para espesores de chapa >70 mm Cr ≤ 1.5 y Ni ≤ 3.5.

Figura 68: Propiedades del acero Armox 500T. Fuente: SSAB [29]

ANEXO II: GUÍA PASOS ABAQUS

1) Importar las piezas diseñadas en SolidWorks en formato ACIS (.sat)

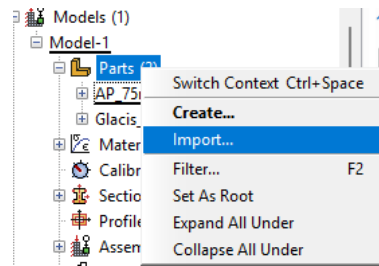


Figura 69: Importar pieza.

1.1) Seleccionar tipo deformable para el blindaje y sólido rígido para el proyectil:

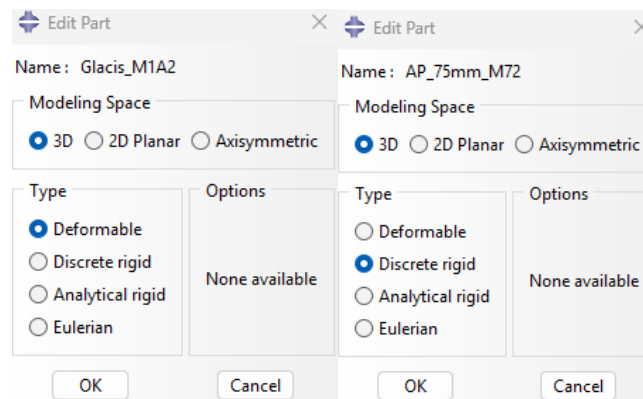


Figura 70: Tipo de sólido.

1.2) Dentro del *Module Part*, añadir un punto de referencia en el proyectil para posteriormente asignar condiciones de contorno y obtener los resultados de velocidad

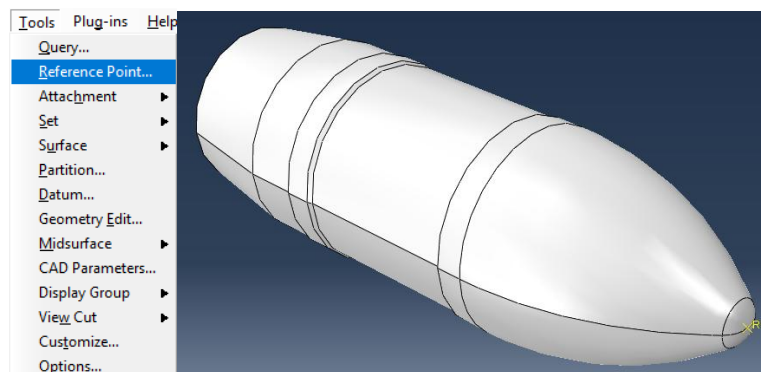


Figura 71: Punto de referencia.

1.3) Añadir partición al blindaje para posteriormente mallar mas fino la zona de impacto

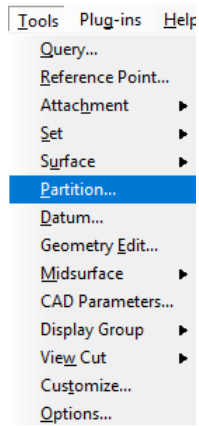


Figura 72: Añadir partición I.

1.4) Seleccionar la cara para dibujar un círculo y la arista del espesor.

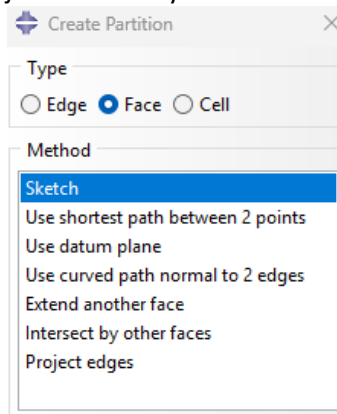


Figura 73: Añadir partición II.

1.5) Volver a añadir partición para todo el espesor de la pieza seleccionando la arista

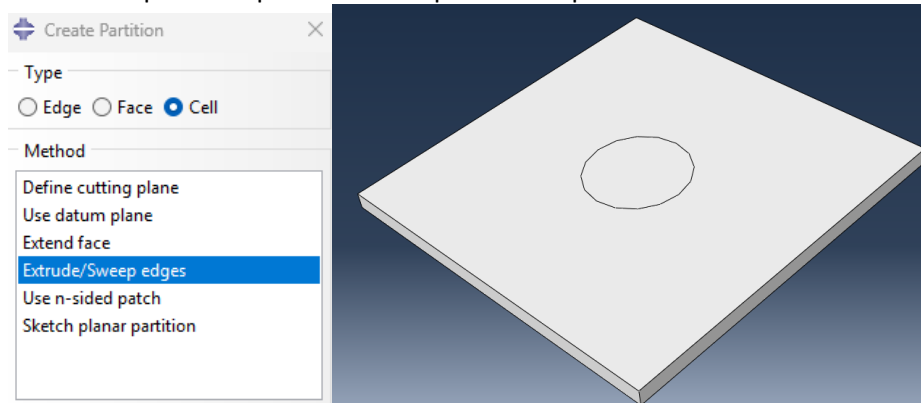



Figura 74: Añadir partición III.

2) Ir al módulo *Property* para asignar el material

2.1) Crear nuevo material y añadir propiedades en *Create Material* :

	ACERO S355	ACERO ARMOX 500T
Densidad	7,85e-9 T/mm ³	7,8e-9 T/mm ³
Modulo Young	210000 MPa	210000 MPa
Coefficiente Poisson	0.3	0.3
Límite elástico	750 MPa	1250 MPa
Tensión de rotura	1120 MPa	1900 MPa
Temperatura fusión	1700 K	1700 K
Temperatura transición	293 K	293 K
Coefficientes JC		
A	750 MPa	1250 MPa
B	473 MPa	705MPa
n	0.17	0.12
m	1	1
C	0,02	0.02
ε ₀	1	1
d1	0.06	0.05
d2	4	4
d3	-2	-2.5
d4	0.002	0.002
d5	0.5	0.6
Velocidad deformación ref.	1	1
Desplazamiento fractura	0.1	0.2

Tabla 11: Propiedades de los materiales en Abaqus.

- En *General, Density*, añadir densidad.
- En *Mechanical, Elasticity, Elastic*, añadir módulo de Young y coeficiente de Poisson.
 - o A) Caso sin Johnson-Cook
- Ir a *Mechanical, Plasticity, Plastic* e introducir parámetros:

ACERO S355		ACERO ARMOX 500T	
Yield Stress	Plastic Strain	Yield Stress	Plastic Strain
750	0	1250	0
800	0.01	1350	0.01
820	0.02	1420	0.02
839	0.1	1500	0.05
890	0.16	1600	0.1
920	0.42	1700	0.2
950	1	1800	0.4
1120	4.2		

Tabla 12: Propiedades de los materiales en Abaqus.

- Ir a *Mechanical, Damage for ductile metals, Ductile damage* e introducir parámetros:

ACERO S355			ACERO ARMOX 500T		
Fracture Strain	Stress Triaxiality	Strain Rate	Fracture Strain	Stress Triaxiality	Strain Rate
1	0	30	0.58	-0.33	30
0.6	0.39	30	0.24	0	30
Displacement at failure		0.022	0.11	0.33	30
			0.055	0.66	30
			0.028	1	30
			Displacement at failure		0.2

Tabla 13: Propiedades de los materiales en Abaqus.

- o B) Caso con Johnson-Cook:

- Ir a *Mechanical, Plasticity, Plastic y hardening* seleccionar *Johnson-Cook* para parámetros A,B,n,m, Tf, To.
- En *Subotions, Rate dependant, Johnson-Cook* para parámetros C y ϵ_0
- Ir a *Mechanical, Damage for ductile metals, Johnson-Cook Damage* e introducir parámetros d1, d2, d3, d4 ,d5 Tf, To
- En *Subotions, Damage evolution, Displacement at Failure*.

2.2) Crear sección en *Create Section*

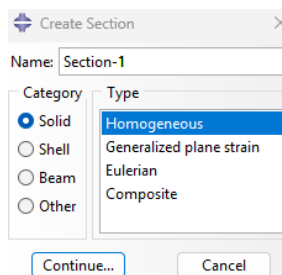


Figura 75: Crear sección.

2.3) Asignar sección en *Assign Section* seleccionando la pieza.

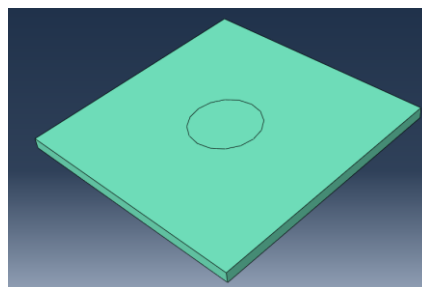


Figura 76: Asignar sección.

- 3) Ir a *Module Assembly*, en *Create Instance* añadir las dos partes y ubicarlas según trasladándolas o girándolas según convenga.

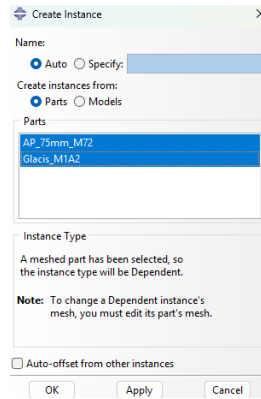


Figura 77: Ensamblaje.

4) Ir a *Module Step*

4.1) En *Step Manager*, crear un nuevo step *Dynamic, Explicit*, con un *Time Period* de 0.001 seg para que abarque la duración del impacto.

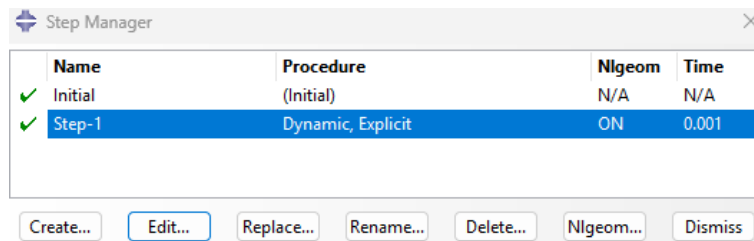


Figura 78: Step Manager.

4.2) En *Field Output Manager*, añadir STATUS, Status (VUMAT)

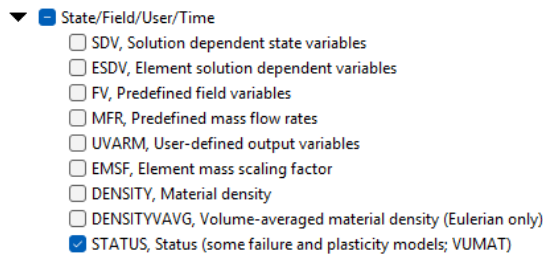


Figura 79: Field Output Manager

4.3) En *History Output Manager*, indicaremos las variables que queremos obtener en resultados, en este caso la velocidad V3 del punto de referencia.

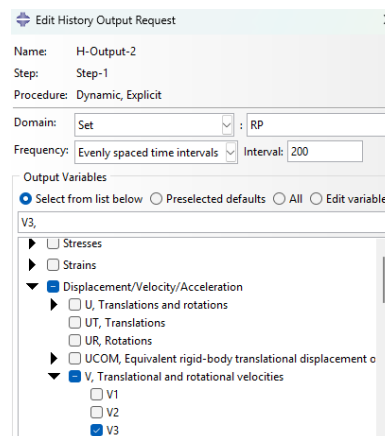


Figura 80: History Output Manager

5) Ir a módulo *Mesh*

5.1) En *Seed Part Instance*, mallar grueso toda la pieza.

5.2) En *Seed Edges*, seleccionar los círculos de ambas caras para seleccionar la partición y mallar con 50 nodos para tener mayor precisión en la zona de impacto. Volver a clicar en *Seed Edges* y seleccionar las 4 aristas para mallar el espesor con 10 nodos.

5.3) Ir a *Assign Element Type*, seleccionar *Element Type Explicit* y *Element deletion Yes* para que desprece desprendimiento de partes pequeñas de la pieza durante el impacto y evitar errores.

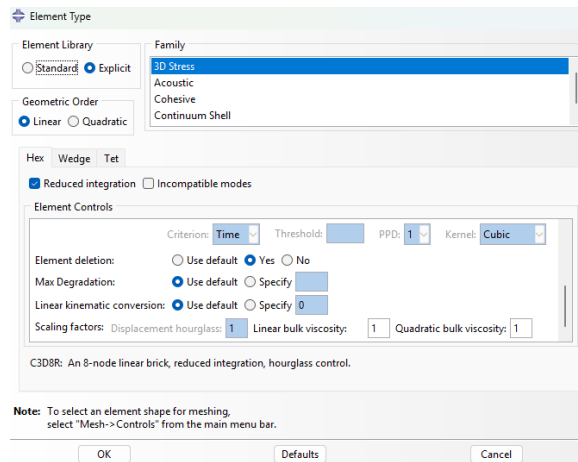


Figura 81: Asignar tipo de elemento malla.

5.4) Mallar en *Mesh Part*

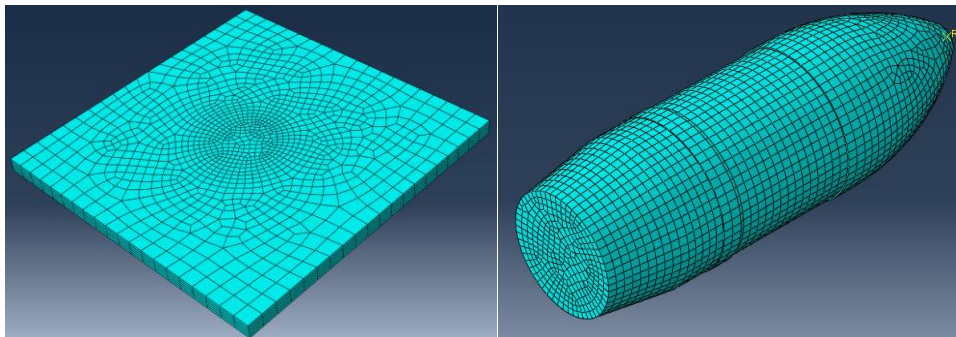


Figura 82: Mallado.

6) Ir al *Module Interaction*.

6.1) Crear inercia al ser un SR, con una masa de 6,5 kg (introduzco en toneladas).

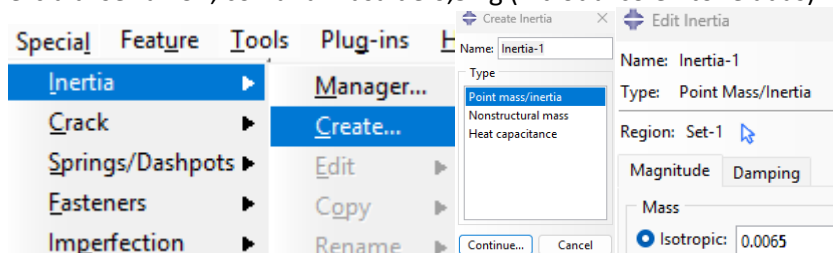


Figura 83: Inercia.

6.2) Creo una superficie del proyectil, seleccionando solo el proyectil:

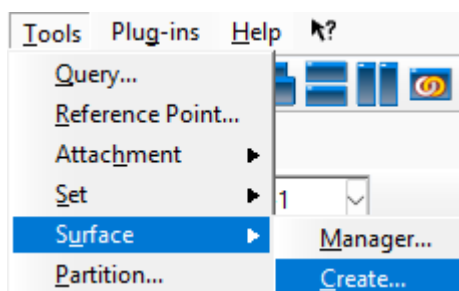


Figura 84: Crear superficie.

6.3) Creo un set de la malla del blindaje, seleccionando solo el blindaje:

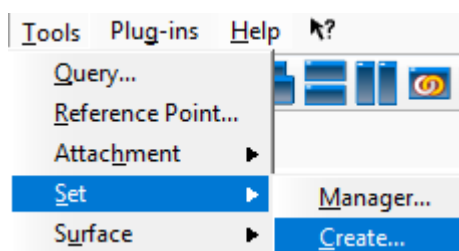


Figura 85: Crear set.

6.4) En *Create Interaction*, creo una interacción del tipo Surface-to-surface contact (Explicit):

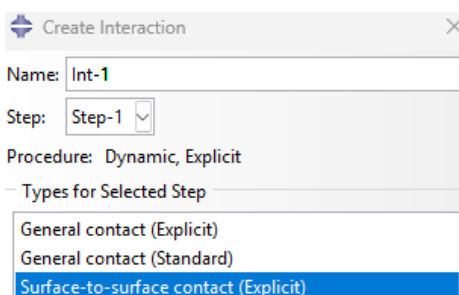


Figura 86: Crear interacción superficie-superficie.

6.5) Selecciono las dos superficies creadas previamente de contacto y acepto.

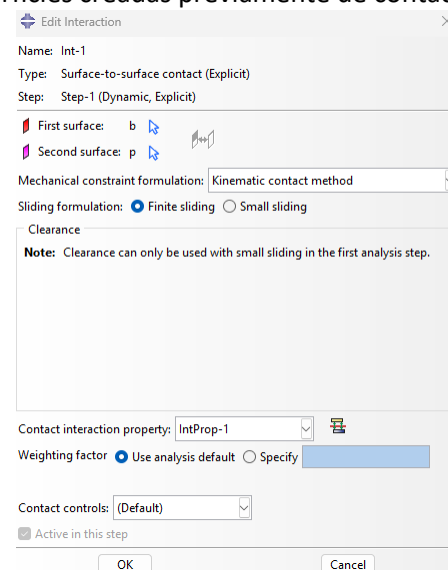


Figura 87: Crear interacción.

6.6) En *Create Interaction Property*, creo interacción *Mechanical*, *Tangential Behavior* con un coeficiente de fricción 0,2 y *Normal Behavior*, *Hard Contact*.

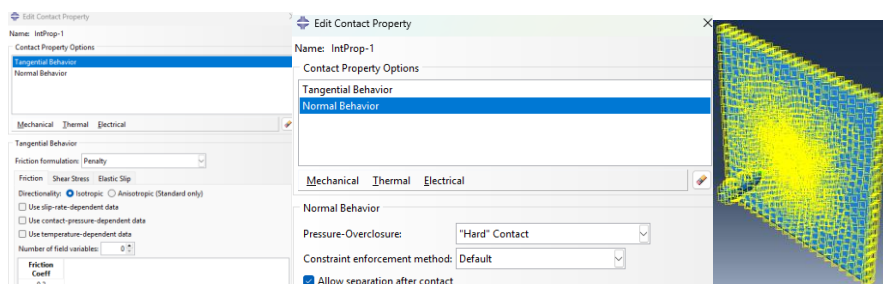


Figura 88: Crear tipo de interacción.

7) Ir a *Module Load* para asignar las condiciones de contorno.

7.1) En *Create Boundary Condition*, crear condiciones de contorno.

i) Apoyos fijos en contorno del blindaje

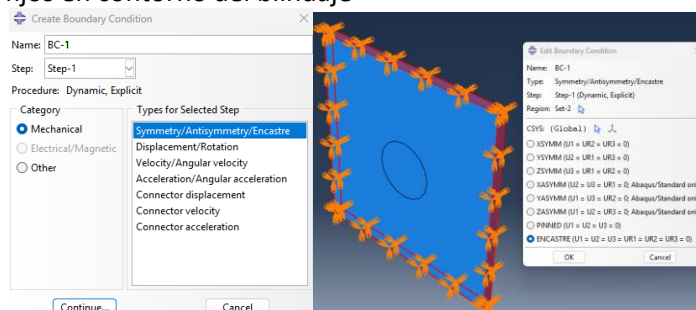


Figura 89: Crear condiciones de contorno I.

ii) Desplazamiento del proyectil permitido en Z

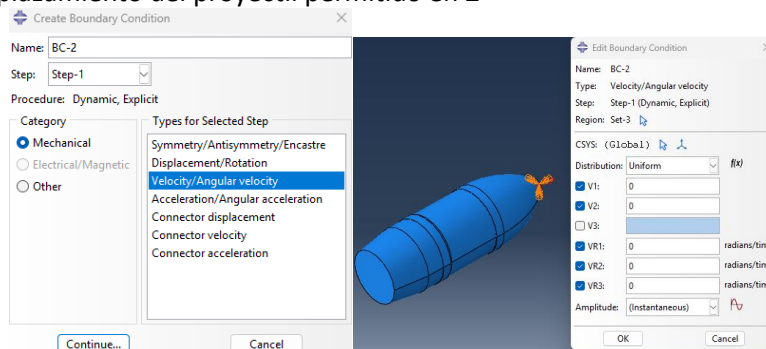


Figura 90: Crear condiciones de contorno II.

7.2) En *Create Predefined Field*, indico la velocidad inicial del proyectil de 600000 mm/s

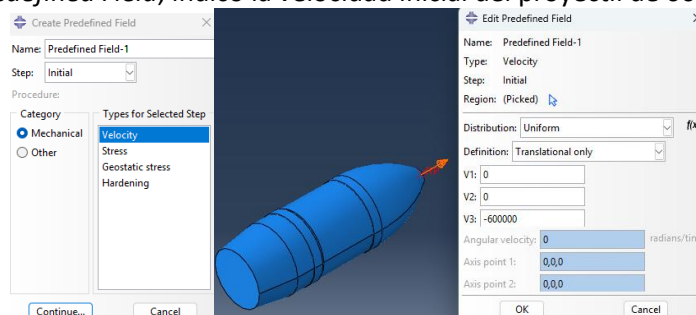


Figura 91: Crear condiciones de contorno III.

8) Ir a *Module Job* → *Create Job* → *Submit* → *Results* para visualizar los resultados.

ANEXO III: RESULTADOS SIMULACIÓN DE IMPACTO EN TANQUE PANZER V PANTHER

Proyectil: **M72 75mm AP**
Tipo: Sólido rígido
Velocidad [m/s] 600
Peso [kg] 6,5

Parte: **Glacis**
Espesor [mm]: 85
Material: Acero S355

Simulación: 1 - Impacto favorable inclinación 55° sin JC.

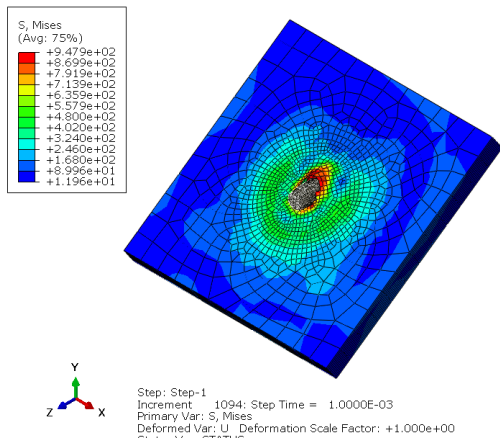


Figura 92: Impacto proyectil contra glacis a 55° sin JC

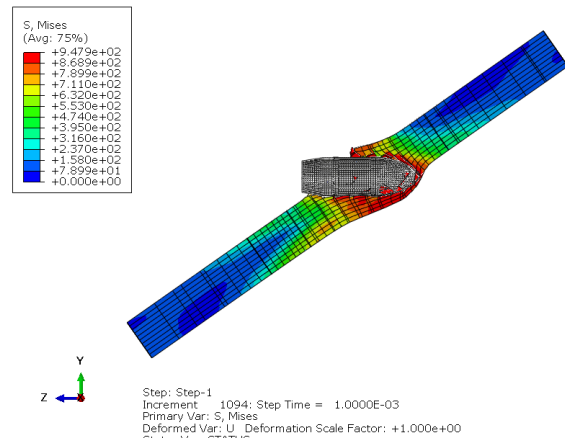


Figura 93: Tensiones VM máximas tras impacto sobre glacis a 55° sin JC

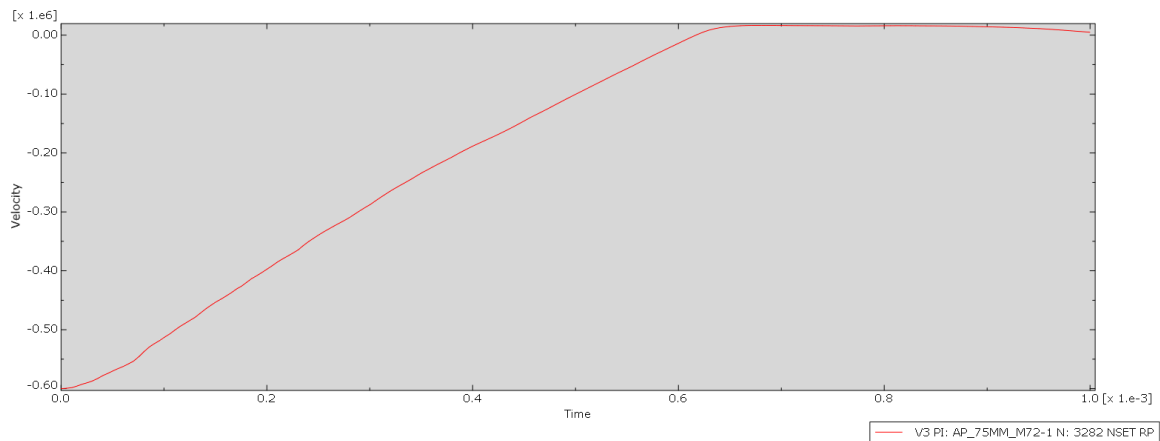


Figura 94: Gráfica Velocidad vs Tiempo del impacto sobre glacis a 55° sin JC

Fuente: Elaboración propia con ABAQUS.

Simulación: 2 - Impacto favorable inclinación 55° con JC.

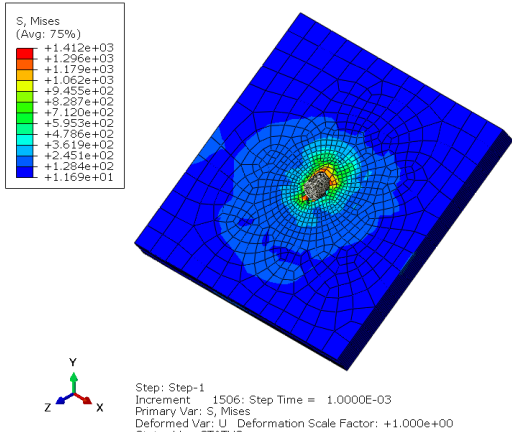


Figura 95: Impacto proyectil contra glacis a 55° con JC

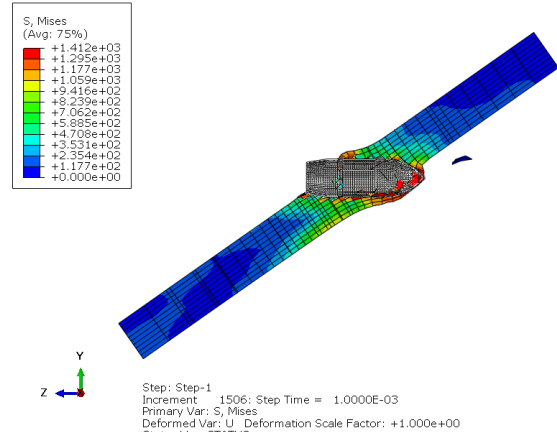


Figura 96: Tensiones VM máximas tras impacto sobre glacis a 55° con JC

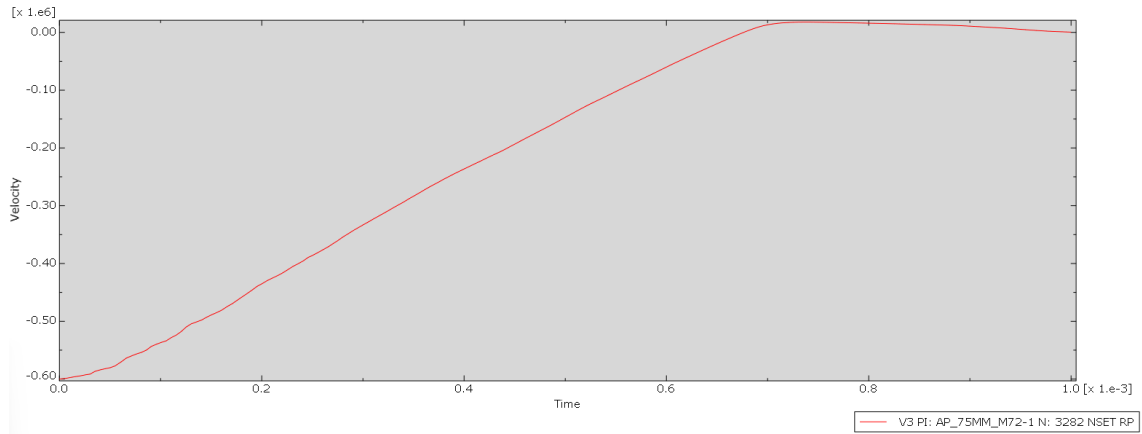


Figura 97: Gráfica Velocidad vs Tiempo del impacto sobre glacis a 55° sin JC

Fuente: Elaboración propia con ABAQUS.

Simulación: **3 - Impacto desfavorable inclinación 90° sin JC.**

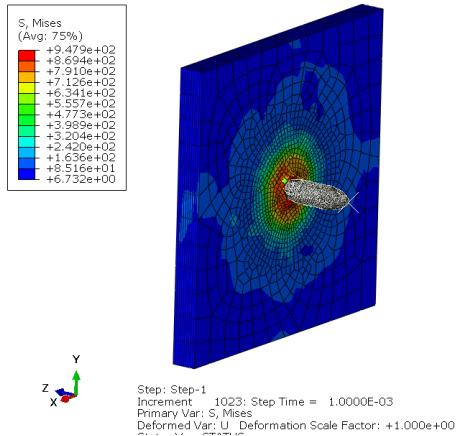


Figura 98: Impacto proyectil contra glacis a 90° sin JC

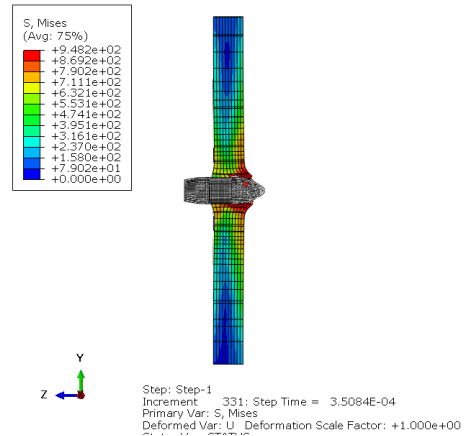


Figura 99: Tensiones VM máximas tras impacto sobre glacis a 90° sin JC

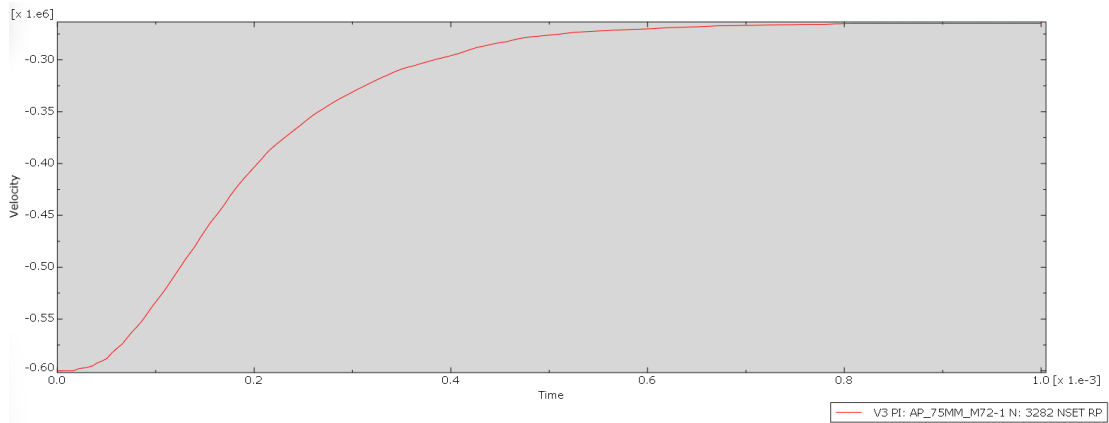
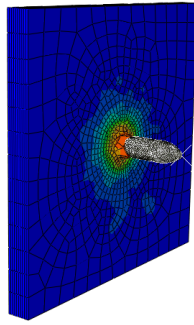
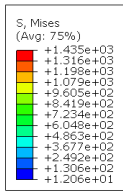


Figura 100: Gráfica Velocidad vs Tiempo del impacto sobre glacis a 90° sin JC

Fuente: Elaboración propia con ABAQUS.

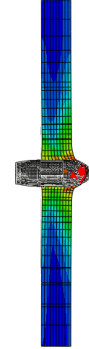
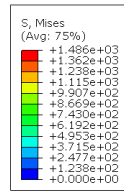
Simulación:

4 - Impacto desfavorable inclinación 90° con JC.



Step: Step-1
 Increment 3788; Step Time = 1.0000E-03
 Primary Var: S, Mises
 Deformed Var: U_Deformation Scale Factor: +1.000e+00

Figura 101: Impacto proyectil contra glacis a 90° con JC



Step: Step-1
 Increment 365; Step Time = 3.5009E-04
 Primary Var: S, Mises
 Deformed Var: U_Deformation Scale Factor: +1.000e+00

Figura 102: Tensiones VM máximas tras impacto sobre glacis a 90° con JC

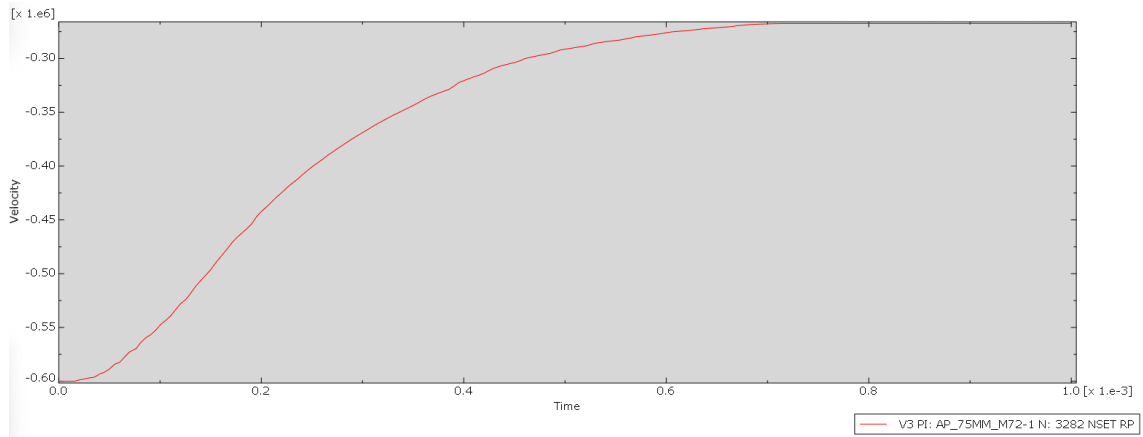


Figura 103: Gráfica Velocidad vs Tiempo del impacto sobre glacis a 90° con JC

Fuente: Elaboración propia con ABAQUS.

Parte: **Lateral**
 Espesor [mm]: 40
 Material: Acero S355

Simulación: 5 - Impacto favorable inclinación 45° sin JC.

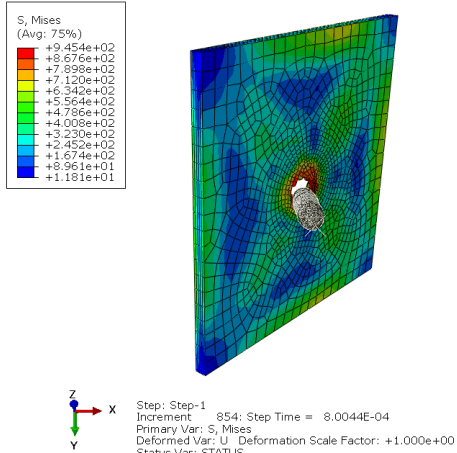


Figura 104: Impacto proyectil contra lateral a 45° sin JC

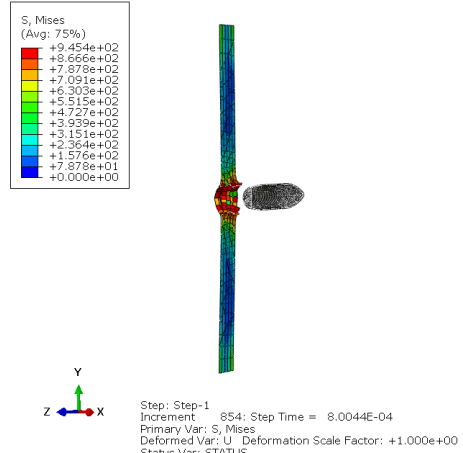


Figura 105: Tensiones VM máximas tras impacto sobre lateral a 45° sin JC

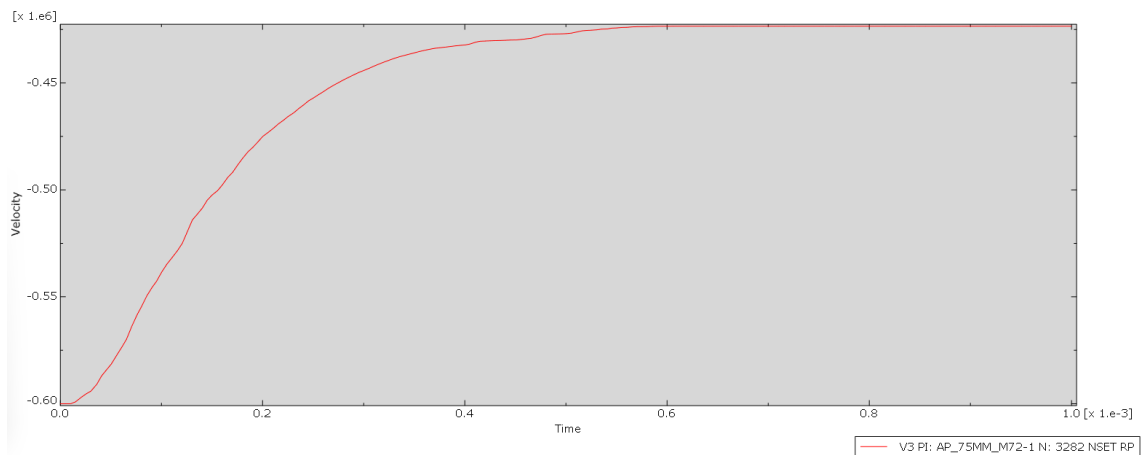


Figura 106: Gráfica Velocidad vs Tiempo del impacto sobre lateral a 45° sin JC

Fuente: Elaboración propia con ABAQUS.

Simulación: 6 - Impacto favorable inclinación 45° con JC.

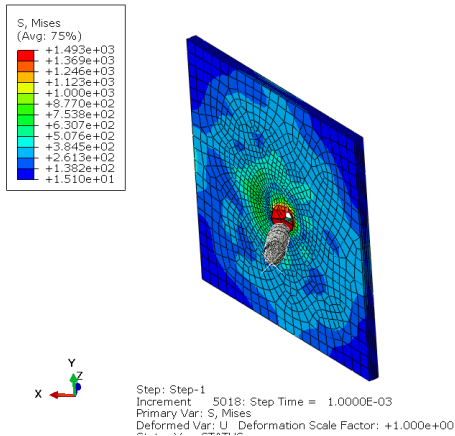


Figura 107: Impacto proyectil contra lateral a 45° con JC

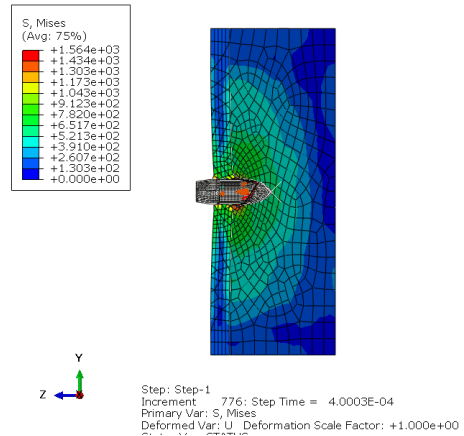


Figura 108: Tensiones VM máximas tras impacto sobre lateral a 45° con JC

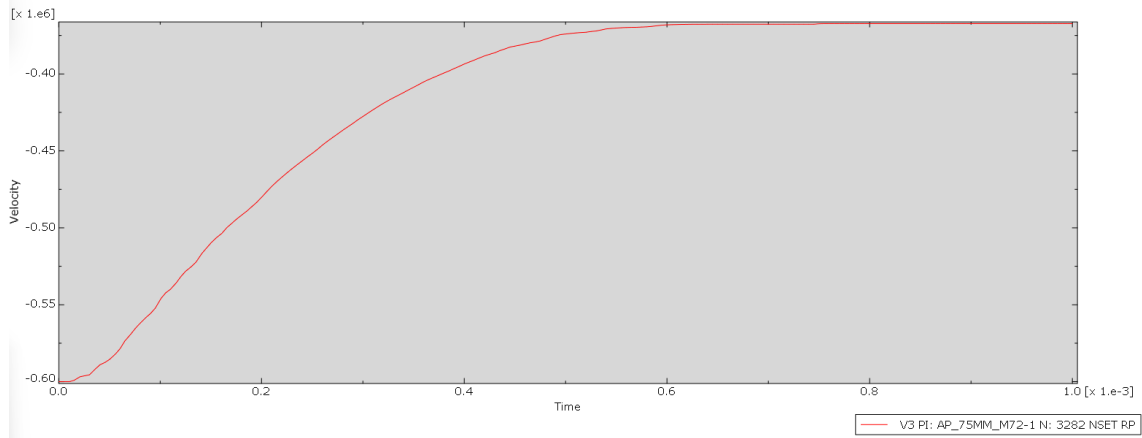


Figura 109: Gráfica Velocidad vs Tiempo del impacto sobre lateral a 45° con JC

Fuente: Elaboración propia con ABAQUS.

Simulación: 7 - Impacto desfavorable inclinación 90° sin JC.

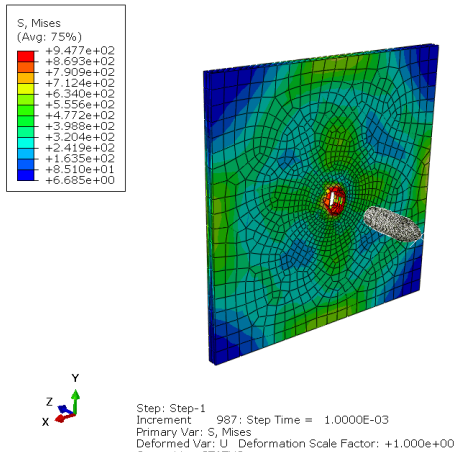


Figura 110: Impacto proyectil contra lateral a 90° sin JC

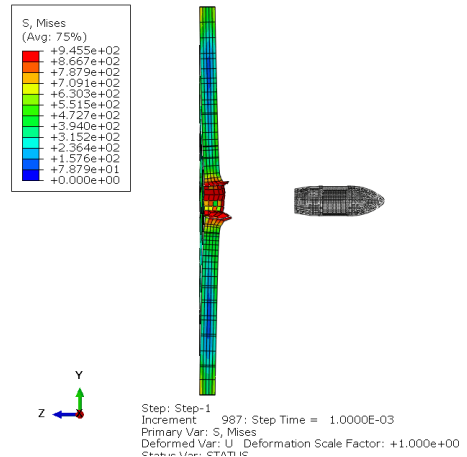


Figura 111: Tensiones VM máximas tras impacto sobre lateral a 90° sin JC

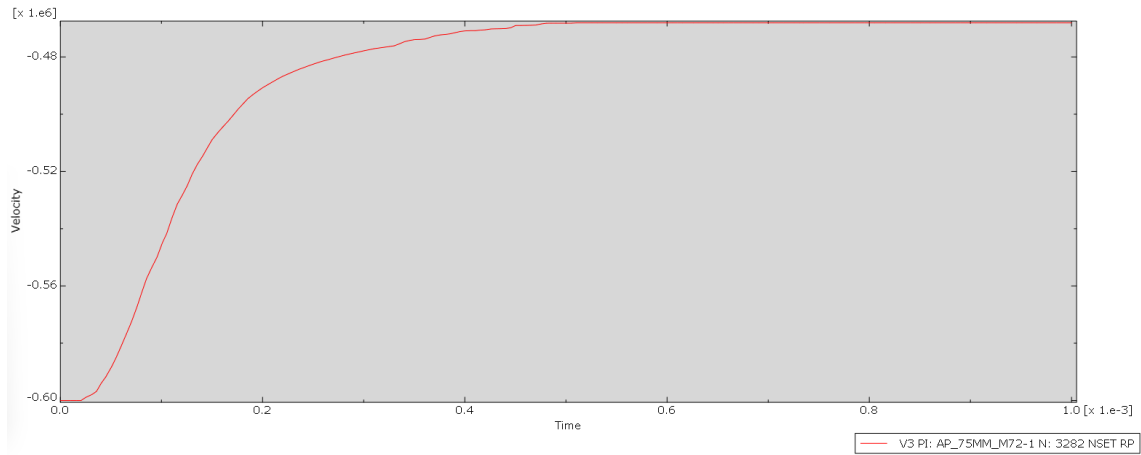


Figura 112: Gráfica Velocidad vs Tiempo del impacto sobre lateral a 90° sin JC

Fuente: Elaboración propia con ABAQUS.

Simulación:

8 - Impacto desfavorable inclinación 90° con JC.

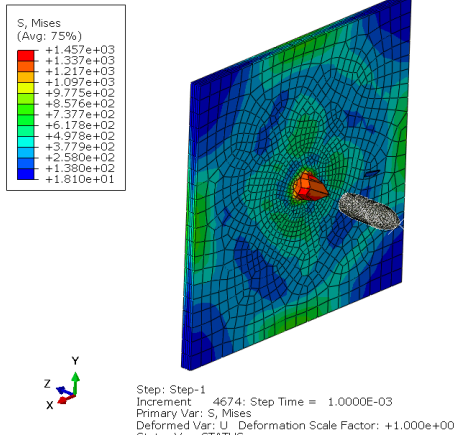


Figura 113: Impacto proyectil contra lateral a 90° con JC

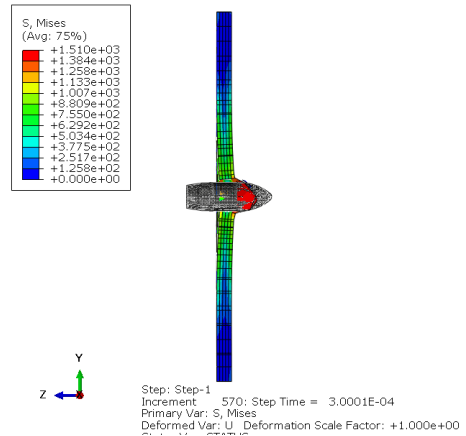


Figura 114: Tensiones VM máximas tras impacto sobre lateral a 90° con JC

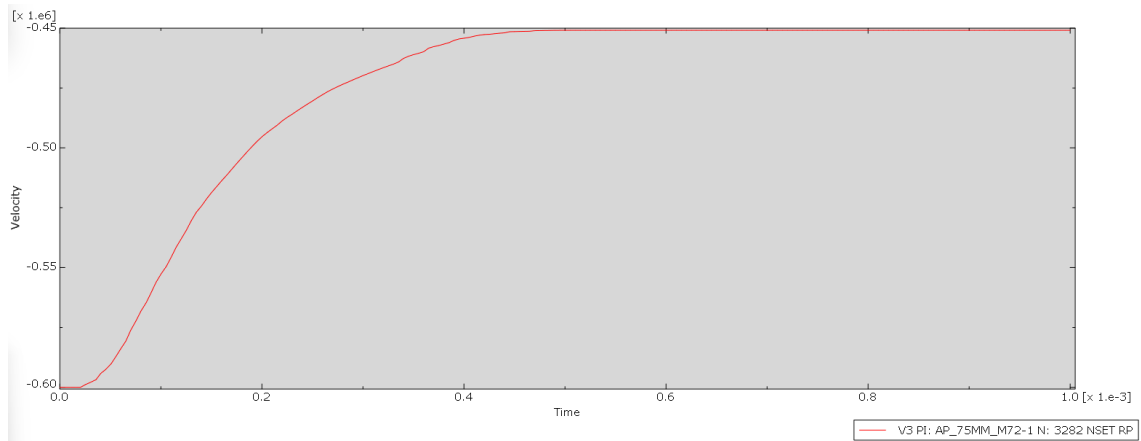


Figura 115: Gráfica Velocidad vs Tiempo del impacto sobre lateral a 45° con JC

Fuente: Elaboración propia con ABAQUS.

Parte: **Mantelete**
 Espesor [mm]: **110**
 Material: **Acero S355**

Simulación: 9 - Impacto favorable inclinación 20° sin JC.

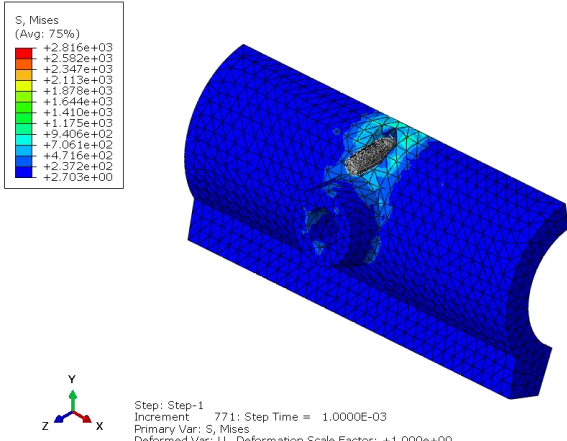


Figura 116: Impacto proyectil contra mantelete a 20° sin JC

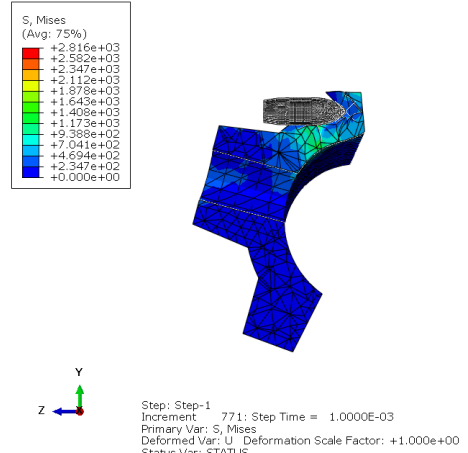


Figura 117: Tensiones VM máximas tras impacto sobre mantelete a 20° sin JC

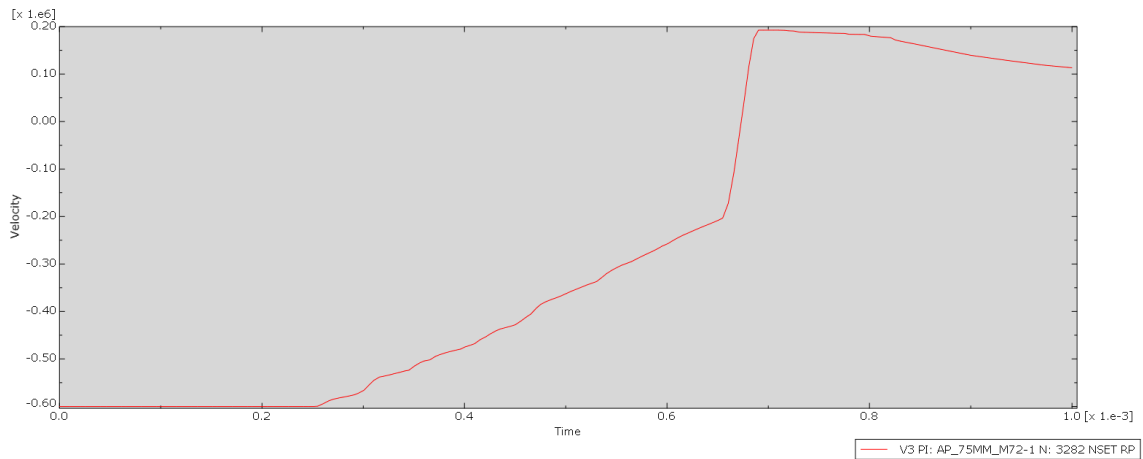


Figura 118: Gráfica Velocidad vs Tiempo del impacto sobre mantelete a 20° sin JC

Fuente: Elaboración propia con ABAQUS.

Simulación: 10 - Impacto favorable inclinación 20° con JC.

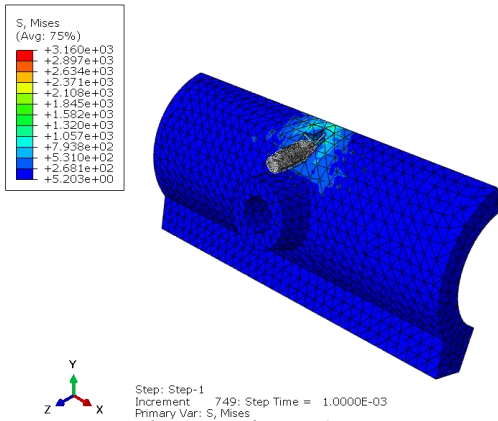


Figura 119: Impacto proyectil contra mantelete a 20° con JC

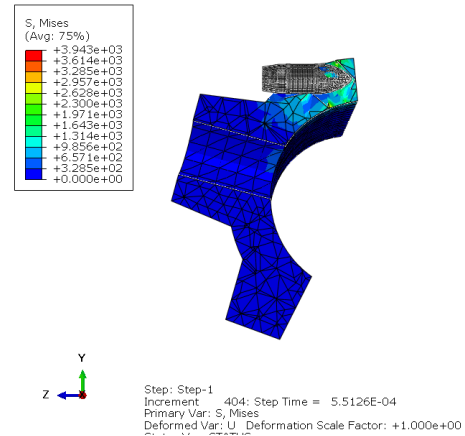


Figura 120: Tensiones VM máximas tras impacto sobre mantelete a 20° con JC

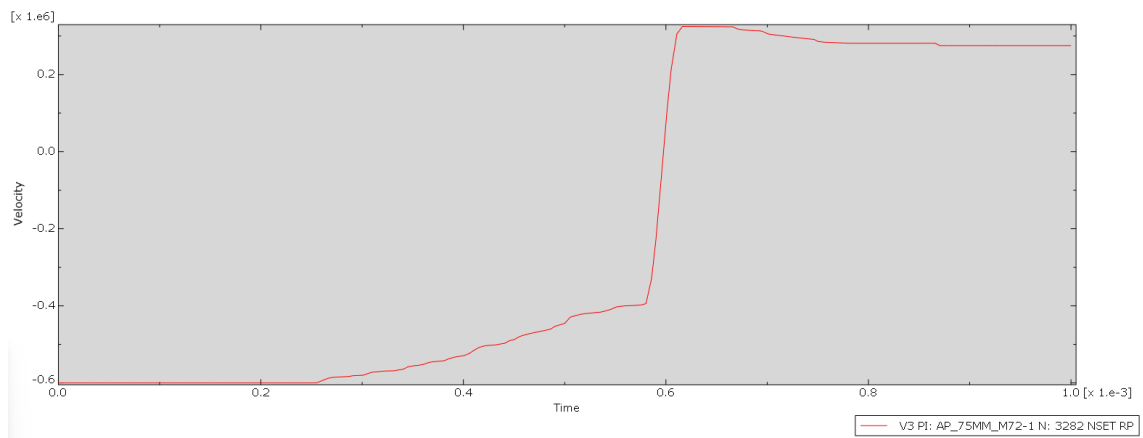


Figura 121: Gráfica Velocidad vs Tiempo del impacto sobre mantelete a 20° con JC

Fuente: Elaboración propia con ABAQUS.

Simulación: 11 - Impacto desfavorable inclinación 90º sin JC.

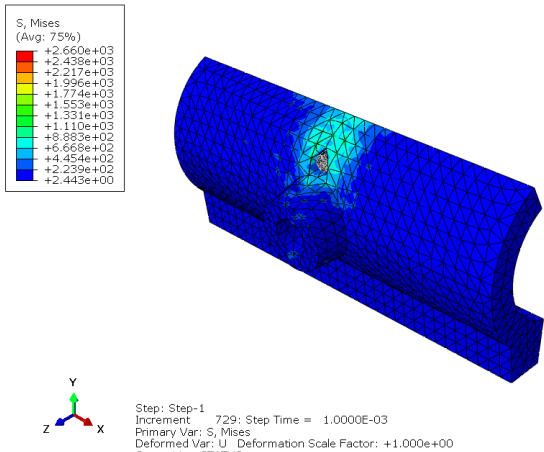


Figura 122: Impacto proyectil contra lateral a 90º sin JC

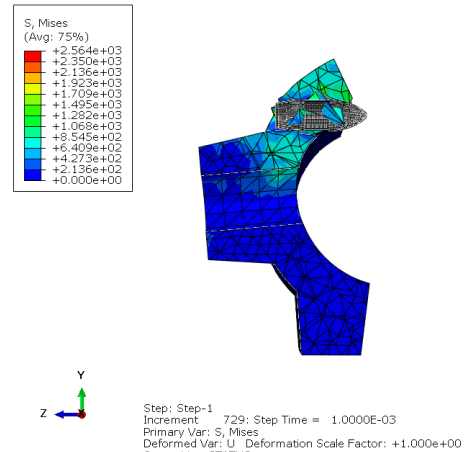


Figura 123: Tensiones VM máximas tras impacto sobre lateral a 90º sin JC

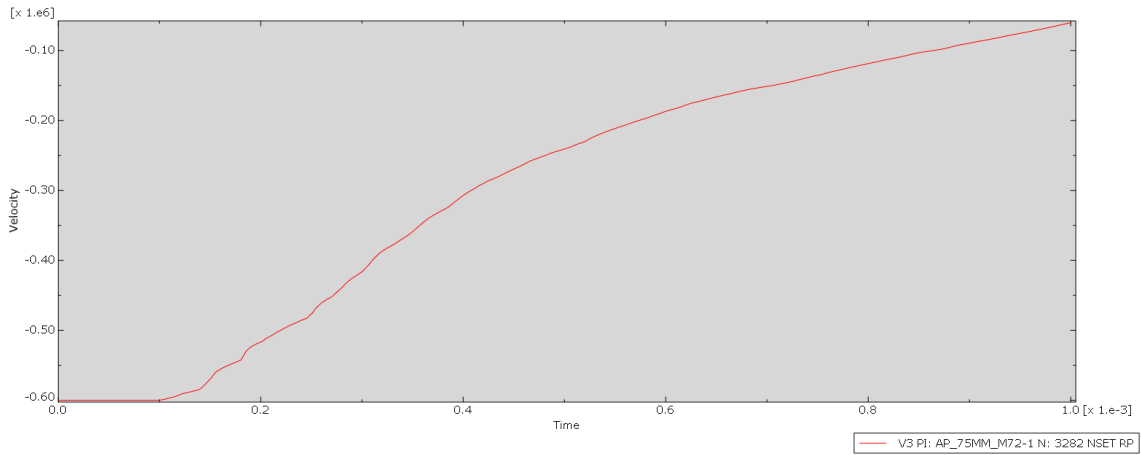


Figura 124: Gráfica Velocidad vs Tiempo del impacto sobre lateral a 90º sin JC

Fuente: Elaboración propia con ABAQUS.

Simulación: 12 - Impacto desfavorable inclinación 90° con JC.

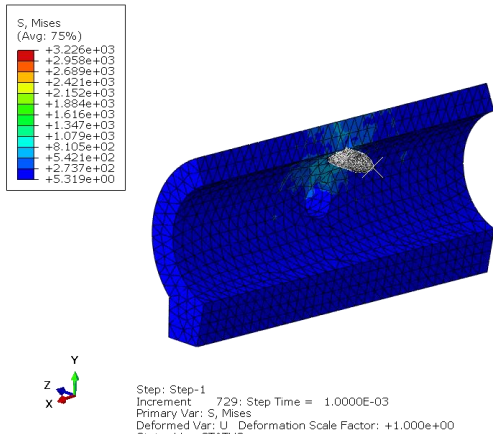


Figura 125: Impacto proyectil contra lateral a 90° con JC

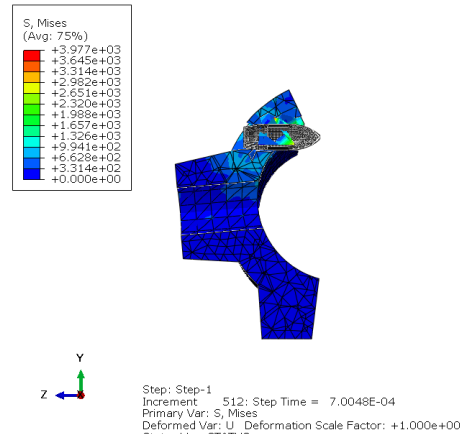


Figura 126: Tensiones VM máximas tras impacto sobre lateral a 90° con JC

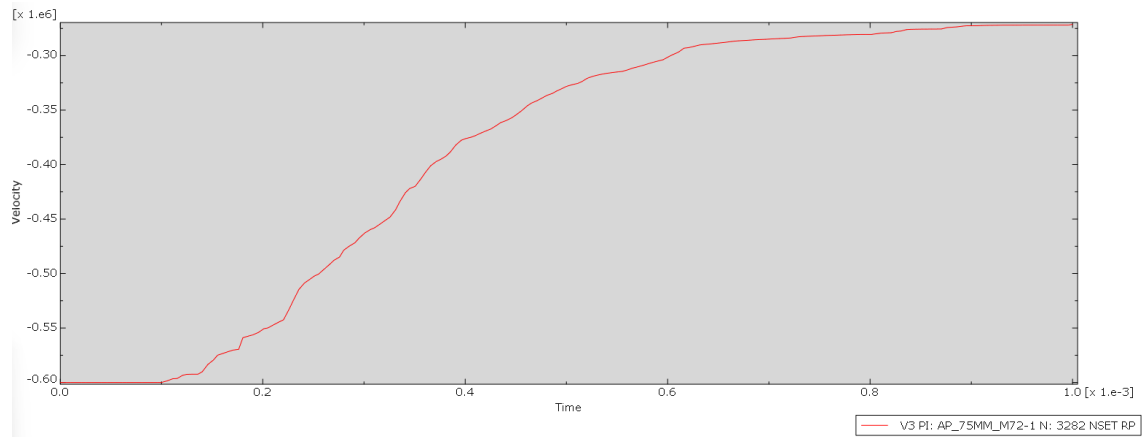


Figura 127: Gráfica Velocidad vs Tiempo del impacto sobre lateral a 90° con JC

Fuente: Elaboración propia con ABAQUS.

ANEXO IV: RESULTADOS SIMULACIÓN DE IMPACTO EN TANQUE M1A2 ABRAMS

Proyectil: **M72 75mm AP**
Tipo: Sólido rígido
Velocidad [m/s]: 600
Peso [kg]: 6,5

Parte: **Glacis**
Espesor [mm]: 45
Material: Acero Armox 500T

Simulación: 13 - Impacto favorable inclinación 8° sin JC.

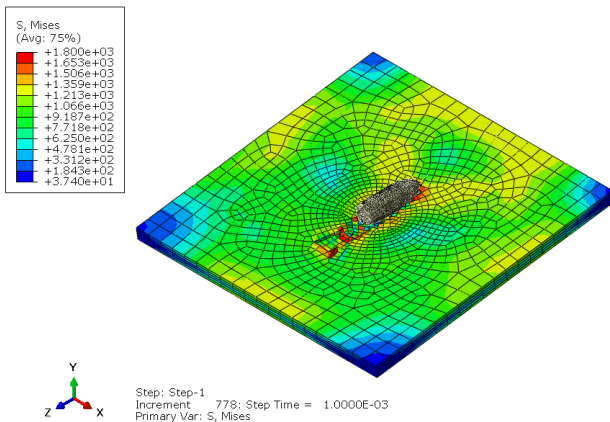


Figura 128: Impacto proyectil contra glacis a 8° sin JC

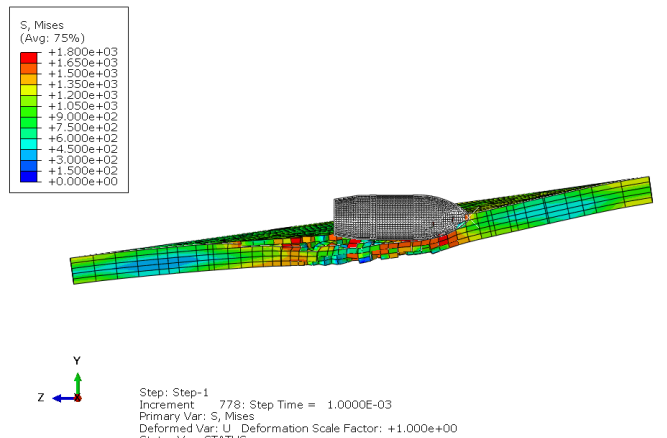


Figura 129: Tensiones VM máximas tras impacto sobre glacis a 8° sin JC

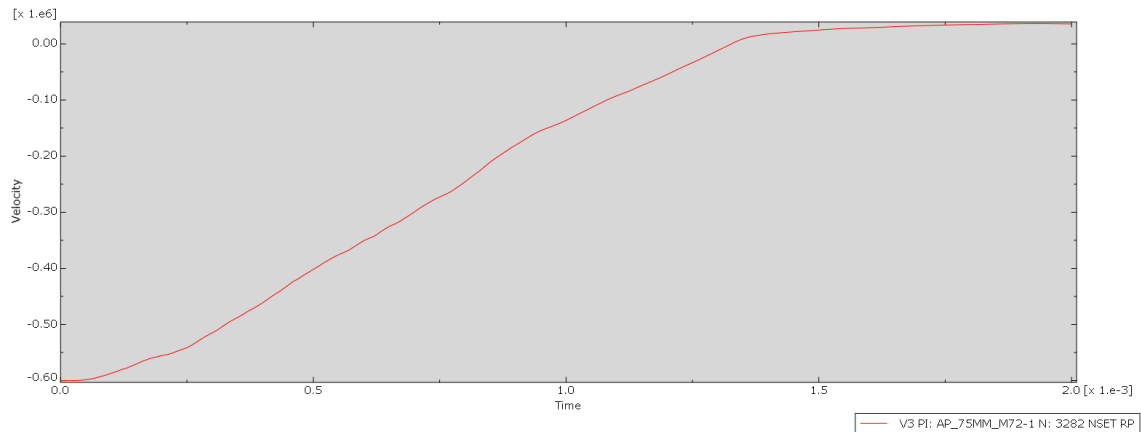


Figura 130: Gráfica Velocidad vs Tiempo del impacto sobre glacis a 8° sin JC

Fuente: Elaboración propia con ABAQUS.

Simulación:

14 - Impacto favorable inclinación 8° con JC.

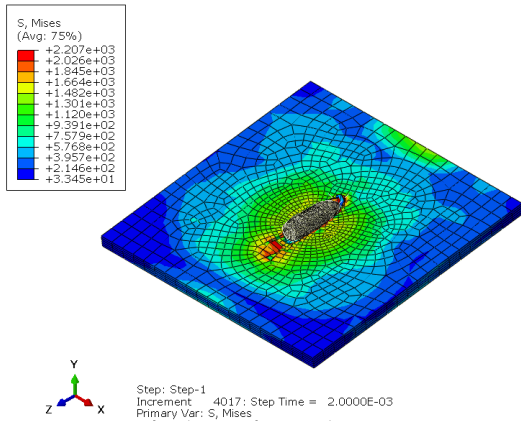


Figura 131: Impacto proyectil contra glacis a 8° con JC

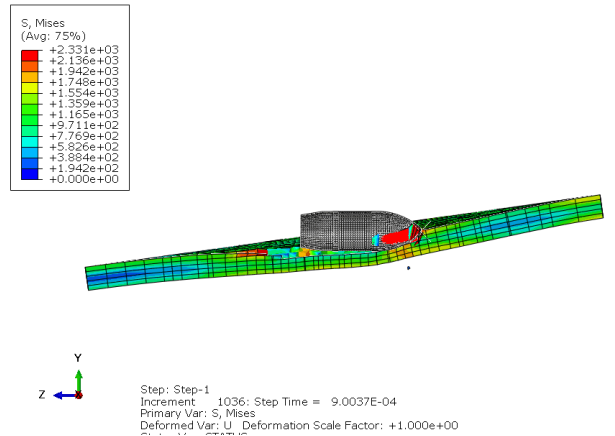


Figura 132: Tensiones VM máximas tras impacto sobre glacis a 8° con JC

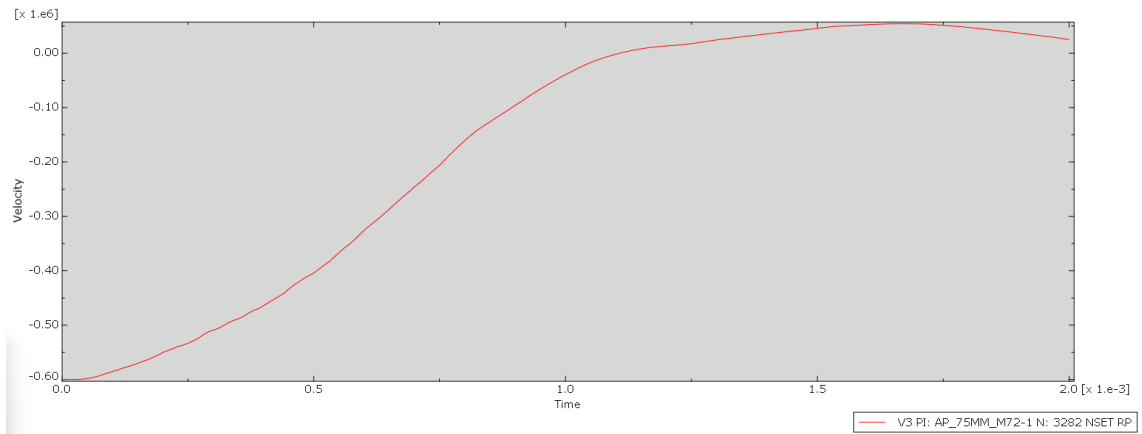
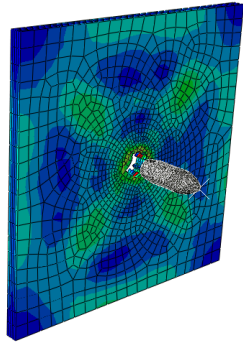
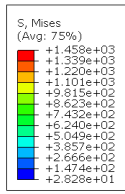


Figura 133: Gráfica Velocidad vs Tiempo del impacto sobre glacis a 8° con JC

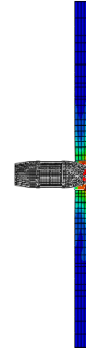
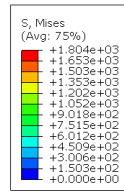
Fuente: Elaboración propia con ABAQUS.

Simulación:

15 - Impacto desfavorable inclinación 90º sin JC.



Step: Step-1
Increment 776: Step Time = 1.0000E-03
Primary Var: S, Mises
Deformed Var: U, Deformation Scale Factor: +1.000e+00



Step: Step-1
Increment 350: Step Time = 4.5044E-04
Primary Var: S, Mises
Deformed Var: U, Deformation Scale Factor: +1.000e+00

Figura 134: Impacto proyectil contra glacis a 90º sin JC

Figura 135: Tensiones VM máximas tras impacto sobre glacis a 90º sin JC

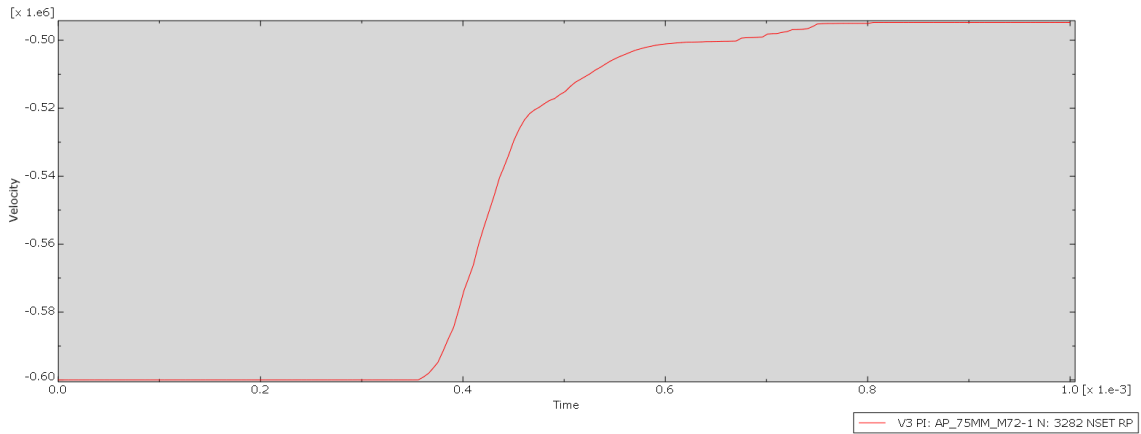


Figura 136: Gráfica Velocidad vs Tiempo del impacto sobre glacis a 90º sin JC

Fuente: Elaboración propia con ABAQUS.

Simulación: 16 - Impacto desfavorable inclinación 90º con JC.

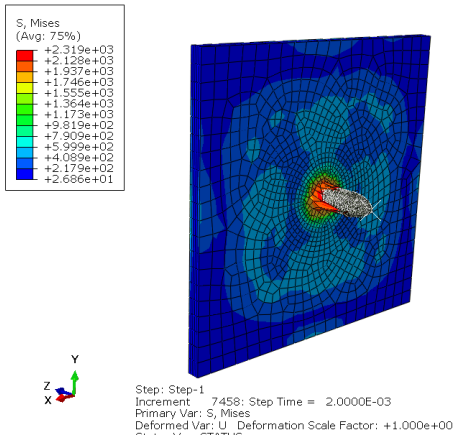


Figura 137: Impacto proyectil contra glacis a 90º con JC

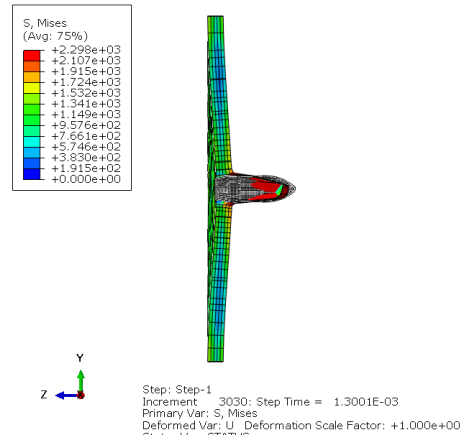


Figura 138: Tensiones VM máximas tras impacto sobre glacis a 90º con JC

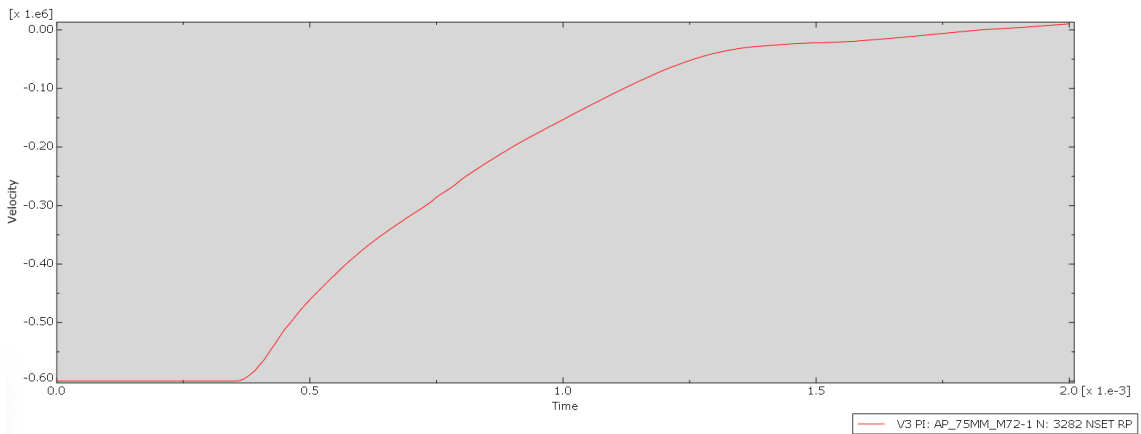


Figura 139: Gráfica Velocidad vs Tiempo del impacto sobre glacis a 90º con JC

Fuente: Elaboración propia con ABAQUS.

Parte: **Lateral**
 Espesor [mm]: **40**
 Material: **Acero Armox 500T**

Simulación: 17 - Impacto favorable inclinación 45° sin JC.

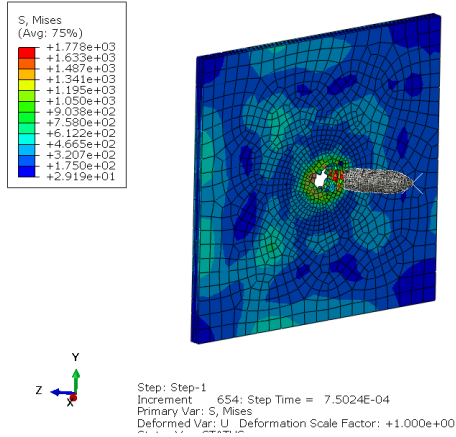


Figura 140: Impacto proyectil contra lateral a 45° sin JC

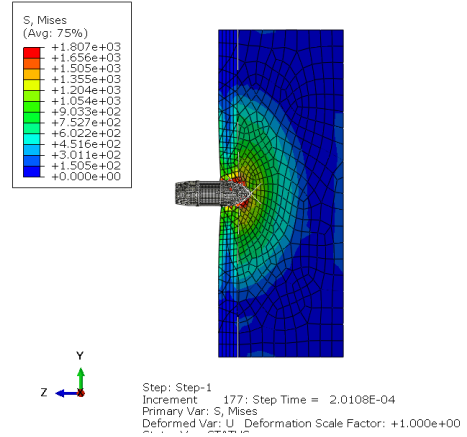


Figura 141: Tensiones VM máximas tras impacto sobre lateral a 45° sin JC

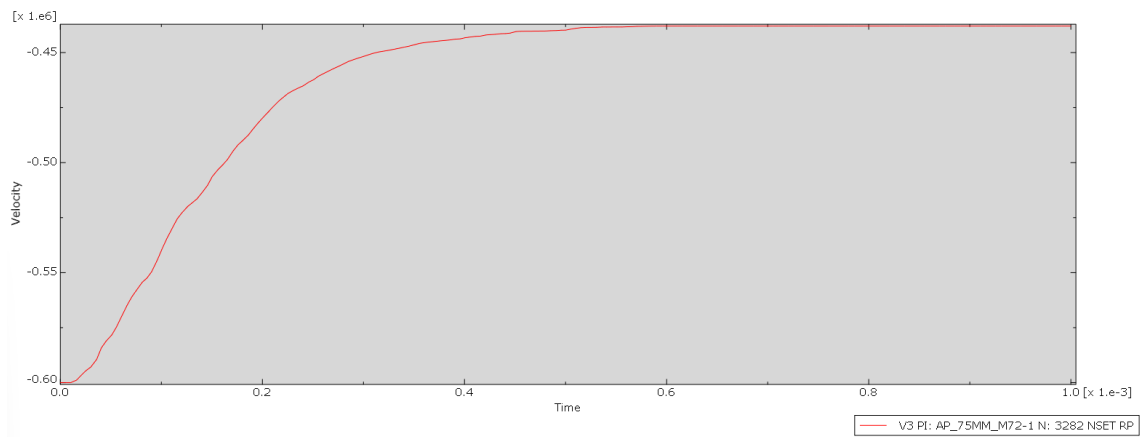


Figura 142: Gráfica Velocidad vs Tiempo del impacto sobre lateral a 45° sin JC

Fuente: Elaboración propia con ABAQUS.

Simulación: 18 - Impacto favorable inclinación 45° con JC.

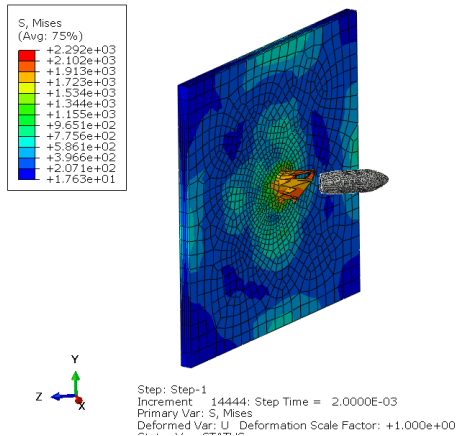


Figura 143: Impacto proyectil contra lateral a 45° con JC

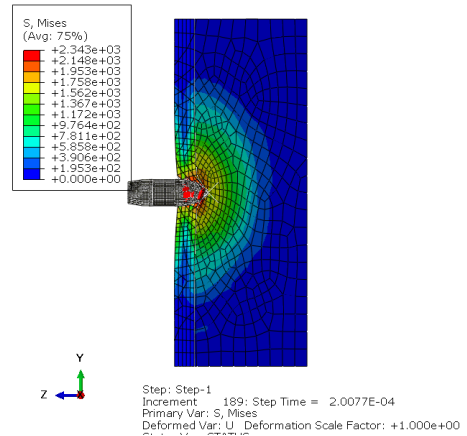


Figura 144: Tensiones VM máximas tras impacto sobre lateral a 45° con JC

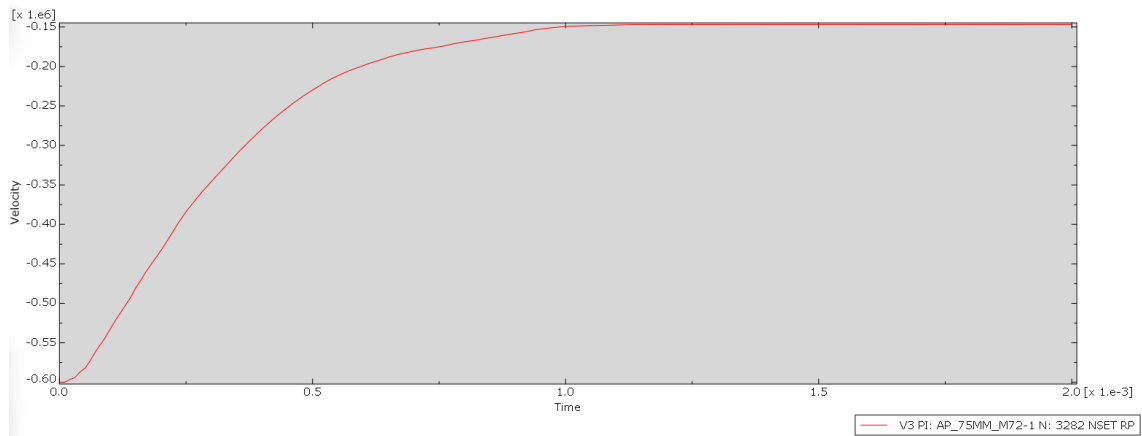


Figura 145: Gráfica Velocidad vs Tiempo del impacto sobre lateral a 45° con JC

Fuente: Elaboración propia con ABAQUS.

Simulación: 19 - Impacto desfavorable inclinación 90º sin JC.

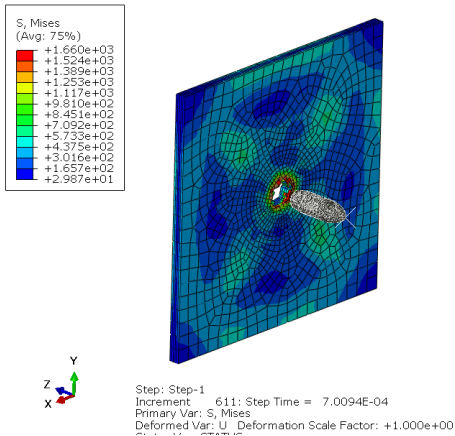


Figura 146: Impacto proyectil contra lateral a 90º sin JC

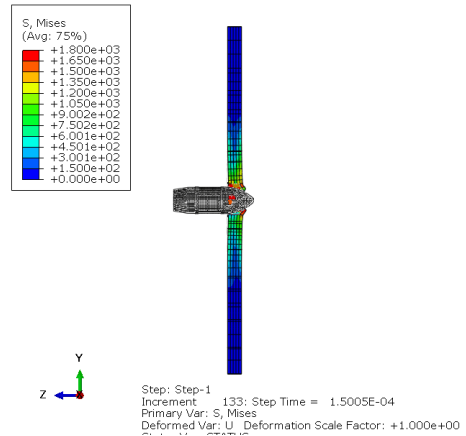


Figura 147: Tensiones VM máximas tras impacto sobre lateral a 90º sin JC

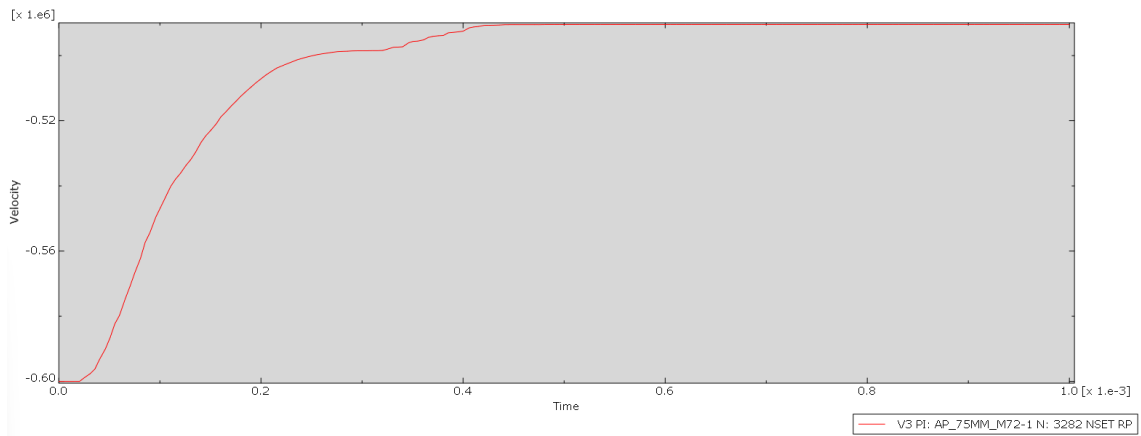


Figura 148: Gráfica Velocidad vs Tiempo del impacto sobre lateral a 90º sin JC

Fuente: Elaboración propia con ABAQUS.

Simulación: 20 - Impacto desfavorable inclinación 90º con JC.

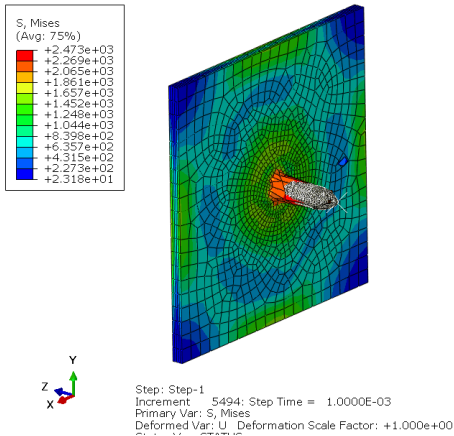


Figura 149: Impacto proyectil contra lateral a 90º con JC

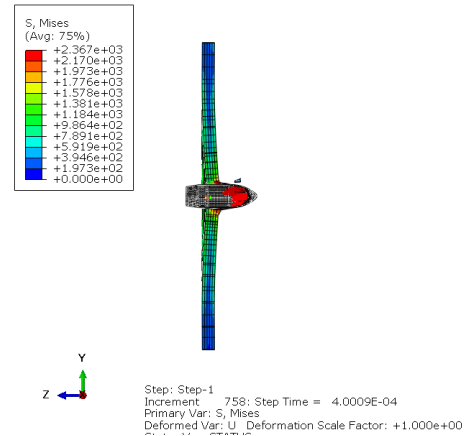


Figura 150: Tensiones VM máximas tras impacto sobre lateral a 90º con JC

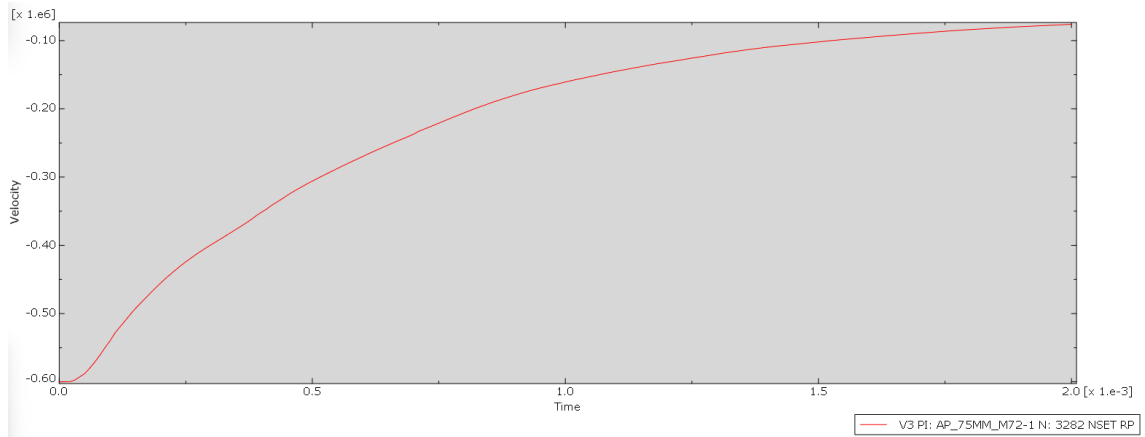


Figura 151: Gráfica Velocidad vs Tiempo del impacto sobre lateral a 90º con JC

Fuente: Elaboración propia con ABAQUS.

Parte: **Mantelete**
 Espesor [mm]: 100
 Material: Acero Armox 500T

Simulación: 21 - Impacto favorable inclinación 20° sin JC.

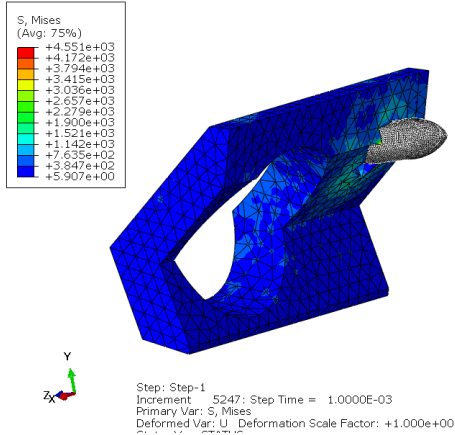


Figura 152: Impacto proyectil contra mantelete a 20° sin JC

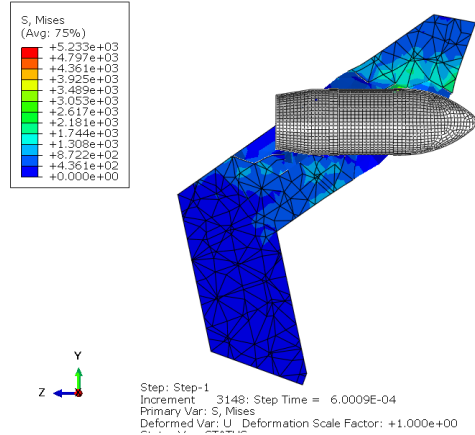


Figura 153: Tensiones VM máximas tras impacto sobre mantelete a 20° sin JC

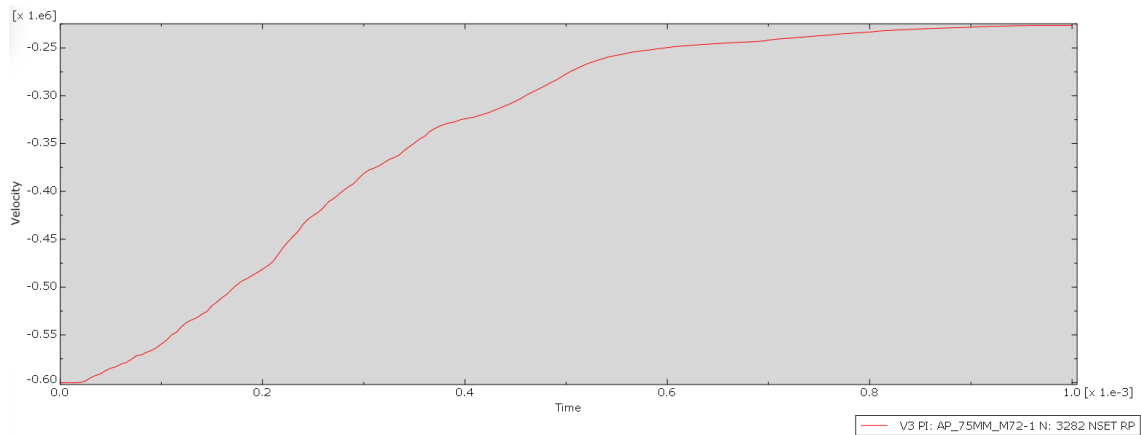


Figura 154: Gráfica Velocidad vs Tiempo del impacto sobre mantelete a 20° sin JC

Fuente: Elaboración propia con ABAQUS.

Simulación: 22 - Impacto favorable inclinación 20° con JC.

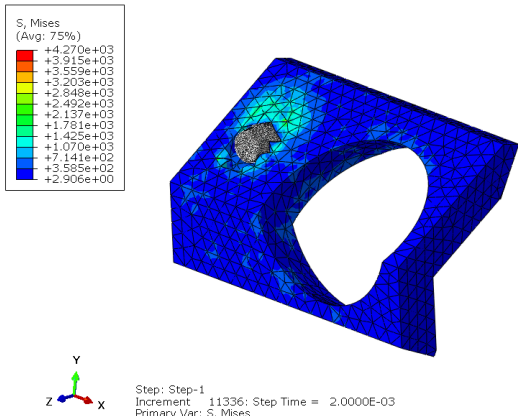


Figura 155: Impacto proyectil contra mantelete a 20° con JC

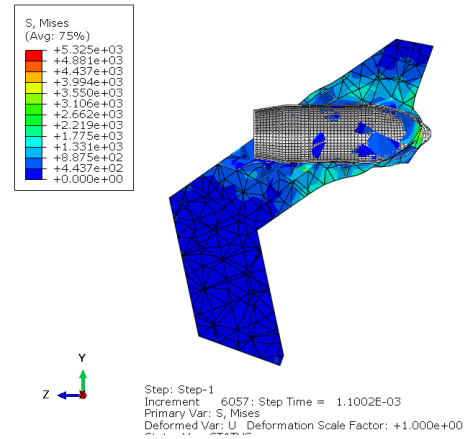


Figura 156: Tensiones VM máximas tras impacto sobre mantelete a 20° con JC

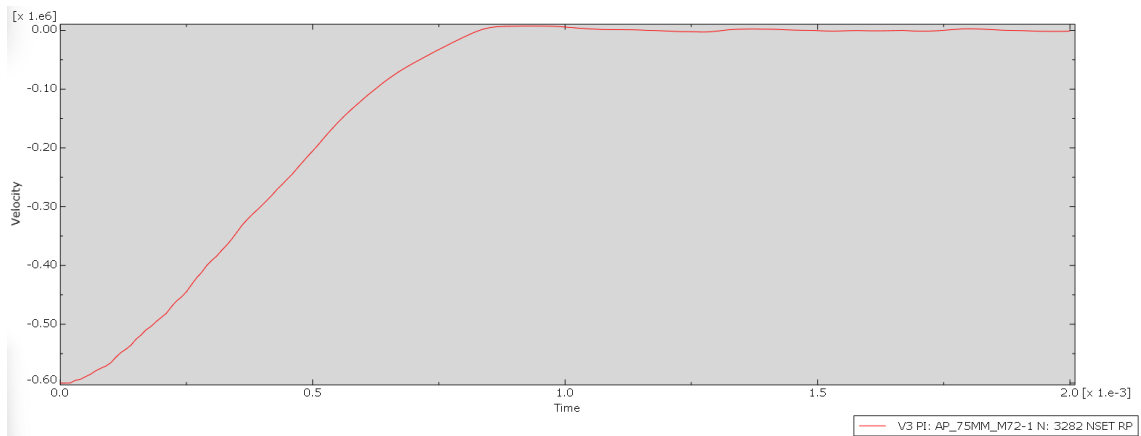


Figura 157: Gráfica Velocidad vs Tiempo del impacto sobre mantelete a 20° con JC

Fuente: Elaboración propia con ABAQUS.

Simulación: **23 - Impacto desfavorable inclinación 90º sin JC.**

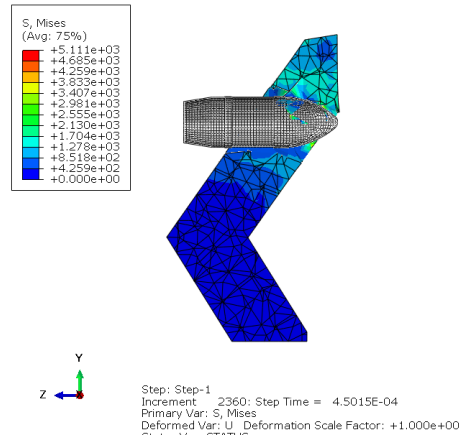
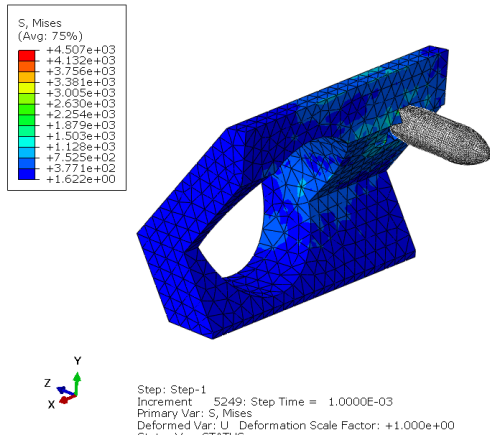


Figura 158: Impacto proyectil contra mantelete a 20º sin JC

Figura 159: Tensiones VM máximas tras impacto sobre mantelete a 20º sin JC

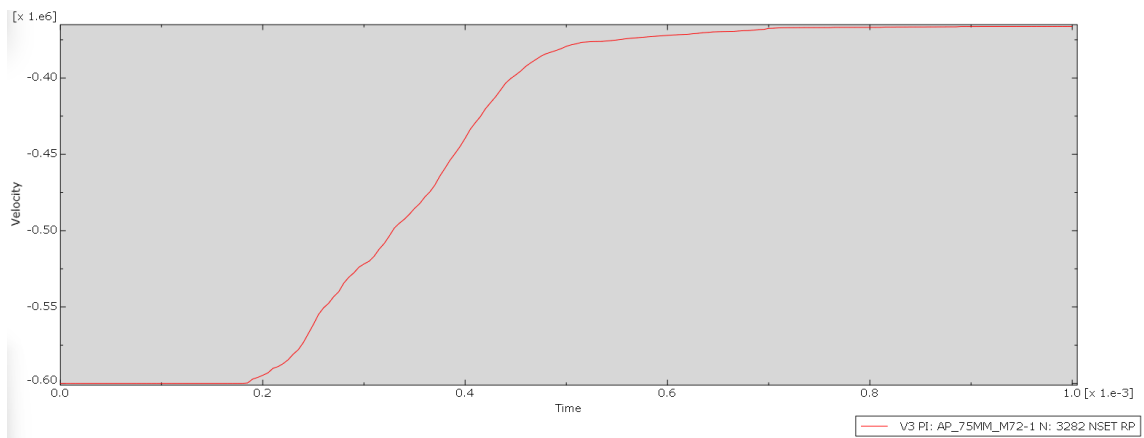


Figura 160: Gráfica Velocidad vs Tiempo del impacto sobre mantelete a 20º sin JC

Fuente: Elaboración propia con ABAQUS.

Simulación: 24 - Impacto desfavorable inclinación 90º con JC.

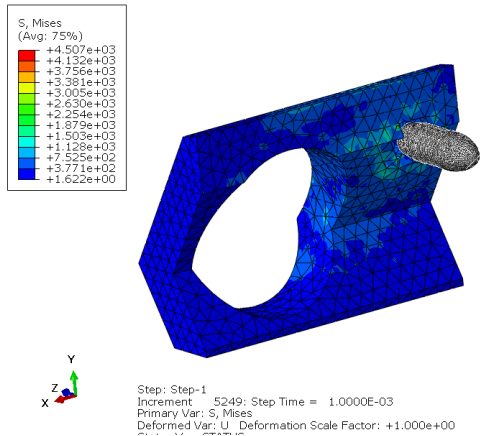


Figura 161: Impacto proyectil contra mantelete a 20º con JC

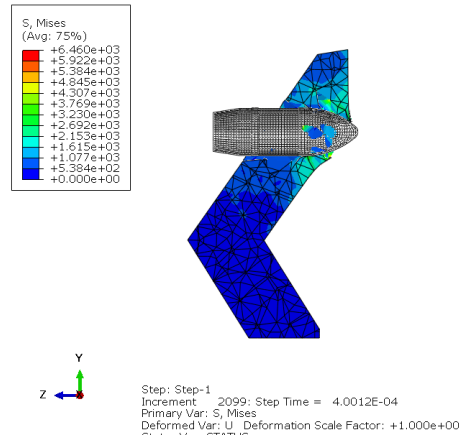


Figura 162: Tensiones VM máximas tras impacto sobre mantelete a 20º con JC

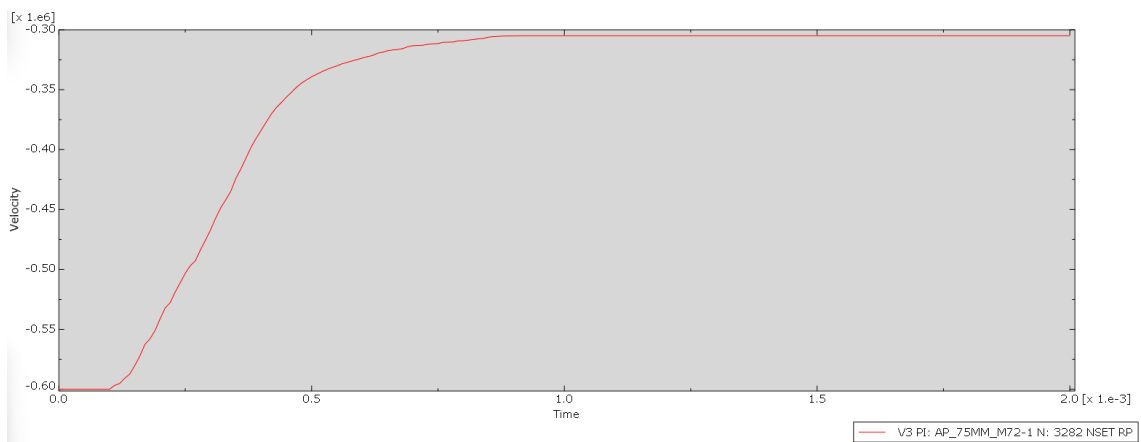


Figura 163: Gráfica Velocidad vs Tiempo del impacto sobre mantelete a 20º con JC

Fuente: Elaboración propia con ABAQUS.