

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

**TRABAJO FIN DE GRADO**

**MODELIZACIÓN Y ESTUDIO DE IMPACTOS  
DE PROYECTILES DE EXPANSIÓN SOBRE  
PLACAS BALÍSTICAS**

AUTOR: RAFAEL DE SOLIS GALINDO

TUTOR: MARCOS RODRÍGUEZ MILLÁN



*A mi abuela.*

## Resumen

En este Trabajo de Fin de Grado se va a realizar un estudio, tanto en diseño como en simulación, de balas expansivas y el impacto sobre diferentes tipos de placas balísticas. Se van a realizar cálculos numéricos para la simulación con el programa de elementos finitos Abaqus, con el objetivo de estudiar el comportamiento mecánico y dinámico del impacto sobre diferentes placas de blindaje corporal y sobre gel balístico.

Las balas expansivas aparecen a mediados de la década de 1870, también son conocidas como balas de punta hueca o proyectil blando. Su propósito es crear en el impacto un trauma mayor que el homólogo sólido ya que transmite mayor energía al objetivo a costa de una menor velocidad y menos posibilidades de atravesarlo.

Este estudio realmente no va a conseguir demostrar que un proyectil expansivo es capaz de atravesar una placa balística, sino la cantidad de energía que le transmite y la posibilidad de crear un trauma tras la placa. Sin embargo, en las simulaciones sobre Gel Balístico sí queremos estudiar el comportamiento del proyectil y su fragmentación mientras atraviesa dicho gel, simulando los efectos que tendría en un ser vivo.

Para este estudio se van a emplear placas de blindaje de acero del tipo "R500" utilizado por muchos ejércitos para la protección de infantería, y tejidos modernos fabricados en "Kevlar" que son utilizados en chalecos y protecciones más compactas y ligeras. Para analizar el trauma producido por el impacto sobre una placa, se utiliza "Plastilina ROMA nº1 Gris" como estándar por la mayoría de las organizaciones y empresas internacionales para establecer los límites de traumas admisibles sin penetración. Y finalmente se utiliza "Gel Balístico" para estudiar el hipotético impacto que tendría el impacto sobre un ser vivo, ya que dicho gel posee características mecánicas similares al tejido y músculo humano.

En cuanto al análisis se ha realizado un modelo numérico de las propiedades mecánicas y dinámicas tanto de las diferentes placas como de los proyectiles. Los resultados obtenidos serán comparados con otros estudios existentes donde se predice el comportamiento mecánico de impactos y con ensayos físicos para comprobar la plausibilidad de que el modelo numérico se aproxima a la realidad.

# Índice

MODELIZACIÓN Y ESTUDIO DE IMPACTOS DE PROYECTILES DE EXPANSIÓN SOBRE PLACAS BALÍSTICAS.....	0
1. INTRODUCCIÓN.....	5
1.1 Motivación: .....	6
1.2 Objetivos: .....	7
1.3 Metodología:.....	8
2. ESTADO DEL ARTE:.....	9
2.1 proyectiles expansivos.....	10
2.2 Munición expansiva R.I.P .....	12
2.2.1 Prueba I: Cuatro capas de tela dura (denim):.....	16
2.2.2 Prueba II: Madera contrachapada:.....	18
2.2.3 Prueba III: Doce capas de tela dura (denim):.....	20
2.2.4 Evaluación de rendimiento terminal: .....	21
2.3 Placas y materiales balísticos:.....	26
2.3.1 Placa balística AR500:.....	27
2.3.2 Plastilina ROMA N.º 1:.....	33
2.3.3 Gel balístico: .....	35
3. DEFINICION Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES:.....	39
3.1 Acero AISI 4340: .....	41
3.2 Bronce:.....	47
3.3 Plomo: .....	48
3.4 Plastilina ROMA Nº1:.....	49
3.5 Gelatina balística:.....	51
4. MODELO TRIDIMENSIONAL DE SIMULACIÓN: .....	55
4.1 Modelo de Bala: .....	56
4.2 Modelo de Placa:.....	60
5. PROCEDIMIENTOS Y SIMULACIONES .....	62
5.1 Condiciones de contorno:.....	63
5.2 Simulaciones:.....	64
5.2.1 Test de condiciones: .....	64



5.2.2 Simulación con chapa: .....	65
5.2.3 Simulación con plomo: .....	67
5.2.4 Simulación con plomo 2: .....	68
5.2.5 Simulación con rotación: .....	71
5.2.6 Simulación en placa de 2 mm: .....	72
5.2.7 Simulación en placa de 3mm: .....	75
5.2.8 Simulación con plastilina ROMA: .....	76
5.2.9 Simulación con placa de gel balístico:.....	78
5.2.10 Simulación en bloque de gel balístico: .....	82
6. Conclusiones finales: .....	83
7. ANEXOS.....	84
6.1 Anexo 1: .....	85
6.2 Anexo 2: .....	92
6.3 Anexo 3: .....	96
6.4 Anexo 4: .....	97
8. BIBLIOGRAFÍA.....	98



# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Motivación:

Las balas expansivas han ido evolucionando a lo largo de la historia, el primer modelo de bala hueca apareció en torno a 1870, una bala utilizada para la caza que posteriormente fue adaptada por el ejército británico para reprimir las revueltas en la India a finales del siglo XIX. El uso extendido de este tipo de proyectil fue en la Primera Guerra Mundial, donde fueron apodadas “Dum-Dum”.

El uso de las balas expansivas está prohibido desde 1899 con la firma de la Convención de Hague (1899 y 1907), aunque en 1868 en la “Declaración de St. Petesburgo” ya se prohibía el uso de munición explosiva de menos de 400g, también hay un apartado sobre este tipo de munición en la convención de Ginebra (1929).

Aunque el uso de esta munición está expresamente prohibido en conflictos bélicos, si tiene uso para determinadas situaciones empleadas por las fuerzas de seguridad de cada país, como son situaciones de asaltos con rehenes, ataques terroristas y para evitar daños colaterales por proyectiles rebotados (aunque para eso se usan comúnmente balas sin camisa metálica parcial o total). En cuanto al uso civil son usadas para la caza mayor y en algunos países se pueden comprar para defensa personal.

La finalidad de estas balas son las de causar el mayor daño posible sobre su objetivo, siendo casi imposible curar las heridas producidas por la fragmentación interna que producen, por lo que detienen al objetivo casi al instante. Debido a la deformación que sufren y la cantidad de energía que disipan, estos proyectiles no son una gran amenaza contra placas blindadas, aunque la dispersión crea un área mayor de trauma.

Debido al carácter aleatorio de la fragmentación es necesario realizar simulaciones numéricas para optimizar un buen diseño que cumpla con las necesidades básicas como proyectil (vuelo, velocidad, caída...) y con las necesidades como expansivas (penetración, expansión y fragmentación). Dichas simulaciones pueden ahorrar costes de fabricación, costes de materiales de ensayo y de posibles heridos ya que al ser balas irregulares su comportamiento en un arma puede producir fallos mecánicos que produzcan la explosión del cañón hiriendo al personal del ensayo.

Sin embargo, es difícil encontrar literatura relacionada con este campo o artículos científicos donde se detallen modelos científicos que se puedan aproximar al objetivo de forma fiable; por este motivo y lo atractivo de este campo siempre en avance e investigación, tanto en la parte defensiva como la ofensiva, es lo que ha motivado la realización de este proyecto.

## 1.2 Objetivos:

El objetivo principal del proyecto es estudiar y ampliar las investigaciones actuales en cuanto a este campo, ya que se trata de un tema poco estudiado desde el punto de vista científico sin tener en cuenta las investigaciones privadas y gubernamentales que no son del dominio público, y arrojar algo de luz en un campo que evoluciona constantemente y cada vez más se investiga en nuevos tipos de proyectiles.

En el estudio se ha empleado el programa Abaqus, una potente herramienta de cálculo numérico mediante el método de Elementos Finitos, para así observar el comportamiento mecánico de nuestro sistema mediante simulaciones computacionales, y con ello poder predecir el comportamiento de cualquier problema de impacto sobre diferentes tipos de placas balísticas y tejidos orgánicos. Para la realización del proyecto se establecieron una serie de objetivos que ayudarían de alguna forma en este campo si se cumplen:

- Crear un modelo numérico que se aproxime lo más posible a la realidad para reproducir el comportamiento de impactos expansivos sobre varios tipos de placas y contrastar su validez con otros estudios existentes y con ensayos reales sobre las mismas placas.
- Analizar los efectos que influyen en el comportamiento de este tipo de proyectiles:
  - Penetración y Expansión: Es el efecto más importante para el diseño optimizado de proyectiles expansivos capaces de realizar un gran trauma sin apenas realizar daños colaterales, y sin perder cualidades aerodinámicas que empeoren el vuelo de dichas balas.
  - Trauma producido: Otro punto a estudiar es la posibilidad de generar trauma, aunque no exista penetración sobre una placa balística, ya sea rígida o de origen textil.
  - Geometría del proyectil: Importante conocer dicha característica porque determinará las consecuencias que produzca en los impactos tanto en la penetración, expansión y la posible fragmentación.
  - Condiciones de contorno: Tanto como las características anteriormente citadas, también es importante tener un control claro de las condiciones de contorno que determinaran el comportamiento mecánico y será decisivo su estudio a lo largo del proyecto.
- Demostrar si los resultados obtenidos numéricamente son plausibles comparándolos con otros artículos existentes en la literatura científica y encontrar la justificación con fundamentos teóricos.

## 1.3 Metodología:

Para poder cumplir con los objetivos descritos anteriormente, se ha empleado la siguiente metodología, que estructurará todo el trabajo:

- I. **Búsqueda y estudio de información:** Uno de los primeros pasos es realizar una búsqueda exhaustiva de información sobre el objeto de estudio, tanto en literatura científica como en manuales prácticos y documentación militar, para así abarcar un gran conocimiento del campo, desde la parte más teórica del lado de la ciencia, hasta la parte más empírica donde realmente podremos hacer una idea de su funcionamiento y comprender conceptos propios del campo. De esta manera buscaremos información tanto antigua como moderna para poder realizar una visión del estado del arte y de los trabajos anteriores. Todos los conocimientos teóricos que se adquieren serán parte fundamental para cumplir con los objetivos y construir una base de conocimientos que nos posibilite razonar la plausibilidad de los ensayos.
- II. **Creación y validación del modelo:** Con todos los conocimientos obtenidos se crea un modelo numérico con el que trabajar, dicho modelo ha de compararse con los datos de la literatura científica de ensayos similares y validarlos con nuestro modelo.
- III. **Estudio y análisis de resultados:** Con el modelo ya creado y validado, ya se pueden realizar todos los estudios necesarios. Para cada estudio realizado se han comparado los resultados obtenidos con los resultados publicados en artículos científicos del mismo campo y darles un razonamiento teórico.



## 2. ESTADO DEL ARTE:

## 2.1 Projectiles expansivos

Desde que apareció este tipo de munición (finales S.XIX), ha habido muchas formas de fabricarlas con diseños desde muy simples y efectivos al principio, hasta unos muy complejos devastadores como los que podemos encontrar en la actualidad. La premisa fundamental ha sido siempre causar el mayor daño posible en tejidos blandos, como es el caso del tejido muscular humano, transfiriendo la mayor cantidad de energía por medio de la fragmentación y la expansión de una o varias partes del proyectil.

En un primer inicio estas balas no eran más que una munición de plomo con un vaciado en la punta para crear la oportunidad de expansión por medio de la penetración de tejido blando en dicha cavidad, de este modelo encontramos munición para caza del tipo Hollow-point de 1870 [Fig1] que más tarde emplearían los británicos en la India [1].



modelos actuales son una combinación de plomo y camisa metálica, normalmente están

*Figura 1: Dibujo de bala Hollow-point antes y después del impacto (1870).*

mecanizadas para obtener la geometría óptima para la expansión. Una de las más utilizadas es la Hollow-point con camisa metálica de cobre [Fig2], muy utilizada entre las fuerzas de seguridad, ya que estas no rebotan y tampoco atraviesan si el disparo es efectivo, con lo que se reducen notablemente los daños colaterales que se puedan producir en determinadas situaciones.



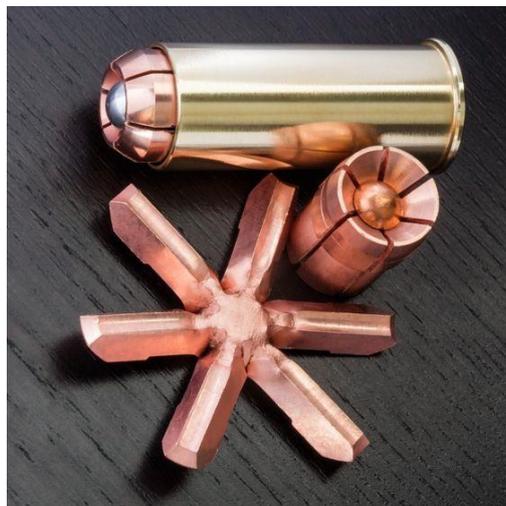
*Figura 2: Dibujo esquema de bala Hollow-point con vista en corte.*

La munición del tipo Hollow-Point puede clasificarse como proyectil expansivo [Fig3], por lo que no se genera fragmentación alguna, lo que genera un trauma algo menos complicado que las balas que generan fragmentación.



*Figura 3: Detalle de la expansión de una bala Hollow-point.*

Las tendencias actuales sobre este tipo de munición son enfocadas a una optimización de la geometría, prescindiendo del plomo como material de peso en la bala, y se está optando por proyectiles fabricados en su totalidad con cobre o aleaciones de bronce [Fig4]. Se trata de munición ligera que alcanza velocidades muy altas y poseen un gran poder de expansión y fragmentación.



*Figura 4: "OATH Ammunition" bala calibre 12.*

Para este trabajo se ha estudiado en particular la munición "R.I.P" de la compañía estadounidense "G2 Research".

## 2.2 Munición expansiva R.I.P

El diseño del proyectil R.I.P. de G2Research se relaciona con la capacidad de controlar la forma en que el proyectil reacciona al pasar a través de diferentes medios mediante el control del proceso de fabricación, la geometría y la tasa de fallo en diferentes zonas a lo largo de su eje axial. Más particularmente, este proyectil tiene la capacidad de comportarse como cualquier otro proyectil común mientras atraviesa un sólido rígido y la capacidad de expandirse al atravesar otro tipo de sólido sin modificar ningún aspecto de la bala.



*Figura 5: Detalle de munición R.I.P. 9mm de G2R.*

La geometría en la punta del proyectil tiene mucho que ver con la forma en que el proyectil viaja a través del tejido, desde hace mucho tiempo se sabe en la industria médica que una punta con forma de trocar penetra la capa de la dermis de manera más eficiente. Las patentes de trocates aparecieron a principios del siglo XIX, aunque su uso se remonta posiblemente a miles de años. Es el uso de esta geometría en la punta del proyectil lo que hace un trabajo específico en el punto de entrada de un sistema al siguiente. Dependiendo del medio, la geometría de los proyectiles está diseñada para reaccionar de manera diferente.



*Figura 6: Detalle de la geometría de trocar del proyectil.*

En un fluido, el proyectil se fragmenta. Debido a la geometría del trocar de cada pétalo, se maximiza el diámetro resultante del patrón de fragmentación. Las puntas de los trocares permiten que los fragmentos pasen a través del tejido / gel con menos resistencia, conservando así la energía. Los grosores y las geometrías de la sección transversal también crean un giro completo de 180 grados a la mitad de cada uno de los 8 pétalos. La onda de choque resultante y la trayectoria de la herida se maximizan. El resultado es devastador.

“El implacable estudio y la física aplicada de G2R han derivado en un proyectil radicalmente invasivo que supera al resto” según afirma la propia G2R [2].

En la actualidad hay mucho interés en el proyectil R.I.P. Su video de marketing se ha vuelto viral, con más de 1.5 millones de visitas, e incluso la prensa dominante se ha puesto al día con la historia de la nueva y sorprendente munición que es "como ningún otro proyectil que el mundo haya visto jamás". La compañía ha estado haciendo afirmaciones muy audaces sobre el rendimiento de esta nueva bala. Con estudios no muy profundos se puede desmontar algunos de las afirmaciones que G2R utiliza, siendo poco probables o incluso imposibles.

El portal *Thetruthaboutguns* realizado la primera revisión independiente del mundo del rendimiento real de la munición en escenarios de prueba controlados [3].

Realizaron pruebas en dos fases: pruebas básicas en gel y pruebas más avanzadas para reclamos sobre la penetración de barreras y contra munición convencional.



Figura 7: Presentación de la munición de G2 Research.

Lo primero que expone el portal es el coste del proyectil, 50\$ por 20 cartuchos, eso es 2.50\$ (2.022 €) por bala, rendimiento tendrá que justificar el precio. También se preguntan si este proyectil va a sufrir problemas de alimentación dentro de las armas debido a su forma tan especial llena de bordes afilados, y a veces, las armas tienen problemas para alimentar munición hueca ya que los bordes agresivos se quedan enganchados en el interior del mecanismo del arma.

En los ensayos se utilizó gelatina balística profesional VYSE estándar de Gelatin Innovations. La gelatina balística es el simulador de tejidos blandos humano más preciso disponible, y es lo que los verificadores profesionales de balas usan para evaluar la penetración y el potencial de daño de las municiones.

En términos de velocidad, en el ensayo la munición de G2R superó la calificación del fabricante, la establecen a 1265 fps (1388,06 km/h), pero el rendimiento observado en una GLOCK 19 fue un poco más alto, alrededor de 1313 fps (1440,73 km/h).



Figura 8: Detalle de la pistola empleada en los ensayos.

Con el primer disparo sobre el gel, se observó que su expansión fue según lo que especifica el fabricante. Los "trocares" se separaron y la base entró profundamente, funcionó prácticamente como fue diseñado. Sin embargo, no cumplió con sus especificaciones enumeradas.

G2 afirma que los trocares tienen una dispersión de 6" (152,4 mm), pero en el ensayo la dispersión fue de 4.5" (101,6 mm) de ancho x 3.5" (88,9 mm) de alto. En cuanto a la penetración, G2R reclama de 15"a 17" (381 mm a 431,8 mm), en las pruebas no se alcanzaron esos valores, sino que la penetración bajó hasta los 12.75" (323,85 mm), siendo los estándares establecidos por el FBI en un mínimo de 12" (304,8 mm), por lo que la penetración obtenida demuestra una penetración suficiente para poder llegar a los órganos vitales, según los estándares, además de producir una herida incapacitante.

En la siguiente figura se muestra cómo impacta el gel, en el punto donde la cavidad de estiramiento temporal estaba en su mayor tamaño:



Figura 9: Detalle de cavidad temporal de máxima expansión.

Y, en la siguiente figura se observa el daño permanente dejado en el bloque de gel por el G2 R.I.P.



Figura 10: Detalle del daño permanente producido por el proyectil.

¿Cómo se puede cuantificar el rendimiento en términos que podamos entender, cuando estamos hablando de una bala que la compañía pregona como un proyectil revolucionario que cambia el juego?

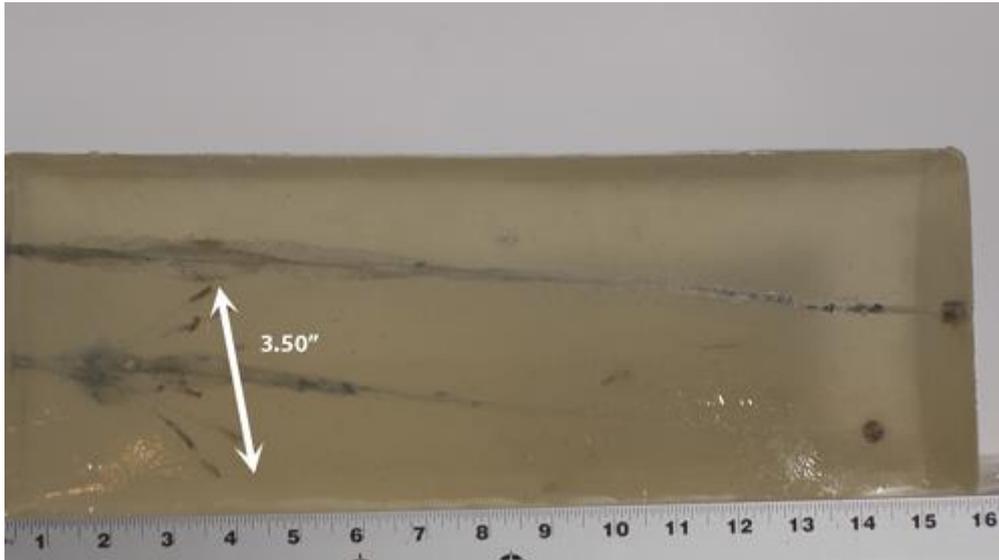
Para ponerlo en contexto, la mejor manera de hacerlo sería usar munición convencional para simular el daño y compararlo con el proyectil de G2R, incluso intentar replicar el mismo daño, pero por medio de munición estándar y así intentar comparar ambos resultados en los mismos términos e identificar cual es el diferenciador.

Otra de las características que propone el fabricante es la capacidad de atravesar barreras sin perder sus cualidades tras atravesarla, incluso sin expandirse, pero ¿cuál es el rendimiento residual de la bala, una vez que supera esa barrera? La bala de G2R es diferente a las balas de punta hueca convencionales. Aproximadamente la mitad del material de la bala se usa para hacer la cavidad de la punta hueca, ese material se corta en tiras finas para hacer los trocares. ¿Se taponará esa cavidad hueca? ¿Se romperán las tiras del trocar o se doblarán? ¿Cómo resistirían esos a las barreras?, esas son las preguntas que debemos esclarecer.

### 2.2.1 Prueba I: Cuatro capas de tela dura (denim):

En la primera prueba, se utilizó un bloque de gel balístico sintético "ClearBallistics" y cuatro capas de "denim", o tela dura de tipo vaquera, siguiendo el protocolo estándar IWBA (16 oz por yarda cuadrada, 0.5kg por 0.84m<sup>2</sup>). La bala atravesó el denim, se expandió dentro del gel y la base penetró a 14.25" (361,95 mm). Atravesar las cuatro capas de denim no tuvo ningún efecto en la bala; la cavidad de daño resultante se parecía más o menos a la cavidad de daño de la prueba de gelatina desnuda.

Los trocares se extendieron a un diámetro de 3.5" (88,9 mm), y penetraron a cerca de 4" (101,6 mm) de profundidad. Una vez más, ninguno de esos resultados cumple con los reclamos de G2R (donde dicen que logrará una dispersión de 6" (152,4 mm), y de 15 a 17" (381 mm a 431,8 mm) de penetración, pero esa es otra pregunta que puede abordarse más adelante.



*Figura 11: Detalle del daño producido tras atravesar el denim.*



*Figura 12: Detalle de la dispersión de los trocares.*

Para comparar los resultados se hicieron también pruebas con munición de tipo Hollow-point, en concreto munición HST, esta munición Penetró 16" (406,4 mm) y se expandió a un diámetro promedio de .460" (11,68 mm). Ambas balas pasaron a través del gel cubierto de denim exactamente como se esperaba, y de forma muy similar a cómo lo habían hecho en el gel desnudo. La HST se expandió un poco menos que en el gel desnudo, como es típico en las pruebas de gel cubiertas de denim, en el gel desnudo se expandió a .522" (13,26 mm).



Figura 13: Detalle del proyectil recuperado del gel.

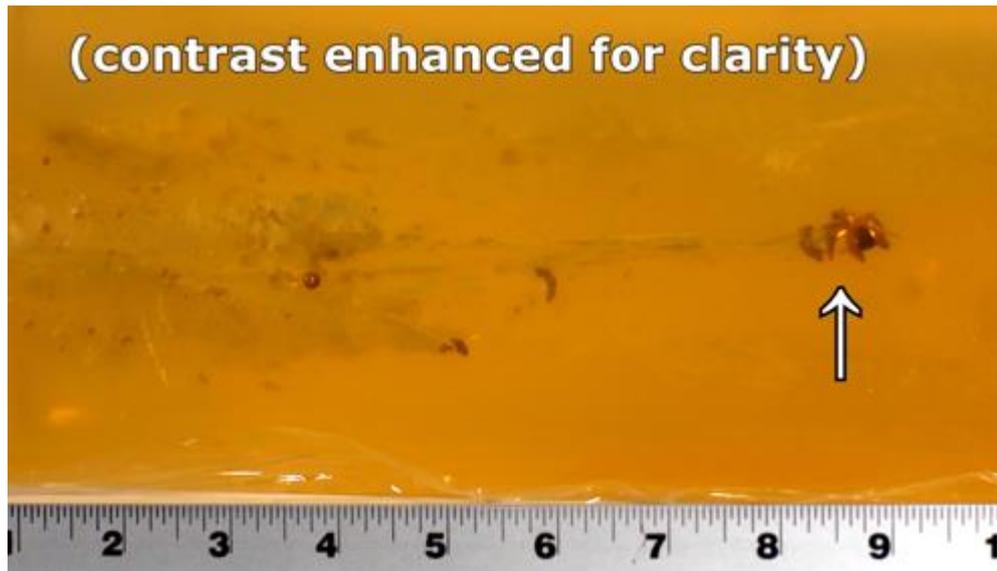
### 2.2.2 Prueba II: Madera contrachapada:

Uno de los protocolos de prueba estándar del FBI es disparar a través de 3/4" (76,2 mm) de madera contrachapada. En las pruebas se realizó lo mismo, pero no era exactamente lo mismo que hace el FBI, la prueba del FBI especifica una distancia de 18" (457,2 mm) entre la madera contrachapada y el bloque de gel, con una capa de ropa ligera sobre el bloque de gel, así que simplemente se puso la madera contrachapada justo en frente del gel. Después de todo, el objetivo no era tratar de realizar una prueba específica del FBI, sino examinar cómo funcionaban las dos municiones después de encontrar una hoja de madera contrachapada en su trayectoria.

Además, el FBI usa un tipo específico de abeto para su prueba de contrachapado, lo que sabemos es que es madera contrachapada de 3/4" (76,2 mm) probablemente abedul, por lo que no podemos afirmar que esto sea una recreación de la prueba de contrachapado de los laboratorios del FBI.

G2R afirma que su munición atraviesa todas las barreras conocidas, como la madera contrachapada, en el test atravesó la madera y entró en el gel, así que sí, derrotó a la madera contrachapada, a diferencia de la prueba con denim, en la prueba de contrachapado no era lo mismo que en el gel desnudo: solo tres de los trocares se

rompieron, los otros cinco se quedaron adjuntos, esto hizo un bloque de gel bastante interesante; el hueco dejado por la bala R.I.P. se asemeja al hueco expandido de una bala convencional, con un gran diámetro de expansión. Debido al diámetro más grande, tampoco penetró tan profundamente, se detuvo a aproximadamente a 9.25" (234,95 mm), la cavidad de expansión inicial no era tan grande como en las pruebas con gel desnudo o con denim, aproximadamente 1.50" (38,1 mm) de ancho.



*Figura 14: Detalle del daño producido en la prueba II.*

Los trocares que se rompieron realmente no se desplegaron como en las pruebas de gel anteriores. En las pruebas de gel desnudo y denim, los trocares se rompieron y se mantuvieron rectos y largos, cada uno creando su propio canal de herida, en la prueba de contrachapado, solo tres se rompieron y quedaron curvados, como los que permanecieron unidos a la bala. Solo uno de estos trocares curvos separados trató de avanzar por su propio camino, los otros básicamente se quedaron en la cavidad central del daño, muy similar a la forma en que una Hollow-point se expande, frecuentemente arroja pétalos que permanecen en la cavidad permanente.

Los HST no hicieron bien aquí, en el primer disparo atravesó la madera contrachapada y entró en el gel, pero no se expandió. Sobrepasó y siguió penetrando hasta aproximadamente 23.50" (596,9 mm), en el siguiente intento se obtuvieron resultados similares; atravesó la madera y el gel, pero tampoco se expandió, penetrando unos 22.25" (565,15 mm).

Ninguna de las dos municiones tuvo éxito en esta prueba improvisada de contrachapado no estándar.

### 2.2.3 Prueba III: Doce capas de tela dura (denim):

Para la prueba número tres, se intentó demostrar el reclamo que G2R estaba haciendo en el que decía que su bala penetraría a través de 12 capas de denim gruesas y que seguiría funcionando como estaba diseñado. Doce capas no es una prueba estándar, por supuesto, Las cuatro capas de la prueba de denim se diseñaron para presentar el peor escenario posible para una bala, y el propósito de la prueba de cuatro capas es ver si una bala de punta hueca se obstruye y no se expande.

Para la prueba se usó el mismo denim, pero se amplió a 12 capas sobre un bloque de gel balístico orgánico al 10% y se disparó una bala de cada en el bloque.

La bala R.I.P. hizo lo que dijeron que haría, cortó las 12 capas, los trocares se rompieron, hizo una cavidad de 2" (50,8 mm) de diámetro y la base penetró a 14.25" (361,95 mm). Realmente se ve más o menos exactamente igual a como lo hizo a través de cuatro capas, excepto que los trocares no giraron y crearon un anillo de 8 canales de heridas separadas, que simplemente se juntaron en la cavidad de daño inicial.

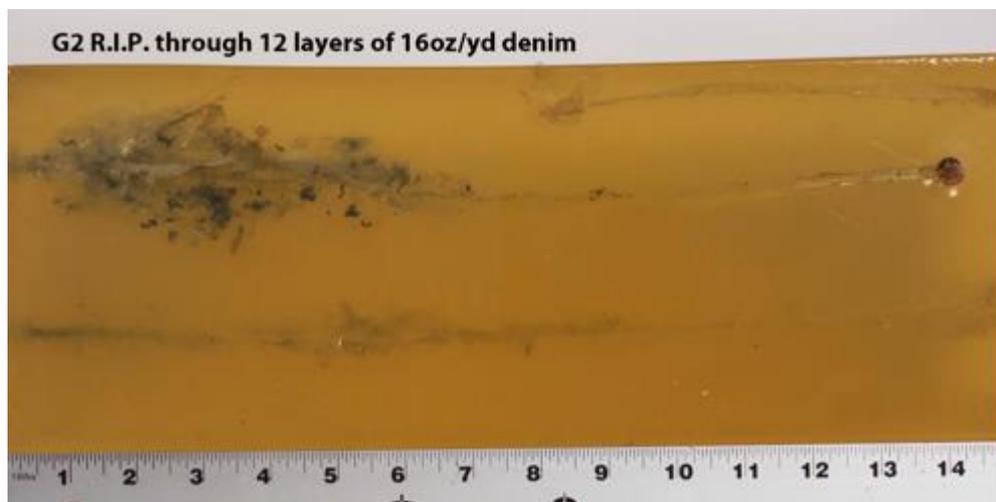


Figura 15: Detalle del daño tras pasar por 12 capas de denim.

## 2.2.4 Evaluación de rendimiento terminal:

La munición de G2R lo hizo sorprendentemente bien a través de las barreras, se comportó muy bien atravesando el algodón de 4 capas y 12 capas, y penetró a través de la madera contrachapada y aún logró expandirse; la penetración es extremadamente superficial en la prueba de las 4 capas de Denim, y el hecho de que no crean un daño disperso notable en la prueba de 12 capas de Denim y contrachapado, llevan a creer que tal vez crean una superficie desagradable, pero una herida poco profunda, sin embargo, penetra lo suficientemente profundo como para llegar a los órganos vitales, y se debe evaluar su potencial para causar una incapacidad involuntaria.

Dado ese contexto, examinemos los proyectiles recuperados y veamos si podemos alcanzar alguna conclusión.



Figura 16: Comparación del estado de cada munición tras el ensayo.

En la parte superior de la imagen se encuentran las balas recuperadas de la gelatina orgánica desnuda. En el proyectil R.I.P. la bala mide .375" (9,52mm) de diámetro en la parte frontal (el corte de los trocares dejó un poco de rebarba en la cara frontal, lo que aumenta el diámetro un poco por encima del cuerpo principal de la bala, que mide .355" (9,02mm)), podemos determinar que el G2R R.I.P. presenta 71 milímetros cuadrados de área, en 48,4 gr (3,14g) de peso.

Utilizando las fórmulas matemáticas de selección de municiones cuantitativas de Schwartz, podemos calcular que la base del R.I.P destruirá 19,66 gramos de tejido. El HST, por otro lado, se expandió a un diámetro promedio de .522" (13,26 mm). Eso le da una superficie total casi dos veces más grande que la bala de G2R, 137 mm cuadrados. Y, combinado con la penetración más profunda del HST, eso nos da un nivel total de destrucción de tejido de 44,34 gramos.

En cuanto a la destrucción total del tejido, podríamos aumentar el total del G2R R.I.P. si sumamos la penetración del trocar. Pero en la balística terminal, la búsqueda no se trata de la destrucción total del tejido en general, se trata de alterar los órganos vitales, y los trocares no penetran lo suficiente como para afectar los signos vitales.

En la prueba a través de cuatro capas de denim, la diferencia es menor. El HST nuevamente excedió el tamaño del proyectil R.I.P., pero no tanto. El HST a través del denim se expandió .460" (11.68mm), en comparación con el .375" (9.52mm) del G2R R.I.P. Eso le da al HST 107,22 mm cuadrados, aproximadamente un 50% más que el proyectil de G2R. de 71,25 mm cuadrados de área de superficie frontal. El HST penetró a 16" (406,4mm), y el R.I.P. penetró 14,50" (368,3mm), por lo que la fórmula de Schwartz nos dice que el HST destruyó 37,20 gramos de tejido, y el R.I.P. destruyó 22,29 gramos. Eso deja al HST haciendo aproximadamente un 67% más de destrucción de tejido si se ignora la destrucción superficial de los trocares.

En términos de penetración y destrucción del tejido, en el proyectil de G2R, la base de 9 mm es comparable a un Hollow-point de .380, es capaz de penetrar lo suficientemente profundo como para causar un golpe a los signos vitales, por lo que podrían conducir a un golpe incapacitante.

Sin embargo, el HST llegará más profundo, con una bala más grande, y destruirá entre 2/3 y el doble de tejido, lo hace con un proyectil que pesa dos veces y media más que la base del R.I.P. (124 gr/8,04 g frente a alrededor de 49 gr/3,18 g), por lo que el impulso retenido será mucho mayor con el HST. Las ventajas serían una ruta de viaje potencialmente más recta, una penetración ósea potencialmente mejor, una destrucción de tejido sustancialmente mayor y la posibilidad de alcanzar objetivos cercanos que la bala de G2R puede fallar (en otras palabras, con la colocación de un disparo idéntico, el RIP potencialmente podría pasar por alto una arteria o un órgano vital, mientras que el tamaño más grande del HST podría extenderse y golpear la arteria u órgano). No hay dudas sobre cuál sería la munición más probable para causar la incapacidad involuntaria, y ese es el HST.

En cuanto a lo que pasa con la onda de choque, según afirma la compañía G2R, "La onda acústica que se transmite al objetivo deseado se envía a lo largo de vectores predecibles. Esta acción crea una entrada fácil al reducir la desaceleración en el punto de impacto, lo que permite que se conserve la energía potencial, transfiriendo así una ola de energía cinética devastadora", a priori esta afirmación parece absurda, pero están

tratando de dar a entender que de alguna manera están creando una cavidad temporal más grande que significa que la bala puede penetrar más lejos sin tener que usar su energía cinética en la penetración, Y eso, como resultado, pueden transferir "una devastadora onda de energía cinética", pero como ya se ha descrito anteriormente esto es falso y se trata nada más que de un reclamo publicitario.

En primer lugar, ya hemos descubierto cuál es su penetración real, por lo tanto, si se trata de rasgar la carne o proviene de "la facilidad de entrar reduciendo la desaceleración en el punto de impacto", el resultado neto es el mismo: los trocares apenas penetra, y la base penetra correctamente.

En segundo lugar, sobre esa "onda de choque devastadora", las ondas de choque de las balas de pistola no dañan, en general, la mayoría de los tejidos. El estrés mecánico (rasgadura, aplastamiento, desgarramiento y corte) es lo que logra eso. Hay una teoría muy disputada sobre el "shock hidrostático" que tal vez están tratando de explicar aquí, pero si es así, están en el camino equivocado. Si bien el concepto de "choque hidrostático" es rechazado por muchos expertos en balística terminal, incluso sus defensores más ardientes (como Courtney y Courtney) reconocen que necesitaría una bala con al menos 500 pies / lb (335,98 m/kg) de energía para producir una cavidad temporal lo suficientemente grande como para comenzar a producir este efecto de onda de choque. Como se probó, el proyectil R.I.P. no llega en ninguna parte cerca de 500 pies / lb (335,98 m/kg). En los disparos de la prueba, el promedio fue de 1313 pies / s (1440,73 km/h), y con un peso de bala de 96 gr (6.22g), eso se traduce en 367.41 pies / lb (246.888 m/kg) de energía, muy por debajo del mínimo especificado por Courtney de 500 pies / lb (335,98 m/kg).

Por lo que se ve en los videos de G2R, el bloque de gel que muestran, la demostración es impresionante, pero se trata de marketing.



Figura 17: Imagen de marketing de G2R.

En esa imagen [Fig17] se muestra una tremenda cavidad de expansión temporal, trocares volando fuera del bloque y la bala atraviesa fácilmente todo el bloque. Pero si nos atenemos a los ensayos estandarizados podemos llegar a la conclusión de que no se están cumpliendo dichos estándares de pruebas balísticas.

A modo de comparación, en la siguiente imagen [Fig18] se muestra lo que produce la munición de G2R en realidad, cuando se dispara en un bloque de 16" x 6" x 6" (406,4 x 152,4 x 152,4 mm) de gelatina sintética ClearBallistics, cubierto con cuatro capas de denim. Teniendo en cuenta que la tela no debería importar, ya que las pruebas revelaron que el rendimiento de la bala es comparable con y sin tela en su lugar.



*Figura 18: Detalle de la expansión en la prueba I.*

Esta imagen fue tomada del metraje de una cámara lenta de 1200 fotogramas por segundo, en el momento exacto en el que se produce el diámetro máximo de la cavidad de estiramiento. Mide alrededor de 5.5" (139,7 mm), resultado bastante bueno, pero nada comparable como lo que demostró G2R. No podemos saber con certeza qué muestra la imagen de G2R, así que debemos asumir, que si suponemos que están utilizando un bloque estándar de 6" x 6" x 16" (406,4 x 152,4 x 152,4 mm), entonces el diámetro de la cavidad temporal que muestran es de al menos 8.5" (215,9 mm). Eso es un 55% más grande de lo que realmente hizo en los ensayos estándares, eso es muy exagerado por lo que no puede ser cierto.

Otra posibilidad quizás es que su daño por estiramiento sea el mismo que en los ensayos estándares, pero usando un bloque de gel engañosamente más pequeño para que pareciera más grande. Si ese es el caso, y su cavidad de estiramiento es un diámetro realista de 5.5" como en los ensayos, eso significaría que su bloque de gel es de solo 4" (101,6 mm) de alto y 9" (228,6 mm) de largo.

Entonces, exploramos una posible explicación alternativa, quizás, "diluyeron" su gel o lo calentaron para hacerlo más suave, eso lo haría más flexible y exageraría la penetración. Posiblemente, pero eso sería calificable como fraude, cosa que sería muy dudoso que hicieran tal cosa. Sabemos de hecho que entienden los conceptos detrás de las pruebas de gel y los estándares del FBI, porque los hacen referencia en sus preguntas frecuentes e incluso en su caja de municiones, así que no usarían un gel falso o diluido.

Otra posible explicación sería que se trataba de una bala con sobrepresión, que viajó a mayor velocidad. Sin embargo, eso sería profundamente deshonesto por lo que no sería plausible; presumiblemente nos están mostrando la munición que está a la venta en el mercado, después de todo.

Es posible que lo que tenemos aquí sea un caso en el que disparan la bala de 9 mm de un rifle o carabina, en lugar de hacerlo con una pistola. El cañón más largo puede entregar 200 o 300 pies extra por segundo (219,46 / 329,18 km/h), y esa puede ser la velocidad adicional suficiente para hacer una mayor cavidad temporal y causar que la base atravesase el bloque. Esto es una suposición que implique que no se trate de un fraude.

Resumiendo, no hay ninguna ventaja para el proyectil R.I.P., en términos de penetración o interrupción del tejido orgánico vital, por lo que la única área real de discusión sería en términos de la cavidad de daño inicial del trocar. Si se elige entre un Hollow-point convencional y la munición de G2R, lo único que el R.I.P. agrega más que una punta hueca convencional es esa cavidad inicial de daño y poco profunda del trocar.

La cavidad del trocar no proporcionará una "onda de choque devastadora", ciertamente ninguna más allá de la proporcionada por una pistola convencional. Entonces tenemos que mirar el daño real hecho por los trocates, que asciende a 0,39 g de cobre cada uno, penetrando aproximadamente 4" (101,6 mm) de profundidad. En general, eso es mucho menos daño (por trocar) de lo que se vería desde por ejemplo una punta hueca del calibre 22LR segmentado.

## 2.3 Placas y materiales balísticos:

Para este trabajo se va a emplear varios tipos de placas y materiales, según los organismos internacionales que tratan los efectos balísticos, encontramos dos materiales que cuantifican los efectos producidos por los proyectiles. Para los efectos producidos por las deformaciones y traumas producidos por un proyectil se emplea como estándar la plastilina "ROMA nº1". Para cuantificar los daños internos, la penetración y los cortes se emplea el gel balístico.

En cuanto a las placas se van a realizar simulaciones sobre chapas metálicas ligeras, simulando una barrera, y una placa balística de uso muy extendido tanto en defensa como en uso civil denominada AR500.

Durante muchos años se han realizado las pruebas sobre trozos de carne animal como por ejemplo de cerdo, para así cuantificar los posibles daños en humanos, pero debido a las condiciones de mantenimiento de la carne y el coste de repetibilidad, se empezó a emplear sustitutos sintéticos que prácticamente son idénticos a los objetivos orgánicos. Esto da una mayor ventaja a los estudios balísticos y forenses ya que por ejemplo con el gel podemos ver que ocurre en el interior, ampliando mucho más el conocimiento científico sobre el comportamiento dinámico de una bala mientras atraviesa un cuerpo.

Cada organismo internacional tiene sus propias reglas y parámetros sobre los ensayos que se realizan, por ello para este trabajo hemos empleado las reglas establecidas por la agencia americana FBI, por lo que emplearemos el gel balístico orgánico al 10% y plastilina roma nº1 [4].



*Figura 19: Detalle de Hollow-Point en el interior de gel balístico*

### 2.3.1 Placa balística AR500:

La AR500 fabricada por AR500 Armor®, es una de las placas de protección balística más extendida en el mundo, tanto en agentes y cuerpos de defensa como en uso por civiles, ya que se trata de una protección muy efectiva y sobre todo económica, por eso su popularidad.



Figura 20: Detalle de placa AR500.

AR500 Armor® es el fabricante líder en la industria de soluciones de blindaje balístico y corporal de alta calidad de núcleo de acero. AR500 Armor utiliza un núcleo de acero de grado balístico avanzado como la columna vertebral de la armadura. Este material es mucho más duro que el acero tradicional y otras alternativas de "armadura de acero" actualmente en el mercado. Este material está especialmente diseñado para los estándares de uso en aplicaciones balísticas [5].

El núcleo de la armadura AR500 tiene una dureza en la escala de Brinell (BNH) entre 504 y 519. Se trata de acero de la más alta calidad disponible en la industria (calidad balística).

Una de las mayores preocupaciones es qué sucede con la armadura cuando una bala impacta. La solución aplicada a la placa de acero fue un recubrimiento de la empresa Line-X, de la línea dedicada para aplicaciones militares de Line-X se empleó el revestimiento protector PAXCON PX-2100; un revestimiento diseñado para mitigación de fallas y fragmentación.

Todas las placas AR500 están sujetas a extensas pruebas de balística. Esto incluye pruebas de laboratorio independientes antes y después de la fabricación, desde su forma original hasta un producto terminado, y en pruebas de lote internas. Las pruebas de laboratorio independientes son realizadas por el laboratorio de pruebas balísticas independiente más confiable en los Estados Unidos, HP White Laboratory, Inc. La armadura corporal de nivel III ha sido probada según los estándares NIJ-STD-0101.06 de calibres III (militar), disparos y deformación.

Desde el portal de la comunidad de *Guns.com* se realizó un ensayo real con una placa balística AR500, empleando munición real y un estado controlado del proceso y bajo los estándares normales de ensayo, dicho ensayo fue realizado por *David Higginbotham* en 2013, y gracias a esta prueba de campo podemos conocer como se comporta la placa AR500 y podremos resolver las preguntas básicas sobre sus cualidades como blindaje [6]:

¿Cuánto daño puede soportar una pieza de acero de 1/4" (6,35 mm)? Depende completamente del tipo de acero. Como ya se ha comentado este acero posee unas cualidades excepcionales y a demás posee la ayuda del recubrimiento plástico de PAXCON.

La clasificación es de nivel III, por el Instituto Norteamericano de Justicia, eso significa que las placas soportarán amenazas de fusil de hasta 7.62 x 51 de la OTAN (.308 Winchester) a velocidades de hasta 2.780 pies por segundo (3050,44 km/h) y todos los calibres de pistola.



*Figura 21: Detalle de la fijación de placa para test de impacto*

La placa mide aproximadamente 10" por 12" (254 por 304,8 mm) y tiene las esquinas cortadas en los hombros para permitir una mayor libertad de movimiento de quien lo porta.

Las placas pesan 7.5 lb (3,4 kg), son excepcionalmente resistentes, como era de esperar, algunos otros tipos de armadura pueden ser más ligeros, pero el peso de una placa AR500 representa su capacidad para soportar múltiples impactos, algo que las placas más livianas no pueden soportar.

Conseguir que el acero resista el impacto de una bala requiere un proceso especial de tratamiento térmico, algunos métodos de calentamiento y enfriamiento hacen que el acero sea duro, pero también quebradizo, una placa frágil simplemente se rompería.

El tratamiento térmico del acero le permite conservar algo de la dureza, pero también incorporar algo de elasticidad. Una buena placa de acero tiene que ser lo suficientemente resistente para soportar el impacto, y suficientemente elástica para doblarse cuando sea apropiado.

Demasiado duro, y aumentaría el riesgo de rebote y fractura de la placa, Si una placa es demasiado elástica, la placa se estirará, ese estiramiento, curiosamente, causa fricción en el acero haciéndolo más suave. Una sección más delgada y más blanda significa que es más probable que penetre un proyectil.

¿Qué le sucede a la bala cuando golpea la placa? Ese trozo de plomo, tal vez acero, cobre, etc., tiene que ir a alguna parte, en un mundo perfecto a prueba de balas, el proyectil simplemente se aplastaría y se mantendría justo donde impactó. Pero este no es un mundo perfecto. Las balas que golpean las placas de acero son propensas a rebotar, en algunos casos, se rompen en pedazos que rebotan en todo tipo de formas impredecibles, pudiendo ser deflactadas en la cara, brazos y piernas del portador de la placa balística.

La armadura AR500 es más que acero, el recubrimiento PAXCON en el acero actúa atrapando las posibles esquirlas incluso una bala completa. La bala penetra la capa externa, golpea el acero, pero no rebota hacia atrás a través del PAXCON, esto debería evitar la mayoría de las heridas de rebote.

Existe un peligro adicional, la fragmentación de la placa producida por el impacto de alta velocidad. Puede producirse una gran deformación en la parte de atrás de la placa Incluso si no penetra en ella, incluso se puede fracturar el acero y crear metralla, es ahí donde el PAXCON actúa también.

El impacto en sí mismo crea una tremenda cantidad de fuerza, varía según el peso del proyectil, el ángulo de impacto y la velocidad. El PAXCON ralentiza el proyectil, la placa detiene la bala (absorbiendo la energía), y luego las capas suaves (como el portador de la placa, la ropa, etc.) amortiguan ese golpe. Pero aún puede doler.



*Figura 23: Detalle de penetración en el PAXCON*



*Figura 22: Detalle de corte en el PAXCON*



*Figura 24: Detalle de fragmentación del PAXCON*

Se realizó un ensayo donde se disparó una secuencia de balas de pistola a la placa. Hay muy pocas posibilidades de que una bala de pequeño calibre pueda dañar la placa en sí. La armadura clasificada de nivel III va a resistir a todas las municiones de arma de fuego, y debe resistir cualquier cosa hasta un .308 (mientras no sea anti blindaje). Hay algunas municiones pequeñas y rápidas que pueden derrotar a la armadura clasificada clase III, pero son raras (y aún más raras en combate), como el calibre .223 con velocidades extremadamente altas que quizás pueden perforar la placa.

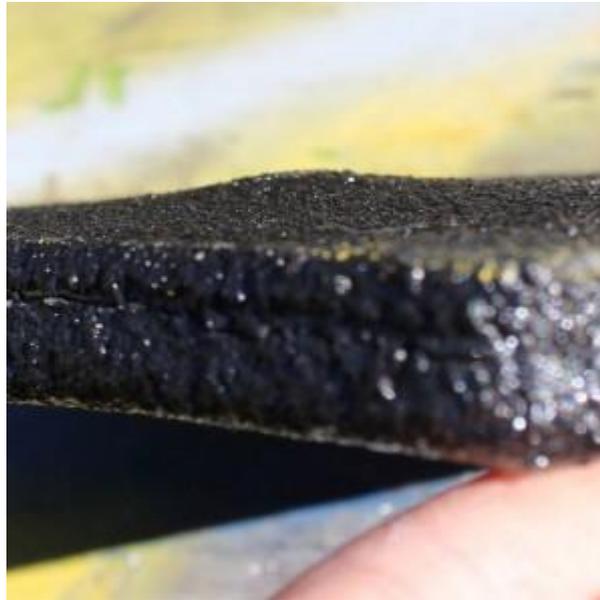
La placa fue testada con los calibres: .380 ACP, .38 + p, .357 Magnum, 9 mm (HP y FMJ), .40 S & W (HP y FMJ) y .45 ACP, se realizaron dos disparos de cada calibre. La placase comportó como se esperaba, el PAXCON tampoco fue muy afectado. Algunas de los proyectiles se expandieron entre el PAXCON y la placa, cortando el recubrimiento plástico, pero conservaron todas sus cualidades protectoras, sin rebotes, sin astillarse y después de haber sido disparada 12 veces, no mostró signos de flexión, se mantuvo plana.



*Figura 25: Detalle de los daños producidos tras los múltiples impactos.*

A continuación, se empleó munición FMJ 7.62 x 39 desde un SKS, sin dañar la placa. Partes del PAXCON se cortaron, y hubo más rebote, incluso partes de cobre de la chaqueta metálica rebotaron llegando a una distancia de 23 m, pero sin apenas energía para hacer daño.

Con el calibre 5.56, tampoco pasó nada, incluso el impacto en la placa fue mínimo. El 7.62 x 51, sin embargo, causó una abolladura.



*Figura 26: Detalle de la abolladura producida en el ensayo.*

La abolladura en la parte posterior de la placa se logró disparando en el mismo lugar varias veces, pero la placa resistió la el esfuerzo.

Con todo esto queda demostrada la eficacia que posee esta placa balística, y aunque de antemano ya sabemos que el proyectil expansivo R.I.P. de G2R no va a causar ningún daño, es interesante estudiar y ver cual es el comportamiento de dicho proyectil al impactar con una placa balística tan efectiva.



*Figura 27: Detalle del área protegida por una placa AR500 sobre el torso humano.*

### 2.3.2 Plastilina ROMA N.º 1:

La Plastilina Roma, es una arcilla sintética blanda y maleable hecha de aceites, ceras y minerales. Aunque este material fue concebido para aplicaciones artísticas como un compuesto de modelado para hacer esculturas, su naturaleza blanda y maleable fomentó su uso en aplicaciones de ingeniería específicas. Probablemente el primer campo en ingeniería que usó Plastilina Roma fue el análisis de formación de metales. En este campo, la plastilina Roma se utiliza como material sustitutivo en el modelado físico para simular el flujo de metales plásticos durante los procesos de fabricación, como la extrusión o la forja [7].



Figura 28: Detalle de la plastilina ROMA N.º1.

Debido a su carácter suave, la plastilina Roma requiere mucha menos carga para deformar que el material metálico real; proporcionando información valiosa en condiciones de laboratorio sobre el flujo de plástico, formación de defectos y campos de deformación. El diseño óptimo de matrices de conformación de metales, la reducción de la deformación no homogénea y la mejora en la calidad de los productos de metal se logran mediante el uso de plastilina Roma en el análisis de conformación de metales.

Otro campo de ingeniería que utiliza plastilina Roma es la evaluación del daño en materiales compuestos cuando cuerpos blandos, como las aves, impactan estructuras compuestas. Este tipo de estudios es de gran importancia para la seguridad de vuelo en la industria aeronáutica. Por ejemplo, la integridad en estructuras de materiales compuestos, se evalúa después de un impacto de aves, simulado como un cuerpo blando hecho de Plastilina Roma.

Asimismo, una de las aplicaciones más amplias en ingeniería de la plastilina Roma es su uso como material de respaldo en pruebas de resistencia balística de armaduras corporales. En este caso, la plastilina Roma replica el tejido del torso humano durante una prueba balística.



Figura 30: Detalle de ensayo de trauma e impacto.



Figura 31: Detalle del montaje del ensayo de trauma.



La posible lesión sufrida por un usuario

Figura 32: Detalle de los resultados del ensayo.



Figura 29: Detalle del trauma producido sin penetración.

como consecuencia del impacto balístico se describe como una proyección de profundidad en la Plastilina Roma. Esta medición, conocida como *Backface Signature*, se usa en los estándares de armadura corporal para determinar el trauma potencial producido durante un impacto no penetrante. Un aspecto común presente en todas estas aplicaciones de ingeniería es la gran deformación plástica que sufre la plastilina Roma y, en la mayoría de los casos, en combinación con las velocidades de deformación media. Por lo tanto, la descripción del comportamiento de flujo de Plastilina Roma a velocidades de deformación media es crítica para comprender los procesos en las aplicaciones mencionadas.

### 2.3.3 Gel balístico:

La gelatina balística es un medio de prueba científicamente correlacionado con el tejido muscular porcino (que a su vez es comparable al tejido muscular humano), en el cual se pueden simular los efectos de las heridas de bala. Fue desarrollado y mejorado por Martin Fackler y otros en el campo de la balística de la herida. La gelatina balística es una solución de polvo de gelatina en agua. La gelatina balística simula la densidad y la viscosidad del tejido muscular humano y animal, y se utiliza como medio estandarizado para evaluar el rendimiento terminal de la munición de las armas de fuego. Mientras que la gelatina balística no modela la estructura del cuerpo, incluida la piel y los huesos, funciona bastante bien como una aproximación de tejido y proporciona un rendimiento similar para la mayoría de las pruebas de balística. Se usa gelatina balística en lugar de tejido muscular real debido a la capacidad de controlar cuidadosamente las propiedades de la gelatina, lo que permite una comparación consistente y confiable de la balística terminal [8].



*Figura 33: Detalle de gel balístico en un ensayo de impacto.*

#### 2.3.3.1 PREPARACION:

La fórmula más comúnmente utilizada es una "gelatina balística al 10%", que se prepara disolviendo 1 parte de gelatina Bloom 250A en 9 partes de agua tibia (en masa), mezclando el agua mientras se vierte la gelatina en polvo. Se enfría a 4 ° C. La fórmula más antigua de la OTAN especifica una solución al 20%, enfiada a 10 ° C, pero esa solución cuesta más para prepararse, ya que usa el doble de la cantidad de gelatina. En cualquier caso, un documento de investigación de 1988 de Martin Fackler recomienda que el agua no se caliente a más de 40 ° C, ya que esto puede causar un cambio significativo en el rendimiento balístico.

Para garantizar resultados precisos, inmediatamente antes del uso, el bloque de gelatina se "calibra" disparando un BB (bola) de acero calibre .177 (4,5 mm) estándar desde una pistola de aire sobre un cronógrafo de pistola en la gelatina, y se mide la profundidad de penetración. Si bien los métodos exactos de calibración varían ligeramente, el método de calibración utilizado por la Unidad Estadounidense de Armas de Fuego del SIN es bastante típico. Requiere una velocidad de  $183 \pm 3$  m / s y una penetración de BB entre 8,3 y 9,5 cm.



*Figura 34: Detalle de un bloque de gel balístico orgánico y uno sintético transparente*

Los geles balísticos hechos de gelatina natural son típicamente de color marrón amarillento claro, y generalmente no son reutilizables. Los sustitutos sintéticos más caros están diseñados para simular las propiedades balísticas de la gelatina natural, aunque inicialmente son incoloros y claros. Algunos geles sintéticos también son reutilizables, ya que pueden fundirse y reformarse sin afectar las propiedades balísticas de los geles.

#### *2.3.3.2 USOS:*

Dado que la gelatina balística imita las propiedades del tejido muscular, en comparación con los tejidos musculares porcinos, es el medio preferido para comparar el rendimiento terminal de diferentes municiones en expansión, como las Hollow-Point y balas de punta blanda. Estas balas usan la presión hidráulica del tejido o la gelatina para expandirse en diámetro, lo que limita la penetración y aumenta el daño a los tejidos a lo largo de su camino.



*Figura 35: Detalle de daños producidos por proyectiles Hollow-Point.*

Muchas agencias también realizan ensayos empleando símiles óseos e incluso de órganos con símiles de sangre. Con todos estos añadidos al gel balístico se pueden hacer ensayos extremadamente precisos y que intentan recrear al 100% un caso real, como por ejemplo un torso humano completo como vemos en la siguiente figura [Fig36]:



*Figura 36: Detalle de torso completo para ensayo.*

Martin Fackler trabajo para el *Letterman Army Institute of Research*, donde fundo el departamento de *Daños balísticos*, allí realizo sus estudios sobre las heridas y los patrones de los proyectiles mientras atraviesan tejido animal, dentro de sus estudios podemos encontrar infinidad de gráficos y tablas detalladas sobre esos patrones, como por ejemplo en la siguiente imagen [Fig37] [9] [10]:

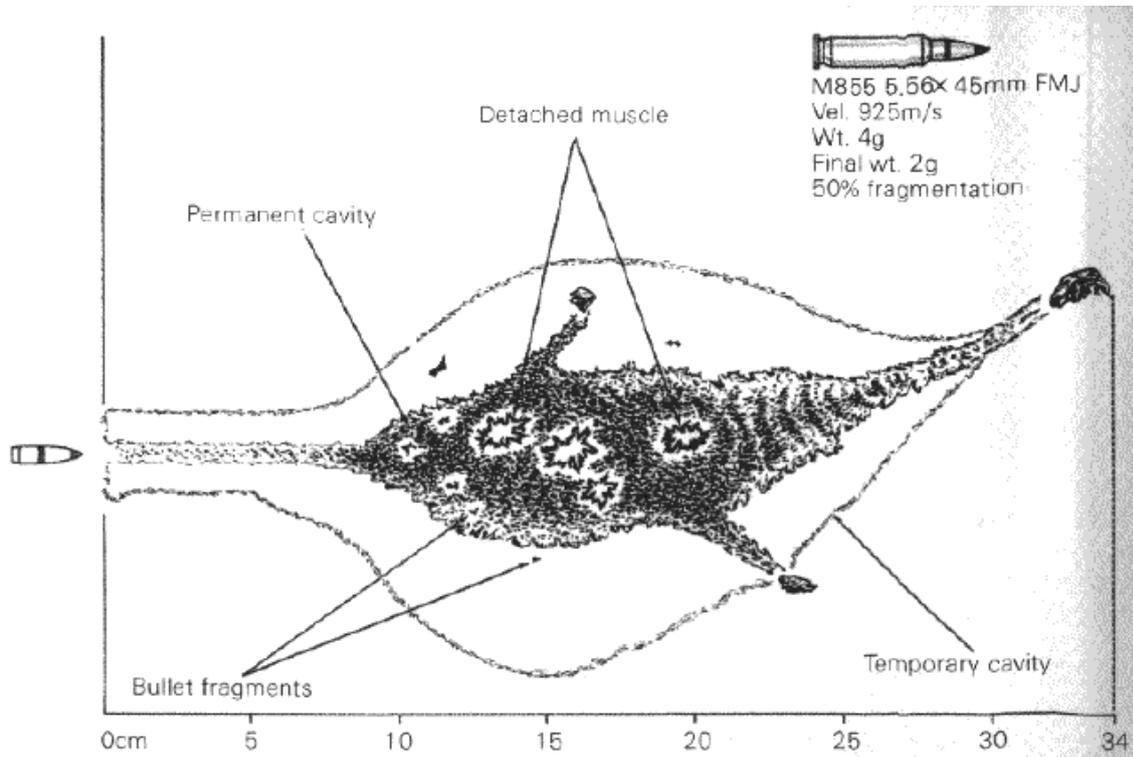


Figura 37: Esquema del patrón de herida producido por munición del 5,56mm

De todos los patrones que se producen con la gran mayoría de proyectiles, se puede identificar diferentes zonas que se repiten constantemente, como son la Cavidad permanente y la Cavidad temporal, ambas zonas son producidas por la expansión hidrostática que se produce durante la penetración.

### **3. DEFINICION Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES:**

Para la realización de las simulaciones y los cálculos se ha empleado el código comercial Abaqus CAE, por lo que la caracterización de los materiales, en último instante, va a estar supeditada a la necesidad de poder aplicarla en Abaqus. En este apartado se van a exponer las propiedades de cada material empleado, el método de parametrización empleado para dichas propiedades y como se han obtenido si han tenido que ser definidas por medio de cálculos matemáticos.

Los materiales seleccionados para las simulaciones son los siguientes:

Para la bala se ha empleado una aleación de bronce de alto contenido en cobre, al igual que el empleado por la compañía G2 Research para la fabricación de su proyectil expansivo R.I.P., para el interior del núcleo del proyectil se ha elegido plomo. Para las pruebas sobre chapa y placa AR500 se ha empleado aleación de acero de alta calidad, y para el resto de pruebas de impacto bajo las demandas de los estándares del FBI, se empleará Plastilina ROMA N°1 y gelatina balística orgánica.

Todas las parametrizaciones tienen que definirse desde un punto de vista mecánico que satisfaga su deformación y un criterio de fallo, tanto creación como propagación del fallo, todo este criterio va a permitir crear una simulación que se aproxime al comportamiento físico real.

## 3.1 Acero AISI 4340:

Para los materiales de la placa AR500 y la chapa de prueba, se ha elegido el acero AISI 4340, esta aleación de acero está compuesta por [11]:

97,25% Fe; 0,91% Mn; 0,87% Si; 0,72% Mo; 0,25% Cr

Sus propiedades mecánicas son:

Dureza Vickers: 394,4

Densidad: 7850 kg/m<sup>3</sup>

Módulo de Young: 210 GPa

Coeficiente de Poisson: 0,3

Calor específico: 486° K

Para la parte del criterio de fallo y la propagación del mismo, se ha empleado el modelo de daño de Johnson-Cook [12]:

El modelo de Johnson-Cook es puramente empírico; hace posible tener en cuenta los efectos de endurecimiento isotrópico (estático), fortalecimiento cinemático, variación de temperatura y la variación asociada en el límite elástico. De acuerdo a este modelo, el estrés está determinado por la fórmula (1):

$$\sigma_Y = (A + B \cdot \varepsilon_p^n) \times \left( 1 + C \cdot \ln \left( \frac{\varepsilon'_p}{\varepsilon'_0} \right) \right) \times \left( 1 - \left( \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right), \quad (1)$$

Donde  $\varepsilon_p$  es la deformación plástica efectiva,  $T_m$  es la temperatura de fusión,  $T_r$  es la temperatura ambiente, y  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $n$ ,  $m$ ,  $\varepsilon_0$  son los parámetros del modelo. En realidad, la fórmula (1) es la curva de deformación del material.

Los parámetros del modelo (1) se determinan en función de los datos sobre las deformaciones plásticas del material con tensiones y temperaturas de deformación diferentes. El procedimiento para determinar los parámetros del modelo (1) se presenta a continuación:

El parámetro **A** del modelo (1) es el valor de resistencia a la fluencia cuando la tasa de tensión es baja. De hecho, el parámetro **A** es el límite elástico con la temperatura dada designada como **R<sub>0,2</sub>**. En consecuencia, se asumirá el valor de **A=R<sub>0,2</sub>** para la temperatura ambiente.

El parámetro **m** tiene en cuenta la temperatura del material con reblandecimiento. El valor de este parámetro se puede obtener a través de datos de **R<sub>0,2</sub>** para diferentes temperaturas. Por lo tanto, la conversión de la expresión (1), sin deformaciones plásticas, es:

$$\sigma_Y = A \times \left( 1 - \left( \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right).$$

Después de haber insertado los valores  **$\sigma_Y = R_{0,2}$**  para diferentes temperaturas con una igualdad del parámetro **A**, tendremos:

$$R_{0,2}^{20} / \left( 1 - \left( \frac{T_1 - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right) = A = R_{0,2}^T / \left( 1 - \left( \frac{T_2 - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right),$$

O

$$R_{0,2}^{20} / R_{0,2}^T = \left( 1 - \left( \frac{T_1 - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right) / \left( 1 - \left( \frac{T_2 - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right)$$

La última relación da el valor estimado del parámetro **m** para el modelo (1).

Los parámetros **B** y **n** del material son responsables del endurecimiento isotrópico (estático) durante las tensiones. Estos parámetros se determinan en base a los datos del comportamiento del material cuando el estrés es lento (cuasi estático).

La conversión de la expresión (1) para la tensión lenta (cuasi estático) es:

$$\sigma_Y = (A + B \cdot \varepsilon_p^n) \times \left( 1 - \left( \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right). \quad (2)$$

La inserción de datos para la temperatura  $T = T_{kvasist}$  y la deformación  $\varepsilon_1$  (la tensión  $\sigma_1$ ) dará:

$$\sigma_1 = (A + B \cdot (\varepsilon = \varepsilon_1)^n) \cdot k_t,$$

O

$$\sigma_1/k_t - A = B \cdot (\varepsilon = \varepsilon_1)^n. \quad (2a)$$

Expresión (2) para la temperatura  $T = T_{kvasist}$  y la deformación  $\varepsilon_2$  (la tensión  $\sigma_2$ ) dará

$$\sigma_2 = (A + B \cdot (\varepsilon = \varepsilon_2)^n) \cdot k_t,$$

O

$$\sigma_2/k_t - A = B \cdot (\varepsilon = \varepsilon_2)^n. \quad (2b)$$

La solución al sistema de ecuaciones (2a) y (2b) da los parámetros  $B$  y  $n$  del modelo (1).

$$B = (\sigma_2/k_t - A)/(\varepsilon = \varepsilon_2)^n;$$
$$n = \log_{(\varepsilon_1/\varepsilon_2)}((\sigma_1 - A)/(\sigma_2 - A)).$$

El parámetro restante,  $C$ , del modelo es responsable del endurecimiento cinemático (es decir, de los efectos de deformación). Este criterio se estima en base a los datos sobre los efectos de la tasa de deformación sobre las tensiones.

Supongamos que para la temperatura  $T = T_{\text{kinemat}}$  y la deformación  $\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{kinemat}}$  a la velocidad de deformación,  $\boldsymbol{\varepsilon}' = \boldsymbol{\varepsilon}'_1$  la intensidad es  $\sigma_1$ , y para la velocidad de deformación  $\boldsymbol{\varepsilon}' = \boldsymbol{\varepsilon}'_2$  es  $\sigma_2$ . Teniendo en cuenta (1), obtenemos:

$$\sigma_2/\sigma_1 = (1 + C \cdot \ln(\varepsilon_2'^n/\varepsilon_0'))/(1 + C \cdot \ln(\varepsilon_1'^n/\varepsilon_0')),$$

de donde encontramos la estimación del parámetro C:

$$C = (\sigma_2/\sigma_1 - 1)/(\ln(\varepsilon_2'^n/\varepsilon_0') - \sigma_2 \cdot \ln(\varepsilon_1'^n/\varepsilon_0')/\sigma_1). \quad (3)$$

El modelo de Johnson-Cook funciona junto con una ecuación constitutiva que tiene en cuenta el comportamiento hidrodinámico del material. Define la relación entre las variables del estado y el estado de la materia. Normalmente, esta es la dependencia de las características termodinámicas (es decir, presión) en los otros dos parámetros independientes del estado (es decir, densidad y energía interna). La definición de la ecuación constitutiva para los metales se divide en gran parte en dos componentes: presión fría y presión térmica:

$$P(\mu, W) = P_C(\mu) + P_T(\mu, W), \quad (4)$$

donde  $\mu = \rho / \rho_0$  es 1,  $\rho$  es la densidad actual,  $\rho_0$  es la densidad inicial,  $W$  es la energía interna total específica del material. El primero, es decir, el componente de presión en frío  $P_C(\mu)$ , es la función de presión que se estima a lo largo de la isoterma a 0° K, y el último, es decir, la presión térmica  $P_T(\mu, W)$ , depende tanto de la densidad y la energía interna específica del material. Para el material comprimido,  $\mu > 0$ ; mientras que, para el material estirado,  $\mu < 0$ .

La ecuación constitutiva más simple se define mediante un polinomio de la siguiente forma:

$$P = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)W,$$

donde  $C_1$  es el módulo de elasticidad en masa (viscosidad lineal en masa);  $C_4 = C_5 = 0$ ;  $W$ ,  $J/m^3$  es la energía interna de volumen;  $C_0 = C_2 = C_3 = C_6 = 0$ .

Los parámetros adicionales del modelo incluyen:  $C_P$ ,  $J / (kg K)$ , es decir, calor específico;  $E$ , Pa, es decir, módulo de Young;  $G$ , Pa, es decir, módulo de rigidez;  $\nu$ , es decir, coeficiente de Poisson y  $P$  de corte, Pa, es decir, presión de corte.

Para nuestro modelo se han empleado los siguientes parámetros:

**A:** 350 MPa.

**B:** 275 MPa.

**n:** 0,36

**m:** 1

$T^a$  de fusión: 1538° K

$T^a$  de transición: 293° K

En cuanto a la propagación del daño, se emplean los siguientes criterios de daño [13]:

El criterio de la propiedad del daño se construye como el inicio y la evolución del daño en Abaqus. El criterio de iniciación del daño utilizado es como se muestra a continuación:

$$\bar{\epsilon}_f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \eta)][1 + D_4 \ln \dot{\epsilon}^*][1 + D_5 T^*] \quad (5)$$

Donde  $\bar{\epsilon}_f$  es la deformación equivalente a la fractura, y la relación del estrés de presión adimensional (tensión triaxial) se define como  $\eta = \sigma_m / \bar{\sigma}$ , donde  $\sigma_m$  es el promedio de las tres tensiones normales, y  $\bar{\sigma}$  es el estrés equivalente de Von Mises. La tensión adimensional,  $\dot{\epsilon}^*$  y la temperatura homóloga,  $T^*$ , son idénticos a los utilizados en el modelo de la ecuación (5).

$D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ ,  $D_4$  y  $D_5$  son constantes de fractura, que se adquieren ajustando los resultados experimentales. Para nuestro modelo se han empleado los siguientes valores:

$D_1$ : 0,05

$D_2$ : 2,1

$D_3$ : 0,5

$D_4$ : 0,0002

$D_5$ : 0,61

Para simplificar los cálculos en Abaqus y reducir la carga computacional, se ha introducido un comando que permita eliminar elementos que excedan el rango permitido de deformación. Este comando se puede encontrar en el **Anexo 1**, y no es más que:

`"ELEMENT DELETION=YES"`.

## 3.2 Bronce:

Para la camisa y el cuerpo expansivo del proyectil se ha elegido bronce de alta calidad. La aleación del bronce utilizado está compuesta por [11]:

89,5% Cu; 10,5% Zn

Sus propiedades mecánicas son:

Dureza Vickers: 104,11

Densidad: 8800 kg/m<sup>3</sup>

Módulo de Young: 58,080 GPa

Coeficiente de Poisson: 0,34

Calor específico: 435° K

Para la parte del criterio de fallo y la propagación del mismo, se ha empleado el modelo de daño de Johnson-Cook con los siguientes parámetros:

**A:** 112 MPa.

**B:** 505 MPa.

**n:** 0,42

**m:** 1,68

**T<sup>a</sup>** de fusión: 1030° K

**T<sup>a</sup>** de transición: 293° K

En cuanto al criterio de propagación del daño, aplicable al modelo de Johnson-Cook los parámetros aplicados son:

**D<sub>1</sub>:** 0,54

**D<sub>2</sub>:** 4,89

**D<sub>3</sub>:** 3,03

**D<sub>4</sub>:** 0,014

**D<sub>5</sub>:** 1,12

## 3.3 Plomo:

La bala ha sido diseñada con un núcleo de plomo, lo que le confiere la suficiente masa como para ser potencialmente penetrante. El plomo elegido es plomo común en bruto, con una composición prácticamente pura, 99,9% Pb [11].

Sus propiedades mecánicas son:

Dureza Vickers: <10

Densidad: 8800 kg/m<sup>3</sup>

Módulo de Young: 117 GPa

Coefficiente de Poisson: 0,431

Calor específico: 130° K

Para la parte del criterio de fallo, se ha empleado el modelo de daño de Johnson-Cook con los siguientes parámetros:

**A:** 10,3 MPa.

**B:** 41,3 MPa.

**n:** 1,03

**m:** 1,68

T<sup>a</sup> de fusión: 327,5° K

T<sup>a</sup> de transición: 293° K

En cuanto al criterio de propagación del daño, aplicable al modelo de Johnson-Cook los parámetros aplicados son:

**D<sub>1</sub>:** 0,25

**D<sub>2</sub>:** 0

**D<sub>3</sub>:** 0

**D<sub>4</sub>:** 0

**D<sub>5</sub>:** 0

## 3.4 Plastilina ROMA N°1:

Para la caracterización de la plastilina ROMA, se ha utilizado el modelo propuesto en el experimento de C. Hernández, ya que a diferencia de los materiales anteriores se trata de un material tremendamente plástico y no se rige por las mismas leyes mecánicas [7]:

La herramienta experimental utilizada para determinar los parámetros del material, de materiales blandos, es la prueba de caída. Esta prueba es una técnica experimental simple utilizada para inferir propiedades dinámicas de materiales a velocidades de deformación media ( $10^1 \text{ s}^{-1}$ -  $10^2 \text{ s}^{-1}$ ). Consiste en la caída libre de una esfera de acero desde una altura específica al material acondicionado. A partir de las mediciones de profundidad de la huella registrada en la superficie del material, se pueden definir sus propiedades mecánicas. Una de las aplicaciones más comunes del *Test de caída* en materiales maleables blandos, como la plastilina, se propone en el estándar del National Institute of Justice (NIJ) de Estados Unidos para pruebas de armadura corporal. En esta aplicación particular, la prueba de caída se utiliza para validar la consistencia y la rigidez de la plastilina utilizada como material de respaldo. El estándar NIJ recomienda el uso de una esfera de acero de 63.5 mm de diámetro y 1043 g, caída desde una altura de 2.0 m.

Aunque la prueba de caída se concibe como un método de validación para la dureza de los materiales blandos y maleables, se puede utilizar para caracterizar el comportamiento mecánico de los materiales blandos. El historial de penetración de la esfera se mide mediante fotografías de alta velocidad. Estas mediciones se utilizan como entrada en una técnica de caracterización inversa para determinar los parámetros del material a la velocidad de deformación media de los materiales blandos.

La densidad del material se midió por el método de desplazamiento de agua. Se obtuvo un valor de 1529 kg / m<sup>3</sup>. El coeficiente de Poisson de la arcilla se asumió como 0,49, considerando que el material es casi incompresible.

El comportamiento del estrés de flujo de la plastilina se ajustó a una relación fenomenológica de tensión y tensión llamada modelo constitutivo de plasticidad de la *ley de poder*. Este modelo constitutivo depende de la tensión y la velocidad de deformación, y se usa típicamente para el análisis de formación superplástica. Se basa en la relación constitutiva de Ludwik y es adecuada para modelar el comportamiento de endurecimiento del trabajo observado en muchos materiales similares. En este modelo de material, la tensión uniaxial  $\sigma_{yy}$  muestra una relación no lineal con la deformación  $\epsilon$  y la tasa de deformación  $\dot{\epsilon}$ .

Puede escribirse de la siguiente forma:

$$\sigma_{yy} = k \epsilon^m \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right)^n$$

Donde **k** es la constante del material, **m** es el coeficiente de endurecimiento por deformación, **n** es el coeficiente de sensibilidad de la tasa de deformación y  **$\epsilon_0$**  es la tasa de deformación inicial generalmente establecida en 1.

Si empleamos la simplificación empleada por M. Rodríguez-Millán [14]:

$$\bar{\sigma} = k (\bar{\epsilon}^p)^n \left( \frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right)^m$$

donde **k = 0,202** y es la constante de materia; **n = 0,010** es el coeficiente de endurecimiento, **m = 0,101** es el coeficiente de sensibilidad de velocidad de deformación y  **$\dot{\bar{\epsilon}}_0$**  es la velocidad de deformación inicial generalmente establecida en 1.

Para introducir esta caracterización de la plastilina en Abaqus tendremos que generar la curva de tensión deformación de forma tabular. Para esto fijaremos el valor de  **$\dot{\bar{\epsilon}}$** , mientras que se va dando valores a  **$\bar{\epsilon}$** , así obtendremos los valores de  **$\bar{\sigma}$** . Los rangos que se van a aplicar para  **$\dot{\bar{\epsilon}}$**  son: 10, 100, 1000 y 4000, este último valor es el empleado normalmente para el estudio de impactos. Aplicando estos conceptos a una base de cálculo obtenemos tabla de datos del **Anexo 2**.

Otras propiedades del material son:

$$E = 4.92 \text{ MPa}$$

## 3.5 Gelatina balística:

Para la parametrización de la gelatina no podemos aplicar ni el criterio de Johnson-Cook ni los criterios de plastificación anteriores, ya que se trata de un material hiperelástico, con tensión superficial y propiedades de amortiguamiento, por eso tenemos que emplear los siguientes criterios:

Para la componente hiperelástica, se ha elegido el modelo Ogden ya que se aproxima a las necesidades de simulación del gel y a la posibilidad de aplicarse en Abaqus ya que se encuentra implementado en el software.

El modelo de material de Ogden es un modelo de material hiperelástico que se utiliza para describir el comportamiento de tensión-deformación no lineal de materiales complejos como cauchos, polímeros y tejidos biológicos. El modelo fue desarrollado por Raymond Ogden en 1972. El modelo de Ogden, al igual que otros modelos de material hiperelástico, supone que el comportamiento del material puede describirse mediante una función de densidad de energía de deformación, a partir de la cual pueden derivarse las relaciones tensión-deformación [15].

En el modelo de material de Ogden, la densidad de energía de deformación se expresa en términos de los tramos principales  $\lambda_j$ ,  $j = 1, 2, 3$  como:

$$W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \sum_{p=1}^N \frac{\mu_p}{\alpha_p} (\lambda_1^{\alpha_p} + \lambda_2^{\alpha_p} + \lambda_3^{\alpha_p} - 3)$$

Donde  $N$ ,  $\mu_p$  y  $\alpha_p$  son constantes materiales. Bajo la suposición de incompresibilidad uno puede reescribirla como:

$$W(\lambda_1, \lambda_2) = \sum_{p=1}^N \frac{\mu_p}{\alpha_p} (\lambda_1^{\alpha_p} + \lambda_2^{\alpha_p} + \lambda_1^{-\alpha_p} \lambda_2^{-\alpha_p} - 3)$$

En general, el módulo de corte resulta de:

$$2\mu = \sum_{p=1}^N \mu_p \alpha_p.$$

Con  $\mathbf{N} = 3$  y ajustando los parámetros del material, el comportamiento del material de los cauchos se puede describir con mucha precisión. Para valores particulares de constantes de material, el modelo de Ogden se reducirá al sólido de Neo-Hookean ( $\mathbf{N} = 1, \alpha = 2$ ) o al material de Mooney-Rivlin ( $\mathbf{N} = 2, \alpha_1 = 2, \alpha_2 = -2$ , con la condición de restricción  $\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1$ ).

Usando el modelo de material de Ogden, los tres valores principales de las tensiones de Cauchy ahora se pueden calcular como:

$$\sigma_j = -p + \lambda_j \frac{\partial W}{\partial \lambda_j}$$

Donde se usa:

$$\sigma_j = \lambda_j P_j.$$

Para el caucho y los materiales biológicos, se necesitan modelos más sofisticados. Dichos materiales pueden exhibir un comportamiento de tensión-deformación no lineal en tensiones moderadas, o son elásticos hasta grandes deformaciones. Estos complejos comportamientos no lineales de tensión-deformación necesitan ser acomodados por funciones de densidad de energía de tensión específicamente adaptadas.

En nuestro modelo vamos a emplear los siguientes valores que han sido caracterizados por Richard Moran, Joshua H. Smith y José J. García [16]:

$$\mu_1 = 0.00011643$$

$$\mu_2 = 0.0010589$$

$$\alpha_1 = 7.49$$

$$\alpha_2 = -6.75$$

$$\mathbf{D}_1 = 0.000319$$

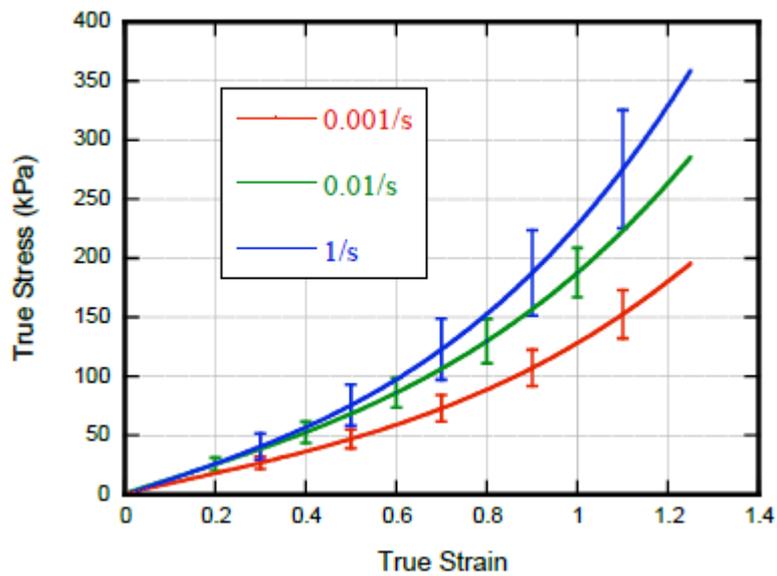
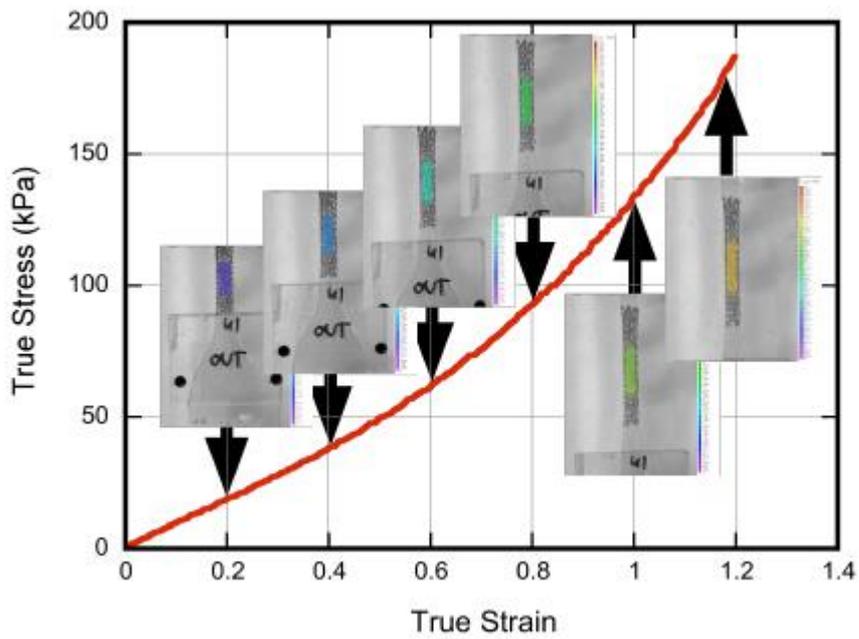
$$\mathbf{D}_2 = 0.000389$$

Para el amortiguamiento vamos a emplear:

$$\alpha = 0.2$$

$$\beta = 1 \times 10^{-8}$$

El comportamiento plástico de la gelatina balística ha sido obtenido mediante ensayos de tracción [17], de estos ensayos se obtuvo la siguiente gráfica de tensión deformación:



En las graficas se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de tracción uniaxial. Las tres líneas de colores corresponden a los tres ensayos realizados, cada ensayo se realizó a diferentes velocidades de estiramiento, lo que nos da unos valores que permiten tratar con herramientas de calculo y sacar los valores medios. Estos valores medios ya si se pueden introducir en Abaqus. La tabla de los valores calculados se puede encontrar en el **Anexo 3**.

Los valores del daño para la gelatina balística han sido obtenidos de las publicaciones [18], [19] y [20], donde se han realizado diferentes pruebas de tracción, compresión e impacto sobre probetas de gel balístico. Los datos empleados han sido modelizados para un modelo de daño cortante y son los siguientes:

Tensión de fractura:  $\sigma = 0.5 \text{ MPa}$

Relación de esfuerzo cortante:  $G = 0.33 \text{ MPa}$

Tasa de deformación = 1

Otras propiedades del material son:

Densidad:  $1080 \text{ kg/m}^3$

## **4. MODELO TRIDIMENSIONAL DE SIMULACIÓN:**

## 4.1 Modelo de Bala:

Para el diseño de la bala se ha utilizado el software *Inventor* de *AutoDesk*. se ha empleado este programa de edición CAD, ya que si se intenta diseñar a través del propio *Abaqus* se van a encontrar dificultades y problemas de diseño.

Tomando como referencia imágenes del proyectil R.I.P. de G2R, se crea un modelo tridimensional lo mas preciso posible partiendo de los escasos datos que se poseen.

Partimos de las especificaciones dimensionales de un proyectil de 9 mm estándar:

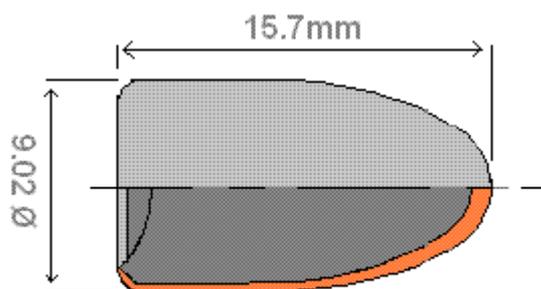


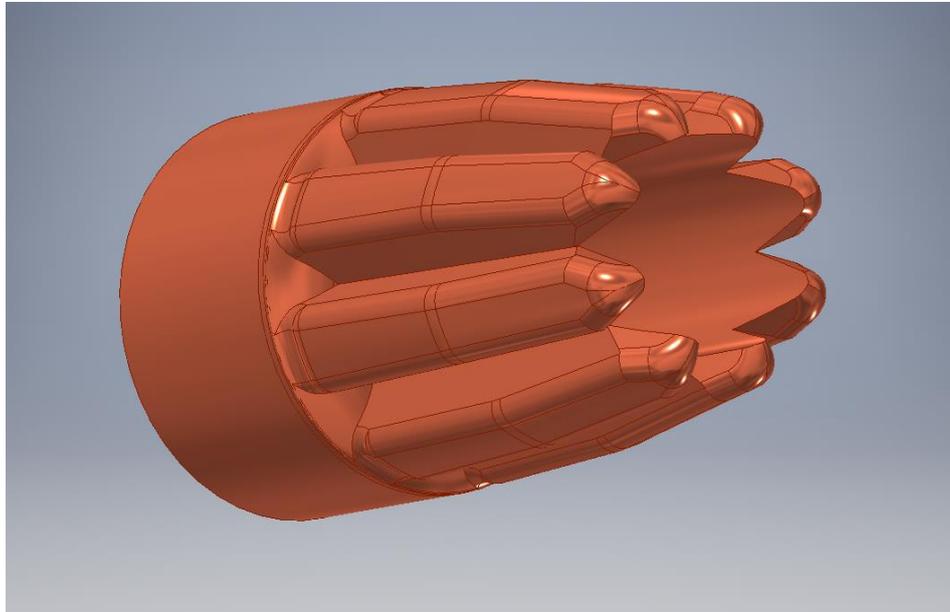
Figura 38: Especificaciones de bala 9 mm estándar.

Tomando como referencia el proyectil original:

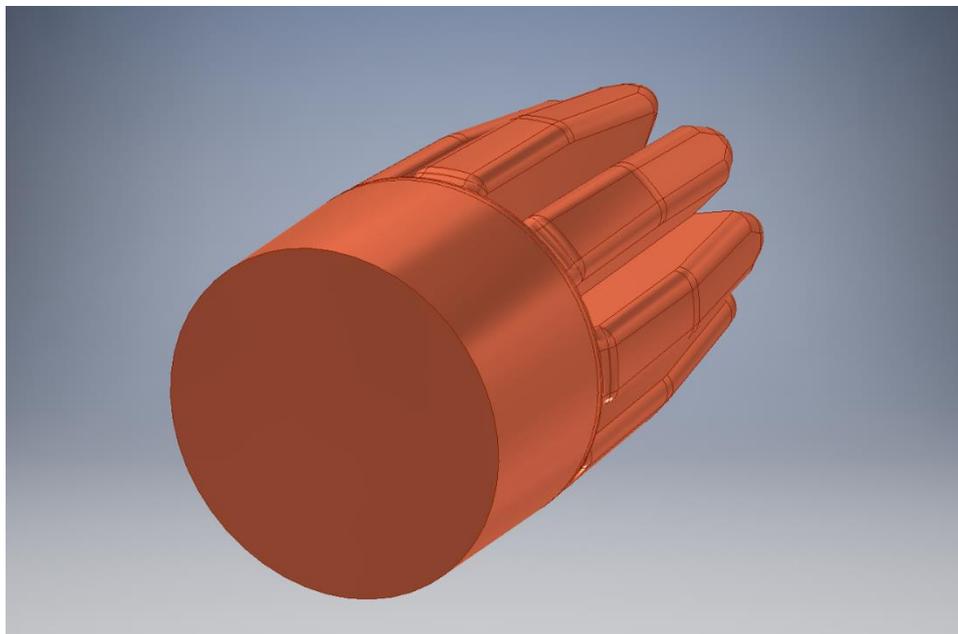


Figura 39: Detalle de bala R.I.P. de G2R.

Aplicando estas dimensiones y los conceptos visibles de las fotos, se ha llegado al siguiente diseño de proyectil en CAE:



*Figura 40: Detalle de proyectil para simulación, vista en ángulo de la parte frontal.*



*Figura 41: Detalle de proyectil para simulación, vista en ángulo de la parte posterior.*

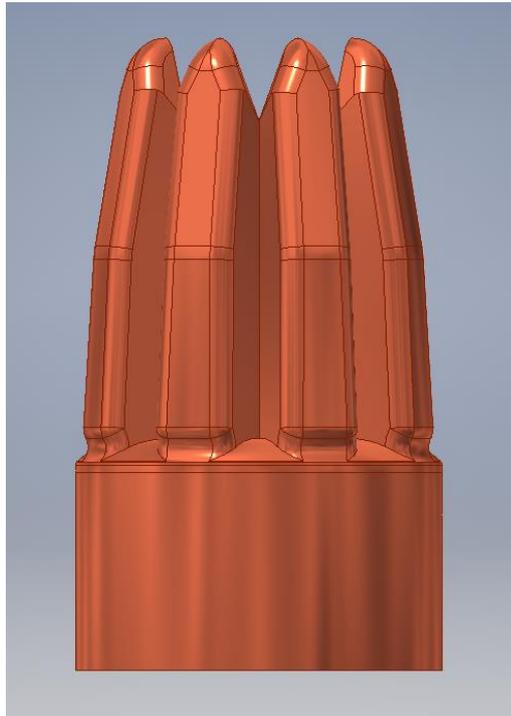


Figura 42: Detalle de proyectil para simulación, vista lateral.

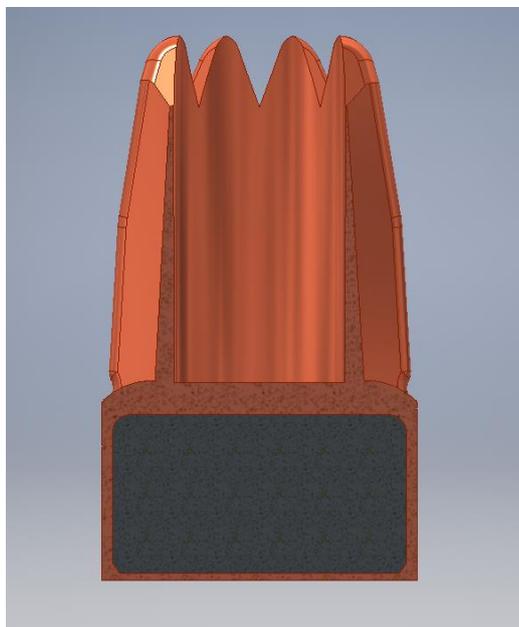
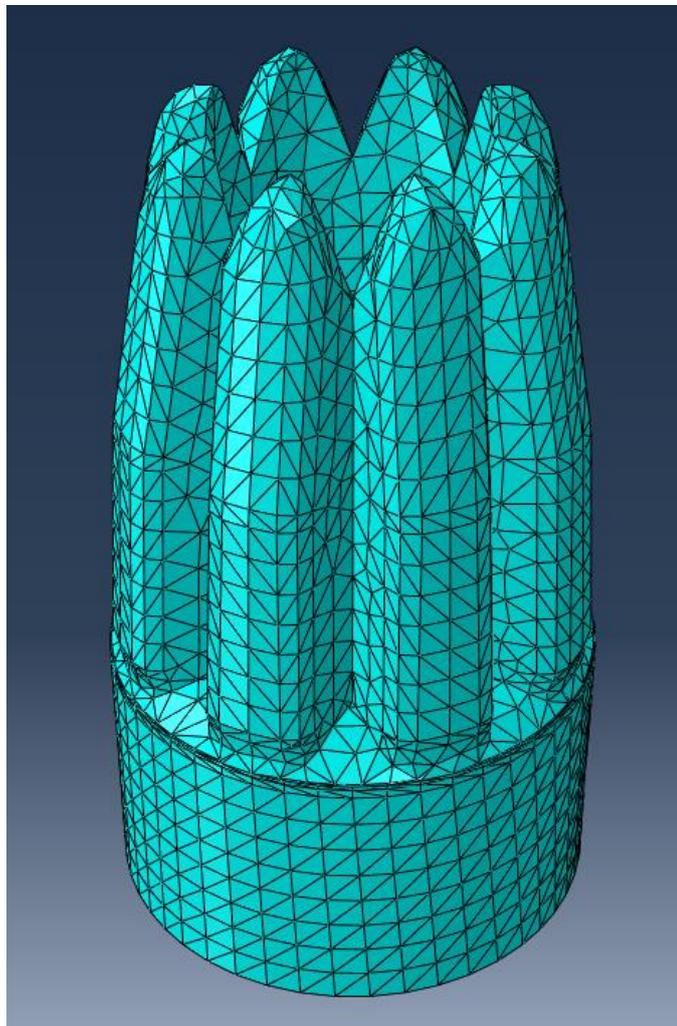


Figura 43: Detalle de proyectil para simulación, vista en corte lateral.

Como puede observarse en la figura anterior [Fig43], se puede ver el núcleo de plomo que le confiere el peso al proyectil.

Para que el mayado sea mas sencillo, algunas de las entallas y aristas se han suprimido o simplificado en favor de realizar una simulación mas sencilla y facilitar en la medida de lo posible los cálculos. El plano detalle del modelo del proyectil puede ser consultado en el **Anexo 4**.

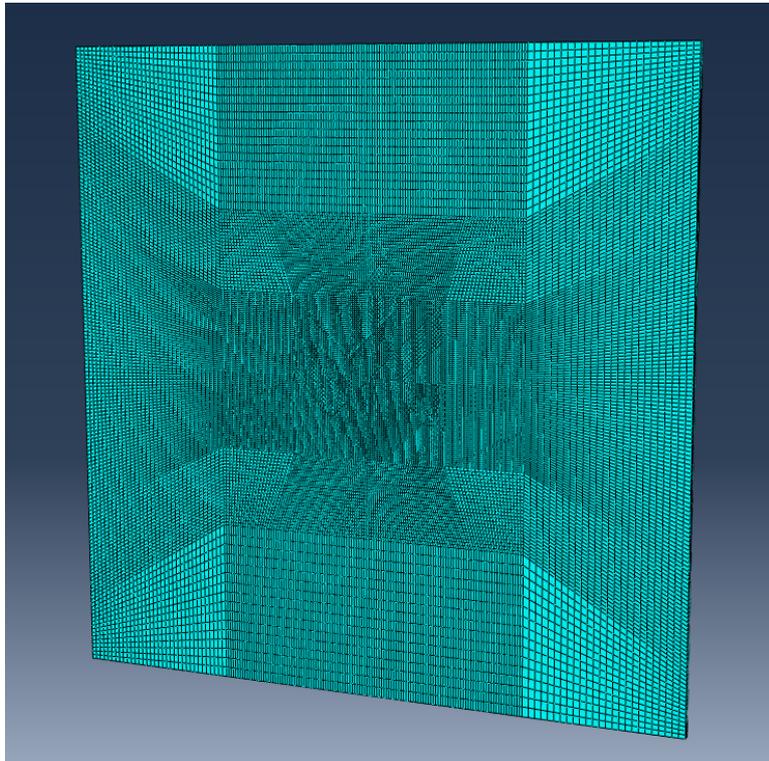
El mayado del proyectil es de una complejidad alta, debido a la gran cantidad de curvas y aristas, en definitiva, de la complejidad geométrica que supone. Se ha mayado con elementos del tipo **C3D4** tetraédricos, en total solo para el proyectil hemos utilizado un total de 44643 elementos.



*Figura 44: Detalle del mayado del proyectil de ensayo.*

## 4.2 Modelo de Placa:

El modelo de la placa no es mas que una placa de 20 x 20 cm de 3mm de espesor, donde se realizara el impacto, lo único destacable sobre la placa es el mayado. Para el mayado se ha dividido la placa en cuadrantes, los cuadrantes exteriores que no intervienen en el impacto se han mayado con elementos de mayor tamaño. Según nos acercamos al centro de la placa el tamaño de elemento disminuye considerablemente, con el fin de recoger unos datos mas precisos y poder obtener una simulación más realista. Para el ensayo en Gel también se ha modificado el espesor, en vez de ser una placa se ha realizado el ensayo sobre un bloque de las mismas dimensiones, pero con un espesor de 40cm, con el fin de conseguir la expansión del proyectil.



*Figura 45; Detalle del mayado de la placa de impactos.*



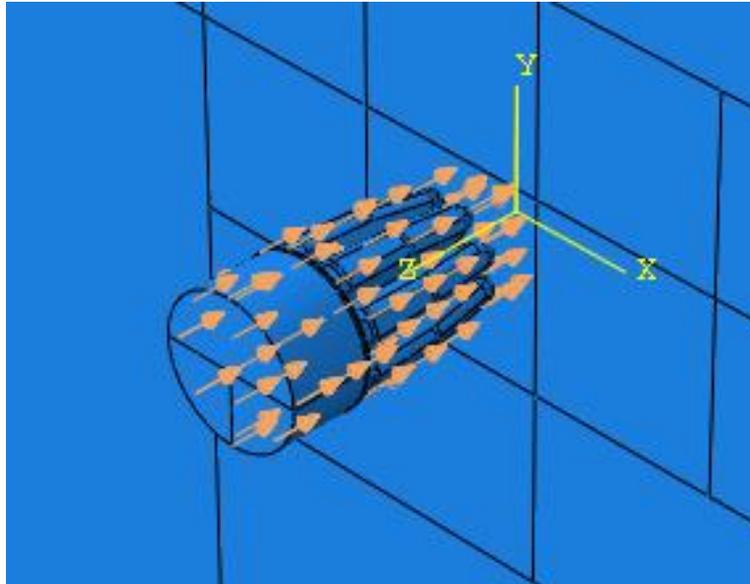
En total para el ensayo completo se han empleado 1.219.683 elementos, siendo esta la cantidad optima que ha permitido realizar las simulaciones sin generar errores críticos ni tiempos de calculo extremadamente largos. Se hizo otro modelo con un total de mas de tres millones de elementos, pero las simulaciones no arrojaron gran diferencia con respecto del modelo actual, sino que los tiempos de cálculo se extendieron a cerca de una semana, por lo que era inequívocamente un mal uso de los recursos ya que no se aprecian diferencias entre ambos modelos.



## **5. PROCEDIMIENTOS Y SIMULACIONES**

## 5.1 Condiciones de contorno:

Las condiciones de contorno de las simulaciones son muy simples. La placa de impactos esta encastrada en sus vértices, impidiendo todos sus posibles movimientos, los giros incluidos. La bala vuela con una velocidad redondeada de 400 m/s, como pasa con una bala real, esta no se desplaza con solo un movimiento rectilíneo, sino que posee una velocidad de giro alrededor de su eje longitudinal. Como condición aplicada al proyectil se ha incluido una velocidad de giro de 15 rad/s, que es una aproximación estándar a la velocidad de giro procedente del estriado del cañón.



*Figura 46: Detalle de las condiciones de contorno del proyectil.*

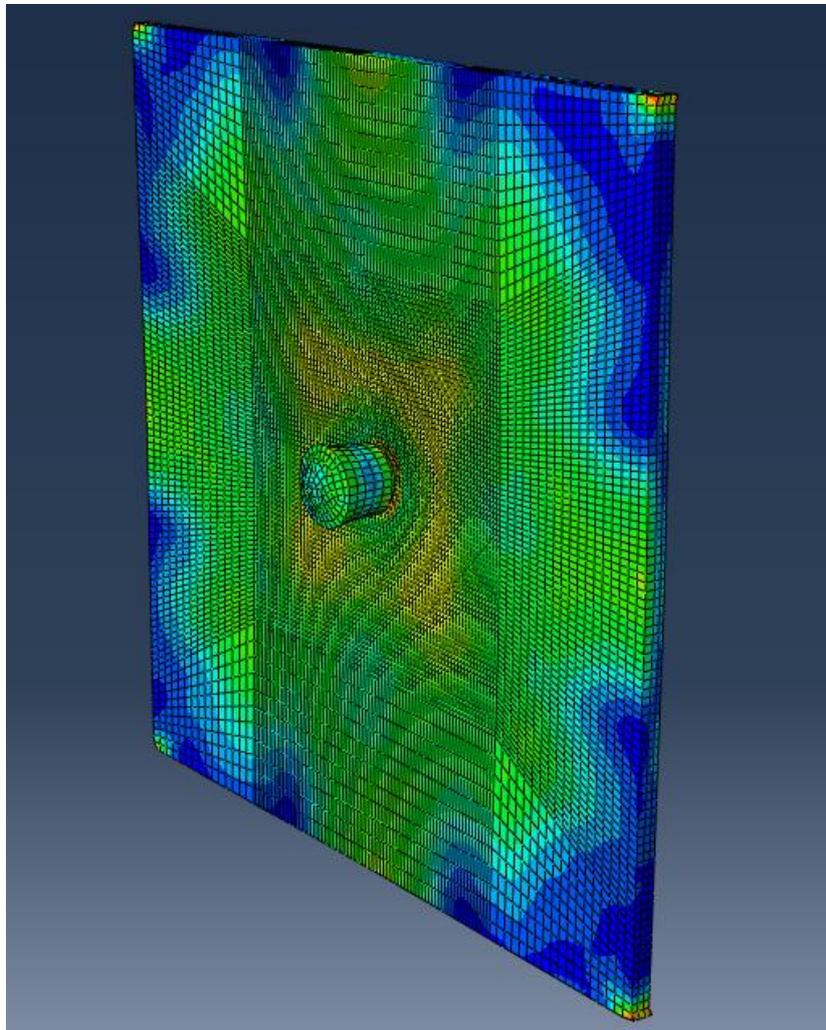
Como puede observarse en la anterior figura [Fig46]. La velocidad lineal se ve representada por un vector que indica el sentido, y la velocidad de giro por el vector momento de giro (vector con doble flecha).

La simulación esta acotada en tiempo a un periodo de 0.001 segundos. Tiempo mas que suficiente para que el proyectil impacte contra la placa. Como es obvio se trata de un análisis dinámico explícito.

## 5.2 Simulaciones:

### 5.2.1 Test de condiciones:

La primera simulación de todas las realizadas no es mas que un test de las condiciones de contorno y las propiedades básicas de los materiales, así como del mayado. El test consiste en el impacto de un proyectil cilíndrico contra una placa de 3mm de acero AISI 4340, al igual que la placa AR500.



*Figura 47: Detalle de la simulación test de impacto*

Como era de esperar un proyectil cilíndrico de 9mm, del mismo acero que la placa, no va a ser capaz de atravesar la placa. No es necesario comprobarlo con una simulación, el fabricante AR500 ya nos garantiza que detiene proyectiles de dichas características, incluso usando la mitad de espesor de placa que el blindaje comercial.

### 5.2.2 Simulación con chapa:

En esta simulación se ha querido comprobar si las hipótesis y los modelos de fallo de Johnson-Cook son correctos. Para ello se ensayó el impacto entre el modelo de bala R.I.P. y una chapa de acero AISI 4340 de 1mm de grosor. Para el proyectil se ha suprimido el núcleo de plomo y solo se ha introducido velocidad lineal.

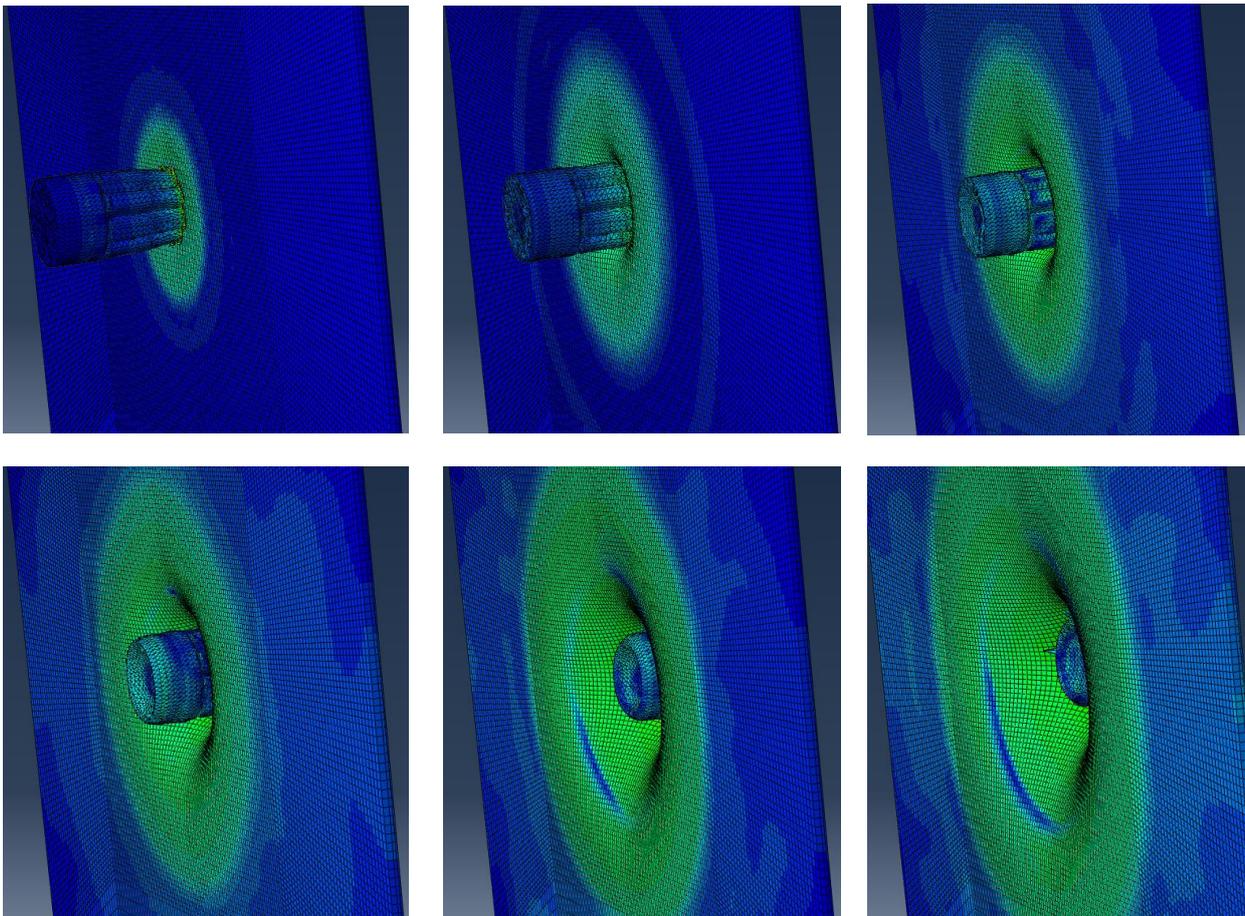


Figura 48: Penetración por la cara frontal

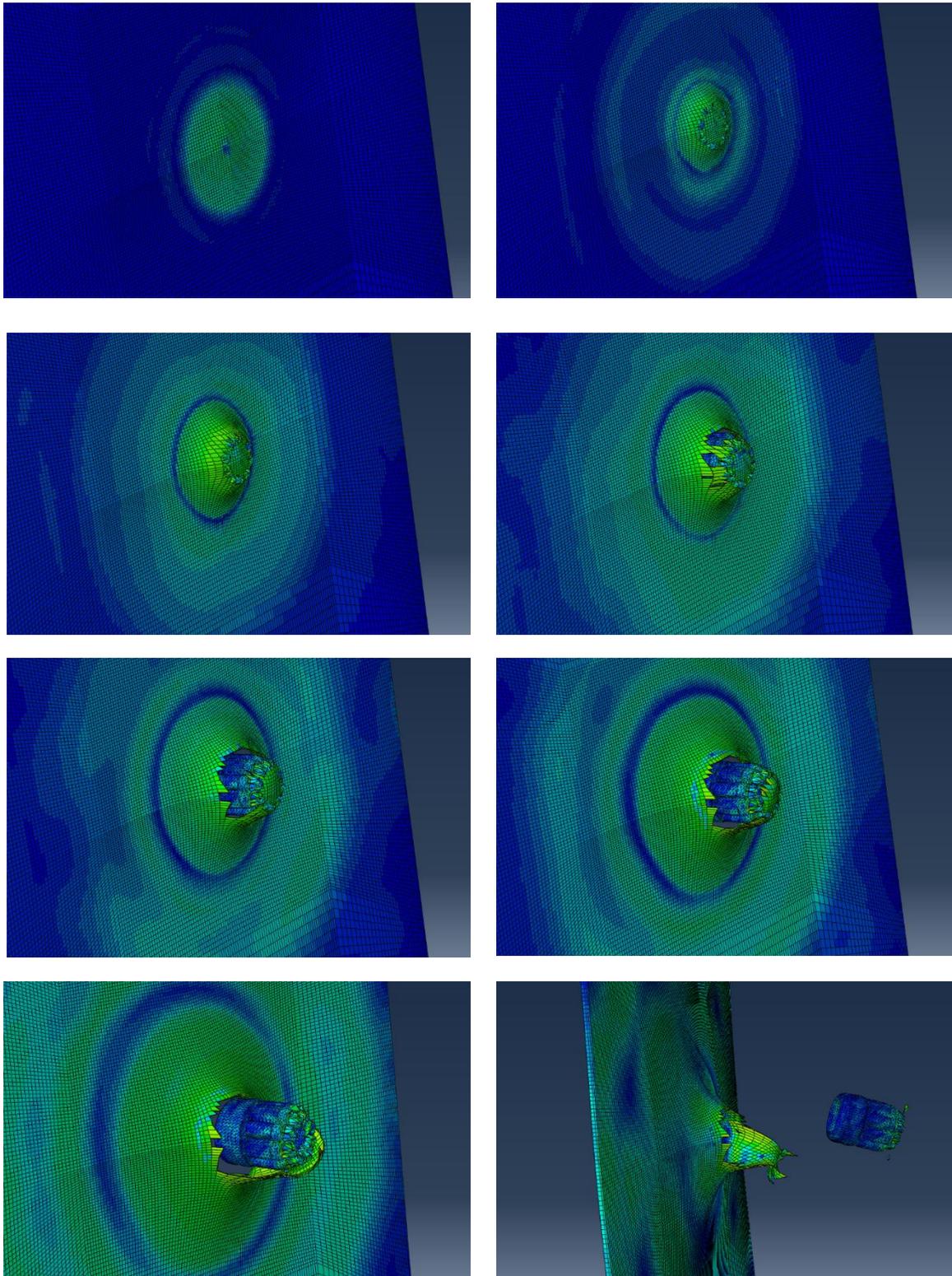


Figura 49: Penetración por la cara posterior.

Como podemos ver tanto en la [Fig48] como en la [Fig49], se trata de una penetración perfecta, con la que comprobamos la validez del modelo de daño y propagación del mismo de Johnson-Cook. Al no tener núcleo de plomo, la parte trasera del proyectil se deforma en gran medida, y por no tener esa masa extra, el proyectil se deforma mucho en su parte delantera, pero aun así mantiene ligados los trocares de expansión. En el interior del proyectil quedan atrapados fragmentos de la placa, por lo que podemos deducir su futura expansión con materiales viscoelásticos.

### 5.2.3 Simulación con plomo:

En la simulación con plomo surgió el problema del contacto entre el plomo y el proyectil. Se introdujo el material con una relación de contactos y fricción interna entre ambos elementos, pero al realizar los ensayos se produjo un colapso debido a la inercia adquirida por el plomo. El plomo empujó la parte frontal y consiguió romper las paredes de su contenedor comprimiéndose hacia adelante. Con este ensayo se descartó el modelo de interacción entre ambos materiales.

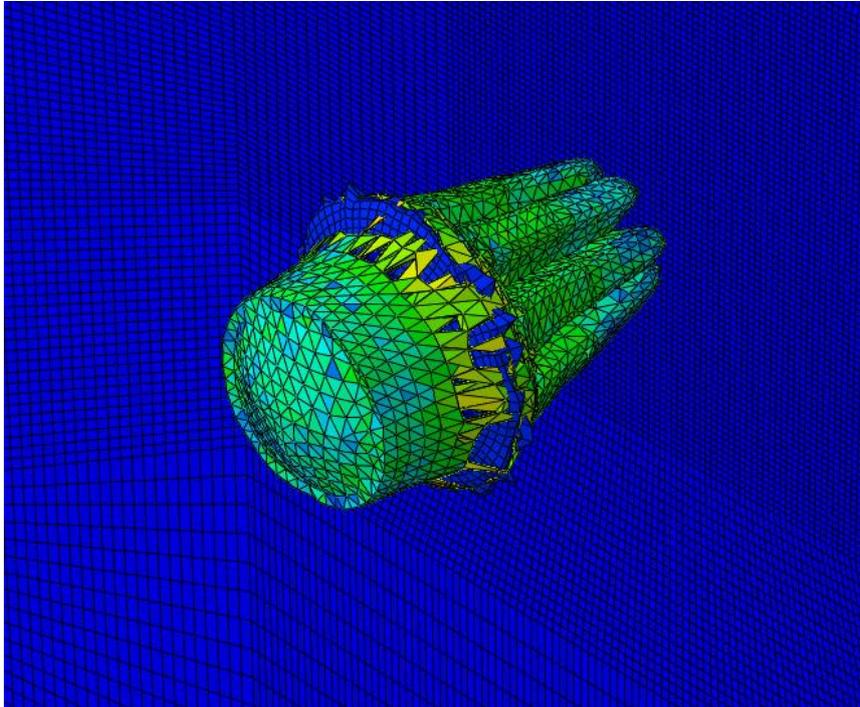


Figura 50: Detalle del colapso del proyectil debido al núcleo de plomo.

## 5.2.4 Simulación con plomo 2:

Para este segundo intento de incluir el núcleo de plomo, se ha introducido como una unión rígida propia del proyectil, es decir, en su conjunto se comporta como una sola pieza. Para diferenciar los materiales se hizo una partición interna de la pieza y se le aplicó las características mecánicas del plomo a la pieza interna del proyectil. Con esto se ha conseguido que la bala en su conjunto sea solo una, sin crear tensiones internas ni problemas de contacto asociados al movimiento y la energía cinética de las piezas sueltas. Esta configuración no elimina la posibilidad de deformación ni fallo entre los dos materiales cuando se produzca el impacto, que es precisamente lo que se busca.

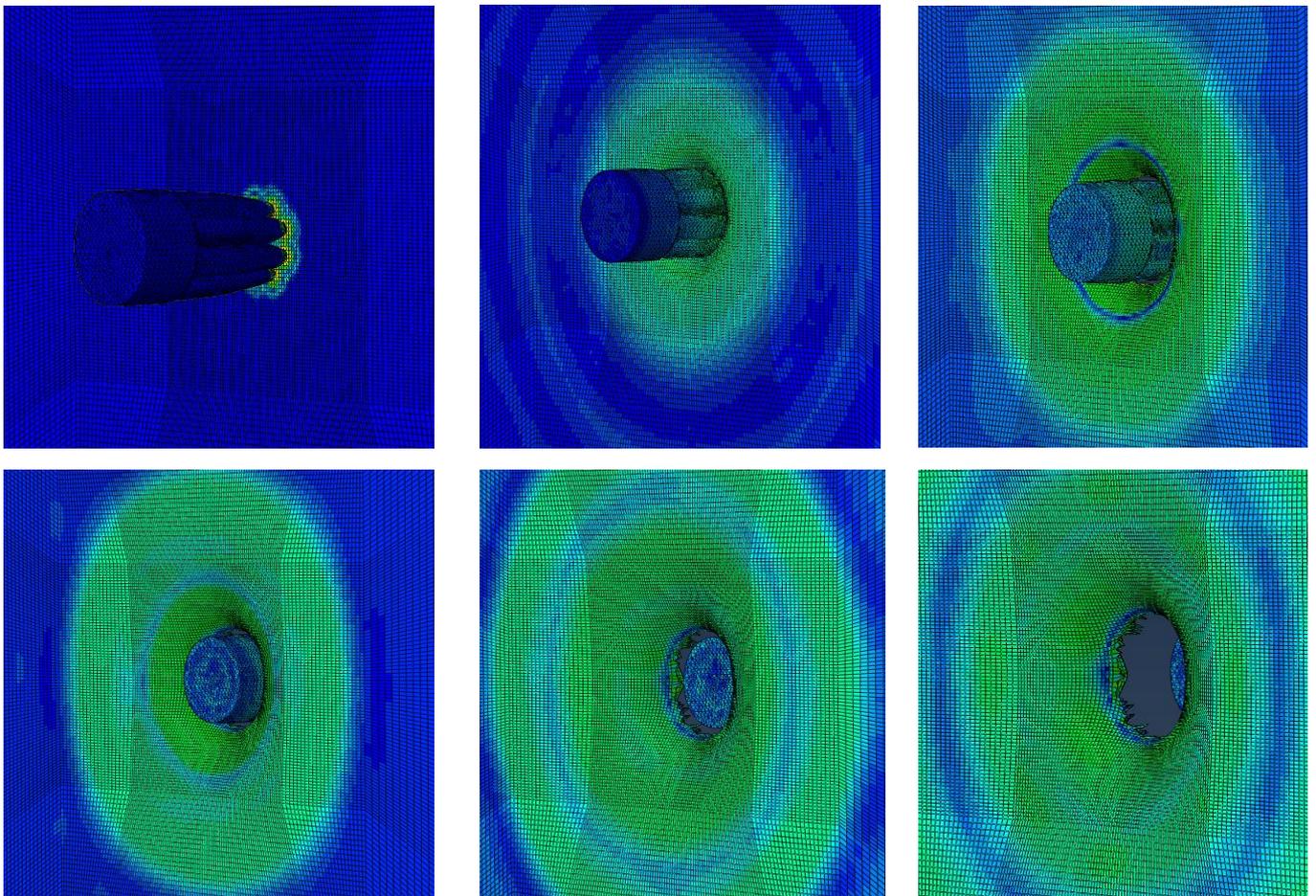
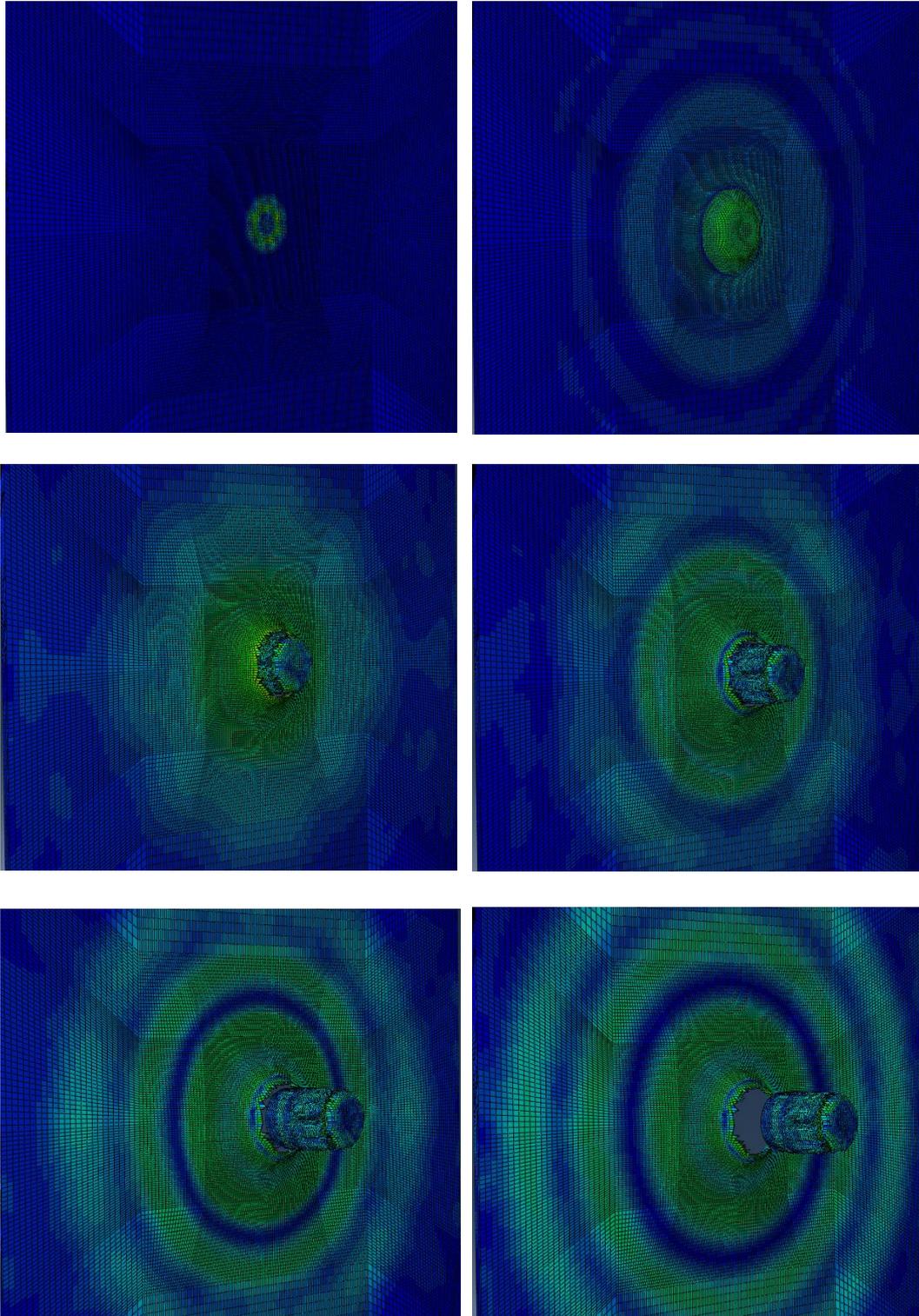
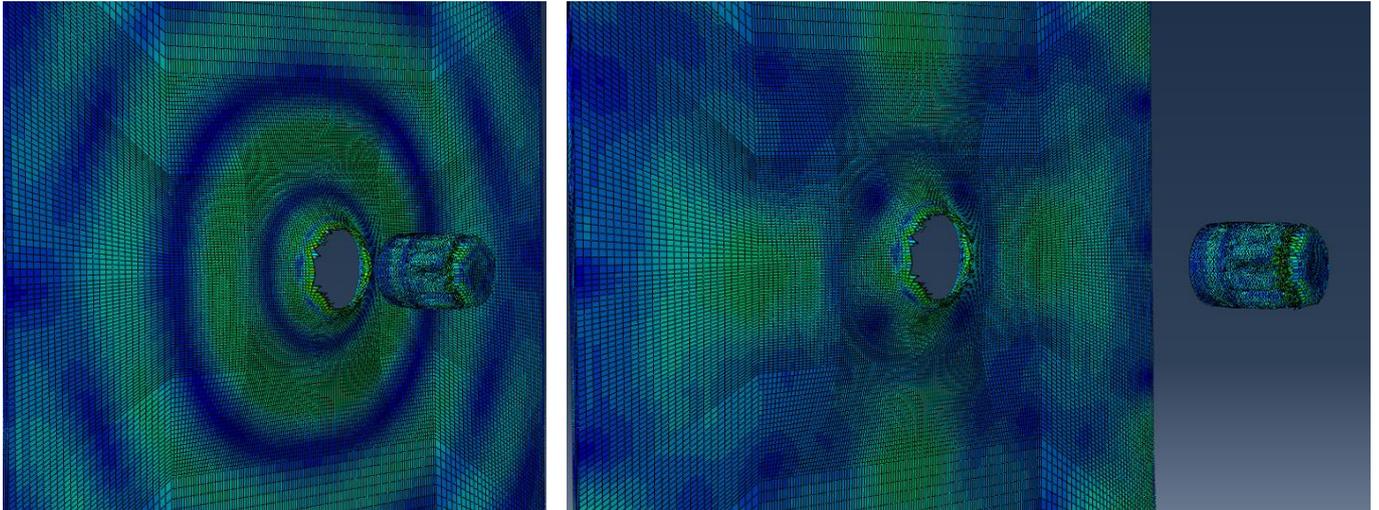


Figura 51: Impacto en cara frontal.



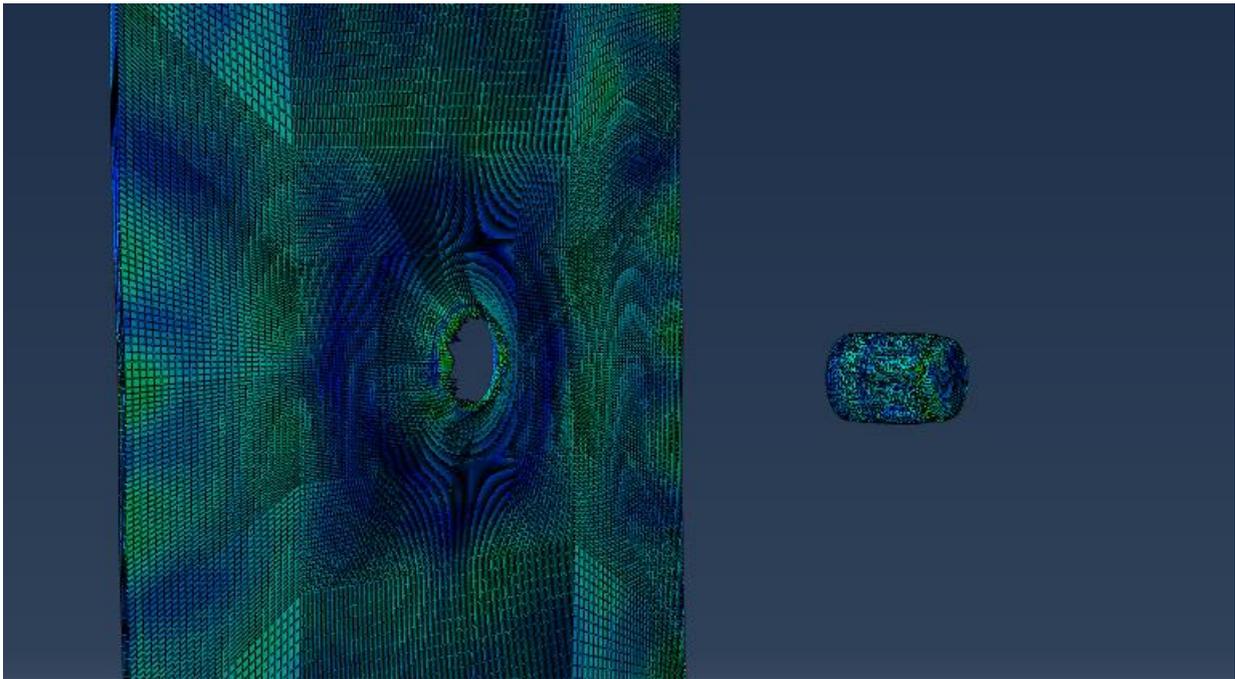


*Figura 52: Penetración desde la parte posterior.*

Como podemos observar en las anteriores figuras, el implemento del plomo le confiere mayor penetración al proyectil. También podemos ver que le confiere mayor estabilidad ya que no se ve alterada su trayectoria al atravesar la placa. El poder cortante se ve muy incrementado, lo que genera un corte perfectamente circular en la placa e incluso arrastra el material cortado en la parte frontal del proyectil. Podemos intuir que al mantenerse íntegra la bala se están cumpliendo parte de los reclamos del fabricante, en concreto el de atravesar barreras sin expandirse.

## 5.2.5 Simulación con rotación:

En esta simulación se introdujo la rotación propia del proyectil, a diferencia del caso anterior, se consigue un corte mas apurado de la placa ya que ese giro favorece el corte, pero prácticamente se obtienen los mismos resultados.



*Figura 53: Penetración del proyectil rotatorio, visto desde la parte posterior.*

### 5.2.6 Simulación en placa de 2 mm:

La simulación que aquí se presenta ya es en una placa de gran espesor del tipo AR500. Como queremos encontrar el límite de penetración para el proyectil R.I.P. empezaremos con un espesor de 2 mm, el cual es mucho menor al de uso comercial de nivel de protección III. Para esta simulación y de forma aditiva se han introducido todos los parámetros anteriormente mencionados, (velocidad lineal, rotación y núcleo de plomo).

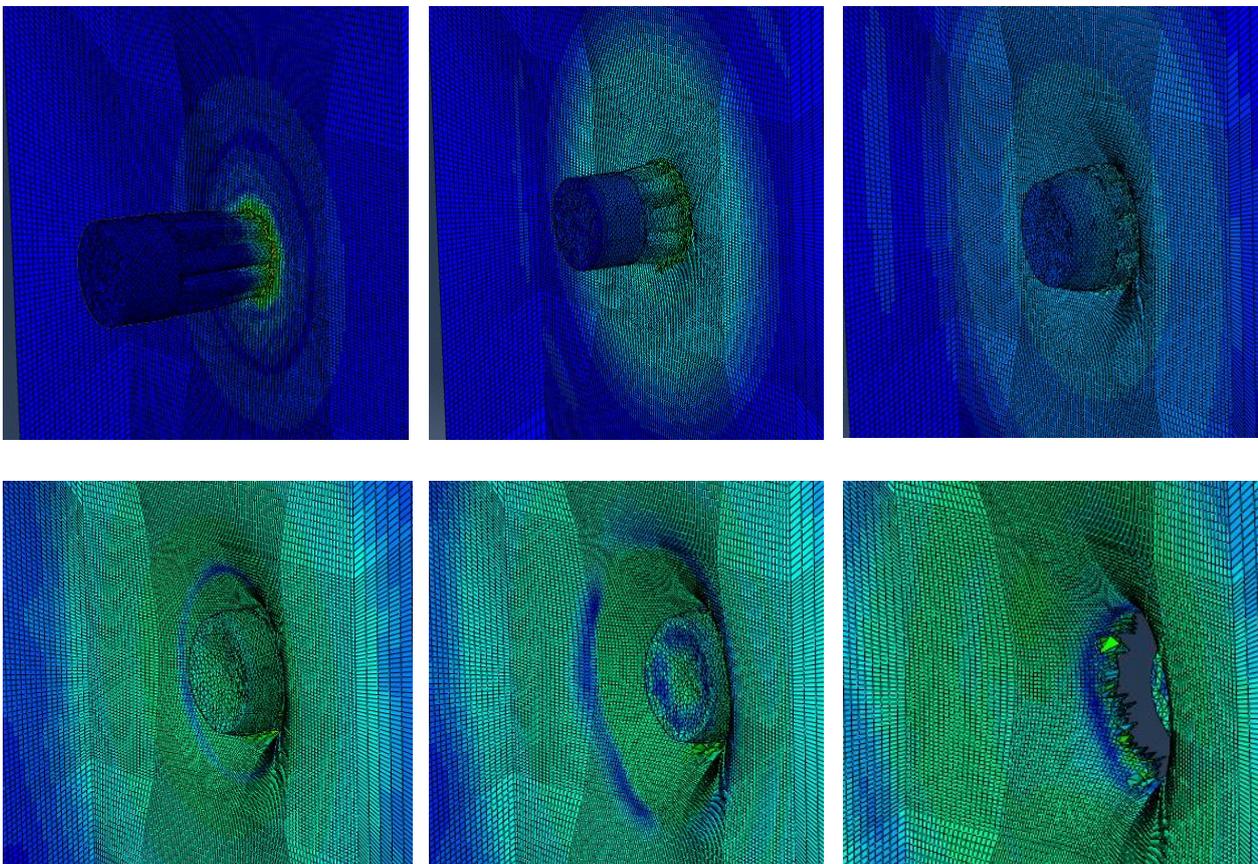
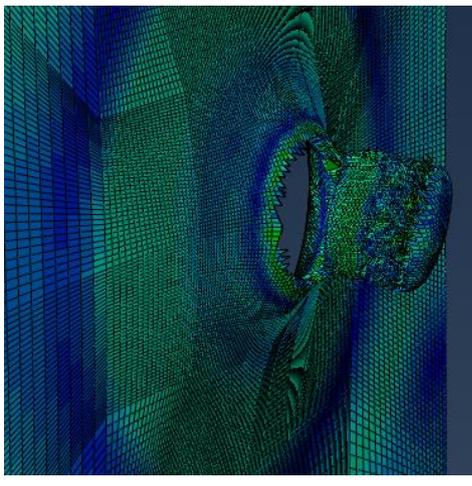
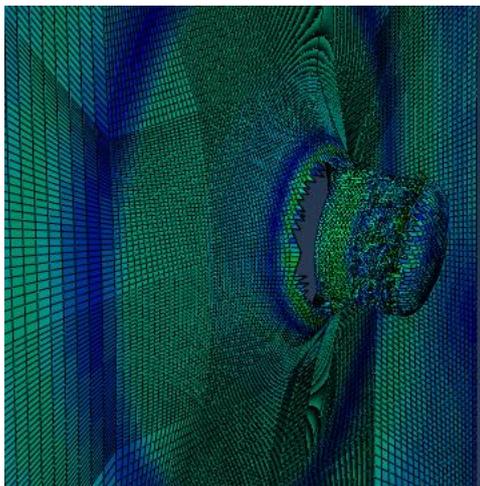
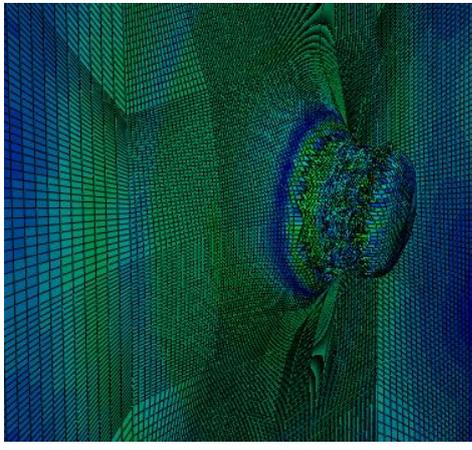
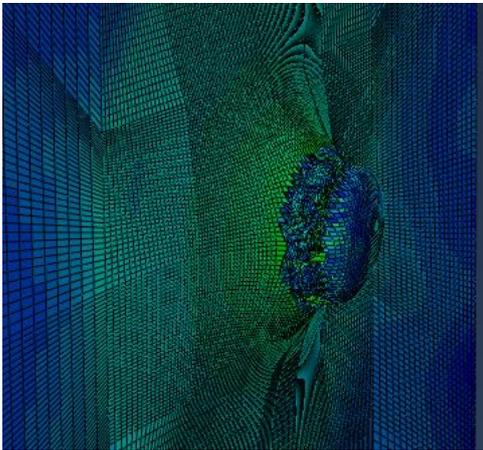
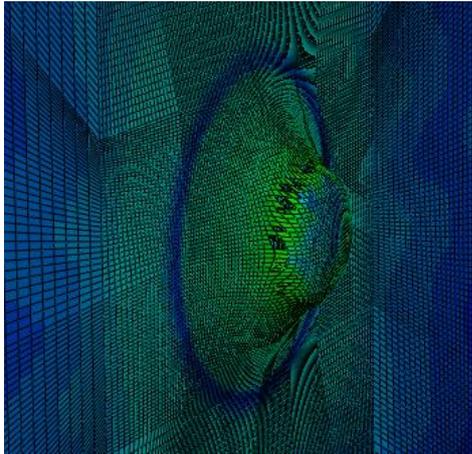
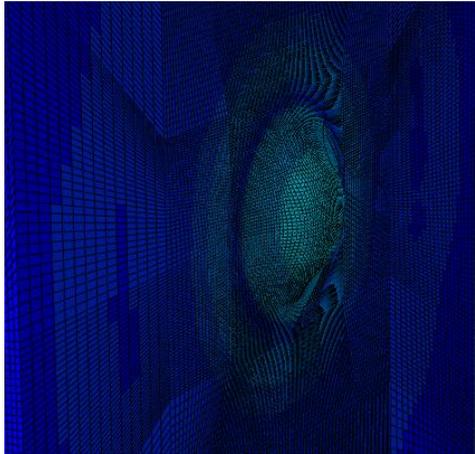
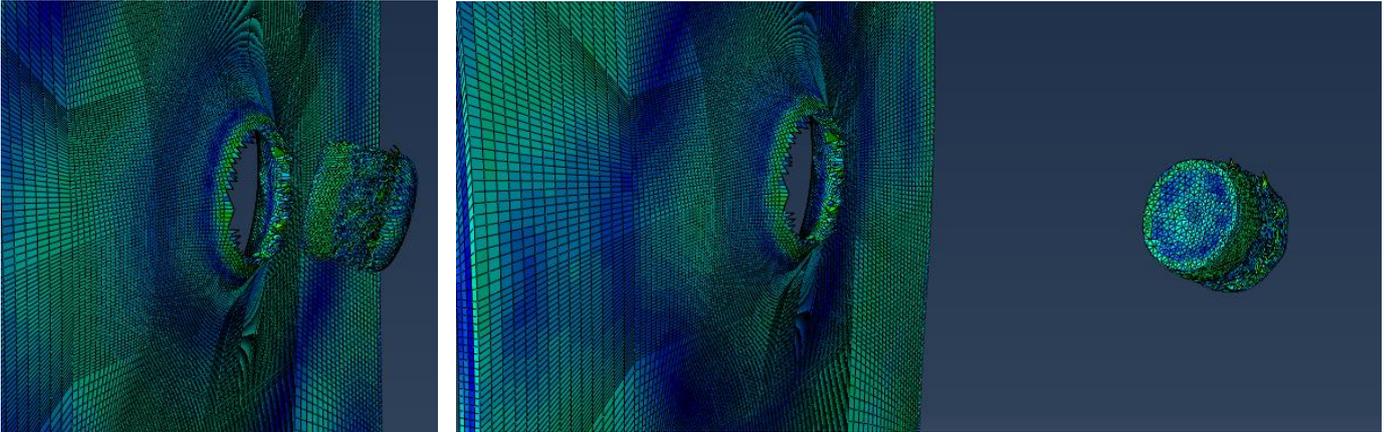


Figura 54: Vista delantera del impacto.



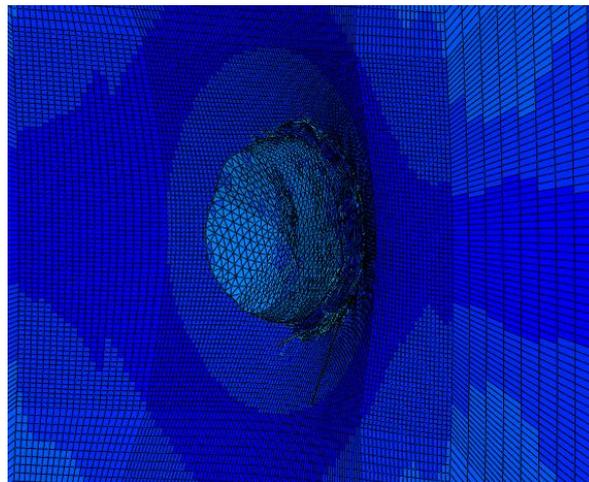


*Figura 55: Vista posterior del impacto.*

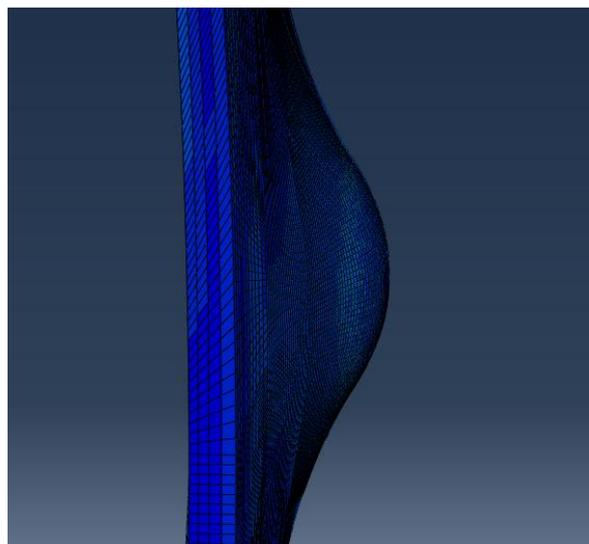
Viendo las figuras anteriores, puede apreciarse que 2 mm de blindaje AR500 no son rival para el proyectil. Aun así, se aprecia que la bala sale desviada y muy deformada, por lo que se sobreentiende que ha perdido la gran mayoría de su energía cinética. Los trocares siguen creando un corte bastante preciso, incluso arrastrando el material sobrante. La transferencia de energía se traduce en una mayor deformación de la placa ya que no se produce el corte tan rápidamente como en casos anteriores, ya que la placa está oponiéndose a dicha penetración con mayor masa y más espesor.

## 5.2.7 Simulación en placa de 3mm:

Esta simulación es idéntica a la anterior, pero con un espesor de placa de 3 mm. Con este ensayo se ha alcanzado el límite máximo que este proyectil puede penetrar. Aun así, la gran deformación que produce puede causar un gran daño al tejido que se encuentre detrás, si se encontrará en un torso humano, podría haberse producido un gran edema debido al golpe sufrido, por lo que habría que ampliar el espesor o incluir material absorbente y amortiguador.



*Figura 56: Vista delantera del impacto.*



*Figura 57: Vista lateral de la placa, detalle de la deformación.*

## 5.2.8 Simulación con plastilina ROMA:

Para la simulación con plastilina ROM N°1 se comenzó con pruebas de impactos con una esfera metálica. Pero debido a la complejidad de la parametrización de la plastilina y la gran carga de cálculo que suponía para el hardware, no se llegó a un resultado óptimo del material, por lo que se desestimó su uso en las siguientes simulaciones. De haber utilizado un equipo de cálculo más potente sí que se podría haber llegado a un modelo adecuado, pero al no ser este el principal material que se quería desarrollar, no se le dio más tiempo a su caracterización.

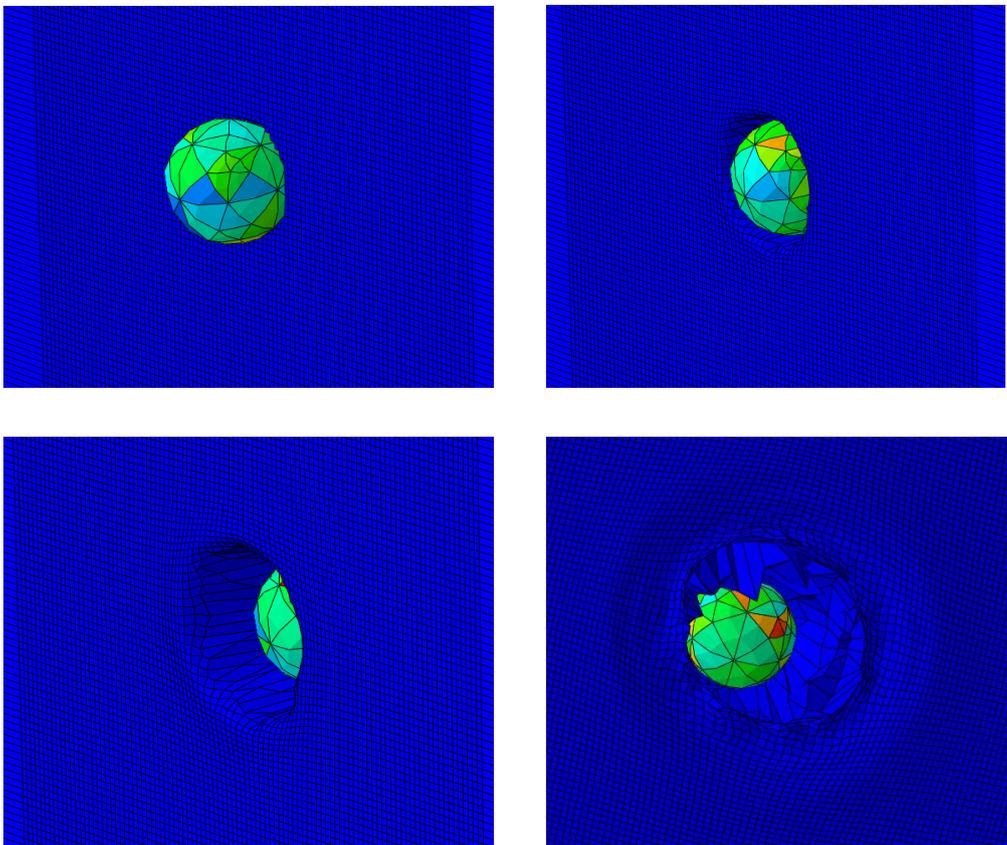
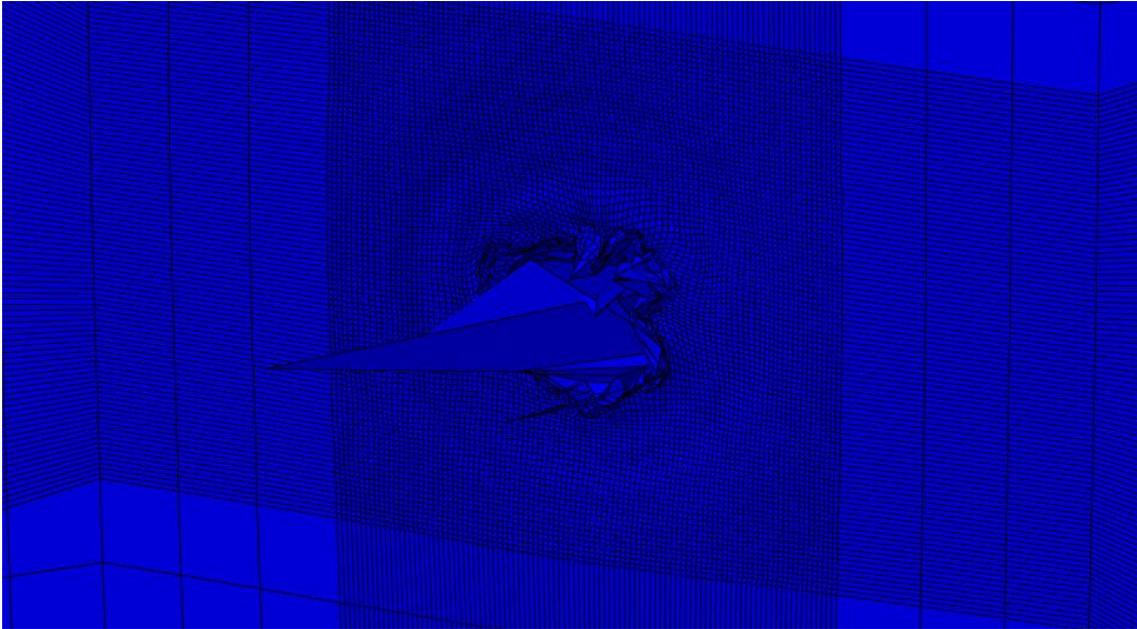


Figura 58: Vista delantera del impacto.



*Figura 59: Vista delantera del impacto.*

Como puede verse, se generan numerosos fallos de simulación, elementos que se estiran infinitamente y se distorsionan. El proyectil esférico nunca atravesó el bloque, pero aun así genero distorsiones en el otro extremo del bloque. Es por esto que se decidió apartar este material de la ruta de simulaciones y ensayos objetivo.

### 5.2.9 Simulación con placa de gel balístico:

En esta simulación se ha sustituido el acero AISI 4340 de la placa por la gelatina balística. Se sobreentiende que ha de aplicarse en un bloque de gran espesor, pero para realizar unos cálculos más ligeros, y sabiendo que existe la posibilidad de que se generen fallos de simulación, se realizará en placa y así veremos el comportamiento dinámico del proyectil.

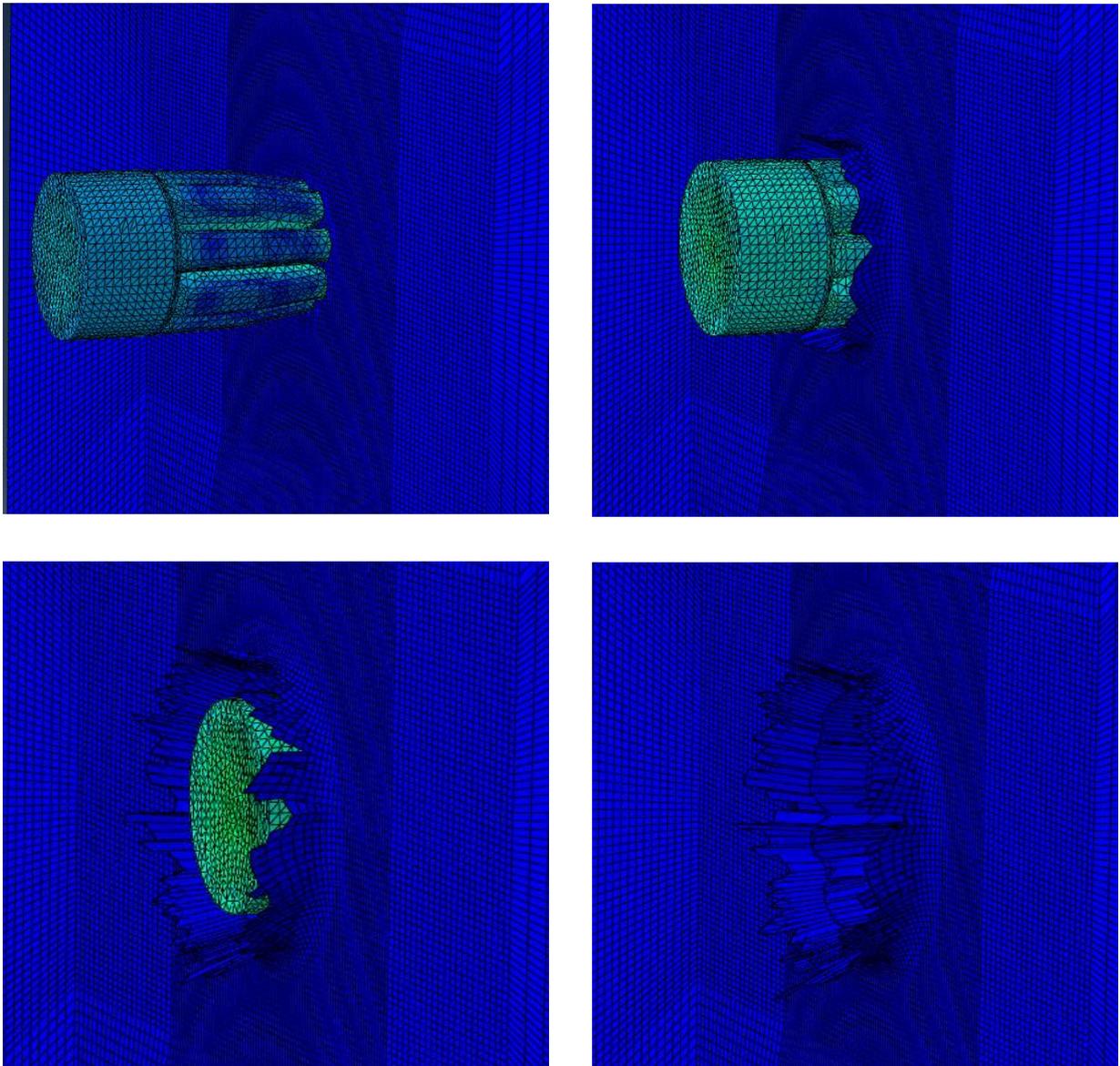
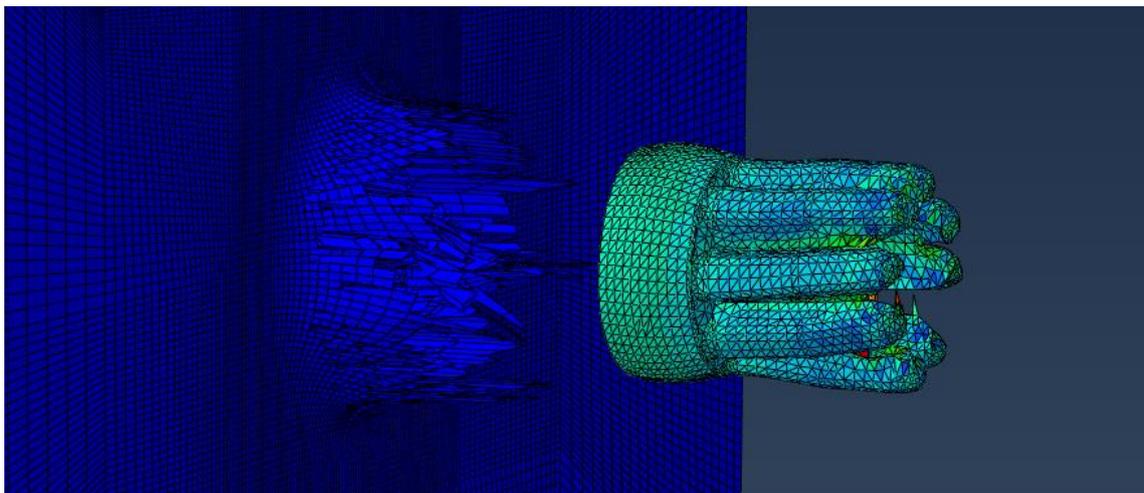
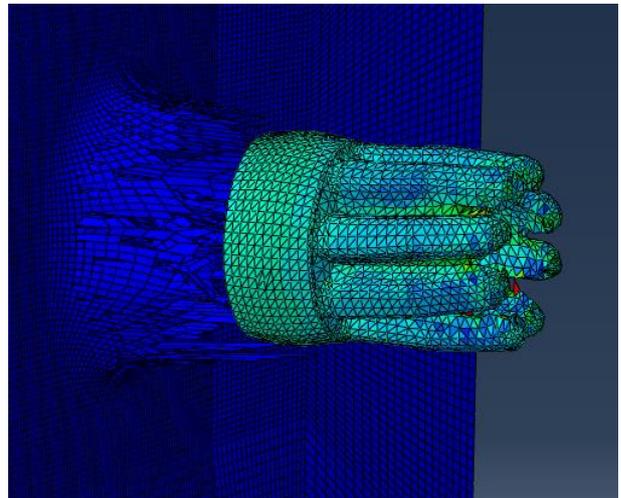
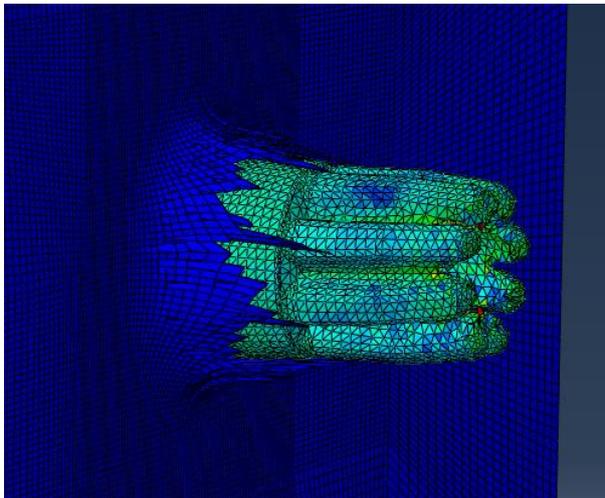
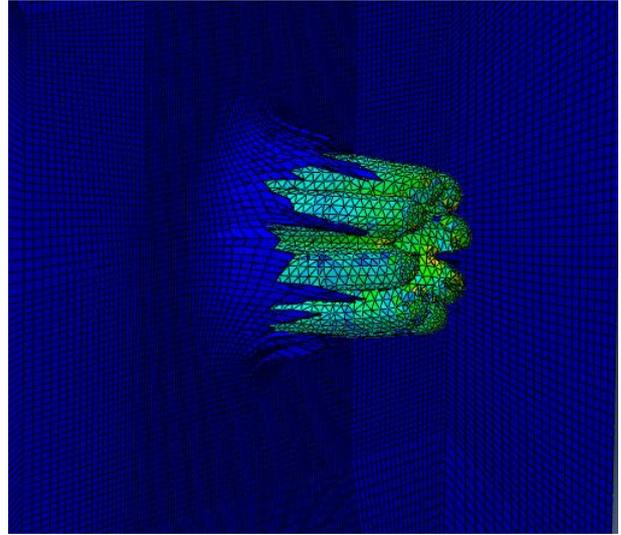
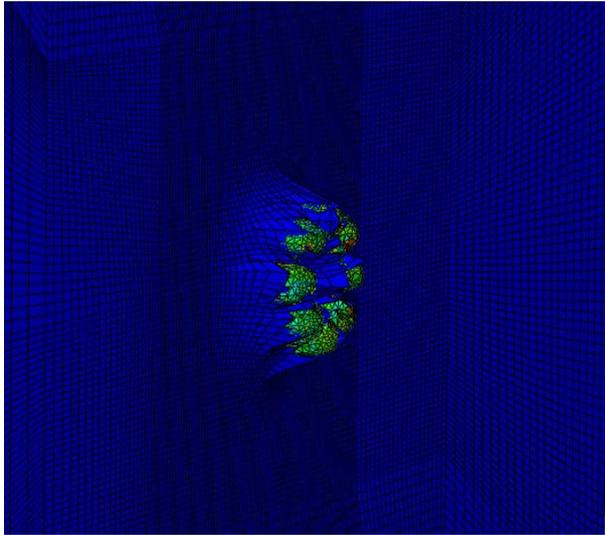


Figura 60: Vista delantera del impacto.



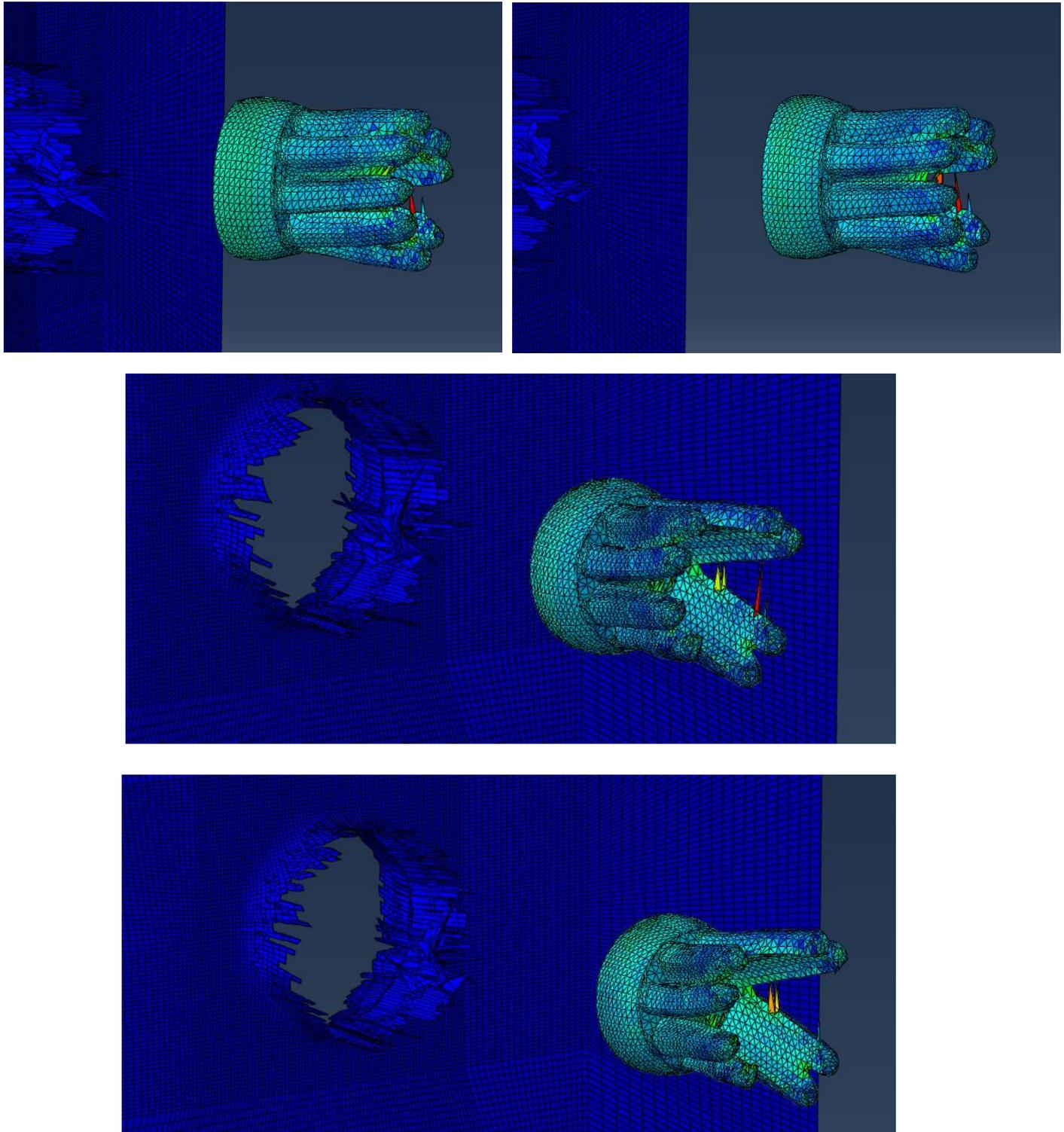


Figura 61: Vista posterior del impacto.

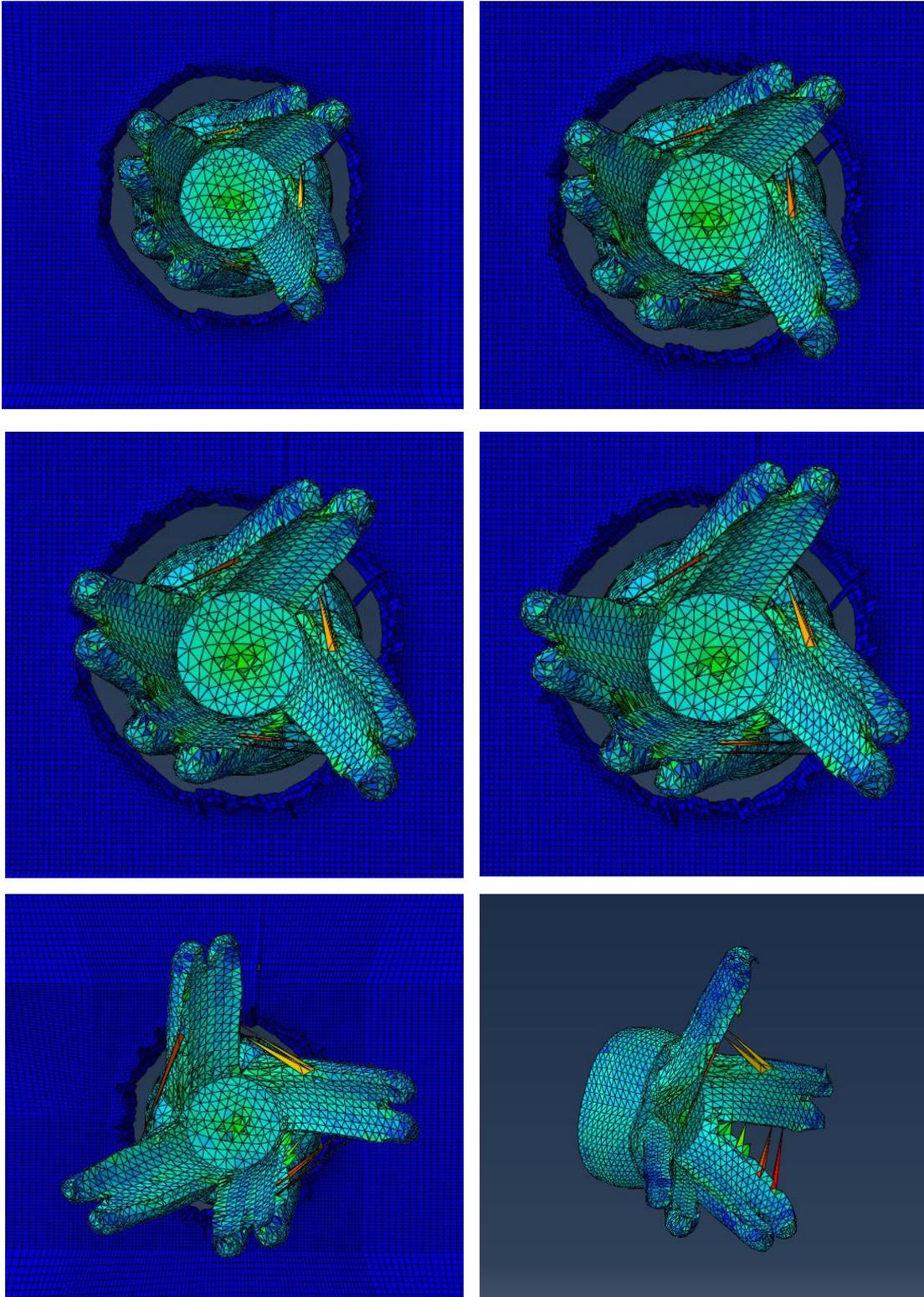


Figura 62: Vista posterior del impacto y frontal del proyectil.

Como podemos ver aún con una placa de gel se empieza a producir la expansión y la separación de las esquirlas, también se aprecia el giro debido al movimiento rotativo. Este movimiento de rotación va a favorecer la separación y la dispersión de los trocares. No se ha conseguido una disgregación total de las esquirlas ya que aun intentando ser lo mas preciso posible, hay comportamientos y diseños que no han sido posibles simularlos. A pesar de todo esto podemos validar en la medida de lo posible el comportamiento tanto del proyectil como del gel, siempre obviando los pequeños fallos de elementos que poseen una deformación excesiva o que no se comportan como debieran.

### 5.2.10 Simulación en bloque de gel balístico:

En este caso se hicieron las simulaciones con un bloque de gel balístico, con las mismas propiedades y condiciones de contorno que con la placa anterior. Debido a las limitaciones de hardware no se ha conseguido una simulación correcta, el proyectil no se ha expandido y tampoco ha atravesado el bloque. La bala se ha quedado parada en el interior ya que se produjo un error de cálculo, ya que son demasiado elementos a tener en cuenta en los cálculos numéricos. De haber realizado estos ensayos en un ordenador de gran potencia si que se hubiesen obtenido los resultados esperados, ya que en el ensayo anterior fue posible atisbar como evolucionaría el proceso.

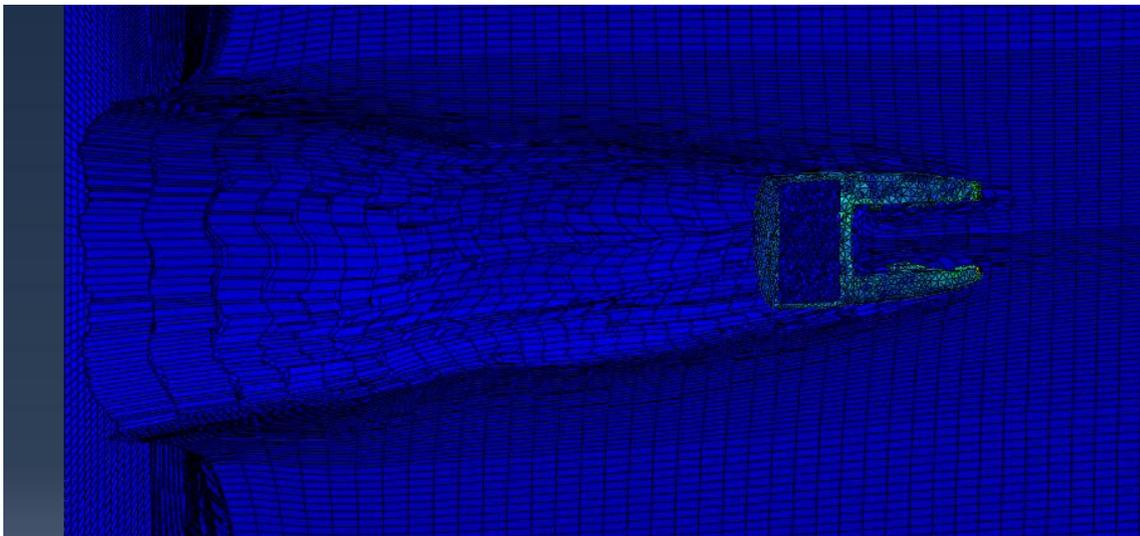


Figura 63: Ensayo en bloque balístico, vista en corte.

## 6. Conclusiones finales:

Como parte del proceso de aprendizaje aquí realizado, se han obtenido grandes cualidades y conocimientos en el uso y entendimiento del método FEM, cálculo mediante elementos finitos, y una visión global de las dificultades y necesidades existentes en la caracterización de materiales para su uso en cálculos mecánicos.

También se han conseguido las capacidades de búsqueda y estudio de otros estudios científicos de mayor valor y gran importancia, de donde extraer datos y conocimientos que ayuden a la realización de las tareas propias.

Pero pese a todo lo ganado y aprendido, se ha llegado a la conclusión y entendimiento que pese a toda la investigación realizada y todos los recursos utilizados, siempre se requerirá de un nivel técnico, tanto de software como de hardware, que sustenten todas nuestras necesidades ya sea para cálculos ligeros como pesadas y grandes simulaciones.

En particular para este trabajo hubiera sido de gran ayuda el contar con los medios técnicos necesarios para realizar unas simulaciones de calidad y gran detalle, pero el coste operacional e incluso el coste material de estos equipos se hacen inviables.

Pese a estas citadas dificultades, se ha llegado a alcanzar resultados admisibles que corroboran el modelo físico teórico aquí planteado. Probablemente estos ensayos no queden aquí y sirvan de base para un trabajo de master o una futura tesis, con más tiempo y mayores medios que posibiliten avanzar en este campo.



## 7. ANEXOS

## 6.1 Anexo 1:

### Archivo .INP:

\*Heading

\*\* Job name: Job-8-merot-gel Model name: Model-1

\*\* Generated by: Abaqus/CAE 6.12-1

\*Preprint, echo=NO, model=NO, history=NO, contact=NO

\*\*

\*\* PARTS

\*\*

\*Part, name=Part-1

\*Node

\*Surface, type=ELEMENT, name=m\_Surf-3

\_m\_Surf-3\_S3, S3

\_m\_Surf-3\_S4, S4

\_m\_Surf-3\_S2, S2

\_m\_Surf-3\_S1, S1

\*End Assembly

\*\*

\*\* ELEMENT CONTROLS

\*\*

\*Section Controls, name=EC-1, DISTORTION CONTROL=YES, ELEMENT  
DELETION=YES, MAX DEGRADATION=0.2, hourglass=VISCOUS

1., 1., 1.

\*Section Controls, name=EC-2, ELEMENT DELETION=YES

1., 1., 1.

\*\*

\*\* MATERIALS

\*\*

\*Material, name=Bronze

\*Density

8.8e-09,

\*Elastic

58080., 0.34

\*Plastic, hardening=JOHNSON COOK

112., 505., 0.42, 1.68, 1030., 293.

\*SHEAR FAILURE, TYPE=JOHNSON COOK, ELEMENT DELETION=yes

0.54, 4.89, 3.03, 0.014, 1.12

\*Specific Heat

435.,

\*Material, name=GEL

\*Damping, alpha=0.2, beta=1e-08

\*Density

1.04e-09,

\*Hyperelastic, n=2, ogden, moduli=LONG TERM

0.00011643, 7.49, 0.0010589, -6.75, 0.000319, 0.000389

\*Mullins Effect

1.49248, 0.004285, 0.000288

\*Viscoelastic, time=PRONY

0.8118, 0., 0.00143

\*Material, name=Gelatina

\*Damage Initiation, criterion=SHEAR

0.9, -0.33, 1.

\*Damage Evolution, type=DISPLACEMENT

0.075,

\*Damping, alpha=0.2, beta=1e-08

\*Density

1.08e-09,

\*Hyperelastic, n=2, ogden

0.00011643, 7.49, 0.0010589, -6.75, 0.000319, 0.000389

\*Plastic, rate=0.

1e-06,0.

\*Plastic, rate=0.001

1e-06,0.

0.1625, 0.2

0.35625, 0.4

0.58875, 0.6

0.893125, 0.8

1.29563,1.

\*Plastic, rate=0.01

1e-06,0.

0.2475, 0.2

0.529375, 0.4

0.88, 0.6

1.30938, 0.8

1.88437,1.

2.64812, 1.2

\*Plastic, rate=1.

1e-06,0.

0.255625, 0.2

0.5625, 0.4

0.975, 0.6

1.5625, 0.8

2.275,1.

3.3125, 1.2

\*Material, name=Lead

\*Density

1.134e-08,

\*Elastic

117000., 0.431

\*Plastic, hardening=JOHNSON COOK

10.3, 41.3, 0.21, 1.03, 327.5, 293.

\*Specific Heat

130.,

\*Material, name=Steel

\*Density

7.85e-09,

\*Elastic

210000., 0.3

\*Plastic, hardening=JOHNSON COOK

350., 275., 0.36, 1., 1538., 293.

\*SHEAR FAILURE, TYPE=JOHNSON COOK, ELEMENT DELETION=yes

0.05, 2.1, 0.5, 0.0002, 0.61

\*Specific Heat

486.,

\*\*

\*\* INTERACTION PROPERTIES

\*\*

\*Surface Interaction, name=IntProp-1

\*Friction

0.13,

\*\*

\*\* PREDEFINED FIELDS

\*\*

\*\* Name: Predefined Field-1 Type: Velocity

\*Initial Conditions, type=ROTATING VELOCITY

Set-9, -15000., 0., 0., -400000.,

0., 0., 0., 0., 0., 10.,

\*\* -----

\*\*

\*\* STEP: Step-1

\*\*

\*Step, name=Step-1

\*Dynamic, Explicit

, 0.0003



\*Bulk Viscosity

0.06, 1.2

\*\* Mass Scaling: Semi-Automatic

\*\* Whole Model

\*Fixed Mass Scaling, dt=5e-08, type=below min, factor=10.

\*\*

\*\* BOUNDARY CONDITIONS

\*\*

\*\* Name: BC-1 Type: Symmetry/Antisymmetry/Encastre

\*Boundary

Set-3, ENCASTRE

\*\*

\*\* INTERACTIONS

\*\*

\*\* Interaction: Int-1

\*Contact, op=NEW

\*Contact Inclusions, ALL EXTERIOR

\*Contact Property Assignment

, , IntProp-1

\*\*

\*\* OUTPUT REQUESTS

\*\*

\*Restart, write, number interval=1, time marks=NO

\*\*

\*\* FIELD OUTPUT: F-Output-1



\*\*

\*Output, field

\*Node Output

A, RF, U, V

\*Element Output, directions=YES

EVF, LE, PE, PEEQ, PEEQVAVG, PEVAVG, S, STATUS, SVAVG

\*Contact Output

CSTRESS,

\*\*

\*\* HISTORY OUTPUT: H-Output-1

\*\*

\*Output, history, variable=PRESELECT

\*End Step

## 6.2 Anexo 2:

Tabla de iteraciones de tensión deformación para plasticidad de la plastilina ROMA N°1:

$\epsilon$	$\sigma$	$\dot{\epsilon}$
0	0	10
0,05	0,24736661	10
0,1	0,24908718	10
0,15	0,25009919	10
0,2	0,25081971	10
0,25	0,25138003	10
0,3	0,25183877	10
0,35	0,25222728	10
0,4	0,2525643	10
0,45	0,25286196	10
0,5	0,25312851	10
0,55	0,25336989	10
0,6	0,25359044	10
0,65	0,2537935	10
0,7	0,25398166	10
0,75	0,25415695	10
0,8	0,25432103	10
0,85	0,25447526	10
0,9	0,25462075	10
0,95	0,25475845	10
1	0,25488916	10

$\epsilon$	$\sigma$	$\dot{\epsilon}$
0	0	100
0,05	0,31213399	100
0,1	0,31430506	100
0,15	0,31558204	100
0,2	0,31649122	100
0,25	0,31719824	100
0,3	0,31777709	100

0,35	0,31826732	100
0,4	0,31869259	100
0,45	0,31906818	100
0,5	0,31940453	100
0,55	0,3197091	100
0,6	0,3199874	100
0,65	0,32024363	100
0,7	0,32048105	100
0,75	0,32070223	100
0,8	0,32090927	100
0,85	0,32110388	100
0,9	0,32128747	100
0,95	0,32146123	100
1	0,32162616	100

$\epsilon$	$\sigma$	$\dot{\epsilon}$
0	0	1000
0,05	0,39385927	1000
0,1	0,39659878	1000
0,15	0,39821011	1000
0,2	0,39935734	1000
0,25	0,40024947	1000
0,3	0,40097988	1000
0,35	0,40159847	1000
0,4	0,40213509	1000
0,45	0,40260901	1000
0,5	0,40303343	1000
0,55	0,40341774	1000
0,6	0,40376892	1000
0,65	0,40409223	1000
0,7	0,40439181	1000
0,75	0,40467091	1000
0,8	0,40493216	1000
0,85	0,40517772	1000
0,9	0,40540938	1000
0,95	0,40562863	1000
1	0,40583675	1000

$\epsilon$	$\sigma$	$\dot{\epsilon}$
0	0	2000
0,05	0,42242061	2000
0,1	0,42535878	2000
0,15	0,42708696	2000
0,2	0,42831738	2000
0,25	0,42927421	2000
0,3	0,43005758	2000
0,35	0,43072103	2000
0,4	0,43129656	2000
0,45	0,43180486	2000
0,5	0,43226005	2000
0,55	0,43267223	2000
0,6	0,43304887	2000
0,65	0,43339563	2000
0,7	0,43371693	2000
0,75	0,43401627	2000
0,8	0,43429647	2000
0,85	0,43455984	2000
0,9	0,4348083	2000
0,95	0,43504345	2000
1	0,43526666	2000

$\epsilon$	$\sigma$	$\dot{\epsilon}$
0	0	3000
0,05	0,44007867	3000
0,1	0,44313966	3000
0,15	0,44494008	3000
0,2	0,44622194	3000
0,25	0,44721876	3000
0,3	0,44803488	3000
0,35	0,44872606	3000
0,4	0,44932566	3000
0,45	0,4498552	3000
0,5	0,45032942	3000
0,55	0,45075883	3000

0,6	0,45115121	3000
0,65	0,45151247	3000
0,7	0,4518472	3000
0,75	0,45215905	3000
0,8	0,45245096	3000
0,85	0,45272534	3000
0,9	0,45298419	3000
0,95	0,45322917	3000
1	0,4534617	3000

$\epsilon$	$\sigma$	$\xi$
0	0	4000
0,05	0,45305312	4000
0,1	0,45620436	4000
0,15	0,45805786	4000
0,2	0,45937751	4000
0,25	0,46040372	4000
0,3	0,46124391	4000
0,35	0,46195546	4000
0,4	0,46257273	4000
0,45	0,46311789	4000
0,5	0,46360609	4000
0,55	0,46404816	4000
0,6	0,46445211	4000
0,65	0,46482402	4000
0,7	0,46516862	4000
0,75	0,46548966	4000
0,8	0,46579018	4000
0,85	0,46607265	4000
0,9	0,46633913	4000
0,95	0,46659133	4000
1	0,46683072	4000

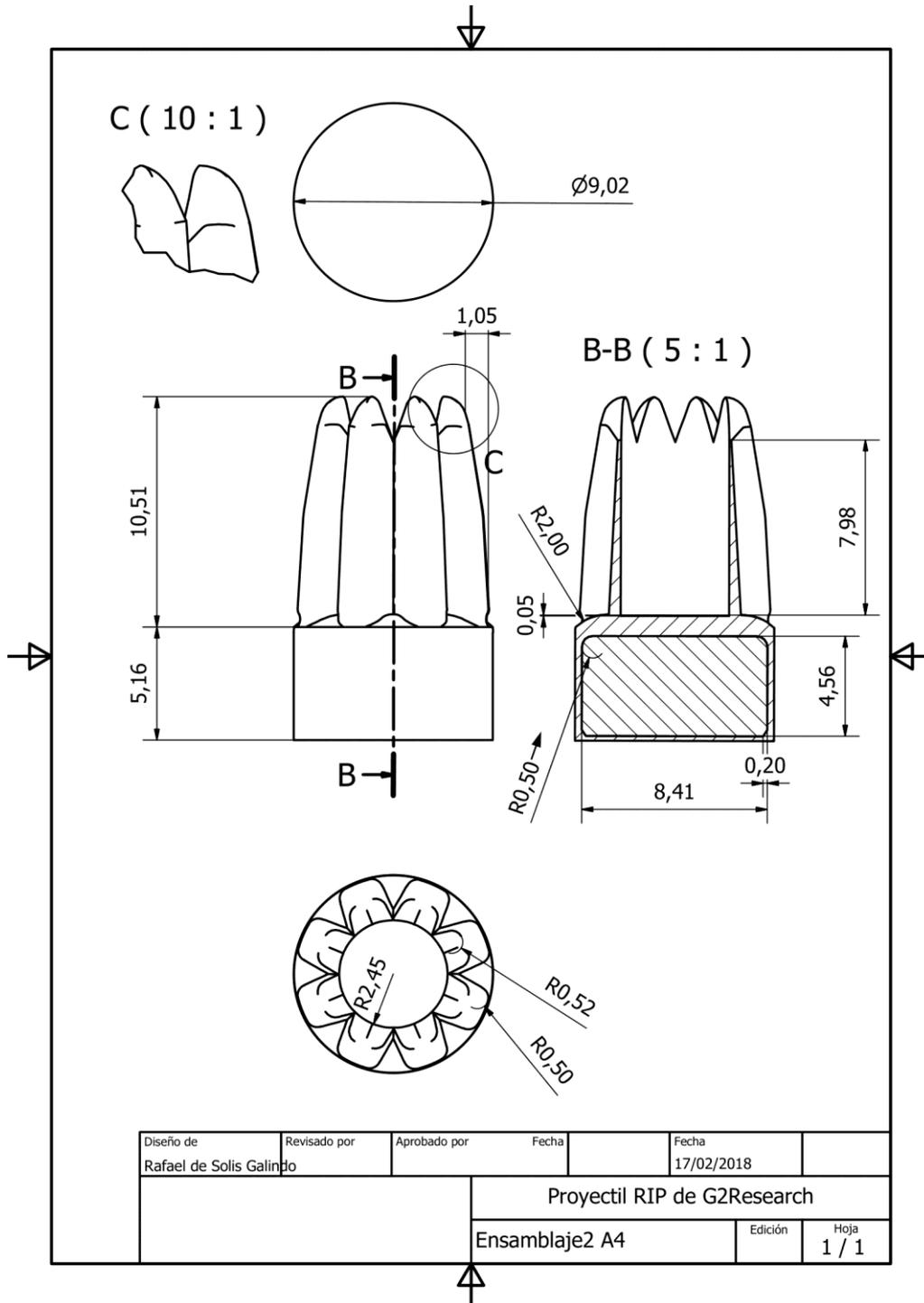
## 6.3 Anexo 3:

Tabla de los valores de tensión deformación para el gel balístico:

mm	stress	strain	rate
0	0	0	1
4,09	0,132925	0,2	1
9	0,2925	0,4	1
15,6	0,507	0,6	1
25	0,8125	0,8	1
36,4	1,183	1	1
53	1,7225	1,2	1
0	0	0	0,01
3,96	0,1287	0,2	0,01
8,47	0,275275	0,4	0,01
14,08	0,4576	0,6	0,01
20,95	0,680875	0,8	0,01
30,15	0,979875	1	0,01
42,37	1,377025	1,2	0,01
0	0	0	0,001
2,6	0,0845	0,2	0,001
5,7	0,18525	0,4	0,001
9,42	0,30615	0,6	0,001
14,29	0,464425	0,8	0,001
20,73	0,673725	1	0,001
28,97	0,941525	1,2	0,001
	Mpa		

## 6.4 Anexo 4:

Plano del modelo de proyectil R.I.P. de G2Research, modelado para simulación:





## 8. BIBLIOGRAFÍA

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- [1]: EXPANDING BULLET HISTORY (WIKIPEDIA).
- [2]: G2R'S RADICALLY INVASIVE PROJECTILE; G2RAMMO.COM.
- [3]: G2 RESEARCH'S RIP AMMO BALLISTIC TESTING, DAN ZIMMERMAN; FEB/03/2014; THETRUTHABOUTGUNS.COM.
- [4]: BRASS FETCHER BALLISTIC TESTING: FBI AMMUNITION PROTOCOL.
- [5]: AR500 ARMOR® FAQ; AR500ARMOR.COM.
- [6]: GEAR REVIEW AND STRESS TEST: AR500 ARMOR PLATE; DAVID HIGGINBOTHAM; 11/15/13.
- [7]: DYNAMIC CHARACTERIZATION OF ROMA PLASTILINA No.1 FROM DROP TEST AND INVERSEANALYSIS; C. HERNANDEZ, M.F.BUCHELY, A.MARANON.
- [8]: BALLISTIC GELLATIN (WIKIPEDIA).
- [9]: MARTIN FACKLER (WIKIPEDIA).
- [10]: TERMINAL BALLISTICS: THE WOUND CAVITY; COLIN FALLON; 18/ 2014.
- [11]: SIMULATION OF BALLISTIC IMPACTS ON ARMORED CIVIL VEHICLES; B. ADAMS; EINDHOVEN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY.
- [12]: USE OF JOHNSON–COOK PLASTICITY MODEL FOR NUMERICAL SIMULATIONS OF THE SNF SHIPPING CASK DROP TESTS; A.V. SOBOLEV , M.V. RADCHENKO B.
- [13]: CALIBRATION OF THE JOHNSON-COOK FAILURE PARAMETERS AS THE CHIP SEPARATION CRITERION IN THE MODELLING OF THE ORTHOGONAL METAL CUTTING PROCESS; KEYAN WANG, B. ENG.
- [14]: DEVELOPMENT OF NUMERICAL MODEL FOR BALLISTIC RESISTANCE EVALUATION OF COMBAT HELMET AND EXPERIMENTAL VALIDATION; M. RODRÍGUEZ-MILLÁN, T. ITOB, J.A. LOYA B, A. OLMEDOC, M.H. MIGUÉLEZ A.
- [15]: OGDEN HYPERELASTIC MODEL (WIKIPEDIA).
- [16]:FITTED HYPERELASTIC PARAMETERS FOR HUMAN BRAIN TISSUE FROM REPORTED TENSION, COMPRESSION, AND SHEAR TESTS; RICHARD MORAN, JOSHUA H.SMITH, JOSÉJ.GARCÍA.
- [17]: TENSILE DEFORMATION OF BALLISTIC GELATIN AS A FUNCTION OF LOADING RATE; PAUL MOY, TUSIT WEERASOORIYA, C. ALLAN GUNNARSSON; ARMY RESEARCH LABORATORY, WEAPONS AND MATERIALS RESEARCH DIRECTORATE.

[18]: A SPHERICAL CAVITY EXPANSION MODEL OF LARGE ELASTIC DEFORMATION AND ITS APPLICATION TO BALLISTIC GELATIN PENETRATION PROBLEMS; LI LIU, ZHEN JIA, XIAOLIN MA, YURUN FAN\*, WEI LI, HONGWEI LIU.

[19]: THE RELATIONSHIP BETWEEN MECHANICAL PROPERTIES AND BALLISTIC PENETRATION DEPTH IN A VISCOELASTIC GEL; RANDY A.MROZEKN, BRAD LEIGHLITER, CHRISTOPHER S.GOLD, IAN R.BERINGER, JIAN H.YU, MARK R.VAN LANDINGHAM, PAUL MOY, MARK H.FOSTER, JOSEPH L.LENHARTNN.

[20]: RIFLE BULLET PENETRATION INTO BALLISTIC GELATIN; YAOKE WENA, CHENG XUA, YONGXI JINB, R.C. BATRAC.