



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**  
**Facultad de Ingeniería Marítima, Ciencias Biológicas,**  
**Oceánicas y Recursos Naturales.**

**“SIMULACIÓN DE LA RESPUESTA DE PANELES  
REFORZADOS DE USO COMÚN EN LANCHAS DE PLANEÓ  
SOMETIDOS A CARGA DE IMPACTO”**

**INFORME DE PROYECTO INTEGRADOR**

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO NAVAL**

Presentado por:

**MIGUEL ÁNGEL ENGRACIA ZAMBRANO**

**GUAYAQUIL – ECUADOR**

**2017**

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por brindarme la oportunidad de respirar y pasar por la historia marcando mi propia huella, a mi madre Rocío Zambrano, quien ha sabido brindarme su apoyo incondicional en todo sentido en cada paso dado desde siempre. A mis hermanos Fabiola y Pablo, que con gran paciencia han permanecido a mi lado guiándome e inspirándome con sus logros, fuerza y consejos. Un agradecimiento especial al Ph.D José R. Marín López por su importantísima contribución, dedicación y paciencia en la cátedra de sus clases y durante el desarrollo de este proyecto. Al MSc. Alejandro Chanabá por su ayuda y colaboración a lo largo de toda mi carrera. A toda mi familia y amigos que de una u otra manera me han brindado una mano durante mis años de estudio.

## DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a mis padres Rocío Zambrano y Miguel Engracia (†), quien a pesar de no estar a mi lado, plantó siempre sentimientos de superación en mí y me enseñó el arte de crear con mis propias manos, he ahí mi amor por la ingeniería. Especialmente a mis familiares y amigos, aquellos que siempre confiaron en que llegaría este momento, a mis sobrinos quienes empiezan su vida y podrán ahora sí, plantearse una meta que cumplir.

## TRIBUNAL DE EVALUACIÓN

.....  
**José R. Marín López**

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

.....  
**Franklin J. Domínguez Ruiz**

PROFESOR EVALUADOR

## **DECLARACIÓN EXPRESA**

"La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, me corresponde exclusivamente; y doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"

---

Miguel Ángel Engracia Zambrano

## RESUMEN

Se analiza numéricamente la influencia de la configuración de refuerzos a la acción de una carga de impacto debida a un golpeador cilíndrico de acero que impacta a una velocidad de  $5.63 \text{ m/s}$  el centro de un panel estructural de aluminio A5086-H32 comúnmente usado en la construcción de embarcaciones en el medio. Los parámetros empleados en las simulaciones numéricas se basan en la experimentación desarrollada por Agila [1], cuyos resultados se comparan con los obtenidos numéricamente en este trabajo.

Para ello, inicialmente se desarrolla un método de estudio de la respuesta al impacto de una plancha plana rectangular con espesor constante simplemente soportada en sus bordes. Este método se basa en las formulaciones de S. Timoshenko para el estudio del impacto lateral sobre una viga, considerando la vibración local y general, y, la deformación en el golpeador [5]. El método se implementa en un programa ejecutable llamado PlateImpact el cual genera la superficie de la plancha deformada en el tiempo.

Seguidamente se desarrolla la simulación numérica en el sistema *Explicit Dynamics* de ANSYS v17.0. Aquí, se emplea una curva que describe la relación esfuerzo deformación más allá del punto de fluencia del material. El modelo discreto para análisis de esfuerzo local es preparado según las recomendaciones de DNV • GL. Se emplean aproximadamente 10000 elementos en la malla con dimensión de  $1 \text{ cm}$ , de los cuales un 70% son tipo *Shell 181 cuadriláteros* y el resto son *Solid 185 Tetraédricos*. El tiempo de simulación es de  $0.01 \text{ s}$ , con un intervalo de tiempo en cada ciclo de  $\Delta t = 2E-07 \text{ s}$  y aproximadamente 40000 ciclos requeridos para una solución.

En la comparación de resultados numérico versus experimental, las curvas de deformación unitaria versus tiempo en los puntos de interés en los tres especímenes de la configuración 3 reportan un comportamiento similar que las obtenidas numéricamente. En las restantes configuraciones del panel, la correlación entre especímenes experimentados no es consistente. De manera considerando el panel mencionado, se piensa que los parámetros seleccionados para desarrollar las

simulaciones numéricas son correctos y se podría en el futuro usarlos para nuevos análisis.

Los resultados numéricos muestran que la configuración con menor dimensión en el alma de sus refuerzos desarrolla un nivel de esfuerzo menor que las demás configuraciones para esta carga de impacto. En cambio esa configuración de refuerzos, por su menor rigidez, alcanza las más altas deflexiones. Analizando los máximos esfuerzos, todas las configuraciones del panel superan el punto de fluencia alcanzando hasta en promedio  $-230 \text{ MPa}$ . Estos valores se presentan en la zona de contacto con una deflexión post impacto permanente de aproximadamente  $-10 \text{ mm}$  en esta zona.

## ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	ii
DEDICATORIA .....	iii
TRIBUNAL DE EVALUACIÓN .....	iv
DECLARACIÓN EXPRESA .....	v
RESUMEN.....	vi
ÍNDICE GENERAL .....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1.....	4
<b>1. ASPECTOS GENERALES. ....</b>	<b>4</b>
<b>1.1 Estudio preliminar de la respuesta estructural al impacto.....</b>	<b>4</b>
1.1.1 Impacto lateral sobre una viga. ....	5
1.1.2 Impacto lateral sobre una plancha. ....	7
1.1.3 Aplicación del estudio preliminar de impacto. ....	9
1.1.4 Solución. ....	10
<b>1.2 Recomendaciones para el modelo estructural discretizada. ..</b>	<b>13</b>
1.2.1 Recomendaciones para el Modelo geométrico. ....	13
1.2.2 Mallado del modelo. ....	14
1.2.3 Cargas y condiciones de frontera. ....	15
1.2.4 Chequeo del modelo. ....	16
<b>1.3 Limitaciones en el análisis dinámico explícito.....</b>	<b>17</b>
1.3.1 Restricciones de tiempo. ....	19
1.3.2 Restricciones de velocidad de impacto.....	21
1.3.3 Restricciones en materiales. ....	22
1.3.4 Otras restricciones.....	22
<b>1.4 Descripción del modelo a emplear.....</b>	<b>23</b>
1.4.1 Dimensiones .....	23

1.4.2	Propiedades del material. ....	24
1.4.3	Configuración del mallado.....	26
CAPÍTULO 2.....		31
2.	DESARROLLO DE SIMULACIONES. ....	31
2.1	Características de impacto experimental. ....	32
2.1.1	Configuración de refuerzos. ....	32
2.1.2	Velocidad de impacto.....	32
2.1.3	Condiciones de frontera.....	33
2.1.4	Tiempo de duración del Impacto. ....	34
2.1.5	Posición del golpeador. ....	34
2.1.6	Puntos de interés.....	35
2.2	Resumen de resultados numéricos. ....	37
2.3	Análisis de resultados de las simulaciones numéricas.....	50
2.3.1	Tiempo de inicio de contacto.....	50
2.3.2	Valor máximo. ....	50
2.3.3	Signo del parámetro de análisis. ....	52
2.3.4	Tiempo de separación de los cuerpos. ....	53
2.3.5	Respuesta Post Impacto. ....	53
2.3.6	Comportamiento Particular.....	53
CAPÍTULO 3.....		56
3.	COMPARACIÓN DE RESULTADOS. ....	56
3.1	Comparación de resultados numéricos y experimentales. ....	56
3.2	Influencia de la configuración de refuerzos. ....	63
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	.....	67
ANEXO A	.....	70
ANEXO B	.....	74
ANEXO C	.....	80
ANEXO D	.....	88
BIBLIOGRAFÍA.....		106

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. (a) Estructura original. (b) Respuesta estática. (c) Respuesta dinámica. (Fuente, Structural Impact, N. Jones, Ref. [4]).....	5
Figura 1.2. Impacto de un cuerpo sobre una viga. ....	6
Figura 1.3: Posición del centro de gravedad de la esfera antes y después del choque.....	8
Figura 1.4: Deformación en la plancha mediante (a) PlatelImpact, (b) ANSYS. ....	11
Figura 1.5: Comparación de resultados mediante ANSYS y PlatelImpact. (a) PlatelImpact, (b) ANSYS deformación. ....	12
Figura 1.6: Ubicación del panel en la estructura de la embarcación. ....	14
Figura 1.7: Mallado de elementos Shell, (a) Error, no coinciden conexiones, (b) Correcto, coincidencia de conexiones, (c) Error, traslape de elementos, (c) Correcto, sin traslape.....	16
Figura 1.8: Proceso de solución llevado a cabo por el sistema dinámico explícito en ANSYS. Tomada de la referencia [7]. ....	18
Figura 1.9: Curva de Esfuerzo Deformación para el Aluminio Al-5086-H32 empleado en el Panel Estructural. ....	26
Figura 1.10: Modelo del panel estructural, proyecciones sobre superficies...	27
Figura 1.11: Mallado afectado por la presencia de regiones sobre las superficies. ....	28
Figura 1.12: Relación de aspecto de los elementos de malla del panel estructural y posición de elementos de mala calidad. ....	30
Figura 2.1: Configuraciones de refuerzos. ....	32
Figura 2.2: Configuración del panel. ....	34
Figura 2.3: Disposición del golpeador y el panel estructural. ....	35
Figura 2.4: Posición de los puntos de interés (metros). ....	36

Figura 2.5: Reconocimiento de zonas con concentración de esfuerzos en C2 para ubicación de puntos de interés. ....	38
Figura 2.6: Reconocimiento de zonas con máximo nivel de deformación unitaria en C2 para ubicación de puntos de interés. ....	40
Figura 2.7: Deformación unitaria plástica en la curva esfuerzo deformación del material (Fuente: Manual de ANSYS, Refe. [7]). ....	41
Figura 2.8: Deflexión en el punto A en las tres configuraciones de refuerzos. ....	43
Figura 2.9: Deflexión en Z, para puntos A, B y C, en configuración C2 y en el golpeador. ....	44
Figura 2.10: Esfuerzo normal en Y en el punto A, para las tres configuraciones de refuerzo (Cara superior de plancha).....	45
Figura 2.11: Perfil de deflexiones a lo largo de ejes X y Y, para los tiempos t1, t2 y t3.....	46
Figura 2.12: Figura 12. Esfuerzos normales en dirección Y para los puntos B y C en la configuración 2 de refuerzos, (Cara inferior de plancha).....	47
Figura 2.13: Figura 13. Deformación unitaria normal en dirección Y en función del tiempo en el punto B para C1, C2 y C3 en cara inferior de plancha. ....	48
Figura 2.14: Figura 14. Deformación plástica equivalente en función del tiempo en el punto B para C1, C2, C3 en cara inferior de la plancha. ....	49
Figura 3.1: Figura 1. Comparación experimental numérica de resultados de deformación unitaria en $e_x$ y $e_y$ . ....	58
Figura 3.2: Deformación permanente experimental y numérica en el centro del panel a lo largo del eje Y.....	61
Figura 3.3: Deformación permanente experimental y numérica en el centro del panel a lo largo del eje X.....	62
Figura 3.4: Figura 4. Esfuerzo normal en Y en función del tiempo en B, RD-X y RE-Y para C1, C2 y C3.....	64

Figura 3. 5: Deflexión en función del tiempo en A, RD-X y RE-Y para C1, C2 y C3.....65

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Datos de la plancha para el ejemplo 1. ....	10
Tabla 2. Valores de deflexión máxima obtenidos en los dos métodos de análisis. ....	13
Tabla 3. Tipo de elementos empleados en el modelo, denominaciones según diferentes motores de cálculo. ....	15
Tabla 4. Número de ciclos e incremento en tiempo según tamaño del elemento y tiempo de simulación. ....	20
Tabla 5. Evaluación de intervalos de tiempo y números de ciclos para plancha y golpeador por separado en ANSYS. ....	21
Tabla 6. Dimensiones del panel estructural. ....	24
Tabla 7. Valores empleados en construcción de curva de esfuerzo deformación del Al 5086-H32 ....	25
Tabla 8. Propiedades mecánicas del Aluminio Al-5086-H32. ....	26
Tabla 9. Propiedades mecánicas del acero de transmisión. ....	26
Tabla 10. Características del tamaño de elemento en el mallado del modelo del panel estructural. ....	29
Tabla 11. Parámetros reportados de acuerdo al punto de interés. ....	37
Tabla 12: Valores máximos registrados en cada punto de interés (números en negritas corresponden a la cara inferior de la plancha). ....	55
Tabla 13: Valores máximos de respuesta numérica y experimental para deformación unitaria en $\epsilon_x$ y $\epsilon_y$ en cara inferior de la plancha. ....	60

## INTRODUCCIÓN

La estructura de las embarcaciones planeadoras por sus altas velocidades, suele estar sometida a cargas de impacto contra la superficie del agua, cuerpos sólidos de menor tamaño, o incluso entre embarcaciones. Los daños debidos a esta carga comúnmente implican grandes desplazamientos, deformaciones, y falla del material. Ahora bien, la velocidad con que ocurre el impacto es un factor determinante para establecer los métodos adecuados para su estudio: desde una baja velocidad con efecto elástico, hasta la híper-velocidad donde el material se comporta como un fluido hidrodinámico. En una embarcación de planeo con 25 nudos de velocidad los posibles escenarios de impacto corresponden a bajas velocidades, donde bajo consideraciones especiales el ámbito lineal es aplicable, [2].

El estudio del fenómeno de impacto, en el caso del buque tiene un alto nivel de dificultad, debido a que se trata de una estructura compleja y a que se produce en un cortísimo instante de tiempo. La dinámica estructural establece ecuaciones diferenciales para este tipo de fenómeno, pero es necesario aplicar métodos numéricos para resolverlos. El método de Elementos Finitos, MEF, permite dar solución a ecuaciones diferenciales complejas que dependen del tiempo, de manera que el estudio del fenómeno de impacto es factible utilizando este método.

Debido a la complejidad que implica analizar toda la estructura del casco de una embarcación, se considera un paso intermedio, el cual corresponde a analizar una sección de la misma. Dicha sección está constituida por una lámina plana y sus refuerzos instalados ortogonalmente entre sí. Este planteamiento simplifica significativamente el desarrollo y análisis del modelo numérico con el MEF. Se podría entonces hacer énfasis en la influencia de variables como: velocidad antes del impacto, la forma o posición de las superficies de contacto, la zona de impacto, y la configuración de escantillado del panel.

Se han desarrollado muchos trabajos relacionados con el análisis de cargas por impacto sobre estructuras. Por ejemplo en la referencia clásica [3], Timoshenko plantea la solución al problema de vigas sometidas a carga de impacto axial y lateral, asumiendo que las curvas de deformación del eje central de la viga, debida a la carga estática y dinámica son similares. Las sociedades de clasificación sugieren

el empleo del MEF, para el estudio de cargas de colisión del buque, por ejemplo DNV, [5] recomienda parámetros básicos en el modelo geométrico de MEF. En la referencia [1], Agila en el 2015, realizó prácticas experimentales de carga de impacto a baja velocidad sobre un panel reforzado de la estructura de una lancha de planeo, obteniendo resultados de deformación y esfuerzos en la zona de impacto. En este trabajo se pretende realizar simulaciones numéricas de la respuesta local de paneles de estructura reforzados, sometidos a carga de impacto, con el fin de determinar la influencia de la configuración de refuerzos sobre la respuesta.

### **OBJETIVO GENERAL.**

Analizar mediante simulación numérica la respuesta local de paneles reforzados del casco de una lancha de planeo, a una carga de impacto discretizada con el método de elementos finitos.

### **OBJETIVOS ESPECIFICOS.**

- Implementar la simulación numérica de la respuesta de diferentes configuraciones de paneles reforzados, sometidos a carga de impacto empleando el MEF y siguiendo las recomendaciones de DNV • GL.
- Analizar la influencia de la configuración de refuerzos sobre la respuesta por carga de impacto de un panel.
- Comparar los resultados experimentales disponibles de paneles sometidos a impacto, con los obtenidos numéricamente.

### **HIPÓTESIS.**

La respuesta dinámica elástica de paneles reforzados debido a impacto puede ser analizado aplicando el MEF y simulaciones en tiempo.

### **BENEFICIOS.**

Las embarcaciones fluviales de planeo, debido a sus altas velocidades y a las condiciones del entorno de trabajo, típicamente son sometidas a cargas de impacto. Dependiendo de la naturaleza del impacto, estas embarcaciones resultan con deformaciones permanentes de gran magnitud en su estructura, e incluso falla del material. El número de incidentes debidos a este fenómeno puede disminuir al desarrollar una metodología que permita estimar la influencia del escantillón en la

respuesta a esta carga. A su vez el diseño de una configuración de escantillonado que pueda soportar cargas de impacto representa un ahorro económico.

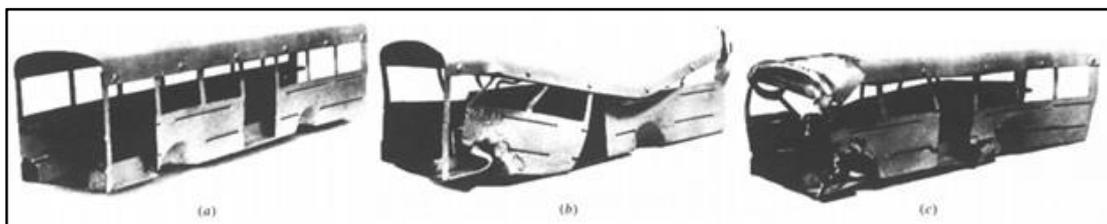
## CAPÍTULO 1

### 1. ASPECTOS GENERALES.

En esta sección se presentan varios aspectos que deben ser estudiados previo al desarrollo de las simulaciones numéricas del fenómeno de impacto. Se inicia con la implementación de un método analítico-numérico para el estudio preliminar de placas sometidas a carga de impacto lateral lineal, para determinar valores referenciales de la respuesta estructural. Luego para asegurar que los parámetros empleados en el modelo de elementos finitos son adecuados para el análisis que se desea realizar, se consideran algunas recomendaciones para el caso de análisis de esfuerzo local según la sociedad de clasificación de buques DNV•GL. Posteriormente, debido a que todo método numérico incluye limitaciones o restricciones se las presenta en base al sistema dinámico explícito que se emplea en este trabajo. Finalmente siguiendo estas recomendaciones y considerando las restricciones del sistema de análisis se establecen los modelos con los que se desarrollan las simulaciones de la respuesta estructural del panel reforzado sometido a carga de impacto.

#### 1.1 Estudio preliminar de la respuesta estructural al impacto.

El estudio general del fenómeno de impacto es de gran complejidad, ya que involucra varios aspectos como dependencia del tiempo, comportamiento plástico, disipación de energía, efectos vibratorios, entre otros. Existen métodos simples de estudio de impacto basados en el coeficiente dinámico o factor de impacto, los cuales consideran una carga estática equivalente capaz de producir la deformación dinámica. N. Jones [4] señala que los métodos estándares estáticos de análisis mediante el factor de impacto, no son adecuados para tratar muchos de los problemas estructurales dinámico-plásticos. Jones presenta imágenes de la deformación plástica de la estructura de un autobús sometida axialmente tanto a carga de impacto, como a carga estática, figura 1.1, en donde claramente se puede observar que las respuestas son muy diferentes.



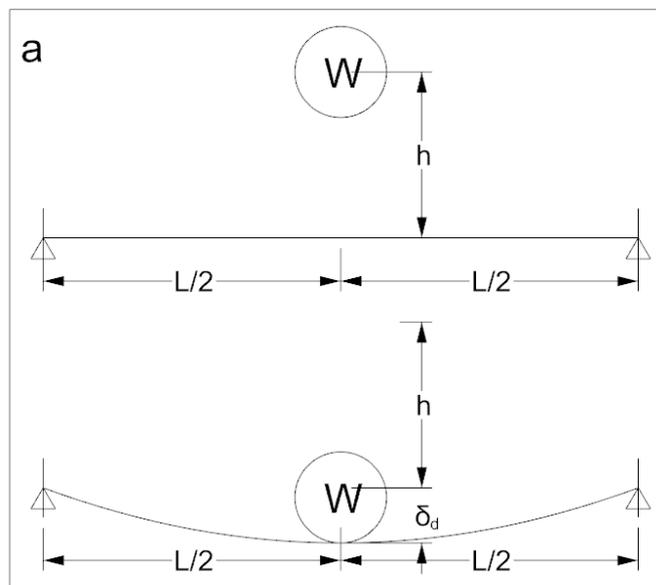
**Figura 1.1. (a) Estructura original. (b) Respuesta estática. (c) Respuesta dinámica. (Fuente, Structural Impact, N. Jones, Ref. [4])**

En el capítulo 6 de la referencia [5] Timoshenko presenta una metodología para el análisis lineal de una viga sometida al impacto de un cuerpo que cae desde una altura  $h$ . Él obtiene expresiones con diferentes niveles de complejidad para la deflexión de la viga. Inicialmente considera una viga con masa despreciable. Luego incluye la masa efectiva de la viga que interactúa con la esfera durante el fenómeno; este porcentaje de masa es obtenido con el método de Rayleigh. Finalmente, Timoshenko considera la deformación del cuerpo y los efectos vibratorios en la viga para obtener la deflexión en una ecuación diferencial integral que requiere de integración en tiempo. Este último método involucra más fenómenos físicos de respuesta, pero aún dentro del ámbito elástico.

### 1.1.1 Impacto lateral sobre una viga.

El impacto de un cuerpo sobre una viga puede analizarse si se considera que la energía potencial del cuerpo se transforma en energía de deformación de la viga. La energía potencial considera la altura  $h$  desde donde cae el cuerpo y la deflexión dinámica de la viga  $\delta_d$ , como se muestra en la figura 1.2. La energía de deformación de la viga producida por una carga estática equivalente se determina a partir de las ecuaciones de Mecánica de Sólidos. En cambio para el impacto sobre una viga cuya masa no es despreciable, es necesario determinar qué proporción de su masa está interactuando con el impactador. Durante el impacto los puntos a lo largo de la viga experimentan velocidades diferentes entre sí: aquellos que se encuentran en los extremos no se mueven, mientras que los puntos en su centro tienen la misma velocidad que el cuerpo golpeador. Timoshenko aplica el método de Rayleigh para

determinar el factor de masa efectiva de la viga que tiene la misma velocidad del cuerpo golpeador.



**Figura 1.2. Impacto de un cuerpo sobre una viga.**

$$\delta_d = \frac{WL^3}{48EI} + \sqrt{\frac{WL^3}{48EI}^2 + 2h \frac{WL^3}{48EI} \frac{1}{1 + \frac{17}{35} \frac{W_1}{W}}} \quad (1.1)$$

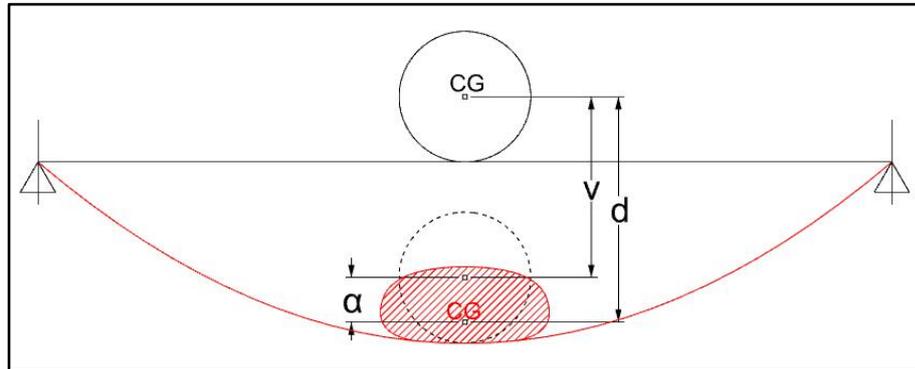
La ecuación (1.1) para la deformación dinámica de una viga simplemente soportada sometida a impacto por un cuerpo que cae desde una altura  $h$  fue tomada de la referencia [5], donde  $W$ , es el peso del cuerpo que cae,  $\frac{17}{35}W_1$ , peso equivalente de la viga,  $h$ , altura desde donde se deja caer el cuerpo,  $E$ ,  $I$  y  $L$ , son módulo de Young, inercia de la sección y longitud de viga respectivamente. La deformación estática equivalente para el caso simplemente soportado es  $\delta_s = WL^3 / 48EI$ , al reemplazar en la ec. (1.1) se obtiene una relación entre deformación estática equivalente y la deformación dinámica. Algunos autores para presentar resultados del fenómeno de impacto definen esta relación cómo el factor de impacto, ecuación (1.2).

$$\varphi = 1 + \sqrt{1 + \frac{2h}{\delta_s} \frac{1}{1 + \frac{17}{35} w_1}} \quad (1.2)$$

En la referencia [5], pag. 394, Timoshenko añade complejidad al problema anterior al incluir los efectos de deformación en el cuerpo golpeador y la vibración lateral de la viga. Para ello, él considera que durante el impacto se desarrolla una fuerza de contacto entre ambos cuerpos, dependiente del tiempo, que causa deformación del golpeador y también deflexión de la viga. Esta fuerza de contacto crea una aceleración que reduce la velocidad del golpeador, en la ecuación del movimiento del golpeador durante el impacto en función de la fuerza  $P$ . La deflexión de la viga debida a la fuerza  $P$  puede obtenerse a partir de la ecuación de Lagrange en función de la energía potencial de deformación y la energía cinética de la viga. La deformación del golpeador  $\alpha$  que también depende de  $P$ , se determina a partir de la formulación para fuerzas de contacto de Hertz [8]. En este trabajo se ha implementado el método anterior para el caso de una plancha rectangular de espesor constante sometida a impacto en su centro por un cuerpo que cae.

### 1.1.2 Impacto lateral sobre una plancha.

Aplicando el trabajo realizado por Timoshenko en [5], se establece la relación, ecuación (1.3) entre deformación  $\alpha$ , desplazamiento  $d$  del centro de gravedad del golpeador y deflexión  $v$  de la plancha, véase figura 1.3.



**Figura 1.3: Posición del centro de gravedad de la esfera antes y después del choque.**

Donde el desplazamiento del centro de gravedad de la masa golpeadora se calcula a partir de una ecuación integral de movimiento que incluye la fuerza variante en el tiempo  $P$ , ya que esta fuerza causa una aceleración que detiene al golpeador durante el impacto,

$$d = v_0 t - \int_0^t \frac{\partial t_1}{m} \int_0^{t_1} P \partial t .$$

$$d = \alpha + v \quad (1.3)$$

Por otra parte, Timoshenko toma la expresión de Hertz que establece una relación entre la fuerza de contacto  $P$  y la deformación del golpeador  $\alpha$  (1.4), ecuación (1.4), en donde  $k$  es una constante que depende de las propiedades mecánicas de los dos cuerpos y la geometría del golpeador ( véase el anexo A).

$$\alpha = kP^{2/3} \quad (1.4)$$

Para incorporar la teoría de planchas a este método se emplea la ecuación (1.5), la cual describe la deflexión  $v$  de la plancha e incluye dependencia en el plano, y tiempo. La variable  $q_{mn}(t)$  es una coordenada generalizada que varía en el tiempo.

$$v(x,y,t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} q_{mn}(t) \text{sen} \frac{m\pi x}{a} \text{cos} \frac{n\pi y}{b} \quad (1.5)$$

A su vez, una forma de obtener esta deflexión  $v$  consiste en integrar la ecuación de Lagrange para una plancha, ecuación (1.6), constituida por las expresiones para energía potencial de deformación y energía cinética de la plancha. Incluyendo la fuerza perturbadora  $Q_m$  del lado derecho de la expresión, la ecuación para cada coordenada generalizada es:

$$\frac{\gamma h}{g} \ddot{q}_m + \pi^4 D q_m (m^2 / a^2 + n^2 / b^2)^2 = \frac{Q_m}{ab} \quad (1.6)$$

Donde  $D$ , es la rigidez flexural de la plancha,  $\gamma$  es el peso específico,  $a$  y  $b$  son las dimensiones de la plancha,  $q_m$  es la coordenada generalizada de perturbación y  $Q_m$  es la fuerza perturbadora correspondiente.

Finalmente, empleando el método de integración en tiempo Runge Kutta de cuarto orden se implementa un algoritmo "PlatImpact" que integra en tiempo la solución del problema. En donde, la velocidad del golpeador se integra para obtener el desplazamiento  $d$ . La deflexión de la viga se obtiene integrando la ecuación (1.6). La fuerza de contacto se calcula evaluando la diferencia entre  $d$  y  $v$ , y aplicando la relación (1.3). De esta forma se puede obtener  $P$  para el siguiente paso. Determinando gráficamente cómo reaccionan ambos cuerpos durante y después del impacto, es posible visualizar la deformación de la plancha. Todo este proceso de cálculo se detalla en el anexo B.

### 1.1.3 Aplicación del estudio preliminar de impacto.

Para obtener valores referenciales en las simulaciones numéricas de la respuesta al impacto de un panel estructural reforzado, se aplica el método desarrollado anteriormente para el impacto lateral sobre plancha en el ejemplo 1. Se considera la plancha central del panel reforzado, sin refuerzos y su condición de borde se define como simplemente soportada. Además, para una evaluación de resultados, se desarrolla una simulación numérica en ANSYS que resuelva el mismo problema del ejemplo 1 para la plancha central. Las características de este análisis

son similares a las que se emplearán posteriormente en las simulaciones numéricas del panel estructural reforzado.

**Ejemplo 1.** Se determina la deflexión de una plancha rectangular fina debida a la acción de una carga de impacto en su centro, provocada por una esfera que se deja caer desde una altura  $h$ . La plancha se encuentra simplemente soportada en sus cuatro bordes. Siguiendo el método de Timoshenko, se considera la deformación de la esfera y la vibración lateral de la plancha.

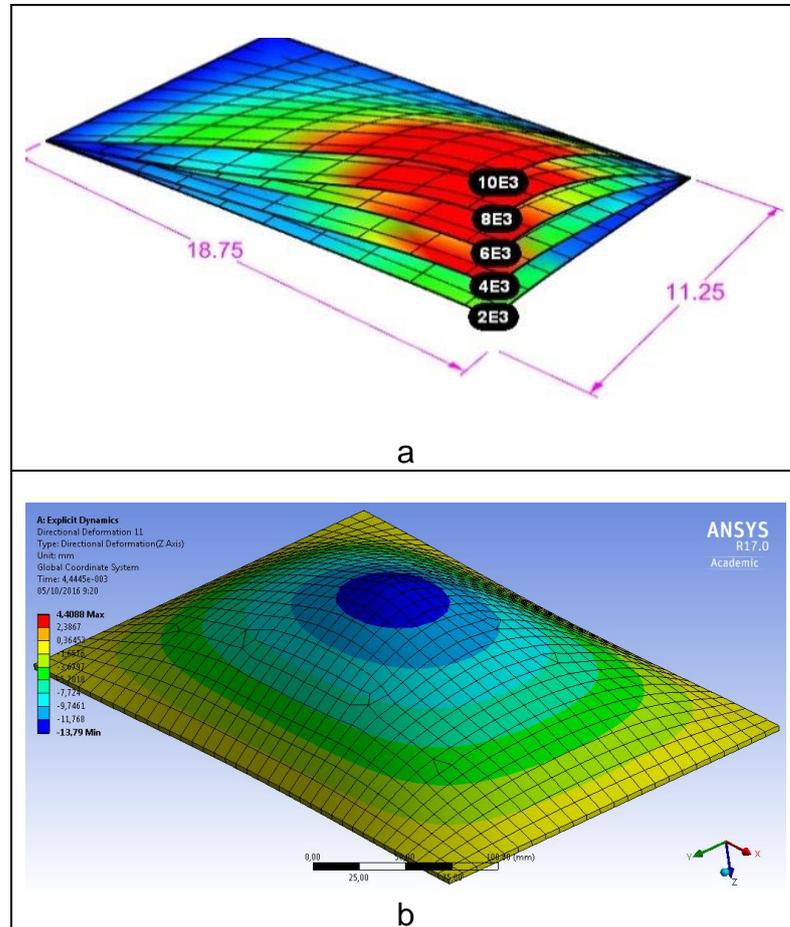
<b>Datos de la plancha y la esfera</b>			
$a$	37.5	cm	Dimensión longitudinal
$b$	22.5	cm	Dimensión transversal
$r$	4.393	cm	Radio de esfera
$t$	0.3	cm	Espesor
$\rho_1$	0.00267	$\frac{Kg}{cm^3}$	Densidad de la plancha
$\rho_2$	0.00811	$\frac{Kg}{cm^3}$	Densidad de esfera
$E_1$	7.18E6	$\frac{N}{cm^2}$	Módulo de Young de la plancha
$E_2$	20E6	$\frac{N}{cm^2}$	Módulo de Young de esfera
$\nu_1$	0.330	-----	Coef. Poisson de la plancha
$\nu_2$	0.292	-----	Coef. Poisson de esfera
$W$	4.320	Kg	Peso de esfera
$k$	1.54E-5	$\frac{cm}{N^{2/3}}$	Constante de deformación de la esfera
$v_0$	563.0	cm/s	Velocidad antes del impacto

**Tabla 1. Datos de la plancha para el ejemplo 1.**

#### 1.1.4 Solución.

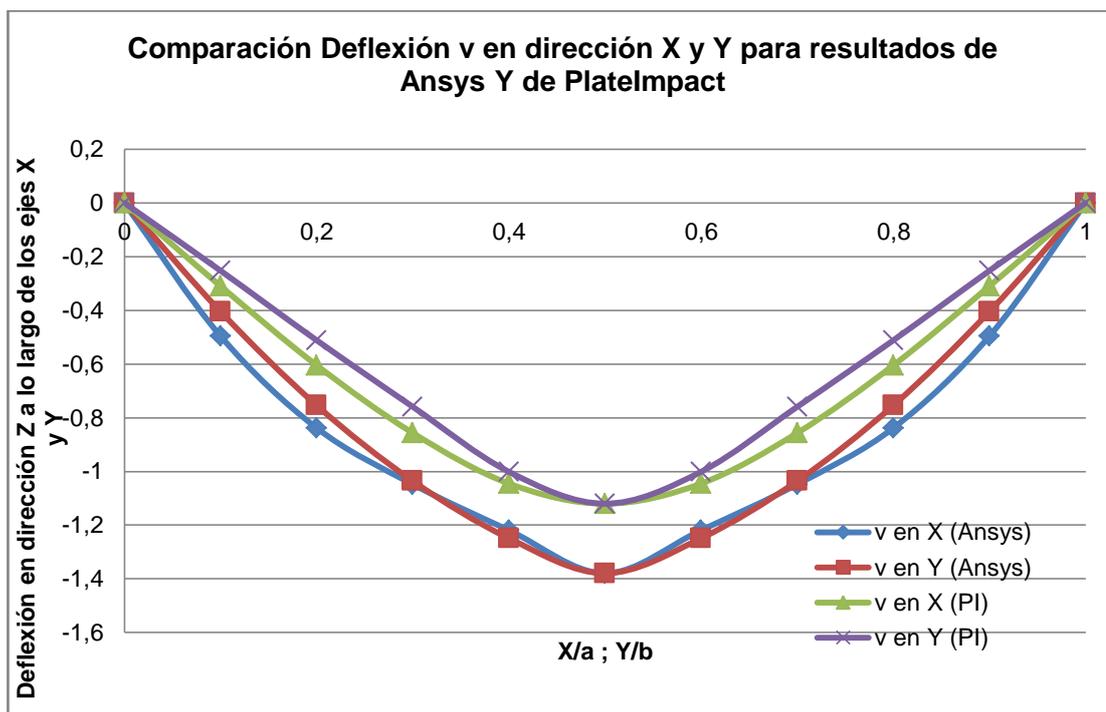
El método de impacto lateral sobre plancha desarrollado se ejecuta con el programa PlatelImpact, el cual genera un archivo de resultados con los valores de hasta 10000 pasos de integración. A continuación se han graficado los resultados para los siguientes intervalos: 2E3, 4E3, 6E3, 8E3 y 10E3. Este archivo de resultados se importa al software

Rhinoceros y se grafica la superficie de la plancha en 3D, ver figura 1.4 (a).



**Figura 1.4: Deformación en la plancha mediante (a) PlatImpact, (b) ANSYS.**

Para efectos de comparación, empleando el programa ANSYS se desarrolla la simulación numérica con los datos de la tabla 1 aplicando el sistema dinámico explícito y los resultados se muestran en la figura 1.4 (b). Se especifican puntos a lo largo de los ejes X y Y del centro de la plancha para obtener un perfil de las deflexiones máximas en estas direcciones que se muestran a continuación.



**Figura 1.5: Comparación de resultados mediante ANSYS y PlatelImpact. (a) PlatelImpact, (b) ANSYS deformación.**

La figura 1.5 resume los resultados obtenidos mediante los métodos mencionados; se presentan las curvas de deflexión a lo largo de los ejes X y Y, que pasan por el centro de la plancha. La deflexión a lo largo del eje Y tiene el mismo comportamiento con ambos métodos. Sin embargo, se puede observar que el perfil de deflexión producido por ANSYS en el eje X cerca de los bordes de la plancha es mayor que en la dirección Y, también en el centro adopta la forma del cuerpo golpeador. Esto se debe a que la fuerza perturbadora en dicho método es puntual. Los valores obtenidos para las deflexiones máximas se muestran en la tabla 2.

Resumen de resultados		
Pasos	PlateImpact [cm]	ANSYS [cm]
10000	-1.12	-1.34
8000	-0.8902	
6000	-0.6700	
4000	-0.4400	
2000	-0.2200	

**Tabla 2. Valores de deflexión máxima obtenidos en los dos métodos de análisis.**

El programa `PlateImpact` también genera curvas de respuesta para las variables de desplazamiento de la esfera, deflexión de la viga, deformación de la esfera y fuerza de contacto  $P$ . Esta fuerza se asume concentrada en el punto de contacto, lo que genera valores altos. Al superponer dichas curvas se observa vibración local de la plancha en cortos instantes de tiempo. En el anexo B se presentan en detalle estas curvas de resultado

## 1.2 Recomendaciones para el modelo estructural discretizada.

Para lograr una discretización estructural eficiente en precisión y tiempo de ejecución se debe considerar las recomendaciones de alguna sociedad de clasificación de buques. En la referencia [6], Det Norske Veritas, presenta una guía para el desarrollo del modelo geométrico para el análisis estructural de un buque aplicando el método de elementos finitos. Existen tres niveles de análisis: *Global* de la viga buque, *Parcial* (generalmente por bloques), y, de esfuerzo *Local* (se consideran zonas específicas de la estructura de la nave). El estudio de la respuesta de un panel reforzado sometido a impacto corresponde a esfuerzo local. En la sección 4 de la referencia [6], se presentan los requerimientos básicos para la realización del modelo en este nivel de análisis.

### 1.2.1 Recomendaciones para el Modelo geométrico.

En el modelo geométrico desarrollado por separado (independiente), la acción del impacto no debe involucrar los bordes del mismo. Estos bordes coinciden con miembros de soporte primario, fondo, longitudinales y transversales. En la figura 1.6 se observa la posición del

panel en la estructura de la nave analizado en este trabajo, que coincide con refuerzos. Por otra parte, según [6] las figuras geométricas empleadas para la construcción del modelo por separado deben ser preferiblemente superficies con espesor virtual, con propiedades de flexión y de membrana. No es necesario incluir las desalineaciones estructurales y geometrías de soldaduras en el modelo, pero si deben existir refuerzos en al menos dos extremos de toda plancha modelada a partir de superficie.



**Figura 1.6: Ubicación del panel en la estructura de la embarcación.**

### **1.2.2 Mallado del modelo.**

La configuración del mallado para el análisis de la respuesta del panel estructural a carga de impacto determina el tiempo total de simulación y la veracidad de los resultados obtenidos. DNV•GL indica que una malla fina, uniforme y con elementos cuadriláteros debe ser usada en aquellas áreas donde se localizan altos esfuerzos. La extensión de esta malla debe ser mayor o igual a 10 elementos en todas las direcciones alrededor de la zona de interés. La transición entre las zonas de malla

fina y estándar debe realizarse lentamente; este parámetro se especifica en ANSYS con los controles de malla del software. El tamaño de los elementos en la zona de malla fina para el análisis de esfuerzo local no debe exceder los  $50 \times 50 \text{ mm}^2$ . Además [6] recomienda que todos los cuerpos que estén a menos de  $500 \text{ mm}$  alrededor de la zona de interés deban ser modelados en detalle con superficies de espesor virtual, los cuerpos fuera de esta zona pueden ser modelados empleando elementos viga. Los elementos planos deben ser cuadriláteros en su mayoría (evitando formas triangulares), y con razón de aspecto menor a 3. La tabla 3 contiene los tipos de elementos empleados en la malla y la denominación según diferentes motores de cálculo.

<b>Elemento Genérico</b>	<b>Mechanical APDL Nombre</b>	<b>NASTRAN Nombre</b>	<b>ABAQUS Nombre</b>	<b>STL Nombre</b>
<b>Lineal tetraédrico</b>	Solid185	CTETRA	C3D4	N/A
<b>Lineal cuadrilátero</b>	Shell181	CQUAD4	S4	N/A

**Tabla 3. Tipo de elementos empleados en el modelo, denominaciones según diferentes motores de cálculo.**

### **1.2.3 Cargas y condiciones de frontera.**

La referencia mencionada establece que cualquier tipo de carga es aplicable al modelo del panel estructural. Si se requiere un análisis estructural mediante simulación numérica de la respuesta de un panel estructural del casco de una embarcación de planeo a la acción simultánea de carga de impacto y a la presión hidrodinámica de la superficie del agua, se debe emplear el análisis de esfuerzo local por separado con el panel estructural para analizar el impacto prescribiendo las condiciones de frontera en su contorno debidas a la respuesta del casco a la presión hidrodinámica. En este trabajo solo se contempla la acción de impacto, el análisis global que involucra la acción de carga

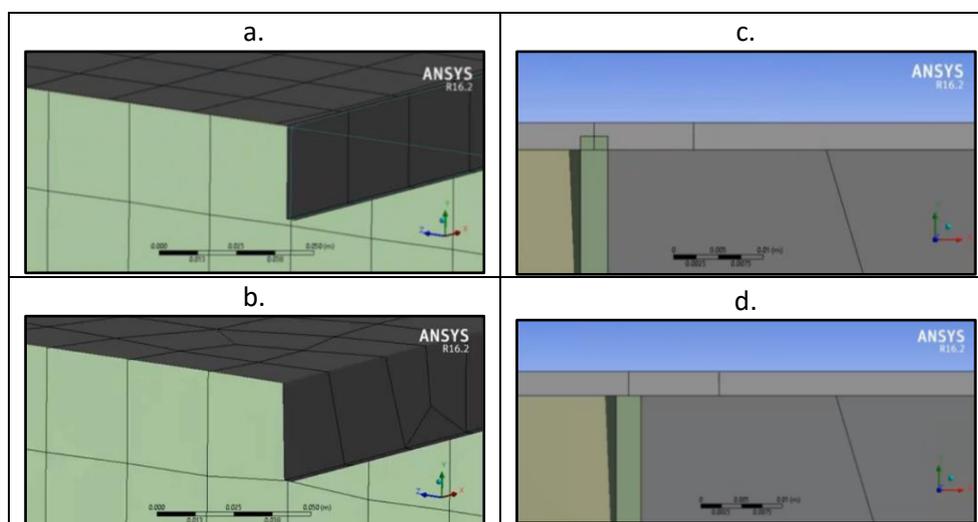
hidrodinámica sobre el casco de la nave podrá ser analizado en trabajos posteriores.

#### 1.2.4 Chequeo del modelo.

En el subcapítulo 1.9 de la sección 1 en [6], DNV•GL lista los principales errores en el modelo que por lo general se presentan durante su desarrollo. Estos son:

- Nodos fijos (son nodos con grados de libertad erróneos)
- Nodos sin rigidez (están dentro del elemento, pero sin propiedades)
- Nodos intermedios (que no están conectados al eje del elemento)
- Vigas que cruzan planchas ( traslape de cuerpos geométricos)
- Elementos sin conexión ( intersección de elementos sin conexión)
- Elementos dobles (Usualmente ocurre al importar geometrías)
- Relación de aspecto de elementos mayor a 3
- Condiciones de contorno mal establecidas

En la figura 1.7 (a-d), se muestran algunos de estos errores y su correspondiente corrección.



**Figura 1.7: Mallado de elementos Shell, (a) Error, no coinciden conexiones, (b) Correcto, coincidencia de conexiones, (c) Error, traslape de elementos, (d) Correcto, sin traslape.**

### 1.3 Limitaciones en el análisis dinámico explícito.

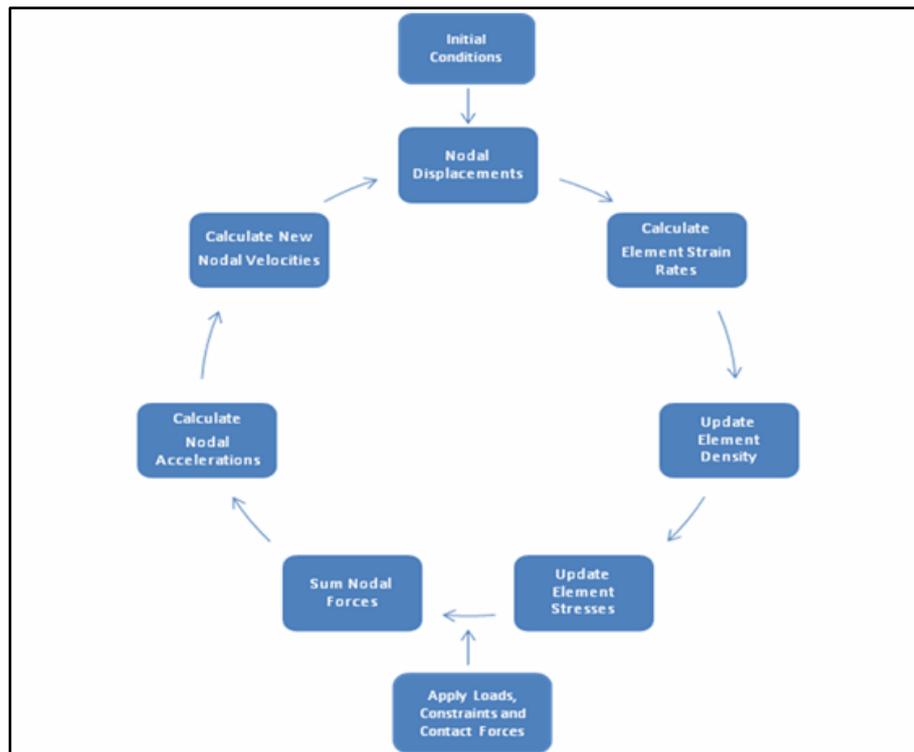
El análisis dinámico comprende el estudio de la variación de fuerzas, desplazamientos, velocidades y aceleraciones que aparecen en una estructura o mecanismo como resultado de una alteración de su estado inicial dinámico, producido generalmente por una carga externa que actúa en un determinado instante de tiempo. El método de elementos finitos se emplea para llevar a cabo este análisis. Debido a la cantidad de vectores que se generan existen alternativas para encontrar una solución aproximada mediante integración numérica basada en diferencias finitas. Se tiene entonces los métodos implícitos y explícito para resolver el análisis dinámico.

En este trabajo, se emplea el sistema de análisis dinámico explícito de ANSYS-Workbench V17.0, que desarrolla el siguiente proceso en cada ciclo, [7].

- El movimiento de los nodos perturbados inicialmente produce deformación en los elementos de la malla.
- La deformación resulta en un cambio de volumen de los elementos siguientes en cada paso.
- Los rangos de deformación se emplean para obtener los esfuerzos resultantes del material mediante leyes constitutivas.
- Estos esfuerzos son transformados nuevamente en fuerzas internas en los nodos a partir de formulación de elementos.
- Las fuerzas nodales externas son computadas desde las condiciones de frontera, cargas y contactos.
- Las fuerzas nodales son divididas entre la masa nodal y producen aceleraciones nodales.
- Las aceleraciones son integradas explícitamente en el tiempo para producir nuevas velocidades nodales.
- Las velocidades nodales son integradas explícitamente en el tiempo para producir nuevas posiciones nodales.

- Este proceso de solución (ciclo) es repetido hasta completar el tiempo definido por el usuario.

El diagrama de flujo mostrado en la figura 1.8 se tomó de la referencia [7], en este se presenta el proceso de solución que ANSYS Workbench lleva a cabo en el sistema dinámico explícito.



**Figura 1.8: Proceso de solución llevado a cabo por el sistema dinámico explícito en ANSYS. Tomada de la referencia [7].**

Ya que este método no encuentra una solución no trivial de las ecuaciones de equilibrio en cada ciclo, es necesario introducir previo al análisis, el tiempo total de simulación. Los intervalos de tiempo de cada ciclo de análisis deben ser menor que el valor  $\Delta t \leq \min_k \frac{2}{\omega_k}$ , donde  $\omega_k$  es la velocidad del sonido a través de un elemento del material que se emplea en el modelo.

El análisis explícito se puede emplear para estudiar el comportamiento no lineal dinámico de fenómenos que dependen del tiempo. Donde la respuesta plástica

puede ser por contacto, choques, explosión, por propiedades del material en caso de hiper-elasticidad, flujo plástico y falla, o por gran deformación en la geometría como en pandeo o ruptura. Debido a la variedad y complejidad de los fenómenos que pueden ser estudiados en este sistema de análisis, existen algunas restricciones que deben ser abordadas previos al desarrollo del modelo y la definición de las características del análisis.

### 1.3.1 Restricciones de tiempo.

En la referencia [7], se establece claramente que este sistema de análisis puede dar solución a fenómenos que ocurren en cortos instantes de tiempo, en el orden de milisegundos o menos. Eventos con una duración de más de 1 segundo pueden ser modelados, sin embargo, se espera un consumo considerable de tiempo de ejecución para encontrar la solución. En estos casos es necesario aplicar técnicas como escala de masa y relajación dinámica para hacer eficiente el proceso de solución.

El incremento en tiempo se calcula empleando la metodología de Courant-Friedrichs-Lewy [7], en donde la perturbación no puede viajar más allá de la dimensión característica del elemento más pequeño contenido en la malla en un solo incremento de tiempo  $\Delta t \leq f * [h/c]_{min}$ , donde  $h$  es la dimensión característica del elemento más pequeño en la malla, para elementos Shell cuadriláteros,  $h = \sqrt{\text{área del elemento}}$ , para elementos tetraédricos  $h =$  mínima distancia entre un nodo y la cara opuesta del elemento que contiene dicho nodo.  $c$  es la velocidad del sonido en el material local del cuerpo analizado,  $f=0.9$  el factor de estabilidad del incremento de tiempo. De manera que el tiempo o número de ciclos que emplea el programa para realizar la simulación depende de este  $\Delta t$ , del tiempo de simulación y del tamaño de los elementos de malla.

La tabla 4 muestra que la cantidad de ciclos es directamente proporcional al tiempo de simulación e inversamente proporcional al tamaño de elementos de malla. Por ello se recomienda analizar eventos

con un tiempo de simulación de 1 segundo como máximo. Los valores mostrados en la tabla corresponden a elementos Shell de Aluminio con una velocidad de sonido de 5100 m/s, con 1-5 cm en sus aristas y tiempos de simulación entre 0.001 a 1 s, obsérvese que para un tiempo de simulación de 0.01 s con una malla de 1 cm de tamaño se deben desarrollar 5667 ciclos. El tiempo total de computación necesario para llevar a cabo este proceso de solución depende de las capacidades del hardware empleado.

<b>Determinación del intervalo de tiempo y número de ciclos para diferentes tamaños de elemento de malla y tiempos de simulación.</b>						
Velocidad del sonido en el Aluminio. [m/s]						5100
Tiempo de simulación. t[s]			0.001	0.01	0.1	1
L [m]	h [m]	$\Delta t$	Ciclos requeridos			
0.01	0.01	1.8E-06	567	5667	56667	566667
0.02	0.02	3.5E-06	283	2833	28333	283333
0.03	0.03	5.3E-06	189	1889	18889	188889
0.04	0.04	7.1E-06	142	1417	14167	141667
0.05	0.05	8.8E-06	113	1133	11333	113333

**Tabla 4. Número de ciclos e incremento en tiempo según tamaño del elemento y tiempo de simulación.**

En el presente trabajo se emplean elementos Shell para el panel y elementos Solid para el cuerpo golpeador. Realizando un análisis rápido para una plancha y luego para el cuerpo sólido en el sistema de análisis explícito dinámico de ANSYS se obtiene lo siguiente.

<b>Evaluación de intervalo de tiempo y número de ciclos, con tamaño de elemento de 1 cm y tiempo de simulación de 0.01s</b>			
Cuerpo	Plancha		Golpeador
Tipo de elemento	Shell		Solid
Forma del elemento	Cuadri.	Trian.	Tetra.
$\Delta t$	1.34E-06	9.41E-07	2.23E-07
Ciclos	7425	10080	44789

**Tabla 5. Evaluación de intervalos de tiempo y números de ciclos para plancha y golpeador por separado en ANSYS.**

La tabla 5 presenta el número de ciclos e intervalos de tiempo que emplea el sistema dinámico explícito de ANSYS al analizar una plancha y un cuerpo sólido por separado. Ambos cuerpos con tamaños de elemento de  $1\text{ cm}$  y un tiempo máximo de simulación de  $0.01\text{ s}$ . Para la plancha se tienen elementos cuadriláteros y elementos triangulares, mientras que para el sólido solo se emplea el elemento tetraédrico. Obsérvese que los valores para el elemento Shell cuadrilátero en la tabla 5 coinciden en orden con los correspondientes teóricos mostrados en la tabla 4. Sin embargo, la presencia de elementos sólidos en el modelo puede afectar el intervalo de tiempo resultante. Es decir que el programa toma automáticamente el valor mínimo durante la solución, siendo en este caso  $\Delta t = 2E-07\text{ s}$  con un número de ciclos en el orden de  $40000$ , siempre que se mantenga el tamaño del elemento en  $1\text{ cm}$  y la duración de la simulación en  $0.01\text{ s}$ .

### 1.3.2 Restricciones de velocidad de impacto.

En [7] también se establecen los límites de velocidad que pueden ser empleados en un análisis de impacto. El rango aplicable comprende desde  $1 \text{ m/s}$  hasta  $5000 \text{ m/s}$ . En este trabajo la velocidad de impacto entre el cuerpo golpeador y el panel estructural es de  $5.63 \text{ m/s}$ , de manera que dicho parámetro está dentro del rango posible de análisis del programa.

### **1.3.3 Restricciones en materiales.**

Todos los tipos de materiales lineales y no lineales son soportados en el análisis dinámico explícito de ANSYS. No es posible agregar dependencia del cambio de temperatura para la densidad, solo un único valor puede ser usado. En el caso de propiedad plástica multilínea de comportamiento isotrópico, la curva de esfuerzo deformación se construye a partir de 10 pares ordenados como máximo ingresados por el usuario. El primer par ordenado debe ser el punto de fluencia, ya que por definición el primer punto es el origen del sistema de coordenadas. Luego del último par ordenado ingresado, se asume una pendiente igual a 0 en la curva. En el siguiente subcapítulo se presentan las propiedades asignadas al panel estructural, la cual corresponde a una curva multilínea.

### **1.3.4 Otras restricciones.**

- El módulo de análisis dinámico explícito solo soporta el sistema de unidades de  $mm$ ,  $ms$ ,  $mg$ , etc. en su solución. El uso de otros sistemas puede producir errores al entregar la solución.
- Los sistemas de coordenadas cilíndricas asignadas a cuerpos no son soportados, a menos que se usen para definir desplazamiento rotacional o restricción de velocidad.
- La sección de elementos lineales debe ser simétrica. El uso de secciones anti simétricas en elementos viga genera errores durante la solución.

- El “thickness mode” y el “offset type” no son soportados en el sistema dinámico explícito, es decir que en elementos Shell, el espesor siempre debe posicionarse centrado con respecto al eje del elemento.
- Las conexiones y la interacción entre los cuerpos se crean automáticamente durante la simulación, sin embargo, es necesario realizar un chequeo de las conexiones entre elementos previo al inicio de la solución.

#### 1.4 Descripción del modelo a emplear.

En esta sección se presenta el modelo estructural, sus propiedades y las características del análisis que se emplean en las simulaciones numéricas en el siguiente capítulo. Para ello, han sido consideradas todas las recomendaciones dadas por DNV • GL, y las limitaciones del sistema dinámico explícito.

##### 1.4.1 Dimensiones

El panel estructural se compone de una plancha metálica rectangular con espesor constante de  $3\text{ mm}$ , con refuerzos ortogonales entre sí, dos longitudinales y dos transversales. Para el análisis se emplean tres configuraciones de refuerzos en el panel estructural, la altura de las almas es la única dimensión que varía en cada configuración. La tabla 6 muestra las dimensiones del panel y las configuraciones de los refuerzos.

<b>Dimensiones del Panel Estructural</b>			
$L$	1.025	Dimensión longitudinal de la plancha	
$W$	0.665	Dimensión transversal de la plancha	
$t$	0.003	Espesor de la plancha	
$L_r$	0.375	Espaciamiento central longitudinal de refuerzos	
$T_r$	0.225	Espaciamiento central transversal de refuerzos	
<b>Configuración de Refuerzos</b>			
	C1	C2	C3

<i>h1</i>	0.066	0.071	0.076
<i>h2</i>	0.031	0.037	0.041
Dimensiones en metros			

**Tabla 6. Dimensiones del panel estructural.**

Por otra parte, se debe especificar las dimensiones del cuerpo golpeador, el cual tiene forma cilíndrica con diámetro de *7.65 cm*, altura de *12.06 cm*, y peso de *4.32 Kg*.

#### 1.4.2 Propiedades del material.

La respuesta estructural al impacto, típicamente involucra comportamiento plástico y falla del material. La biblioteca de ANSYS posee materiales estándar con propiedades no lineales, y permite crear nuevos materiales con propiedades específicas según el fenómeno que se desee estudiar. En este trabajo se crea un nuevo material para el panel estructural cuyas propiedades permiten obtener un comportamiento multilíneal.

El aluminio Al-5086-H32 de construcción naval comúnmente usado en el medio marítimo en Ecuador, es el material del panel estructural. La curva de esfuerzo deformación del aluminio en general no presenta claramente un punto de fluencia. Por ello esta curva se la prepara aplicando la formulación de Ramberg y Osgood detallado en la referencia [9], ec. (1.7). Esta formulación emplea valores arbitrarios de esfuerzo de fluencia y deformación plástica, los cuales se obtienen a partir del método de desplazamiento.

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} + \frac{3}{7} \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad (1.7)$$

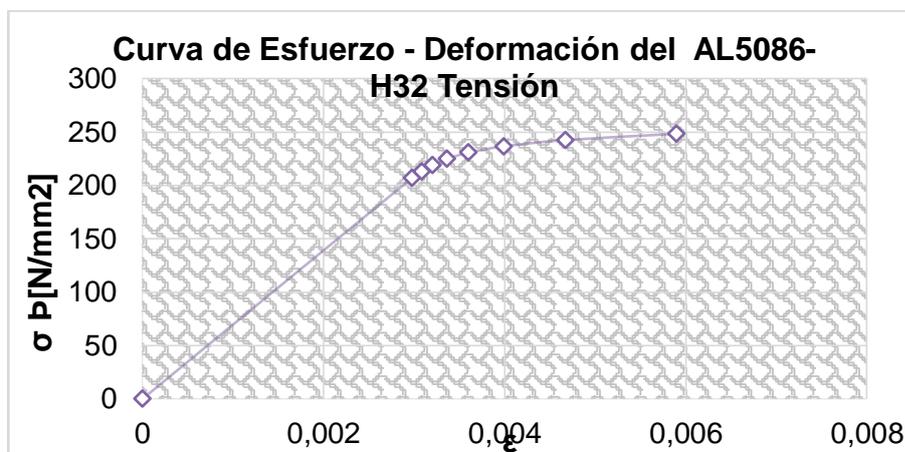
Para el material analizado, el exponente de curvatura  $n$  vale 28, la deformación plástica arbitraria,  $\varepsilon_0 = 0.0035$ , y el esfuerzo de fluencia

arbitrario,  $\sigma_0 = 250 \text{ N/mm}^2$ . Los valores obtenidos a partir de la ecuación 1.7 se presentan en la tabla 7.

<b>Valores en construcción de curva de Esfuerzo Deformación del Al 5086-H32</b>		
Punto	$\sigma[\text{N/mm}^2]$	$\mu\epsilon$
0	0	0
1	207.12	0.002981
2	213	0.003083
3	218.88	0.003203
4	224.77	0.003363
5	230.65	0.0036
6	236.54	0.003989
7	242.42	0.004669
8	248.3	0.005899

**Tabla 7. Valores empleados en construcción de curva de esfuerzo deformación del Al 5086-H32**

La figura 1.9 muestra la curva de esfuerzo deformación para el material del panel estructural Al-5086-H32, esta curva contiene 8 puntos obtenidos a partir de la ecuación (1.7).



**Figura 1.9: Curva de Esfuerzo Deformación para el Aluminio AI-5086-H32 empleado en el Panel Estructural.**

Finalmente las propiedades del aluminio se muestran en la tabla 8.

Propiedades mecánicas del Aluminio AI-5086-H32			
$\sigma$	207.18	[N/mm <sup>2</sup> ]	Límite elástico
E	71.8E+03	[N/mm <sup>2</sup> ]	Módulo de elasticidad
$\rho$	2670	[Kg/m <sup>3</sup> ]	Densidad
$\nu$	0.33	-----	Coef. De Poisson

**Tabla 8. Propiedades mecánicas del Aluminio AI-5086-H32**

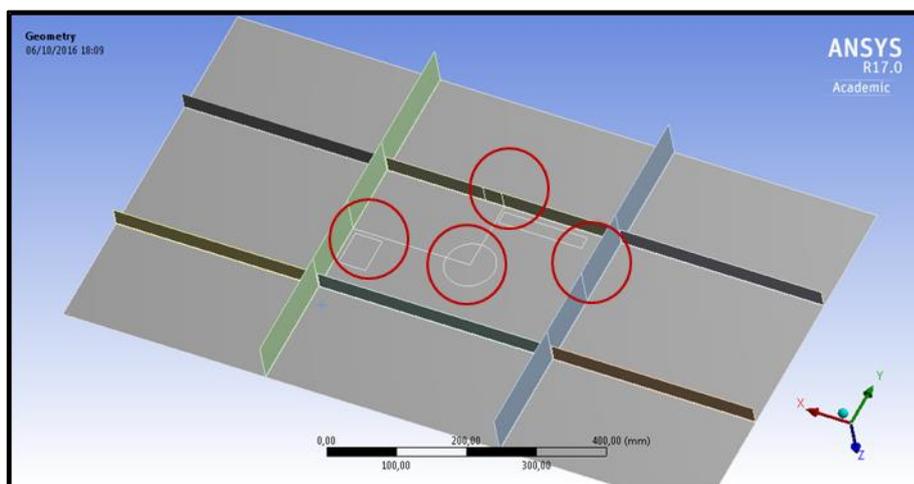
El material empleado para el cuerpo golpeador será acero de transmisión. Se asume un comportamiento lineal isotrópico, ya que no se esperan deformaciones grandes en este cuerpo.

Propiedades mecánicas del Acero de Transmisión			
E	205E+03	[N/mm <sup>2</sup> ]	Módulo de elasticidad
$\rho$	8108	[Kg/m <sup>3</sup> ]	Densidad
$\nu$	0.292	-----	Coef. De Poisson

**Tabla 9. Propiedades mecánicas del acero de transmisión.**

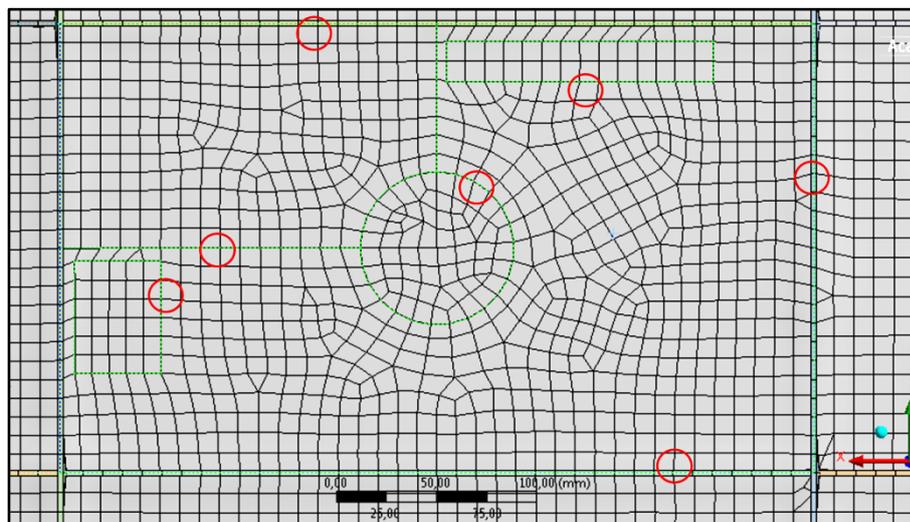
#### 1.4.3 Configuración del mallado.

Como se vio anteriormente la configuración del mallado juega un papel importante en el cálculo del intervalo de tiempo, número de ciclos requeridos para la solución y por ende el tiempo total de computo. El modelo del panel estructural está compuesto por nueve superficies: la plancha y ocho refuerzos que se conectan a esta, dos transversales y seis longitudinales. Adicionalmente se realizan proyecciones sobre la plancha y refuerzos para subdividir a estos en regiones. Sobre los vértices de estas regiones en su mayoría se ubican los puntos de observación, los cuales serán de utilidad cuando se requiera obtener resultados, y en otros casos estos vértices coinciden con las conexiones entre cuerpos. Véase la figura 1.10.



**Figura 1.10: Modelo del panel estructural, proyecciones sobre superficies**

Las regiones definidas y que son proyectadas sobre las superficies que se muestran en la figura 1.10, obligan a la malla a contener elementos que coincidan con los bordes de estas regiones. Esto afecta la forma de los elementos de malla produciéndose formas triangulares en aquellas zonas donde varias aristas se concentran y una relación de aspecto mayor a la unidad, véase la figura 1.11, donde observa presencia de elementos triangulares en el mallado.



**Figura 1.11: Mallado afectado por la presencia de regiones sobre las superficies.**

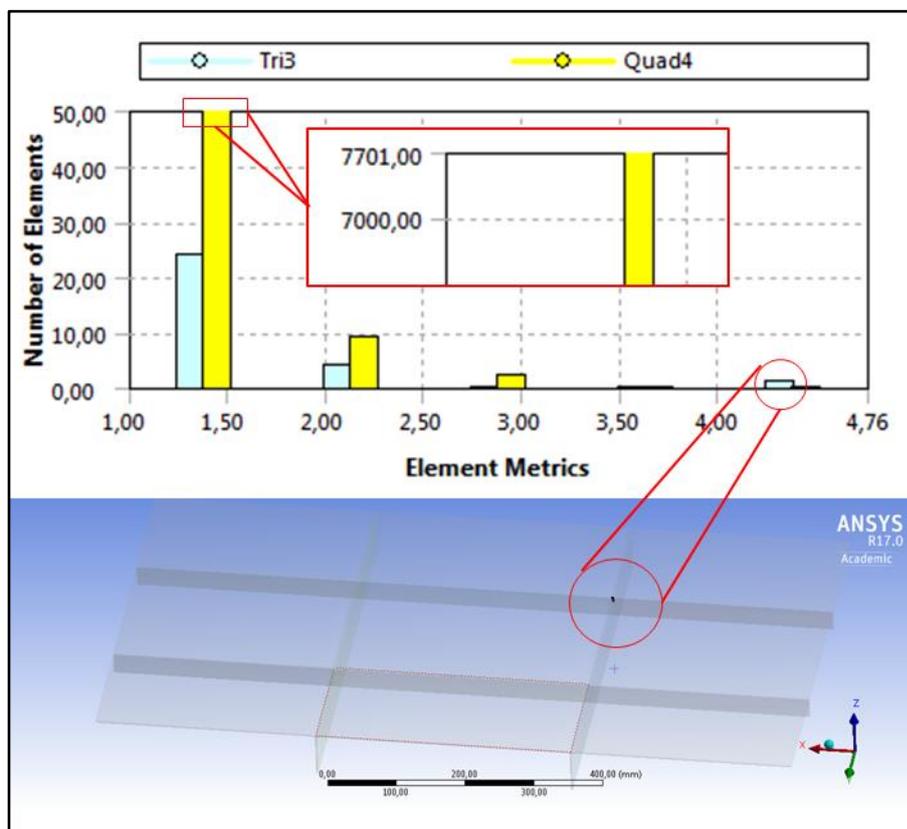
ANSYS permite seleccionar entre una variedad de funciones de mallado, la tabla 10 presenta las principales características del mallado aplicado al modelo del panel estructural. La función de tamaño adaptativa es aplicable cuando la respuesta involucra deformaciones de gran tamaño, donde el mallado debe ser modificado en cada paso. Se selecciona un alto nivel de suavizado para evitar los saltos drásticos en la forma y tamaño de los elementos. Se especifica un nivel de transición bajo, esto favorece el cambio entre una malla fina y una de menor densidad, aunque una sola malla es aplicada a todo el panel. El tamaño de elemento se establece según lo discutido en la sección de restricciones de tiempo en *1 cm*. También se muestra la mínima dimensión de eje contenido en el modelo, en este caso corresponde a *20 mm*; se puede observar en la figura 1.11 que esta dimensión corresponde al ancho del rectángulo proyectado sobre la plancha. Finalmente se muestra el número de elementos y nodos en la malla del panel estructural y también el cilindro golpeador.

Tamaño de Elemento	
Función de Tamaño	Adaptativa

Centro de Relevancia	Medio
Nivel de Suavizado	Alto
Nivel de Transición	Bajo
Tamaño del Elemento	10.0 <i>mm</i>
Mínima Longitud de Eje	20.0 <i>mm</i>
<b>Panel Estructural</b>	
Nodos	7896
Elementos	7741
<b>Cilindro Golpeador</b>	
Nodos	2310
Elementos	1976

**Tabla 10. Características del tamaño de elemento en el mallado del modelo del panel estructural.**

Es importante conocer la calidad de los elementos contenidos en la malla del modelo, una forma de hacer esto, es evaluar la relación de aspecto  $RA$ . ANSYS presenta gráficos que identifican el número de elementos con una determinada  $RA$  y forma. La figura 1.12 presenta toda la información de la calidad de los elementos de malla en el panel estructural. Aquí se puede observar que existen dos formas para los elementos de malla, triangular  $T$  (verde) y cuadrilátero  $C$  (amarillo). En el modelo se tienen  $7700C$  y  $25T$  con una  $RA$  1.5. Con una  $RA \leq 2.5$  tenemos  $10C$  y  $4T$ . Aproximadamente  $2C$  con una  $RA \leq 3$  y finalmente  $1T$  con una  $RA \geq 4$ , para este último se muestra la ubicación sobre la intersección de refuerzos.



**Figura 1.12: Relación de aspecto de los elementos de malla del panel estructural y posición de elementos de mala calidad.**

Finalmente, luego de aplicar las recomendaciones de DNV•GL y considerar las restricciones del sistema dinámico explícito se obtiene un modelo discretizado cuya malla es de tipo adaptativo con elementos Shell181 en el panel estructural y Solid185 en el cuerpo golpeador (cilindro) con un tamaño de  $1\text{cm}$ . En cuanto a la calidad de la malla se tienen 7700 elementos cuadriláteros con una relación de aspecto menor a 1.5 de un total de 7741. Para un tiempo total de simulación de  $1\text{ s}$  se espera un intervalo de tiempo en cada paso de  $2E-07\text{ s}$ , con una cantidad de ciclos en el orden de 40000, esto se debe principalmente a la presencia del cuerpo golpeador en el modelo. Las propiedades asignadas al material del panel estructural permiten obtener un comportamiento plástico de la estructura como respuesta al impacto.

## **CAPÍTULO 2**

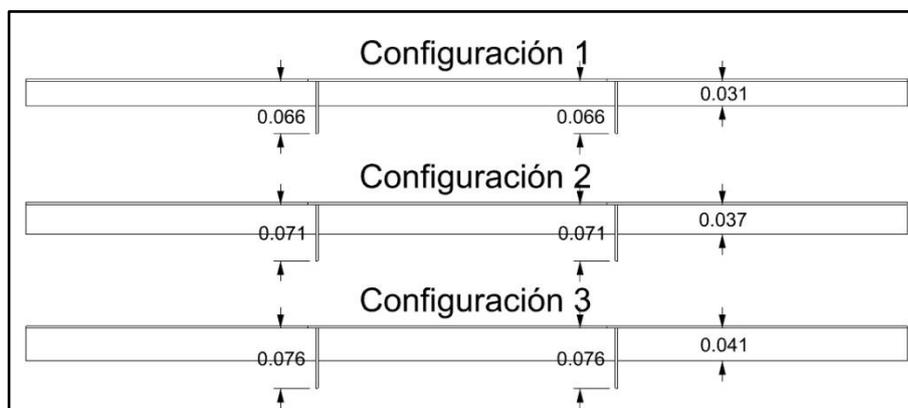
### **2. DESARROLLO DE SIMULACIONES.**

En este capítulo se presenta el desarrollo de las simulaciones numéricas del impacto sobre paneles reforzados usando el módulo de Análisis Dinámico Explícito (“Explicit Dynamics”) de ANSYS Workbench. Inicialmente se identifican las condiciones en las que se deben llevar a cabo las simulaciones, las cuales se basan en las características de los experimentos de impacto sobre un panel estructural realizados por C. Agila [1] en 2015. Entre estas características se tiene configuración de refuerzos, velocidad de impacto, condición de borde, tiempo de duración del evento, posición del golpeador, y ubicación de los puntos de interés.

Los resultados analizados son la deflexión de la plancha, y, deformación unitaria y esfuerzo normal en diferentes direcciones. Finalmente se resumen los valores máximos obtenidos en los puntos de interés para cada simulación numérica y se presentan gráficos comparativos de la respuesta entre las diferentes configuraciones.

## 2.1 Características de impacto experimental.

### 2.1.1 Configuración de refuerzos.



**Figura 2.1: Configuraciones de refuerzos.**

El principal propósito de este trabajo es comparar los resultados obtenidos a partir de simulaciones numéricas con los valores experimentales determinados por C. Agila en [1], en pruebas de impacto sobre paneles reforzados. Ella desarrolló pruebas con paneles de tres configuraciones, cambiando las alturas de los refuerzos. Se registraron en tiempo, la deflexión en un punto cerca al centro del panel de plancha central, y además, deformaciones unitarias en dos puntos sobre los bordes de dicho panel. Las dimensiones de los refuerzos para cada configuración se presentan en la tabla 5 del capítulo 1, y en forma gráfica en la Fig. 2.1.

### 2.1.2 Velocidad de impacto.

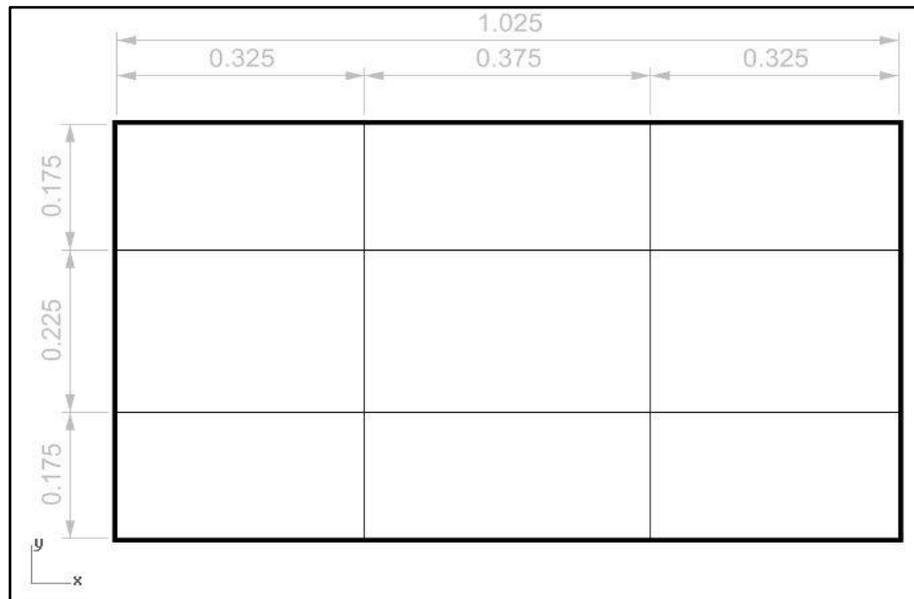
En [1] se describe el procedimiento experimental para producir el impacto de un cilindro sólido de acero sobre el panel estructural de

aleación de aluminio. Se emplea una torre de descenso que consiste de un tubo metálico con diámetro interno de  $7.92\text{ cm}$  en donde se coloca el cuerpo golpeador y se deja caer desde una altura de  $2\text{ m}$ . La velocidad de impacto se midió ( $5.63\text{ m/s}$ ) y se obtuvo un valor cercano al obtenido mediante la ecuación cinemática de caída libre,  $v = \sqrt{2gh}$ , considerando un factor de fricción de  $0.9$ . Esta es la velocidad de impacto que se emplea para las simulaciones con las tres configuraciones de refuerzos.

### 2.1.3 Condiciones de frontera.

El panel reforzado está formado por una plancha de  $1.125\text{ m}$  de largo por  $0.675\text{ m}$  de ancho, con refuerzos separados de forma equidistante en direcciones longitudinal y transversal. Como soporte, los bordes de la plancha se asientan sobre un anillo de ángulo de acero de  $5\text{ cm}$  de ala. Sobre esta ala se instalan pernos fijando el panel de prueba a una estructura de acero que sirve de soporte. En este trabajo se va a modelar el panel sin incluir la porción de plancha que se asienta sobre el anillo de acero. Las dimensiones finales del panel, mostrando la separación entre refuerzos se muestran en la figura 2.2, y corresponde al dominio que se va a discretizar con el MEF.

Los nodos que corresponden a los bordes se modelan como de simple soporte, para simular las zonas donde el panel se asienta sobre los ángulos.



**Figura 2.2: Configuración del panel.**

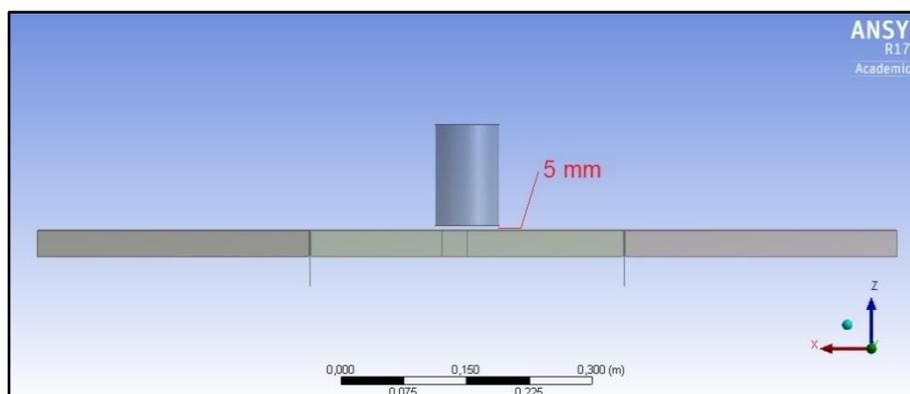
#### 2.1.4 Tiempo de duración del Impacto.

Los resultados de las pruebas reportados en [1] identifican ciertos intervalos de tiempo de importancia en el fenómeno de impacto. Entre estos se tiene, duración del impacto experimental, tiempo en el que se producen los valores máximos de respuesta y el instante en que los cuerpos dejan de estar en contacto luego del impacto. En el capítulo 1 se estableció que la duración de la simulación debe ser  $0.01$  s, ya que este tiempo es suficiente para cubrir el fenómeno de impacto de manera eficiente empleando para la discretización espacial elementos con tamaño de  $1$  cm.

#### 2.1.5 Posición del golpeador.

En la experimentación de Agila, el golpeador se deja caer desde una altura de dos metros, en dirección vertical es decir con las caras planas paralelas a la plancha del panel. En la presente simulación numérica para ahorrar tiempo de cómputo se ubica el golpeador  $0.5$  cm encima de la plancha del panel, y con la velocidad inicial previamente mencionada. Esto implica que en el inicio de la simulación deben transcurrir  $\Delta\tau =$

$5\text{mm}/5630\text{ mm/s} = 0.0008\text{ s}$  antes de hacer contacto. Esto se puede apreciar en los gráficos de respuesta vs tiempo que se presentan posteriormente en este capítulo. La figura 2.3 presenta la posición del cuerpo golpeador con respecto al panel estructural.



**Figura 2.3: Disposición del golpeador y el panel estructural.**

#### 2.1.6 Puntos de interés.

En la experimentación de Agila se reporta la deflexión del panel central de la plancha reforzada y las deformaciones unitarias en dos puntos sobre la plancha central durante el impacto, y son considerados “puntos de interés” en la ejecución de ANSYS para una posterior comparación de resultados. Adicionalmente en la simulación se añaden puntos de interés en zonas donde se espera mayores niveles de esfuerzos. En la figura 2.4 (a) se observan los puntos sobre la plancha en los cuales se reporta la deflexión del panel, denominados *A*, *B*, *C*, *D* y *E*. Se espera que el punto *A* desarrolle la mayor deflexión, ya que está en el centro de la plancha; los puntos *B* y *C* deben proporcionar información suficiente para comprender el comportamiento del golpeador justo en el borde de la zona de contacto durante el impacto. Los esfuerzos normales concentrados en estos puntos también deben ser reportados ya que se espera que sean los extremos. Considerando el espesor de la plancha para un mismo punto de evaluación se obtienen dos valores de esfuerzo normal, en las caras superior e inferior de la plancha. Si se alcanza una deformación plástica, aún en caso de flexión pura, estos valores no

necesariamente serán iguales, por lo que será necesario analizar esta diferencia.

Además de los previamente mencionados, los puntos  $ey$  y  $ex$  reportan las deformaciones unitarias y los esfuerzos normales en las direcciones  $Y$  y  $X$ . En estas posiciones también se esperan altos esfuerzos considerando la plancha central como empotrada en sus bordes, y corresponden a los puntos donde Agila registró la variación en tiempo de la deformación unitaria.

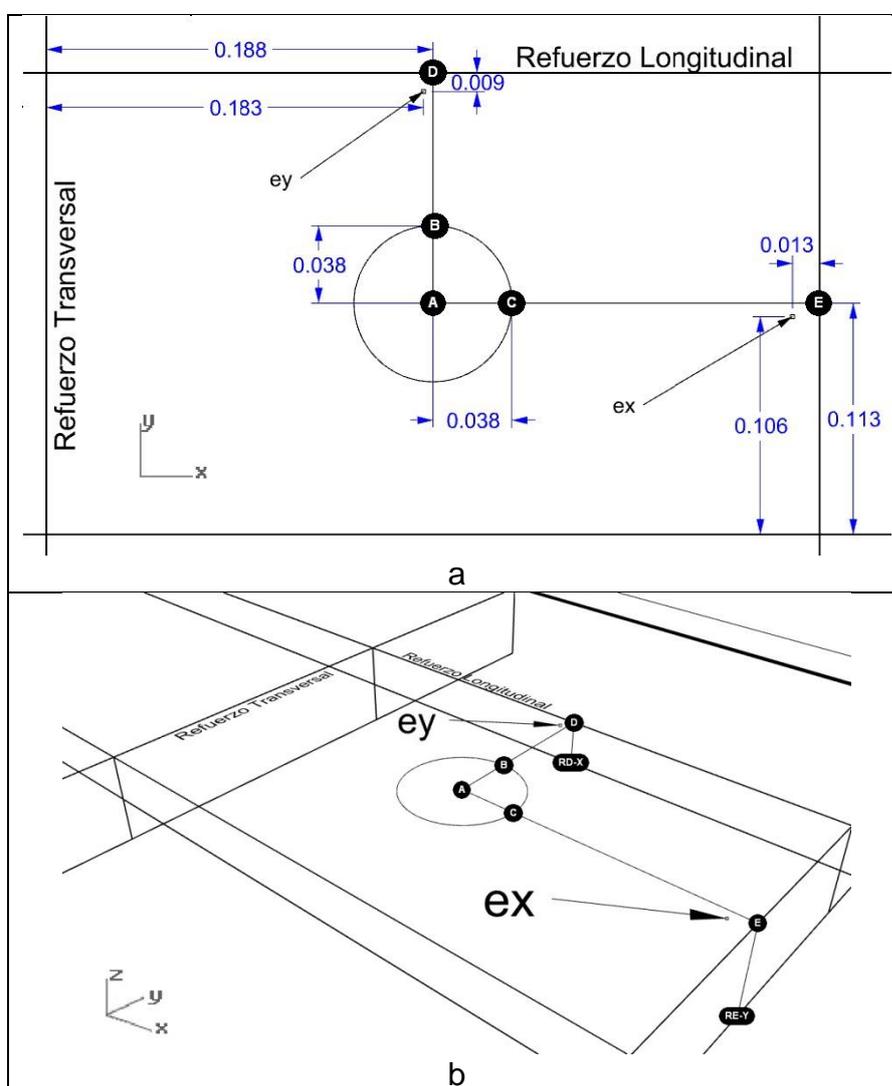


Figura 2.4: Posición de los puntos de interés (metros).

Finalmente se incluyen dos puntos adicionales *RD-X* y *RE-Y* en los cuales se reportan los esfuerzos normales en dirección *X* y *Y* respectivamente, y están ubicados en fibras alejadas del eje neutro de los refuerzos (parte superior de las almas). La tabla 11 presenta un resumen de las posiciones donde se reportan los diferentes parámetros de análisis.

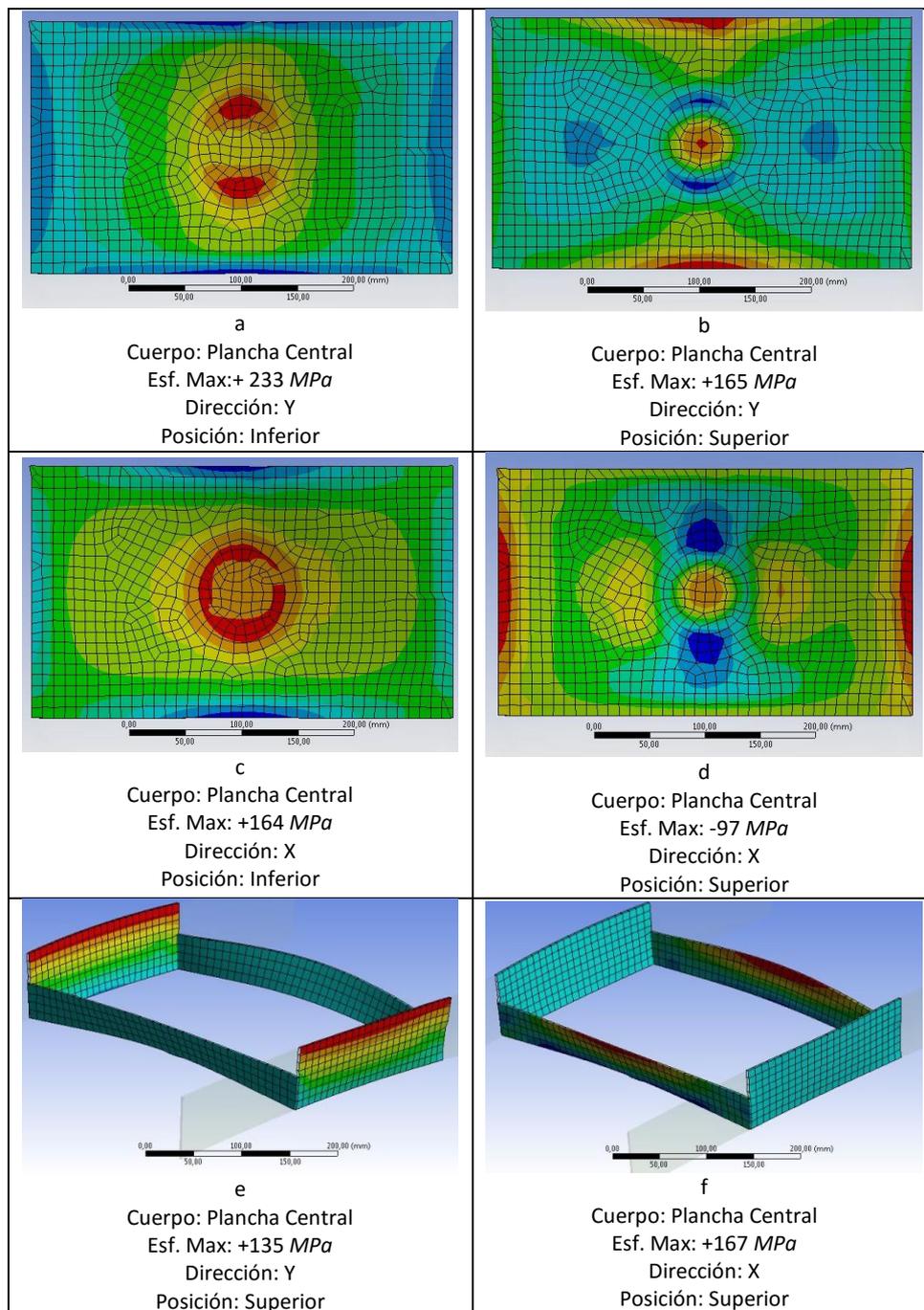
Parámetros que se reportan en cada punto de interés.											
Cuerpo	Punto.	Defl. [mm]	Deform. Unit. [ $\mu\epsilon$ ]					Esf. Norm. [MPa]			
		Z	X		Y		Plast. Equi.	X		Y	
			Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.
Plancha Central	A	✓					✓	✓	✓	✓	✓
	B	✓				✓	✓			✓	✓
	C	✓		✓			✓	✓	✓		
	D	✓			✓		✓				
	E	✓	✓				✓				
	ex			✓							
	ey					✓					
Ref.	RD-X		✓				✓	✓			
	RE-Y				✓		✓			✓	

**Tabla 11. Parámetros reportados de acuerdo al punto de interés.**

Adicionalmente también se reporta deflexión en los puntos *A*, *B* y *C* en el cuerpo golpeador. El detalle de estos resultados se muestra en el anexo C.

## 2.2 Resumen de resultados numéricos.

En esta sección se presentan diferentes figuras que permitan describir el comportamiento del panel durante el impacto, obtenidas a partir de las simulaciones numéricas para las tres configuraciones de refuerzos. Se presentan también resúmenes de los resultados con valores representativos de las pruebas. En el anexo C se presentan los resultados detallados de las simulaciones.



**Figura 2.5: Reconocimiento de zonas con concentración de esfuerzos en C2 para ubicación de puntos de interés.**

Primero se va a verificar que la ubicación de los puntos de interés es la adecuada, y para ello se calculan el esfuerzo normal en dirección  $X$  y  $Y$  y la

deformación unitaria en la zona central de la plancha libre de refuerzos y en zonas cerca de los refuerzos que delimitan esta plancha para la configuración C2. También se hace énfasis en la diferencia entre el esfuerzo normal reportado en la cara superior y en la inferior de la plancha para un mismo punto de interés. Esta diferencia también se aplica a la deformación unitaria elástica.

La figura 2.5 (a-f) presenta las zonas de mayor nivel de esfuerzos en el panel estructural (zonas de color rojo) con configuración C2. Las secciones (a) y (b) muestran el esfuerzo normal en dirección Y en la cara inferior (a) y superior (b) del panel central de plancha, zona libre de refuerzos. Los valores más altos de este parámetro se registran en (a) y superan el límite elástico del material,  $207 \text{ MPa}$ . Estas zonas de mayor esfuerzo coinciden con la ubicación del punto de interés B que se muestra en la figura 2.4. En (b) los valores máximos de esfuerzo no superan el límite elástico y se concentran en los bordes longitudinales de la plancha; esta posición coincide con el punto de interés D, véase Fig.2.4.

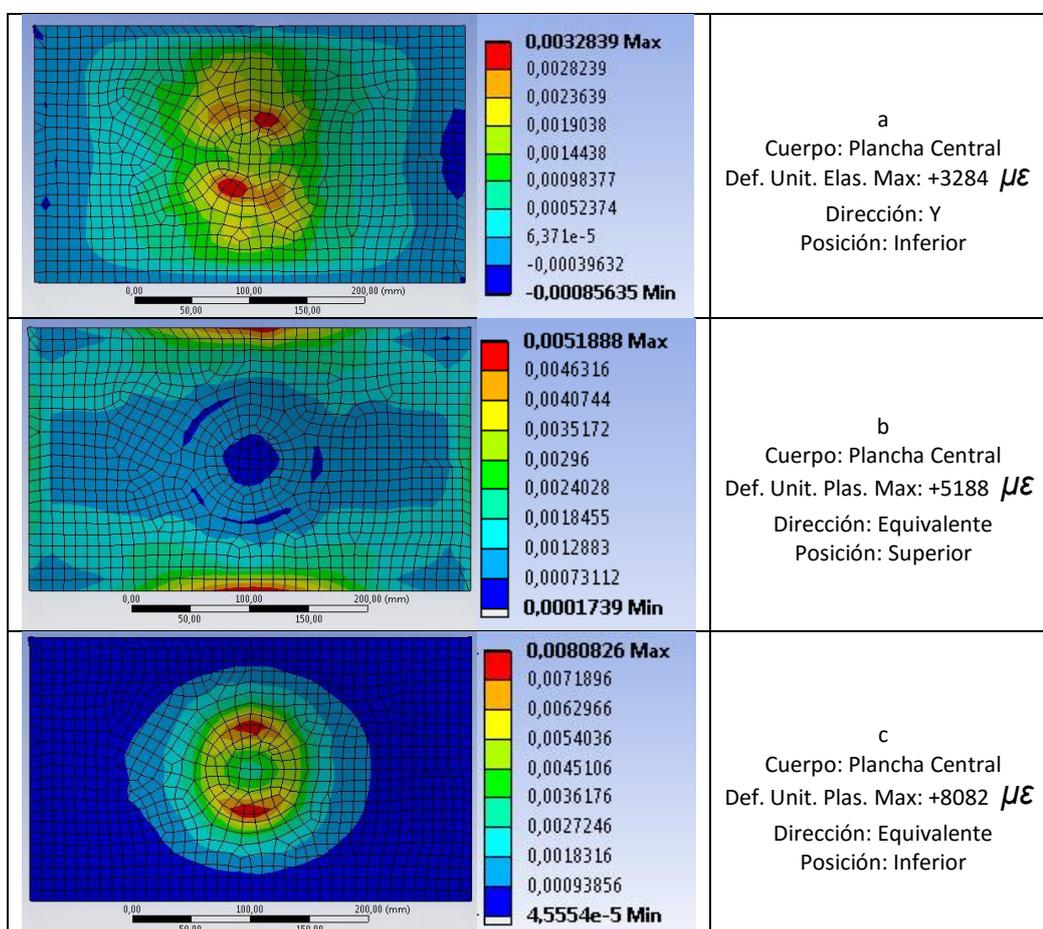
Las secciones (c) y (d) de la figura 2.5 muestran el esfuerzo normal en dirección X en la cara inferior (c) y superior (d) del panel de plancha central. Los valores máximos de esfuerzo no superan el límite elástico y se reportan en (c) alrededor de la zona de contacto entre el panel y el golpeador. El punto C de la figura 2.4 coincide con esta zona de concentración de esfuerzos. El máximo esfuerzo en (d) tiene signo negativo y se concentra en el borde de la plancha coincidiendo con los refuerzos transversales. El punto de interés E en la figura 2.4, se ubica en esta zona de concentración de esfuerzos.

Finalmente las partes e y f de la figura 2.5, muestran el esfuerzo normal en dirección Y (e) y X (f), reportado en la fibra más alejada del eje neutro de los refuerzos. Aquí se espera un mayor nivel de esfuerzos, sin embargo se observa que en ambos casos no se supera el límite de elasticidad. Estas zonas coinciden con los puntos de interés RD-X y RE-Y que se muestran en la figura 2.4.

También se reporta la deformación unitaria en las zonas donde de mayor nivel de esfuerzo en el panel con configuración de refuerzos C2, véase figura 2.5 (a).

Ya que, el esfuerzo reportado en esta zona supera el límite de elasticidad, se espera que exista deformación plástica en toda esta zona.

La figura 2.6 (a), muestra la deformación unitaria elástica en dirección Y reportada en la cara inferior de la plancha central libre de refuerzos. ANSYS permite obtener deformación unitaria plástica equivalente como respuesta; este parámetro se reporta en la cara superior (b) e inferior (c) de la plancha central mostrado en la figura 2.6. Obsérvese que la ubicación de los puntos B y D en la figura 2.4 coincide en las zonas con máximos valores de deformación unitaria en la figura 2.6 (a-c).



**Figura 2.6: Reconocimiento de zonas con máximo nivel de deformación unitaria en C2 para ubicación de puntos de interés.**

La figura 2.6 presenta los niveles máximos de deformación unitaria en el panel estructural. Nótese que en todos los casos se supera el límite de elasticidad de  $2885 \mu\epsilon$  para este material (véase la tabla 8). En la parte (a) de esta figura las zonas de color rojo no son simétricas con respecto a ningún eje en la plancha, y el punto *B* coincide con la zona de color naranja con un valor de deformación unitaria elástica entre  $2300-2800 \mu\epsilon$ . En la referencia [7] el programa ANSYS hace una descripción de esta deformación unitaria plástica equivalente. Básicamente, se describe como la medida de la cantidad de deformación unitaria permanente en un cuerpo sometido a una carga que modifique su estado físico y se calcula en función de las componentes principales según la ecuación (2.1).

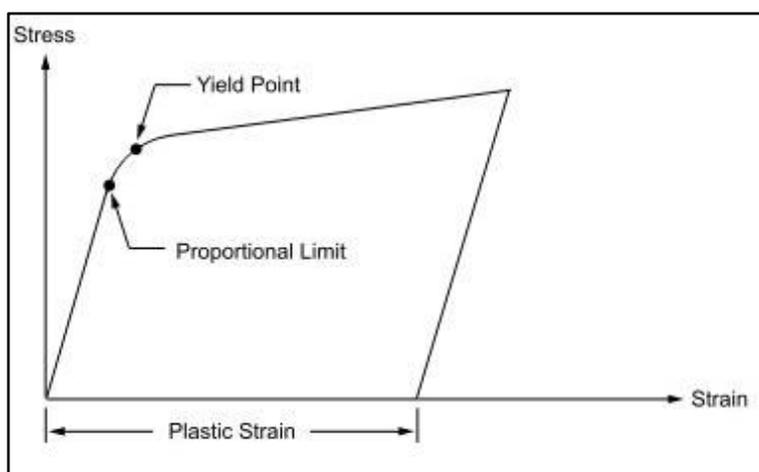
$$\epsilon_{ep} = \frac{1}{1+\nu} \sqrt{\frac{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2}{2}} \quad (2.1)$$

Dónde:

$\nu$  : Razón de Poisson.

$\epsilon_{ep}$  : Deformación unitaria plástica equivalente.

$\epsilon_i$  : Deformación unitaria plástica principal en las tres direcciones: 1=X, 2=Y y 3=Z.



**Figura 2.7: Deformación unitaria plástica en la curva esfuerzo deformación del material (Fuente: Manual de ANSYS, Refe. [7]).**

A continuación se presentan las variaciones en tiempo de los diferentes parámetros en los puntos de interés previamente mencionados. La figura 2.8 muestra la deflexión del punto *A* en función del tiempo para las tres configuraciones de refuerzos. La figura 2.9 contiene la deflexión de los puntos *A*, *B* y *C* para la configuración *C2* en el panel y en el cuerpo golpeador. El esfuerzo normal en dirección *Y* reportado en el punto *A* en la cara superior de la plancha para las tres configuraciones se muestra en la figura 2.10. La figura 2.11 contiene los perfiles de deflexión a lo largo de los ejes *X* y *Y* en el centro del panel para instantes de tiempo específicos durante el impacto. En la figura 2.12 se presenta el esfuerzo normal en función del tiempo en dirección *Y* para el punto *B*, y en dirección *X* para el punto *C*, para la cara inferior de la plancha. La figura 2.13 contiene la de deformación unitaria elástica en dirección *Y* en función del tiempo en el punto *B* cara inferior de la plancha para las tres configuraciones de refuerzos. Finalmente la deformación unitaria plástica equivalente se presenta en la figura 2.14, este parámetro fue reportado también en el punto *B* cara inferior de la plancha para las tres configuraciones.

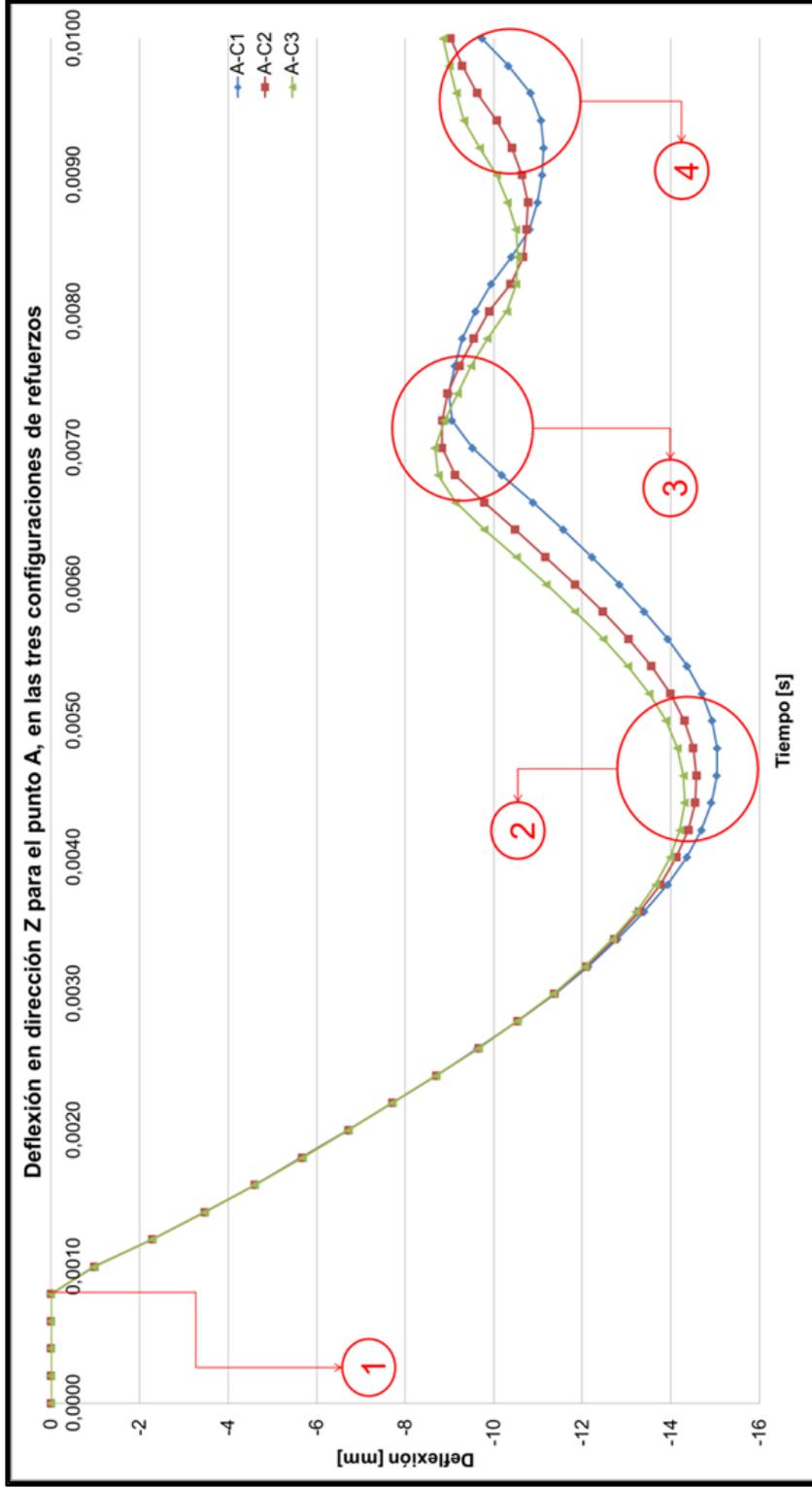


Figura 2.8: Deflexión en el punto A en las tres configuraciones de refuerzos.

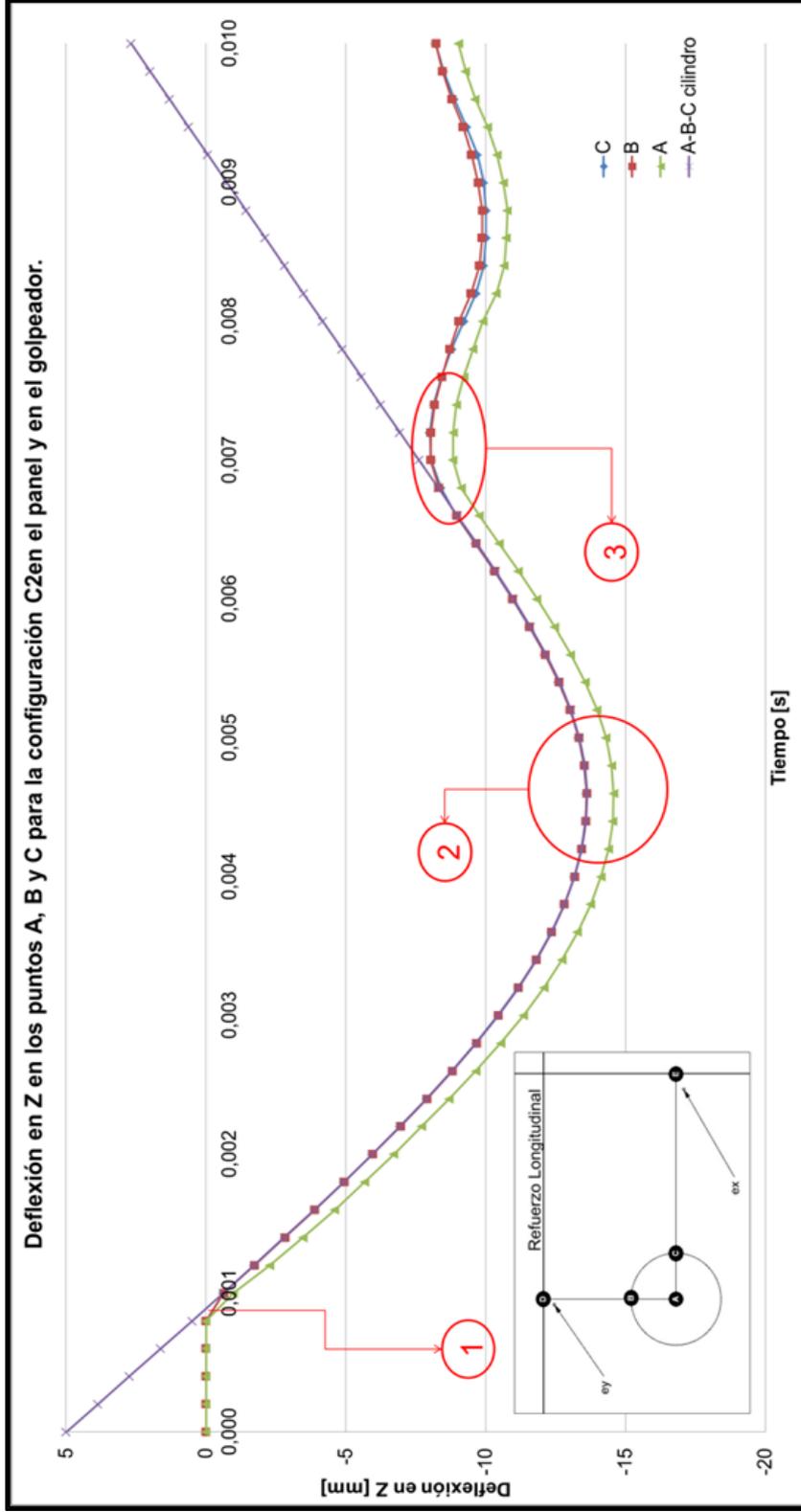
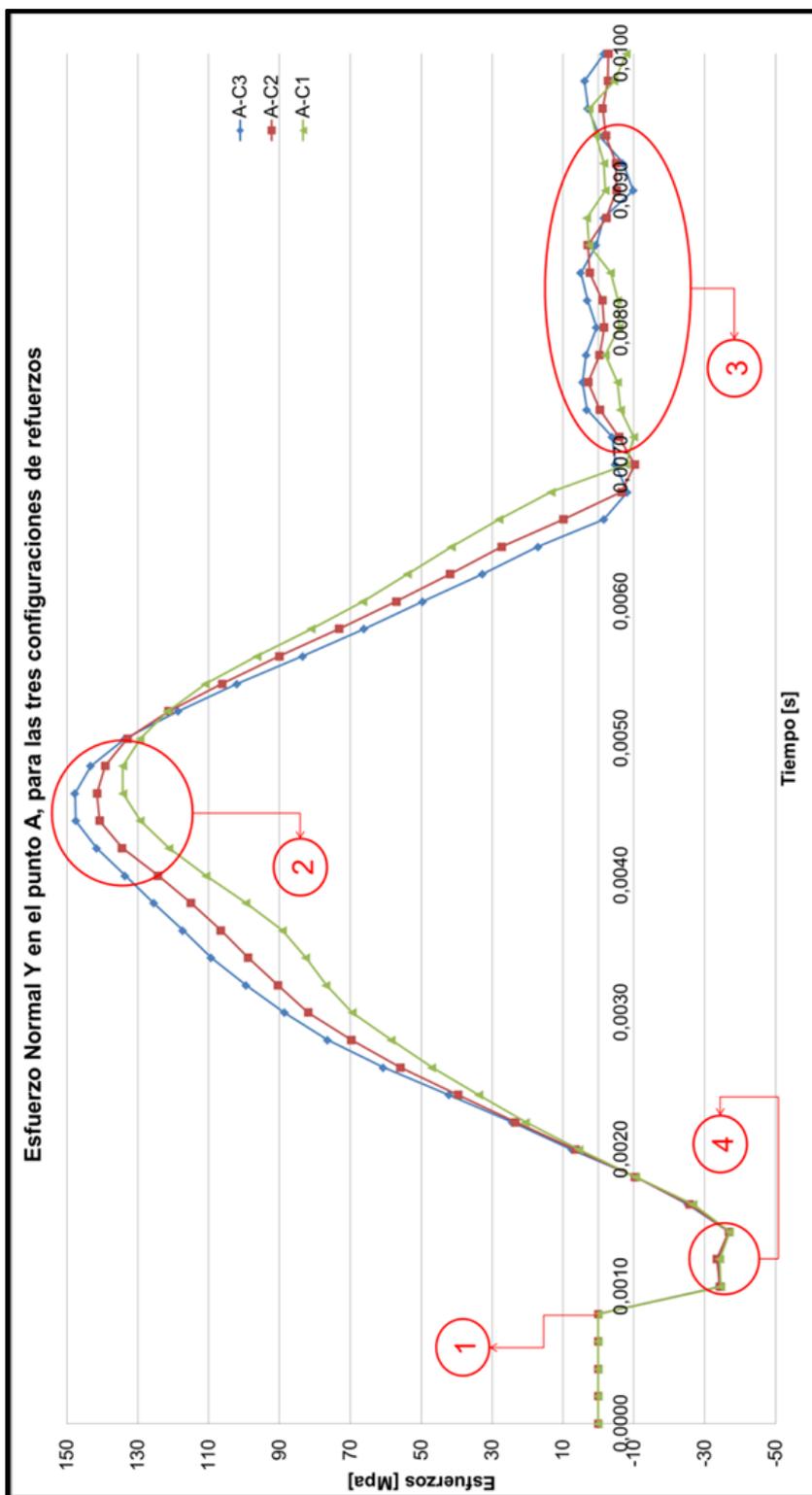


Figura 2.9: Deflexión en Z, para puntos A, B y C, en configuración C2 y en el golpeador.



**Figura 2.10: Esfuerzo normal en Y en el punto A, para las tres configuraciones de refuerzo (Cara superior de plancha).**

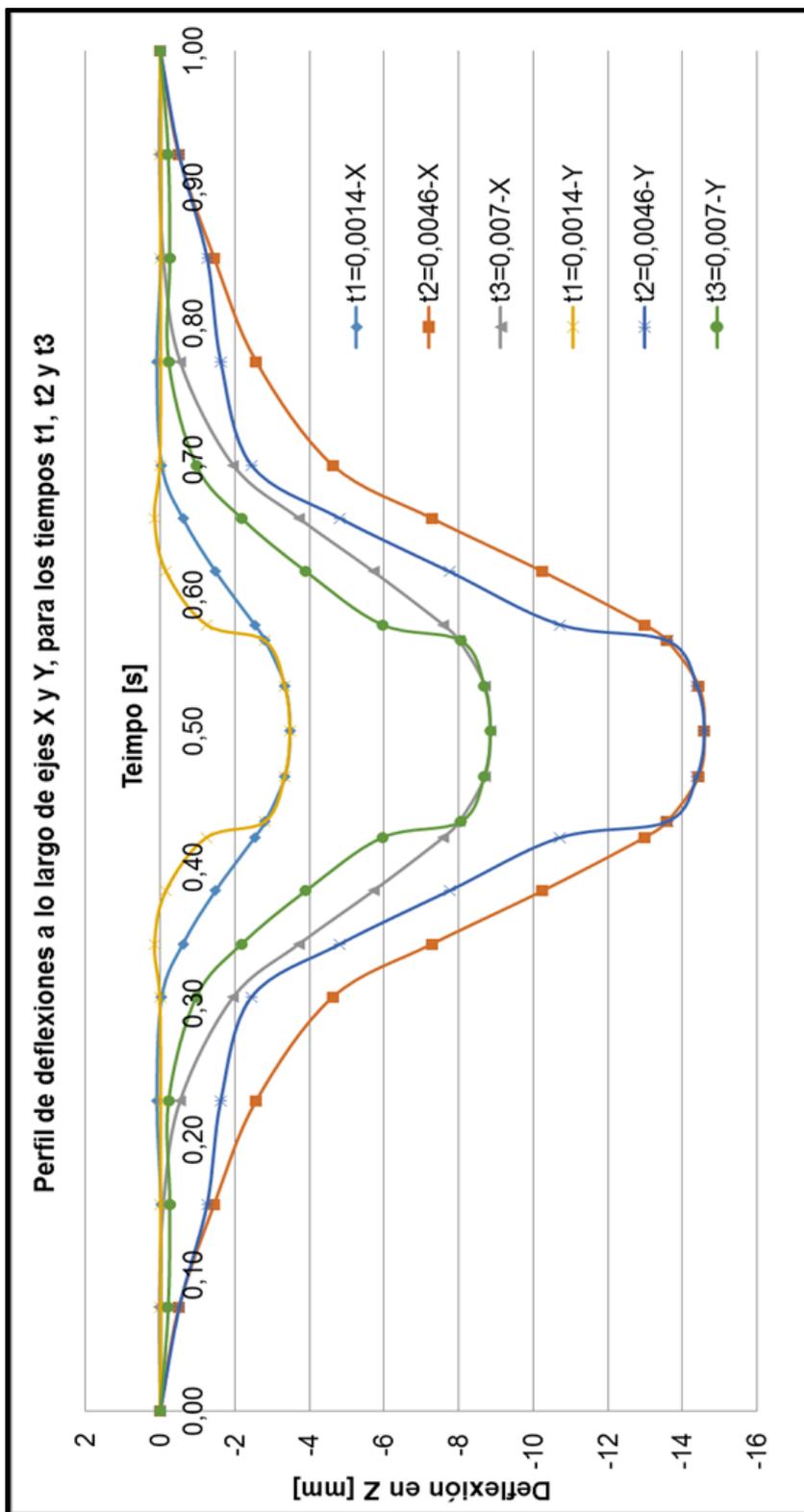
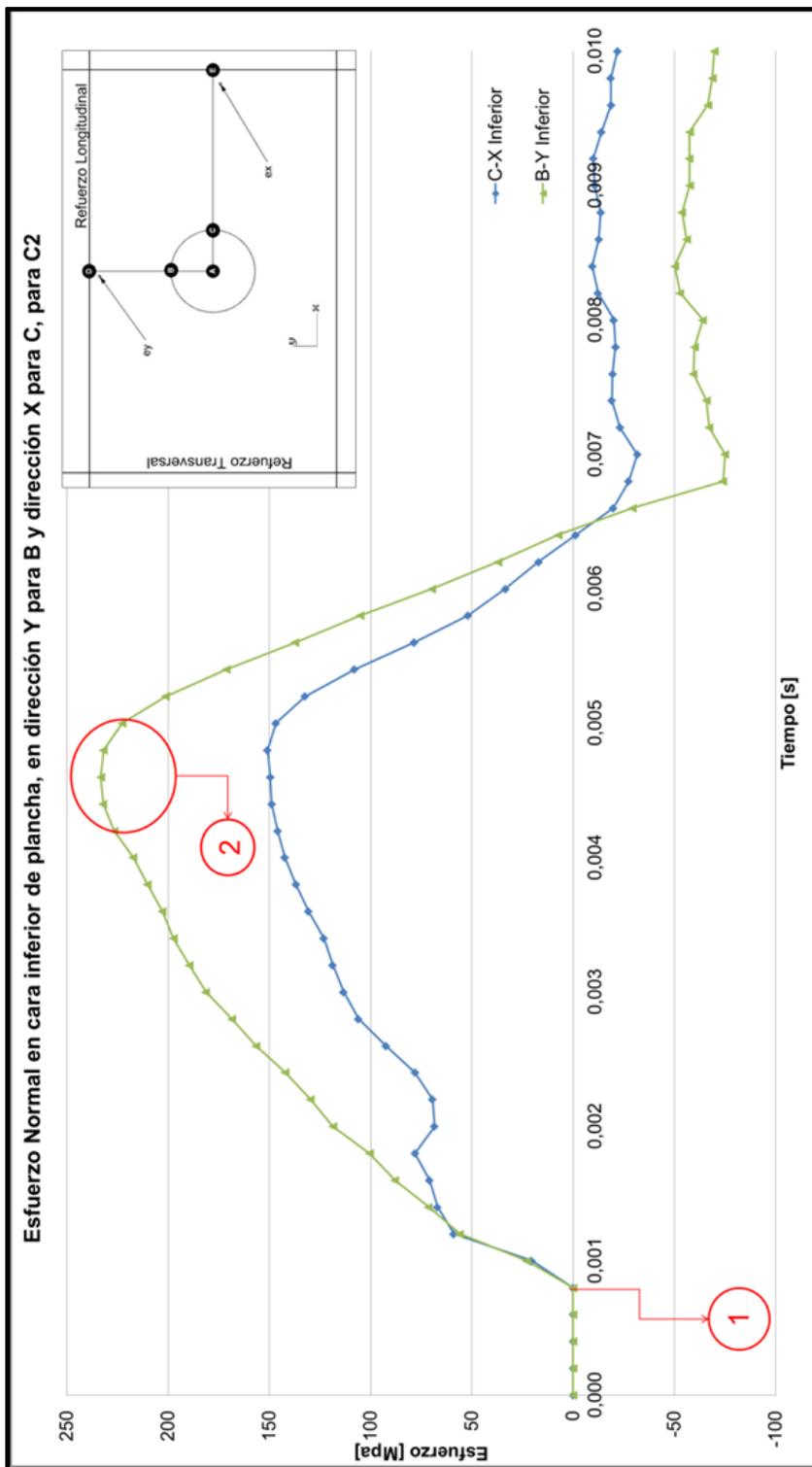
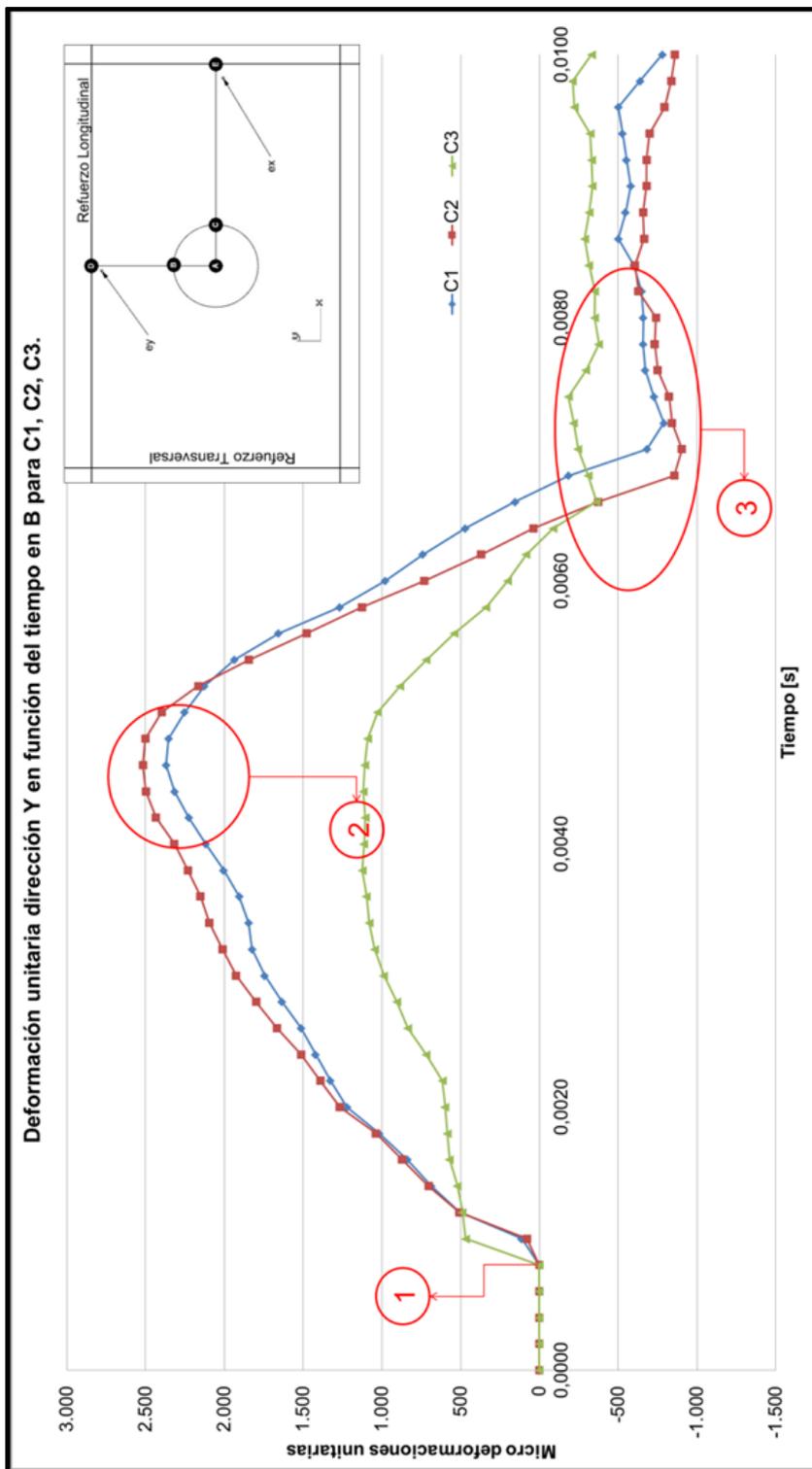


Figura 2.11: Perfil de deflexiones a lo largo de ejes X y Y, para los tiempos t1, t2 y t3.



**Figura 2.12: Esfuerzos normales en dirección Y para los puntos B y C en la configuración 2 de refuerzos, (Cara interior de plancha)**



**Figura 2.13: Figura 13. Deformación unitaria normal en dirección Y en función del tiempo en el punto B para C1, C2 y C3 en cara inferior de plancha.**

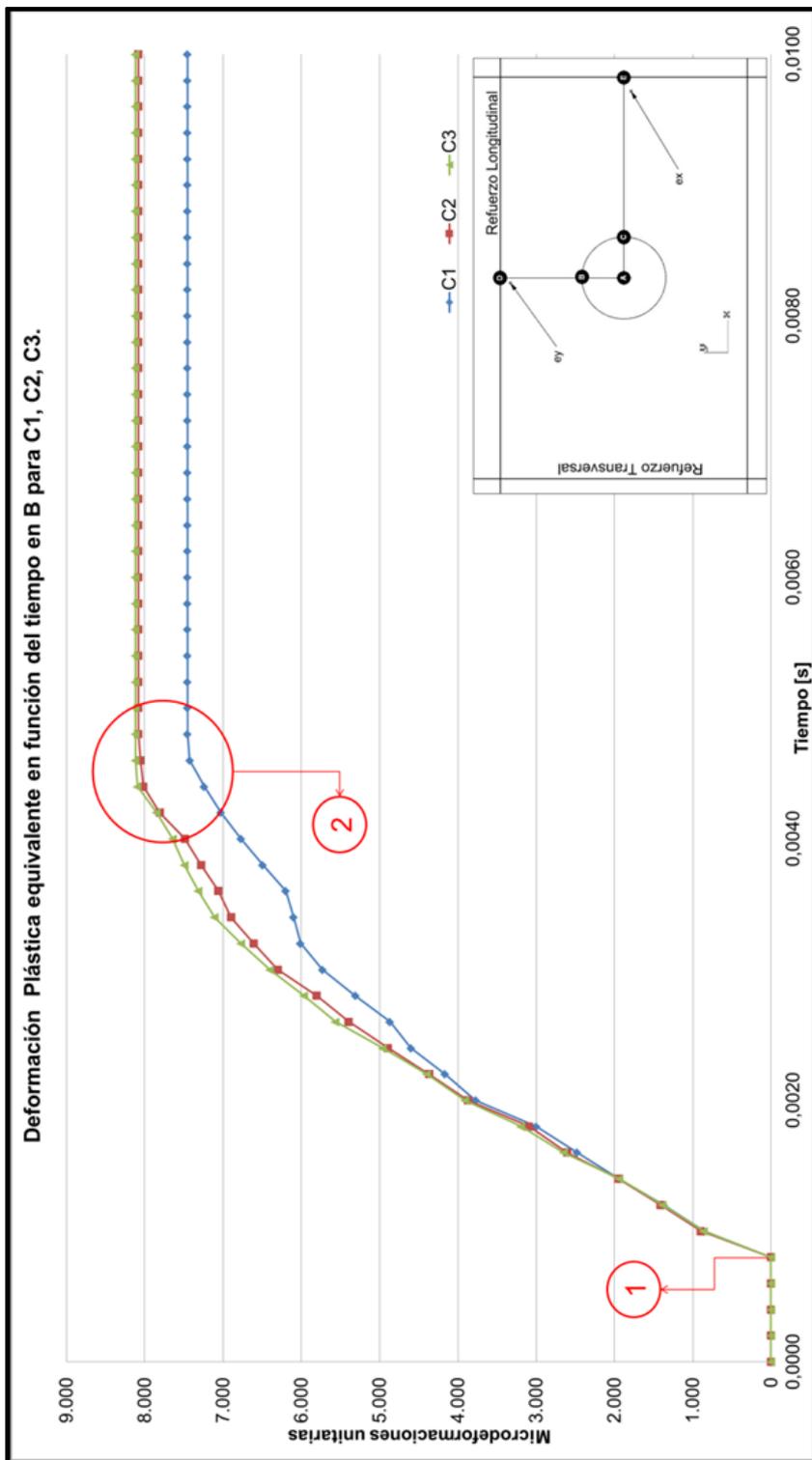


Figura 2.14: Figura 14. Deformación plástica equivalente en función del tiempo en el punto B para C1, C2, C3 en cara inferior de la plancha.

## 2.3 Análisis de resultados de las simulaciones numéricas

En esta sección se desarrolla el análisis de resultados de los resultados obtenidos en las simulaciones, que se presentan en las figuras 2.5 a 2.14. Para ello se determinan los siguientes parámetros: tiempo de Inicio del contacto (instante 1), valor máximo (instante 2), signo del parámetro, tiempo para la separación de los cuerpos (instante 3), y, comportamiento particular del parámetro de análisis (instante 4).

### 2.3.1 Tiempo de inicio de contacto.

El tiempo de inicio de contacto se estableció en  $t=0.00088$  s debido a la separación inicial entre el golpeador y el panel. Este tiempo de contacto debe coincidir con el tiempo en que inicia el movimiento en los puntos cercanos a la zona de contacto, estos puntos son *A*, *B* y *C*. Las figuras 2.8 a 2.14, en el instante 1 con excepción de la 11 muestran que efectivamente en estos puntos existe un cambio en su estado inicial en  $t=0.00088$  s. Esto no sucede con los puntos *D*, *E*, *ex*, *ey*, *RD-X* y *RE-Y*, los cuales se encuentran alejados de la zona de contacto, y sus registros presentan un atraso respecto al tiempo de inicio de contacto.

### 2.3.2 Valor máximo.

Existen tres parámetros de análisis: deflexión del panel, esfuerzo normal, y deformación unitaria. El instante 2 en las simulaciones, figuras 2.8 a 2.14, con excepción de la 2.11, incluye los valores máximos de cada parámetro mostrado en cada figura.

La deflexión máxima del panel se reporta como es de esperarse en el punto *A*, en el centro del panel, que se presenta en la figura 2.8 en función del tiempo para las tres configuraciones, observándose que el panel *C1* experimenta mayor deflexión. Recuérdese que la altura de los refuerzos se incrementa desde la configuración 1 hasta la 3, es decir, el panel *C1* tiene la menor rigidez de los tres. Los valores para la deflexión máxima son  $-15\text{ mm}$ ,  $-14.6\text{ mm}$ ,  $-14.3\text{ mm}$  para *C1*, *C2* y *C3* respectivamente. El tiempo en que el panel alcanza la deflexión máxima es de aproximadamente  $0.0044\text{ s}$ .

La figura 2.9 presenta la deflexión de los puntos *A*, *B* y *C* del panel, para la configuración *C2*. En esta figura también se presenta la deflexión de los puntos *A*, *B* y *C* en el cuerpo golpeador (cilindro). El movimiento de los puntos *B* y *C* coincide durante el impacto, dado que ambos se ubican en el contorno de la zona de contacto. Los valores máximos para estos puntos son  $-14.1\text{ mm}$ ,  $-13.6\text{ mm}$ ,  $-13.3\text{ mm}$  para *C1*, *C2* y *C3* respectivamente, y difieren con los valores del punto central *A* en  $1\text{ mm}$  aproximadamente.

La figura 2.10 presenta las curvas de esfuerzo normal en dirección *Y* versus tiempo reportado en la cara superior de la plancha en el punto central *A* para las tres configuraciones. Obsérvese que el máximo valor no supera el límite de fluencia ( $207\text{ MPa}$ ). Esto concuerda con la figura 2.5, donde se determina que los esfuerzos máximos se reportan en el punto *B*. Nótese que la configuración *C3*, con mayores refuerzos, presenta mayores niveles de tensión que las demás. El tiempo en el que se alcanzan estos valores de esfuerzo en el punto *A* es de  $t=0.0046\text{ s}$ .

Según la figura 2.5 en la cara inferior del punto *B* de la plancha se concentran los esfuerzos máximos en todo el panel. Las curvas de esfuerzo normal en dirección *Y* en función del tiempo para el punto *B* y en dirección *X* para el punto *C* para la configuración 2, se muestran en la figura 2.12. El valor máximo registrado es de  $233\text{ MPa}$ , mayor que el

límite elástico. Obsérvese que en dirección  $X$  el valor de esfuerzo no supera dicho límite.

Ya que se observa que en el punto  $B$  en la cara inferior de la plancha el esfuerzo normal en dirección  $Y$  supera el límite de elasticidad, también se reportan los valores de la deformación unitaria en este punto para las tres configuraciones, Fig. 13. Obsérvese que los valores de este parámetro no superan el límite de fluencia de este material; con esfuerzo de fluencia de  $207 \text{ MPa}$  y módulo de Young de  $71800 \text{ MPa}$ , el límite de fluencia de la deformación unitaria es de  $2886 \mu\epsilon$ . En la figura 2.6 (a) se muestra que en el área muy cerca a este punto se supera este límite.

Finalmente se evalúa la deformación unitaria plástica equivalente en el punto  $B$  en la cara inferior de la plancha, donde los valores alcanzan los  $8000 \mu\epsilon$ . En el anexo C se muestran resultados para este parámetro en diferentes puntos del panel; los valores obtenidos también superan el límite de fluencia del material en estas zonas.

Sin duda el comportamiento plástico de algunas zonas de los paneles luego del impacto que se ha observado desde la figura 2.8 en adelante se debe al nivel de esfuerzo reportado en el punto  $B$  el cual se presenta en los dos puntos de la circunferencia de contacto en dirección  $Y$ , véase figura 2.5 (a). Una vez que los cuerpos se separan, los valores de esfuerzo en ambas direcciones disminuyen considerablemente pero no llegan a descargarse completamente. Es decir que el material ha cambiado sus propiedades mecánicas y ahora existe una tensión residual en el panel.

### **2.3.3 Signo del parámetro de análisis.**

El signo de los valores de los resultados define el comportamiento del panel durante el impacto. La deflexión en todas las figuras tiene signo negativo, ya que la disposición del panel es horizontal con los refuerzos en la cara inferior del mismo, y el golpe se produce en la cara superior, hacia abajo. En la figura 2.10 se muestra el esfuerzo normal en la cara

superior del panel reportado en el punto A para las tres configuraciones de refuerzos. Aquí se observa que la mayor parte del tiempo durante el contacto, esta región está en tensión. Este comportamiento es diferente del esperado ya que la forma que adopta este punto en esta cara de la plancha es una figura cóncava, por lo que se esperaría un signo negativo en el esfuerzo normal. Al evaluar la deformación unitaria plástica equivalente en los puntos A, B y C, se observa que los valores superan el límite de fluencia. Es decir que, a pesar de que aparentemente en este punto haya compresión, realmente lo que existe es tensión debida al impacto. En los puntos B y C en la cara inferior del panel, los valores de esfuerzo son positivos, es decir que existe tensión en el contorno de contacto.

#### **2.3.4 Tiempo de separación de los cuerpos.**

En las figuras 2.9, 2.10, 2.13 y 2.14 se identifica el tiempo en que los cuerpos se separan como instante 3, lo que ocurre alrededor de  $t=0.007s$ . Este valor de tiempo también se puede observar en las curvas de deflexión de los puntos A, B y C en el cuerpo golpeador, donde luego del contacto las curvas se separan y siguen trayectorias diferentes. A partir de este instante el panel inicia un movimiento vibratorio, que disminuye hasta llegar a un valor de deflexión final remanente.

#### **2.3.5 Respuesta Post Impacto.**

Luego de separarse el golpeador del panel, se observa deformación plástica permanente en las figuras 2.8 y 2.9 en los puntos A, B y C, los cuales están cercanos a la zona de contacto. El esfuerzo después del contacto no regresa al valor inicial nulo, es decir que el material adquiere una deformación permanente luego del impacto. Esto se puede observar en las figuras 2.10 y 2.11 en los puntos A, B y C.

#### **2.3.6 Comportamiento Particular.**

En la figura 2.10 se puede observar que luego del inicio del contacto, el punto A en la cara superior de la plancha experimenta un esfuerzo

negativo, es decir que se comprime, y luego cambia de signo hasta el final del contacto. Se mencionó previamente que esto se debe a que aun cuando la forma del panel en el punto *A* es cóncava, el material está experimentando tensión, sin embargo en este corto instante de tiempo (ver instante 4 de la figura 2.10), la deformación unitaria en este punto es mínima y con signo negativo, es decir que la primera reacción en el punto *A* es de compresión. Para verificar lo anterior se grafica el perfil de deflexiones a lo largo de los ejes *X* y *Y* en el centro de la plancha para este instante,  $t=0.0014s$ , también para el instante de tiempo en que se alcanzan valores máximos  $t=0.0046 s$  y para el fin del contacto, figura 2.11. Es decir en esta figura se muestra la forma que adopta el panel en la zona de contacto, para estos tres instantes de tiempo. El punto *A* siempre está por debajo de los puntos *B* y *C* de contacto. A primera vista parece que el golpeador se deforma siguiendo este perfil del panel en la zona de contacto, sin embargo la figura 2.9 muestra el desplazamiento de los puntos *A*, *B* y *C* en el golpeador, aquí los tres puntos siguen la misma curva. En conclusión, el golpeador no se deforma, el punto *A* en el panel siempre está debajo del punto *A* en el golpeador entre los instantes 1 y 3.

Finalmente la tabla 12 resume los valores máximos para cada parámetro de análisis durante el impacto. Se presentan la máxima deflexión en los puntos *A*, *B* y *C* para el panel y para el golpeador. También se presentan los máximos esfuerzos normales para los diferentes puntos de interés. Para los puntos *B* y *C* los valores mostrados corresponden a la cara inferior de la plancha. Todos los valores de esfuerzo son positivos, ya que como se explicó anteriormente toda la zona de contacto se encuentra en tensión, debido a la elevada deflexión. Los valores de deformación unitaria en el caso de los puntos  $\epsilon_x$  y  $\epsilon_y$  en las direcciones correspondientes son los reportados en la cara inferior del panel para efectos de comparación.

Parámetro	Punto	Configuración			tiempo [s]
		Conf. 1	Conf. 2	Conf. 3	
Deflexión [mm]	A	-15.0	-14.6	-14.3	0.0044
	B	-14.1	-13.6	-13.3	0.0044
	C	-14.1	-13.6	-13.3	0.0044
	D	-5.4	-4.6	-4.2	0.0042
	E	-2.7	-2.5	-2.3	0.0042
	A (Golpeador)	-14.1	-13.6	-13.3	0.0046
	B (Golpeador)	-14.1	-13.6	-13.3	0.0046
	C (Golpeador)	-14.1	-13.6	-13.3	0.0046
Deformac. Unit. [ $\mu\epsilon$ ]	ey Inf.	<b>447.2</b>	<b>-445.2</b>	<b>-460.9</b>	0.0046
	ex Inf.	<b>-436.2</b>	<b>-444.9</b>	<b>-454.1</b>	0.0044
	B (Direc. Y)	<b>2370.3</b>	<b>2516.7</b>	<b>1123.3</b>	0.0046
	B (Plást. Equiv.)	<b>7454.5</b>	<b>8082.6</b>	<b>8119.5</b>	0.0046
Esfuerzo Normal [MPa]	A-Y	134.2	141.5	147.7	0.0046
	B-Y	<b>223.7</b>	<b>233.2</b>	<b>240.1</b>	0.0044
	C-X	<b>156.7</b>	<b>150.8</b>	<b>150.0</b>	0.0044
	RD-Y	139.4	135.4	125.2	0.0042
	RE-X	191.6	167.3	157.2	0.0046

**Tabla 12: Valores máximos registrados en cada punto de interés (números en negritas corresponden a la cara inferior de la plancha).**

## CAPÍTULO 3

### 3. COMPARACIÓN DE RESULTADOS.

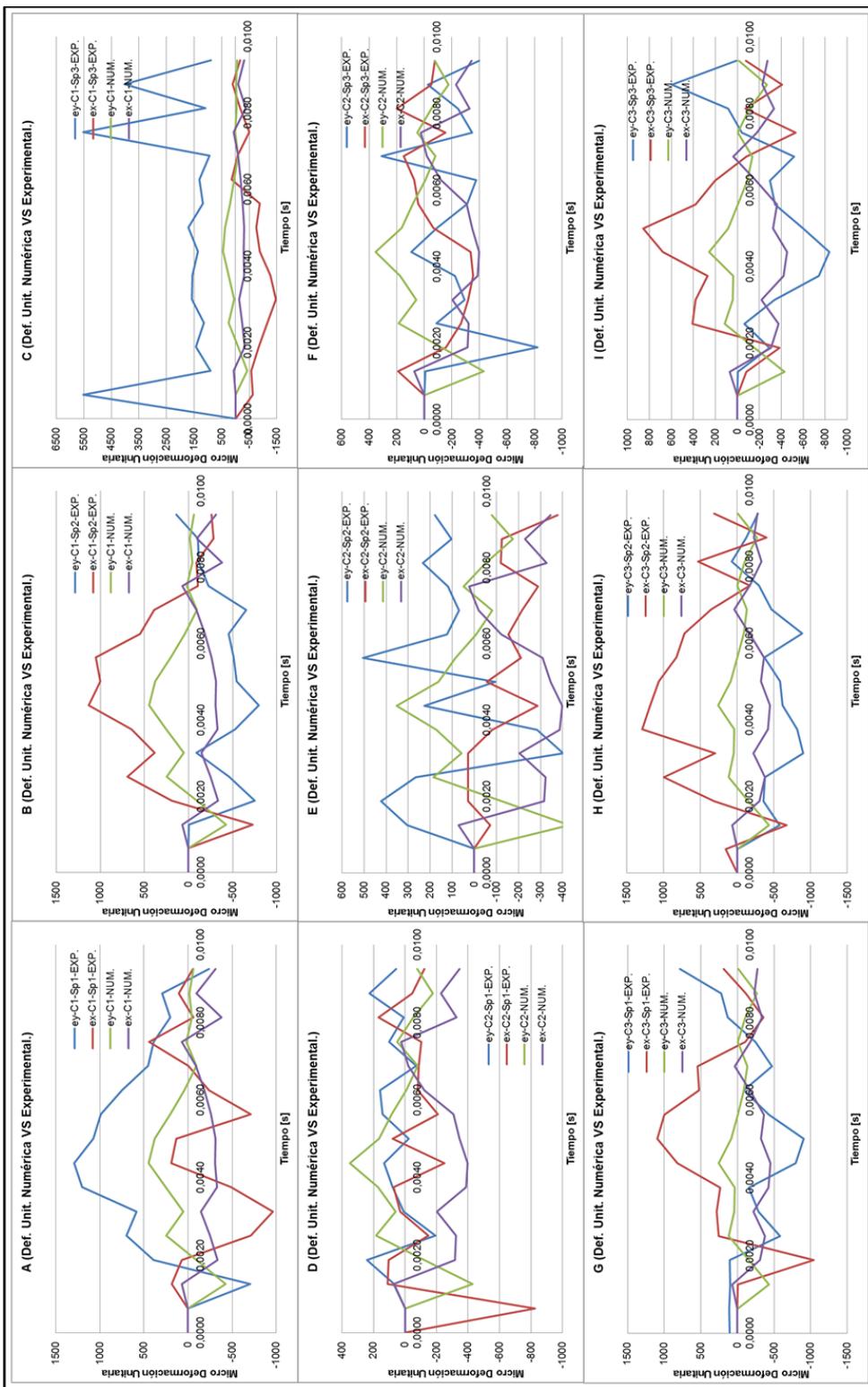
Se ha calculado la respuesta incluyendo comportamiento plástico de la estructura de un panel reforzado de aluminio sometido a carga de impacto, mediante simulación numérica. Para la discretización espacial se ha aplicado el método de elementos finitos. Para las tres configuraciones del panel analizadas se dispone de valores de ciertos parámetros de la respuesta obtenidos experimentalmente, Agila [X]. En este capítulo se realiza primero una comparación de ambos resultados, para tratar de validar los parámetros usados en el sistema de análisis explícito empleado para la simulación numérica. Adicionalmente, también se hace una comparación para investigar la influencia de la configuración de refuerzos en el caso de impacto. Finalmente se comentan algunas características de la respuesta, considerando que se ha excedido el límite de proporcionalidad, y se tiene de formación permanente del panel luego del impacto.

#### 3.1 Comparación de resultados numéricos y experimentales.

En la experimentación del impacto desarrollada por Agila [X] se emplean tres especímenes para cada una de las tres configuraciones de panel reforzado. Los parámetros reportados de la experimentación son la deformación unitaria elástica en los puntos  $e_x$  y  $e_y$  en la cara inferior de la plancha ubicados como se muestra en la figura 2.4 del capítulo 2, en dirección  $X$  y  $Y$  respectivamente en función del tiempo. También se reportó la deflexión en el punto  $A$  ubicado en un punto cercano al centro del panel estructural (véase figura 2.4 del capítulo 2).

A continuación la figura 3.1 (A-I) presenta los resultados experimentales y numéricos para la deformación unitaria en los puntos  $e_x$  y  $e_y$ , en función del

tiempo. Para las comparaciones se hace énfasis principalmente en el comportamiento de las variaciones.



**Figura 3.1: Comparación experimental numérica de resultados de deformación unitaria en ex y ey.**

Obsérvese en la figura 3.1 que existe variación

n en las curvas de deformación unitaria obtenidas experimentalmente de los diferentes especímenes para una misma configuración. Únicamente la configuración de panel C3 presenta curvas de deformación con comportamiento similar en sus tres especímenes; se observa que la mayor parte del tiempo de análisis, la deformación en el punto  $e_y$  tiene signo negativo y en  $e_x$ , es positivo. Este comportamiento se observa también en los resultados numéricos para esta configuración.

La figura 3.1 (A) muestra un comportamiento similar para las curvas de deformación experimentales como numéricas en los puntos  $e_x$  y  $e_y$ . Obsérvese que el cambio de las pendientes de estas curvas se repite favorablemente. También el signo de este parámetro en ambos resultados concuerda en la mayor parte del contacto. Por otra parte las figuras 3.1 (A) y 3.1 (D) presentan valores de deformación unitaria al parecer erróneos.

La tabla 13 muestra los valores máximos de la figura 3.1 (A-I). Los valores en “negrita” mantienen un comportamiento similar en los diferentes especímenes. La configuración 3 presenta diferencias razonables entre sus especímenes. Basándose en los valores de esta última configuración se puede afirmar que en el punto  $e_x$  existe elongación en dirección  $X$ , mientras que en  $e_y$ , dirección  $Y$ , el panel se comprime. Recuérdese que estos valores se reportan en la cara inferior de la plancha. Adicionalmente se observa que numéricamente se obtiene aproximadamente valores de la mitad de los resultados experimentales.

CONF.	Punto	EXPERIMENTAL			Promedio	NUMÉRICO
		Esp.1	Esp.2	Esp.3		Cara Inferior
C1	ex	-960.0	1133.4	-1469.3	-1214.6	-379.0
	ey	1293.5	-793.6	5521.6		446.0
C2	ex	<b>-825.8</b>	<b>-376.9</b>	<b>-356.4</b>	<b>-591.08</b>	<b>-397.0</b>
	ey	240.3	504.7	-820.4	372.5	-429.6
C3	ex	<b>1092.5</b>	<b>1290.9</b>	<b>857.8</b>	<b>975.19</b>	-450.6
	ey	<b>-905.7</b>	<b>-898.4</b>	<b>-837.5</b>	<b>-871.62</b>	<b>-430.3</b>

**Tabla 13: Valores máximos de respuesta numérica y experimental para deformación unitaria en ex y ey en cara inferior de la plancha.**

Las figuras 3.2 y 3.3 presentan el perfil de deflexión a lo largo de los ejes Y y X respectivamente para los tres especímenes de cada configuración en el caso experimental y una curva para el caso numérico. Lo que se observa es una diferencia entre los resultados numéricos y experimentales de 2 a 1. Si se considera que los valores máximos de deformación unitaria indican que el panel experimental se deforma el doble que el panel numérico, lo que se esperaría es que los resultados de perfil de deflexión reflejen el mismo comportamiento, es decir, la curva de deflexión numérica debería llegar hasta un valor máximo igual a la mitad del máximo valor en la curva de deflexión experimental.

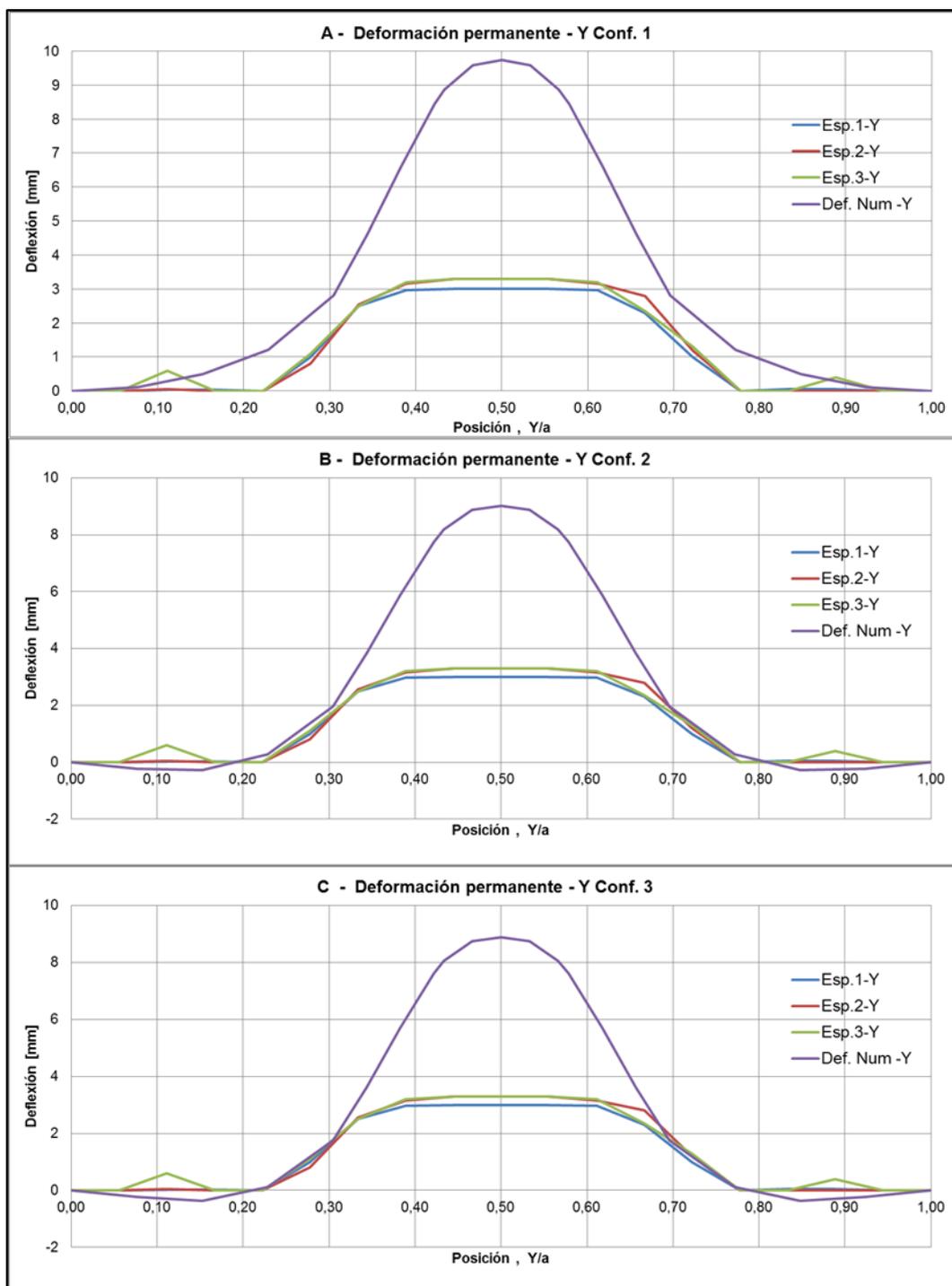


Figura 3.2: Deformación permanente experimental y numérica en el centro del panel a lo largo del eje Y.

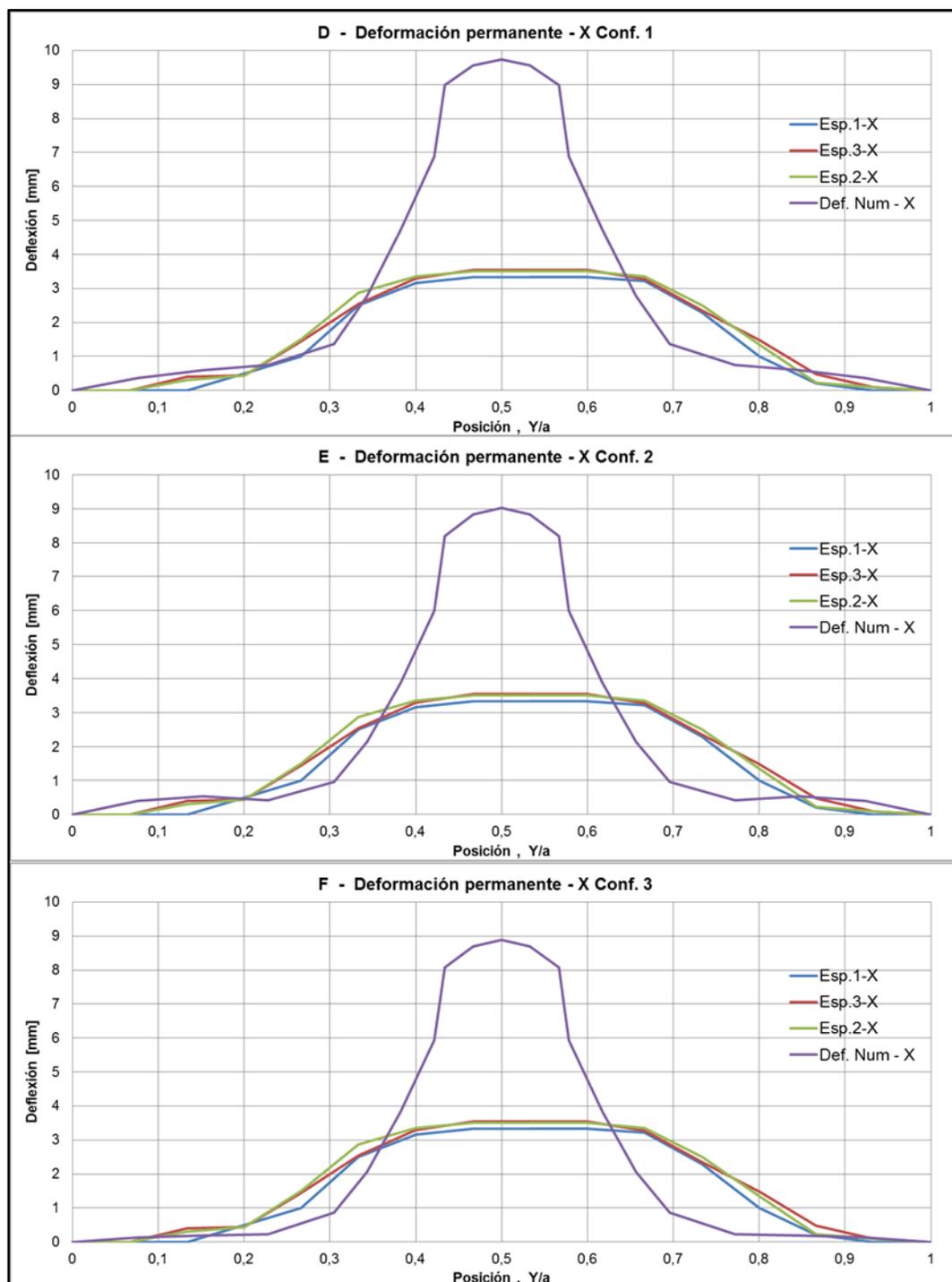


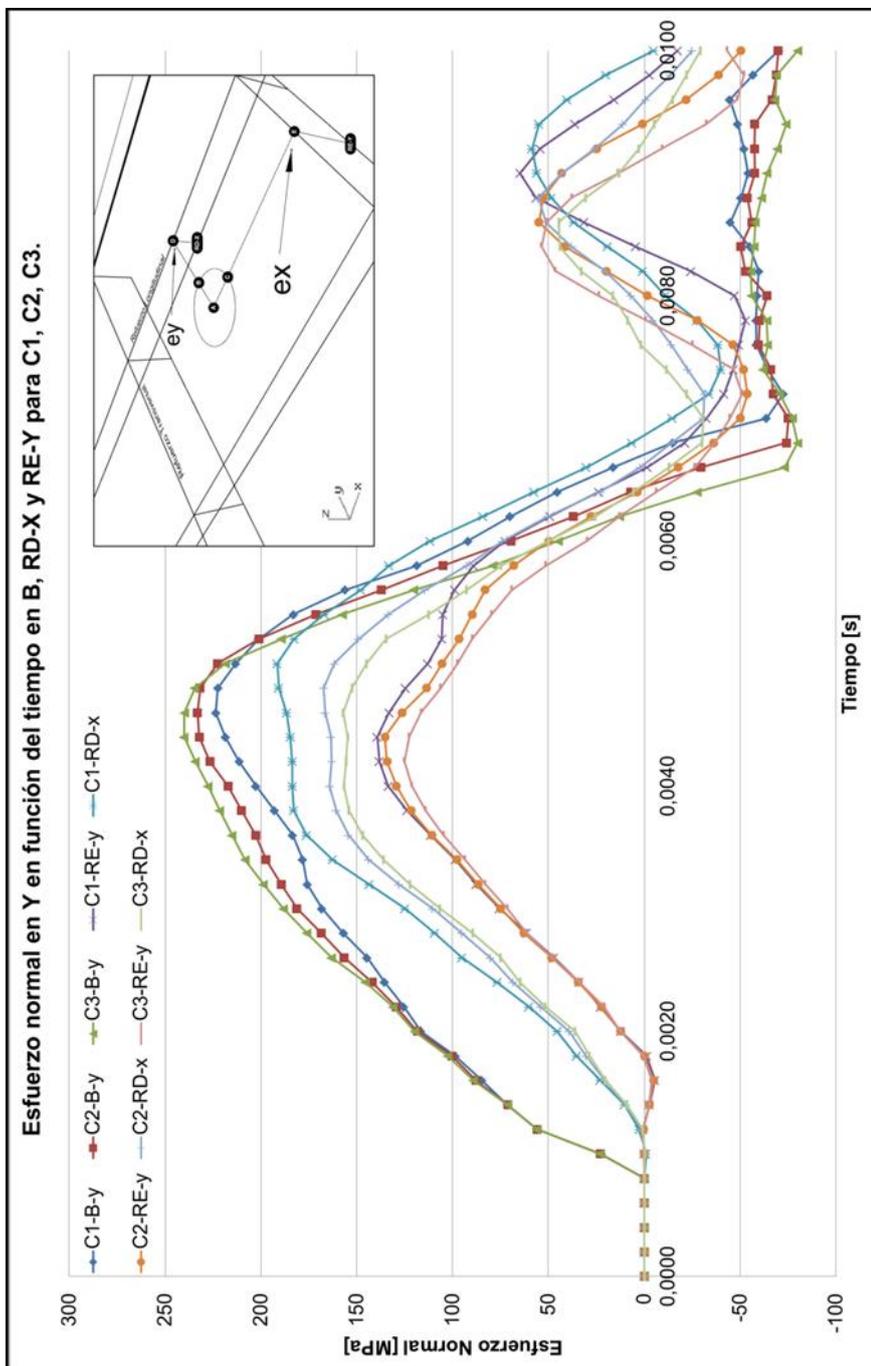
Figura 3.3: Deformación permanente experimental y numérica en el centro del panel a lo largo del eje X.

### 3.2 Influencia de la configuración de refuerzos.

En esta sección se comparan los resultados del impacto, obtenidos a partir de simulación numérica entre las configuraciones. Los parámetros que se analizan son la deflexión remanente y el esfuerzo máximo, ambos parámetros reportados en la zona central del panel y en los refuerzos.

La figura 3.4 presenta los esfuerzos normales en función del tiempo, tomados en el centro del panel (punto *B*) y en los refuerzos. Anteriormente se vio que la dirección en la que actúa el máximo esfuerzo es *Y* en el panel y en la cara inferior de la plancha. La dirección del esfuerzo reportado en el caso de los refuerzos es la que coincide con la disposición de cada uno de estos.

Finalmente la figura 3.5 muestra las curvas de deflexión en función del tiempo en el punto *A*, *RD-X* y *RD-Y* para las tres configuraciones de refuerzos.



**Figura 3.4: Figura 4. Esfuerzo normal en Y en función del tiempo en B, RD-X y RE-Y para C1, C2 y C3.**

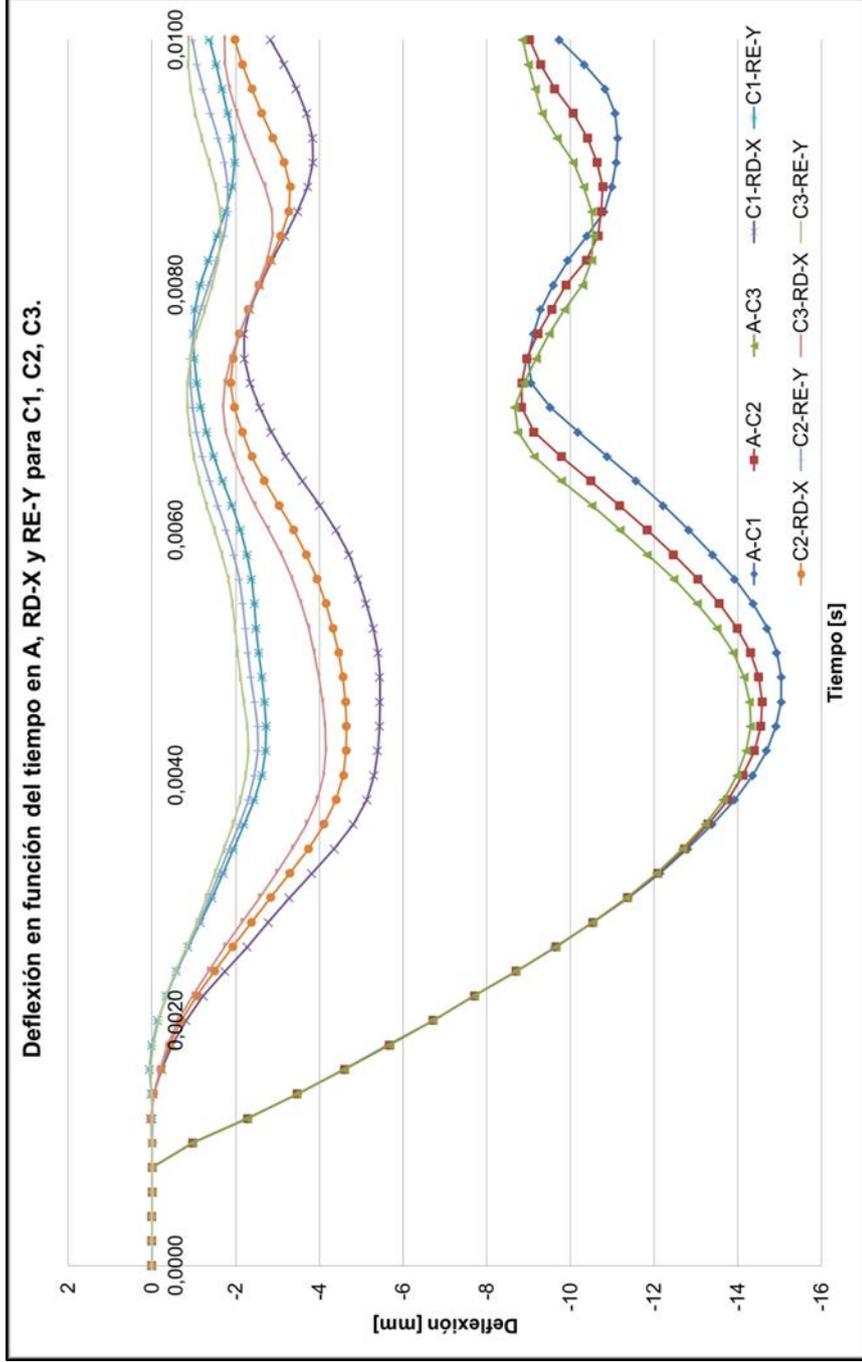


Figura 3. 5: Deflexión en función del tiempo en A, RD-X y RE-Y y para C1, C2 y C3.

El comportamiento observado en la figura 3.4 indica que la configuración de refuerzos C3, que es el más rígido dado que incluye los refuerzos más altos, presenta un mayor nivel de esfuerzo en la zona de contacto; la C1 con los refuerzos más bajos, desarrolla el menor esfuerzo entre las tres configuraciones. Luego, el comportamiento de los refuerzos es inesperado en comparación con la zona central. Los refuerzos con configuración C1 presentan valores de esfuerzo máximo, mayores de la configuración C3. Es decir, el comportamiento es inverso al observado en la zona de contacto. E incluso los esfuerzos en dichos elementos en dirección X son mayores a los de Y. Finalmente luego del contacto en el instante  $t=0.007$ , s se puede observar que en la zona central del panel el material adquiere un esfuerzo de alrededor de  $-70$  MPa. Los refuerzos siguen experimentando tensión y compresión con picos cada vez de menor intensidad.

La figura 3.5 que compara la variación de la deflexión en el tiempo del contacto, corrobora lo mencionado anteriormente. La configuración que desarrolla mayor deflexión en el centro corresponde a C1, ya que esta posee menor rigidez dado que sus refuerzos tienen menor altura. La deflexión de los refuerzos también es mayor para aquellos con configuración C1. Luego del impacto se observa un movimiento vibratorio, en el cual la resistencia en cada dirección hace influencia en la amplitud que alcanza cada curva de deflexión. Finalmente es evidente que todo el panel adquiere una deflexión permanente de aproximadamente  $10$  mm en la zona central y  $2$  mm en los refuerzos. Esta deformación permanente es causa de los esfuerzos residuales que se observan en la figura 3.4.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se han desarrollado simulaciones numéricas del impacto de un golpeador cilíndrico sobre paneles de plancha con tres configuraciones de refuerzos, empleando el módulo Explicit Dynamics del programa ANSYS. Se representaron los parámetros empleados en la experimentación desarrollada por Agila [1] que reporta resultados del impacto sobre paneles reforzados. Dado que se esperaba un comportamiento que sobrepasa el límite elástico del material, se incluyó una curva que describe la relación esfuerzo-deformación más allá del punto de Fluencia. Finalmente se comparan resultados numéricos y experimentales, y, los numéricos obtenidos para las tres configuraciones analizadas.

### Conclusiones

1. Empleando las ecuaciones de S. Timoshenko se puede analizar en forma simplificada el impacto lateral puntual de un cuerpo sobre una plancha, considerando la deformación del golpeador y la vibración de la plancha. El método es útil para mostrar bajo la asunción de linealidad del fenómeno, el comportamiento por impacto de un cuerpo sobre una plancha considerando la vibración de esta última. El método no es eficiente dado que desarrolla la expansión de toda la plancha en función de coordenadas generalizadas, de manera que para la descripción detallada del punto de impacto se debe incluir muchos términos, con desperdicio numérico. Los resultados de deflexión obtenidos fueron similares a los que se lograron con el paquete ANSYS.
2. De los resultados del esfuerzo en las simulaciones numéricas, se esperaba por la curvatura que toma la plancha luego del impacto, valores negativos en la cara del impacto, sin embargo se obtuvo esfuerzos tensionales. Esta

tensión se debe a la elevada deflexión que sufre la plancha, que excede los 10 mm para los valores máximos, lo que a través del término cuadrático, desarrolla esfuerzos normales tensionales. De manera que se concluye que en el fenómeno analizado la no linealidad debida a alta deflexión juega un papel importante en la respuesta obtenida.

3. Se comparó los resultados experimentales disponibles de paneles sometidos a impacto, con los obtenidos numéricamente. Las respuestas reportadas por Agila [1], muestran consistencia en los tres especímenes de la configuración 3, y para este caso, las curvas de deformación unitaria versus tiempo en los puntos de interés muestran un comportamiento similar que las obtenidas numéricamente en este trabajo. De manera que los parámetros seleccionados para desarrollar las simulaciones numéricas son correctos y se podría en el futuro usarlos para nuevos análisis.
4. Se analizó la influencia de la configuración de refuerzos sobre la respuesta por carga de impacto de un panel. Se nota que conforme se incrementa la rigidez de los refuerzos, la deflexión del panel ante un impacto se reduce. Sin embargo debido a este incremento en resistencia a la deformación, los esfuerzos que desarrolla la estructura son mayores. De manera que la selección de los refuerzos para un panel que soporta impacto debe hacerse de manera ponderada entre rigidez y resistencia de refuerzos, y además considerando la resistencia de la plancha a soportar la penetración.
5. Los resultados de las simulaciones numéricas para la velocidad de impacto probada muestran que las tres configuraciones de panel alcanzan un comportamiento plástico, notándose deformaciones unitarias y deflexiones permanentes. Esta respuesta fue detectada incluyendo en los datos de entrada la curva esfuerzo-deformación del material, más allá del límite elástico. Las deflexiones permanentes en promedio alcanzan los 10 mm en la

zona de contacto. También se observa una tensión remanente, que en la plancha central alcanza los  $-70$  MPa. Finalmente se considera que la configuración 1 de refuerzos reacciona de una forma estructuralmente eficiente, ya que presenta menor resistencia a la flexión y absorbe mayor carga. Es decir, el nivel de esfuerzo registrado en esta configuración para esta carga de impacto es menor que las dos configuraciones restantes.

6. La deflexión permanente reportada experimentalmente y la obtenida numéricamente en la zona de contacto en el panel son muy diferentes. Posibles explicaciones para esta diferencia podrían ser la diferencia entre los soportes físicos los empleados en las simulaciones. Sin embargo, se piensa que esto es motivo de trabajo futuro.

### **Recomendaciones**

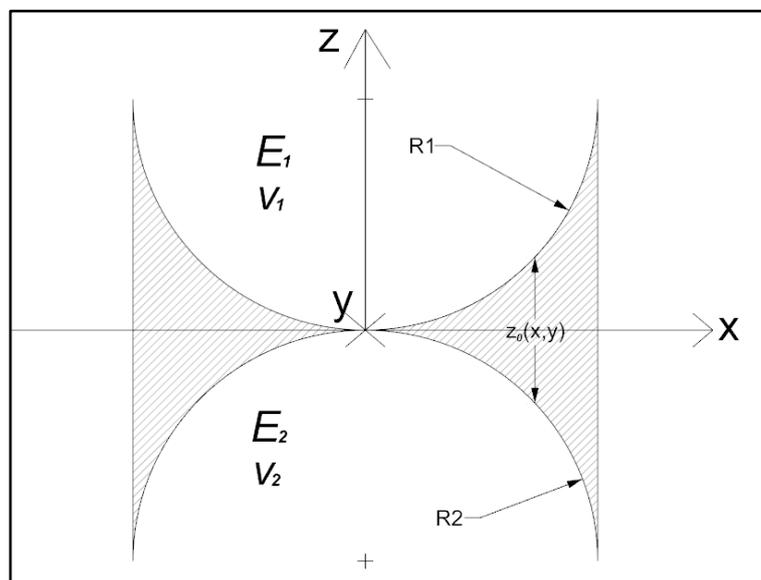
1. El estudio del fenómeno de impacto estructural puede ser abordado en un nivel de pregrado empleando las ecuaciones de S. Timoshenko, bajo asunciones de linealidad del problema. Los resultados obtenidos a partir del programa `PlateImpact` que incluyen la vibración local de la plancha y la deformación del golpeador son satisfactorios. Se logró generar la superficie de la plancha a partir de un archivo de resultados en un software de dibujo asistido por computador. Se recomienda entonces estudiar en detalle las capacidades de este método y la variedad de resultados que se podría obtener en aplicaciones de pregrado.
2. El tiempo de cómputo para hallar la solución en el sistema de análisis dinámico explícito depende directamente del tiempo requerido de simulación y el tamaño del elemento de malla más pequeño en el modelo discreto. Por ello, se recomienda emplear un procedimiento específico que permita definir un tamaño de elemento y tipo de mallado eficientes en el modelo discreto.

## ANEXO A

### LEY DE CONTACTOS DE HERTZ:

En el estudio de impacto entre cuerpos, ya sea flexible-flexible o rígido-flexible es importante determinar las fuerzas de contacto y distribución de esfuerzos en las superficies de contacto. Estos parámetros dependen directamente de la forma de los cuerpos. La ley de contactos de Hertz establece una relación entre la deformación del golpeador y la fuerza  $P$  de contacto. En esta sección se describe el procedimiento de Hertz para llegar a esta relación.

Inicialmente se consideran dos cuerpos esféricos en contacto en un solo punto, este punto es el origen de coordenadas (ver figura (A.1)). Existe una función  $z_0 = (x,y)$  para describir la forma geométrica entre los dos hemisferios antes de aplicar una fuerza de compresión. Cada esfera posee propiedades mecánicas  $E_i$  y  $\nu_i$  y el radio  $R_i$  también puede ser diferente.



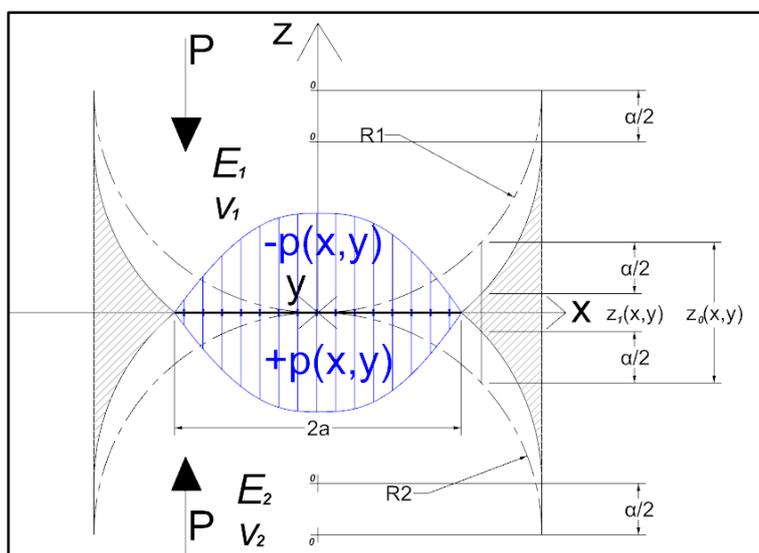
**Figura A. 1. Contacto de esferas previo a deformación.**

La función de forma se presenta en la ecuación (A.1) a continuación.

$$z_0(x,y) = \frac{x^2 + y^2}{2} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (\text{A.1})$$

Si a este esquema se le agrega una fuerza de compresión  $P$  normal al plano  $XY$ , en la zona de contacto se genera una distribución de fuerza  $p(x, y)$  sobre una región circular de diámetro  $2a$  paralela al plano  $XY$ . Considerando que ambos cuerpos son flexibles se espera un desplazamiento  $\alpha/2$  del centro de gravedad o de ambas esferas. Por lo que la función de forma entre los hemisferios  $z_1(x, y)$  quedaría como se muestra en la figura A.2 (ver ecuación (A.2)).

$$z_1(x,y) = z_0(x,y) - \alpha/2 \quad (\text{A.2})$$



**Figura A. 2. Desplazamiento de esferas y nueva función de forma debido a  $P$ .**

Si se considera en la ecuación (A.2) la deformación de las superficies en contacto, se incluyen dos términos a esta expresión. Estos son  $W_i$  que depende de las propiedades mecánicas y la geometría de ambos cuerpos, y, de la intensidad de la fuerza  $P$  ver relación (A.3)

$$W_i = w_i \{ p(x,y), E_i, \nu_i, R_i \} \quad (\text{A.3})$$

En la figura A.2 no se presentan las deformaciones  $w_i$ , lo que se espera es que el material deformado se acumule en la zona de contacto generando en dirección  $z$

una longitud adicional. Finalmente la ecuación (A.2) queda como se muestra a continuación (A.4).

$$z_1 = (x, y) = z_0(x, y) \quad \alpha + w_1 + w_2 \quad (\text{A.4})$$

Una vez definido el esquema general, se cuenta con una función de distribución de presión que depende de los parámetros  $a$  y  $\alpha$ . Se procede a plantear las condiciones de borde.

En la zona de contacto.

$$(x^2 + y^2 < a^2) / \{z(x, y) = 0; p(x, y) \geq 0\} \quad (\text{A.5})$$

Fuera de la zona de contacto.

$$(x^2 + y^2 \leq a^2) / \{p(x, y) = 0\} \quad (\text{A.6})$$

La fuerza de compresión se obtiene al integrar la distribución de presiones en el área de contacto.

$$P = \int p(x, y) \alpha \, d\alpha \quad (\text{A.7})$$

Finalmente asumiendo una distribución de fuerza de un semicírculo apoyado sobre la zona de contacto entre dos esferas se obtiene lo siguiente.

$$p(x, y) = p_0 \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{a^2}} \quad (\text{A.8})$$

$$p_0 = \frac{3P}{2\pi a^2} \quad (\text{A.9})$$

$$a = \left\{ \frac{3\pi P (d_1 + d_2)}{4} \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)} \right\}^{1/3} \quad (\text{A.10})$$

$$\alpha = \left\{ \frac{9\pi^2 P^2 (d_1 + d_2)^2}{16} \frac{(R_1 + R_2)}{R_1 R_2} \right\}^{1/3} \quad (\text{A.11})$$

Donde la expresión para las constantes  $d_i$  se muestra en la ecuación (A.12)

$$d_i = \frac{1 - \nu_i^2}{E_i \pi} \quad (\text{A.12})$$

Para el caso de una esfera que impacta sobre un plano se puede considerar el radio de la esfera 2 como infinito, de esta manera se obtiene.

$$\alpha = \left\{ \frac{3\pi(d_1+d_2)}{4} \frac{1}{\sqrt{R_1}} \right\}^{2/3} P^{2/3} \quad (\text{A.13})$$

Con lo que finalmente se obtiene la expresión para la fuerza de contacto P entre una esfera y un plano.

$$\alpha = kP^{2/3} \quad (\text{A.14})$$

La ecuación (A.14) junto con otras dos expresiones sirve en este trabajo para desarrollar el método de estudio de impacto sobre plancha rectangular, el cual se ejecuta en el programa `Plateimpact`. Para el ejercicio propuesto en el capítulo 1 se emplea una esfera de radio  $0.0439 \text{ cm}$ , con un módulo de Young de  $E_2 = 20e6 \text{ N/cm}^2$  y un coeficiente de Poisson de  $\nu_2 = 0.292$ . La plancha tiene  $E_1 = 7.18e6 \text{ N/cm}^2$ ,  $\nu_1 = 0.33$ . Con lo que se obtiene una constante  $k = 1.54E-05 \text{ cm/N}^{2/3}$ .

## ANEXO B

### RESULTADOS OBTENIDOS CON PLATEIMPACT:

En el capítulo 1 de este trabajo se presentó un método de estudio de la respuesta de una plancha rectangular de espesor constante simplemente soportada en sus bordes, sometida a carga de impacto por una esfera que se deja caer desde una altura  $h$ . En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir del programa `Plateimpact`, el cual ejecuta el método descrito en [5] y proporciona curvas versus tiempo de la deflexión de la plancha  $v$ , la separación entre el centro de gravedad del golpeador y el eje neutro de la plancha  $\alpha$ , y la fuerza de contacto  $P$  que se desarrolla entre los cuerpos. La figura B.1 presenta los datos del ejemplo. La primera línea corresponde a las propiedades mecánicas del material de la plancha, luego la geometría de esta, la gravedad, el peso de la esfera, y la constante de Hertz. El siguiente parámetro es el número de coordenadas generalizadas para la expansión de la función deflexión; finalmente se ingresa el valor de velocidad, el incremento en tiempo para la integración, y el número de intervalos. Todas las medidas de longitud están en centímetros.

7.18e6, 0.33	Young's mod (kg/cm <sup>2</sup> ), Poisson ratio
37.5, 22.5, 0.3, 0.00267	a(cm), b(cm), t(cm), gamma(kg/cm <sup>3</sup> )
980	accel. gravity (cm/seg <sup>2</sup> )
4.32	mball (kg)
1.54e-5	k, constant for ball deformation
4	nj, number of terms for expansions in x and y directions
563.0,0.0000002,50000	vo(cm/s),dt (sec),N

**Figura B. 1. Archivo de datos para ejecutar el programa `Plateimpact`.**

El siguiente paso consiste en ejecutar el programa desde la dirección en el directorio del computador (véase figura B.2).

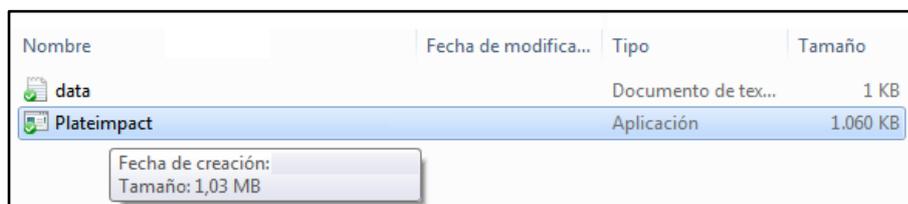


Figura B. 2. Ejecutando el programa Plateimpact.

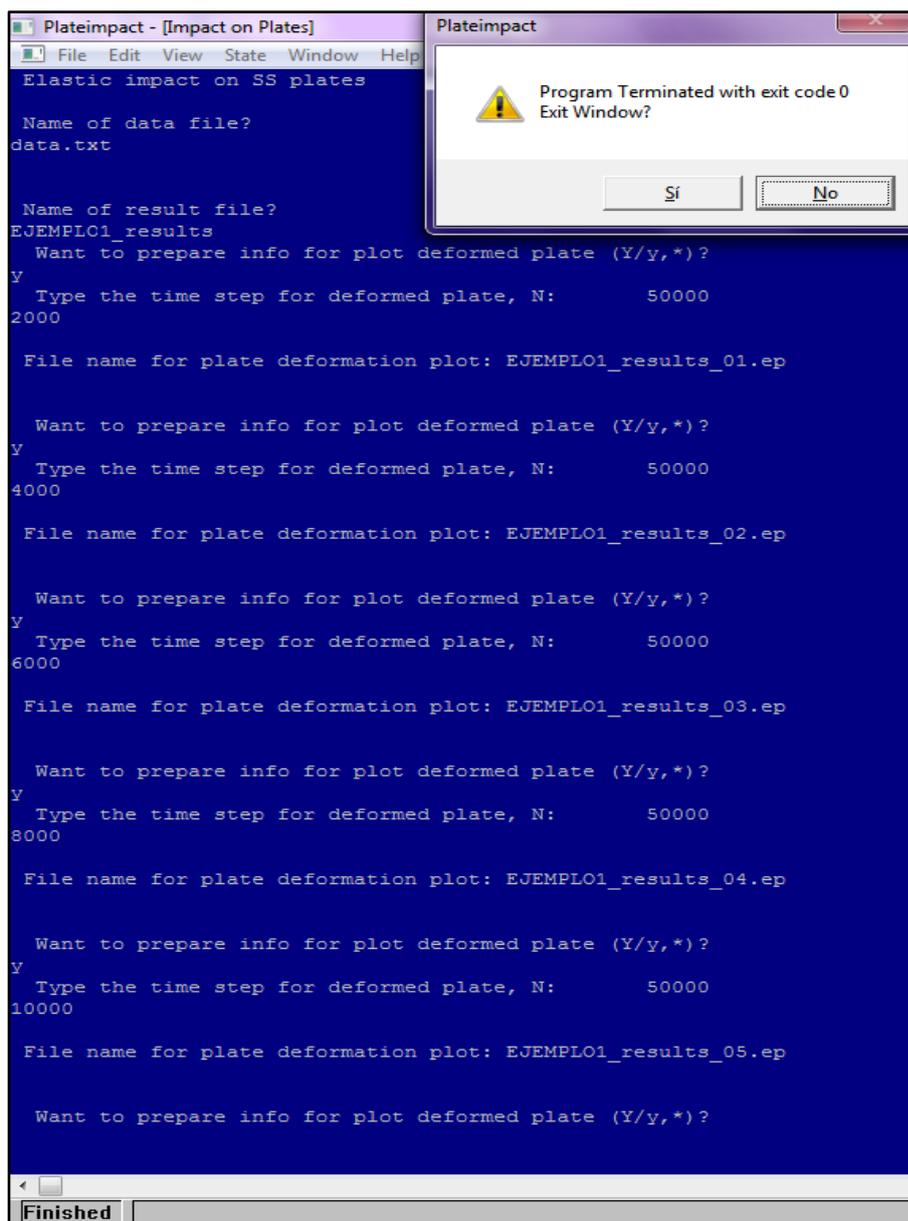
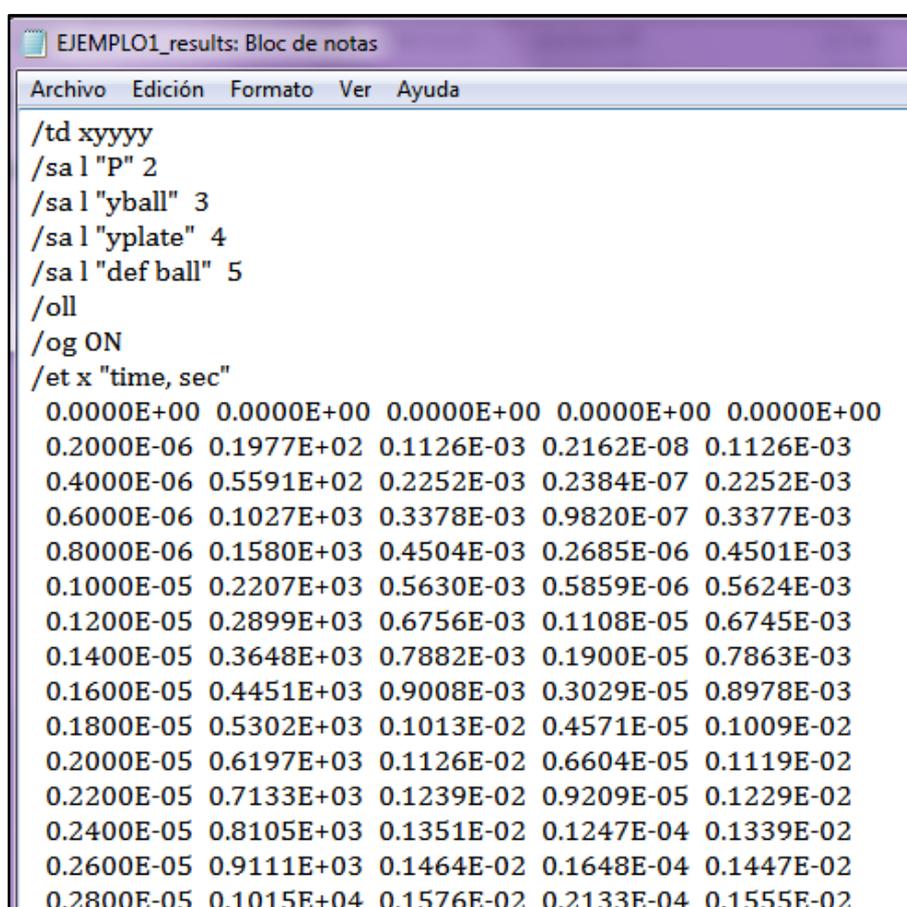


Figura B. 3. Solicitando gráficos para los ciclos 2E3, 4E3, 6E3, 8E3 y 10E3

La figura B.3, presenta cómo se solicitan resultados para diferentes instantes de tiempo o ciclos durante el fenómeno de impacto. Obsérvese que el número máximo de ciclos se estableció en 50000 dentro del archivo de datos. Los resultados se generan en 6 archivos automáticamente, cinco de los cuales contienen la deflexión  $v(x,y)$  en el plano XY para los ciclos de chequeo. Estos se emplean para graficar la plancha deformada. El archivo restante contiene las curvas en función del tiempo de la fuerza de contacto  $P$ , el desplazamiento de la esfera  $d$ , la deflexión de la plancha  $v$ , y la distancia entre el centro de gravedad de la esfera y el eje neutro de la plancha  $\alpha$ , (Véase la figura B.4).



```

EJEMPLO1_results: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
/td xyyyy
/sal "P" 2
/sal "yball" 3
/sal "yplate" 4
/sal "def ball" 5
/oll
/og ON
/et x "time, sec"
0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00
0.2000E-06 0.1977E+02 0.1126E-03 0.2162E-08 0.1126E-03
0.4000E-06 0.5591E+02 0.2252E-03 0.2384E-07 0.2252E-03
0.6000E-06 0.1027E+03 0.3378E-03 0.9820E-07 0.3377E-03
0.8000E-06 0.1580E+03 0.4504E-03 0.2685E-06 0.4501E-03
0.1000E-05 0.2207E+03 0.5630E-03 0.5859E-06 0.5624E-03
0.1200E-05 0.2899E+03 0.6756E-03 0.1108E-05 0.6745E-03
0.1400E-05 0.3648E+03 0.7882E-03 0.1900E-05 0.7863E-03
0.1600E-05 0.4451E+03 0.9008E-03 0.3029E-05 0.8978E-03
0.1800E-05 0.5302E+03 0.1013E-02 0.4571E-05 0.1009E-02
0.2000E-05 0.6197E+03 0.1126E-02 0.6604E-05 0.1119E-02
0.2200E-05 0.7133E+03 0.1239E-02 0.9209E-05 0.1229E-02
0.2400E-05 0.8105E+03 0.1351E-02 0.1247E-04 0.1339E-02
0.2600E-05 0.9111E+03 0.1464E-02 0.1648E-04 0.1447E-02
0.2800E-05 0.1015E+04 0.1576E-02 0.2133E-04 0.1555E-02

```

Figura B. 4. Archivo de resultados de los diferentes parámetros de interés versus el tiempo.

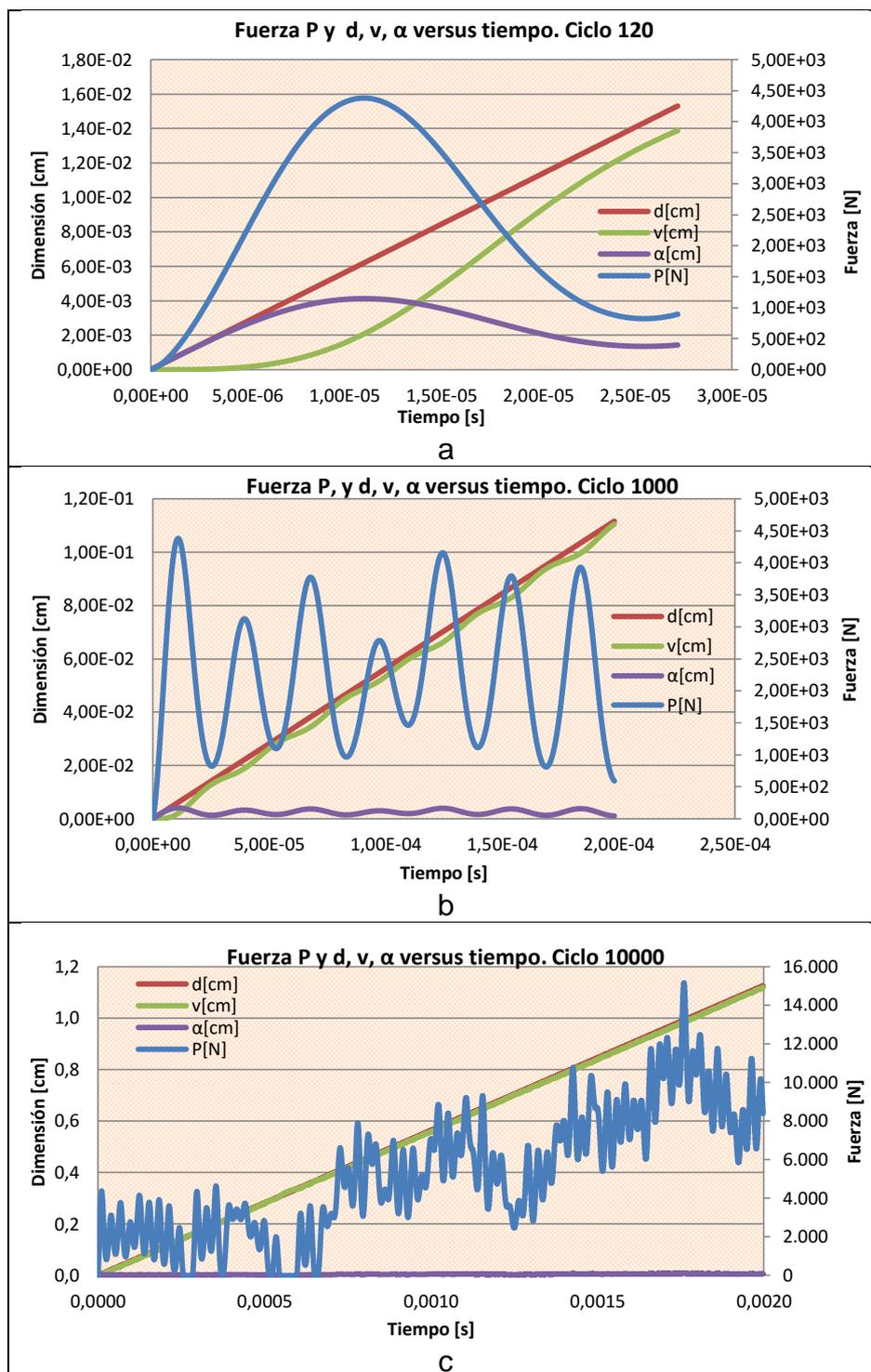
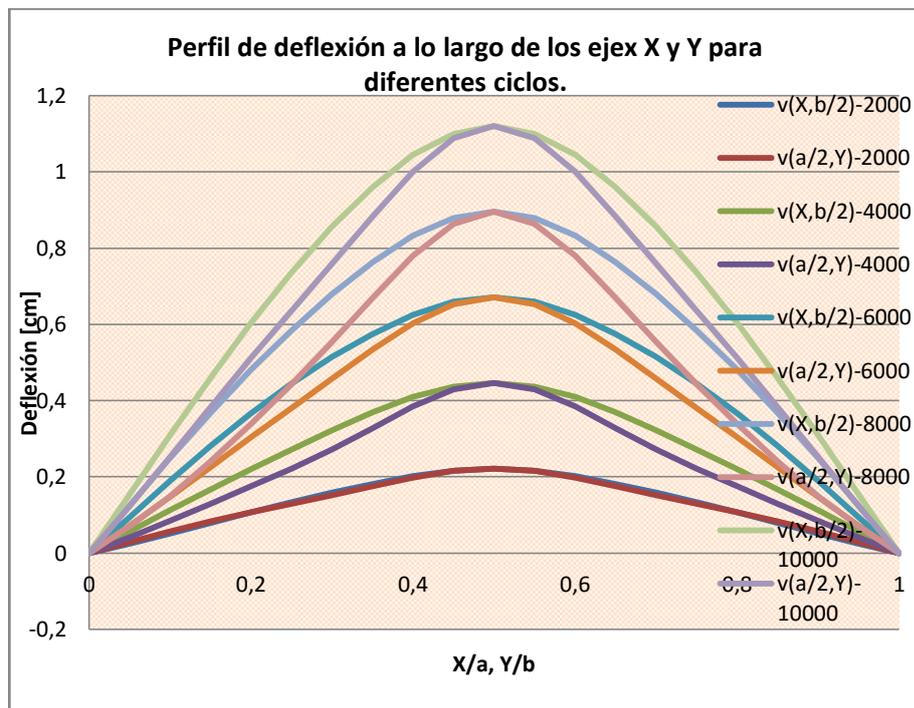


Figura B. 5. Resultados de PlateImpact para diferentes ciclos

La figura B.5 (a-c) muestra las curvas de fuerza de contacto  $P$ , deflexión de la plancha  $v$ , desplazamiento de la esfera  $d$  y deformación de la esfera  $\alpha$ , para diferentes ciclos, entre ellos tenemos  $c=120$ ,  $c=1000$  y  $c=10000$ . Obsérvese en la sección (a) de esta figura, que la deflexión de la plancha no inicia con el contacto, mientras que la deformación en el golpeador parece ser un efecto de vibración que se prolonga después del impacto, ya que en la sección (b) se aprecia que este movimiento es periódico y su amplitud es pequeña. Este movimiento periódico también se observa en la deflexión de la plancha, aunque esta sí se desplaza verticalmente en el tiempo. Esto se debe a que el análisis es lineal. Nótese también que el desplazamiento de la esfera no se ve afectado por este efecto vibratorio, debido a que el efecto es local concentrado en la zona de contacto.

La sección (c) de la figura B.5 muestra que la deflexión de la plancha alcanza  $-1.12 \text{ cm}$  en el ciclo 10000. Sin embargo en este instante de tiempo no hay evidencia de efectos de respuesta razonables. Es decir que, es posible que la sección (a) de esta figura contenga todo el efecto del impacto y la respuesta de la plancha.

Finalmente en la figura B.6 se presenta el perfil de deflexión de la plancha para ciertos ciclos reportados en la simulación con el programa `Plateimpact`. Estos corresponden a los ciclos  $2E+3$ ,  $4E+3$ ,  $6E+3$ ,  $8E+3$  y  $10E+3$ . Nótese que para el último ciclo reportado, el valor de deflexión de la plancha coincide con el que se muestra en la figura B.5 (c).

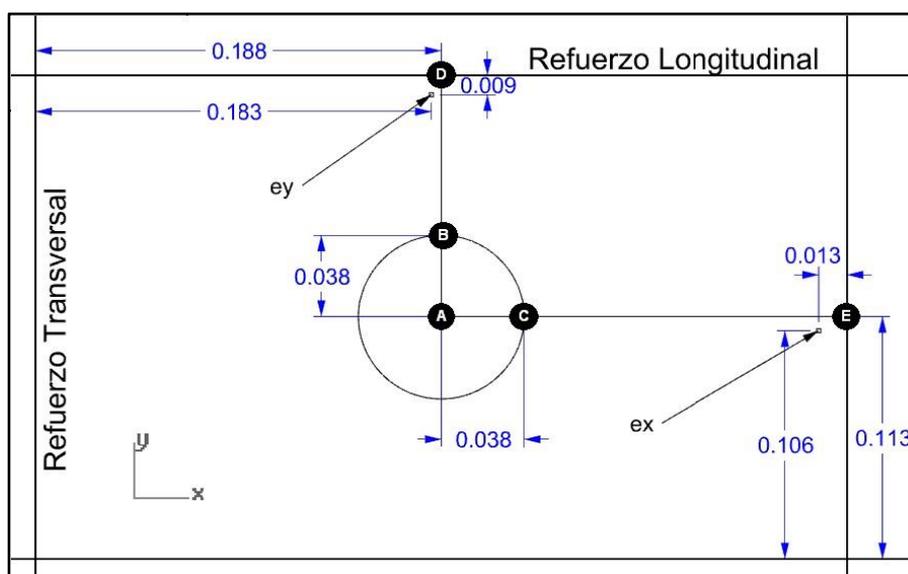


**Figura B. 6 Perfil de deflexión a lo largo de los ejes X y Y para los ciclos 2E+3, 4E+3, 6E+3, 8E+3 y 10E+3**

## ANEXO C

### RESULTADOS DE SIMULACIÓN NUMÉRICA:

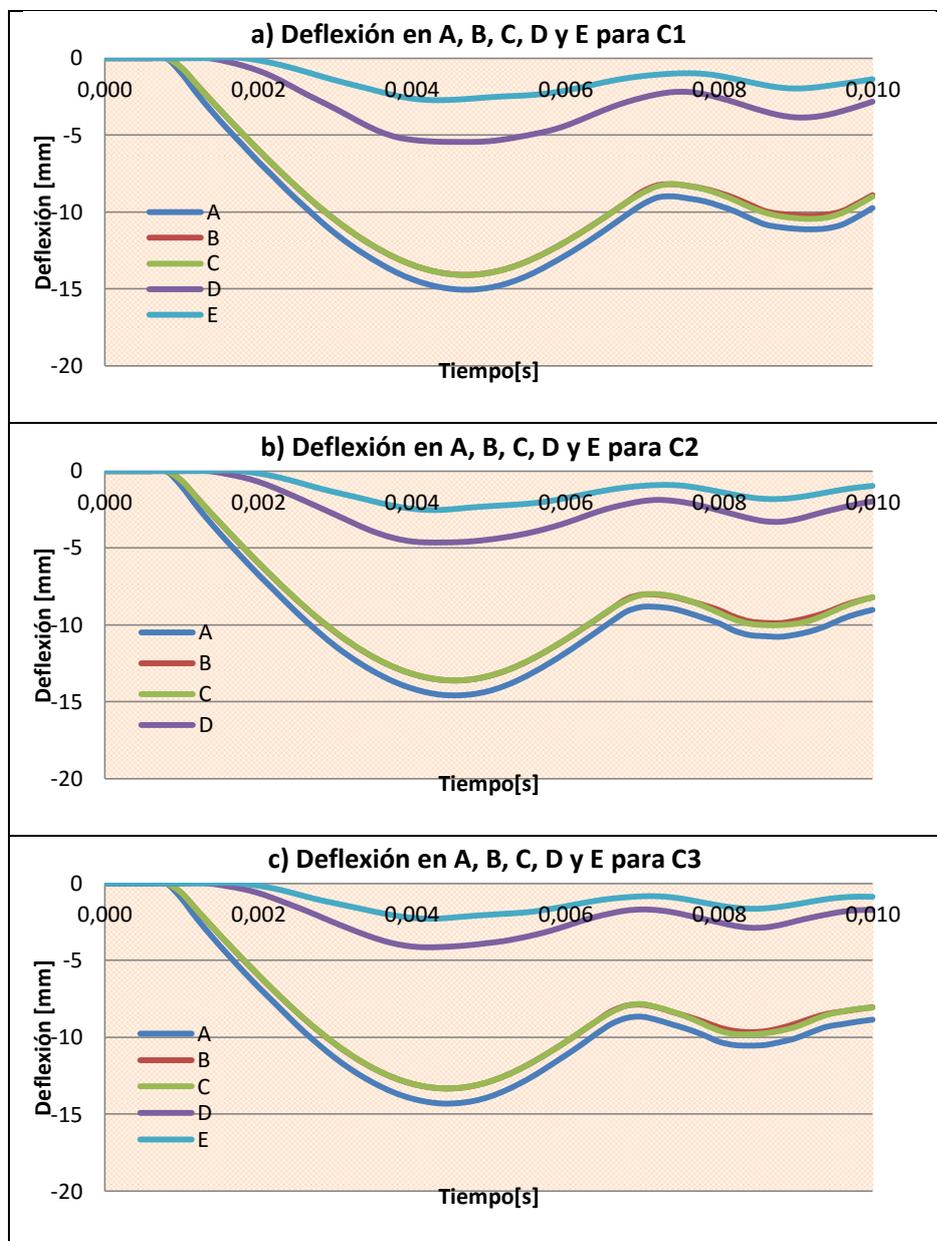
En esta sección se detallan los resultados obtenidos mediante la simulación numérica con el programa ANSYS. Se evalúan tres configuraciones de refuerzos para un panel estructural sometido a impacto. Las características y parámetros empleados en la simulación se pueden ver en el capítulo 2 de este documento y el desarrollo paso a paso de la simulación se presenta en el anexo D. La figura C.1 muestra los puntos de interés en el panel estructural, en donde se reporta deflexión, deformación unitaria y esfuerzo normal.



**Figura 1.1 Puntos de interés donde se reportan resultados en la simulación.**

Tanto en el caso del esfuerzo normal como en la deformación los valores en un mismo punto pueden variar en las caras superior e inferior de la plancha. Aquí se presentan los valores máximos reportados en cada punto y se indica la cara a la que estos valores corresponden. También existe una forma de deformación unitaria que se debe reportar, esta es la deformación unitaria plástica equivalente.

### Deflexión de la plancha.



**Figura C. 1. Deflexión de los puntos A, B, C, D y E para las tres configuraciones.**

Obsérvese que la configuración 1 desarrolla la mayor deflexión.

### Esfuerzo normal.

A continuación se muestran los esfuerzos para la configuración 2 en diferentes puntos de interés.

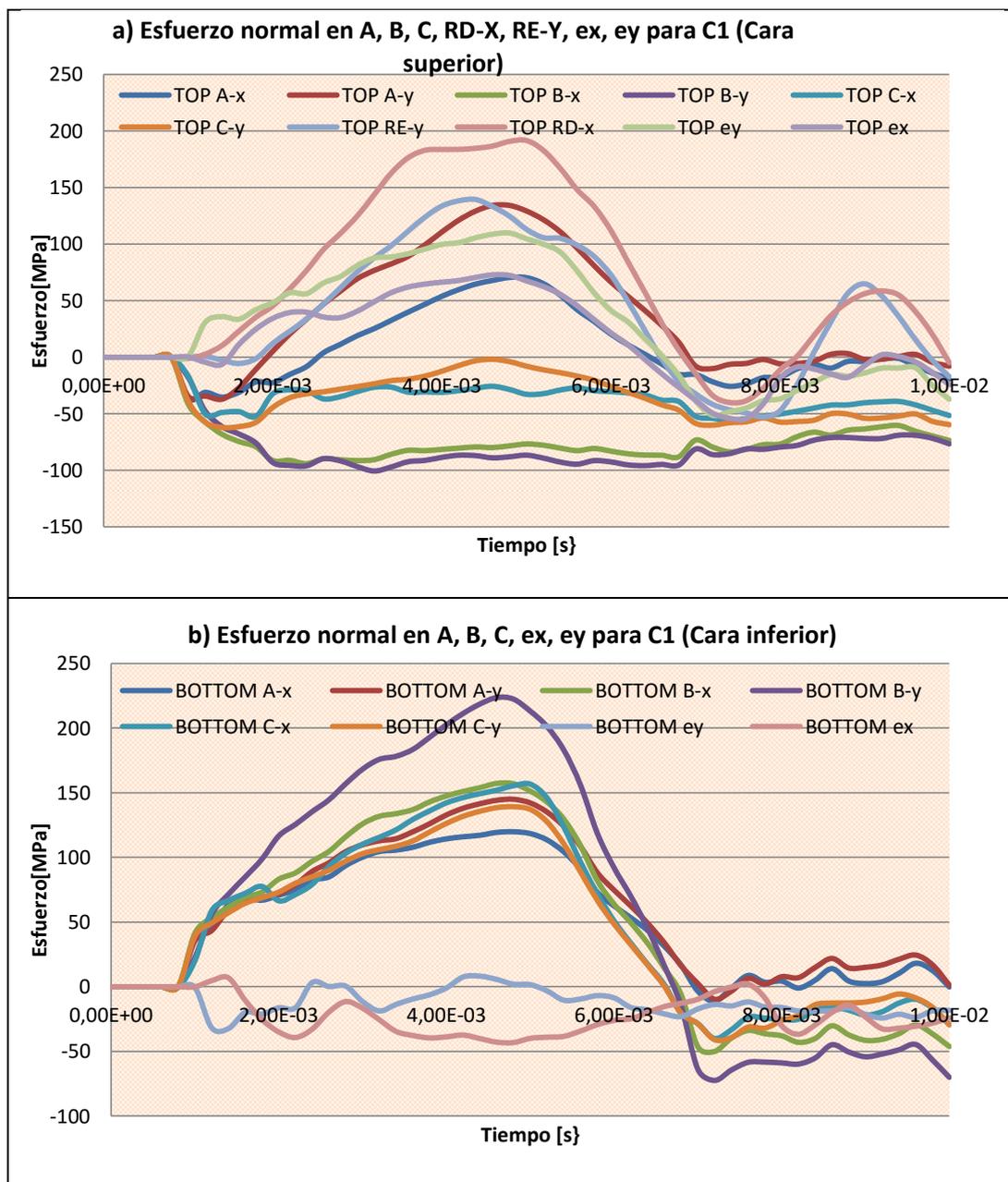
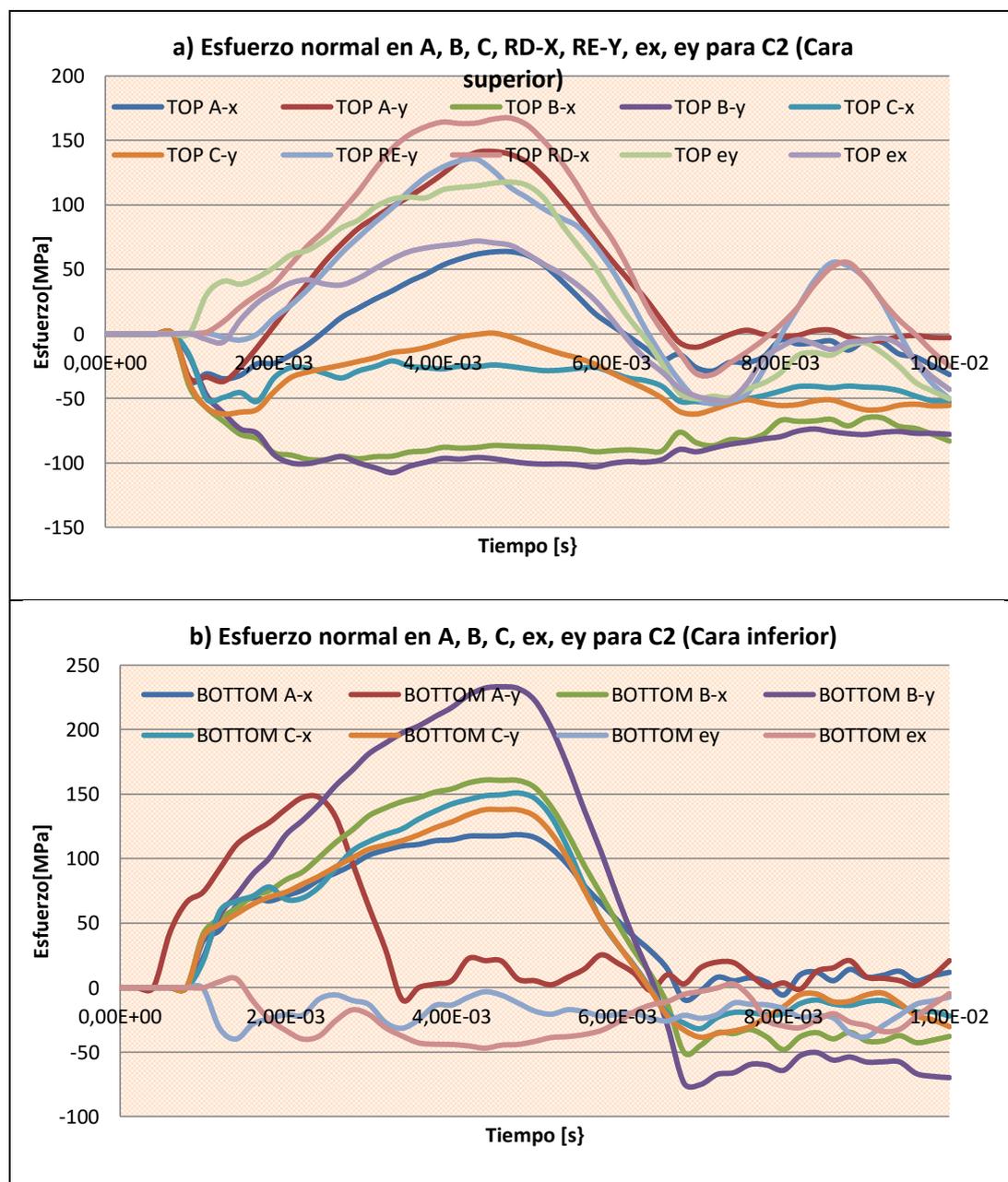


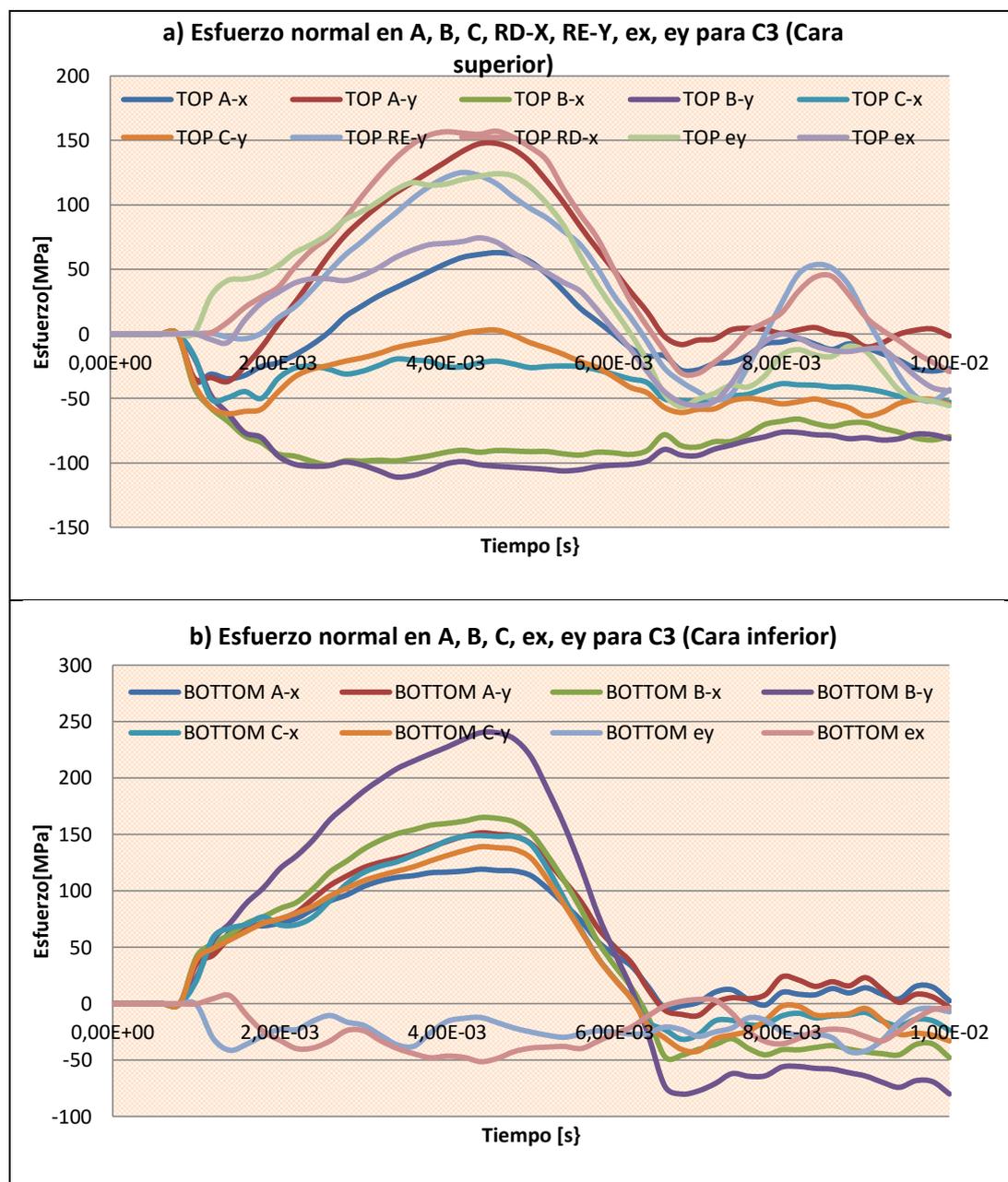
Figura C. 2. Esfuerzo normal en diferentes puntos de interés, a) cara superior, b) cara inferior, para la configuración 1.

A continuación se muestran los esfuerzos para la configuración 2 en diferentes puntos de interés.



**Figura C. 3. Esfuerzo normal en diferentes puntos de interés, a) cara superior, b) cara inferior, para la configuración 2.**

A continuación se muestran los esfuerzos para la configuración 3 en diferentes puntos de interés.



**Figura C. 4.** Esfuerzo normal en diferentes puntos de interés, a) cara superior, b) cara inferior, para la configuración 3.

### Deformación unitaria.

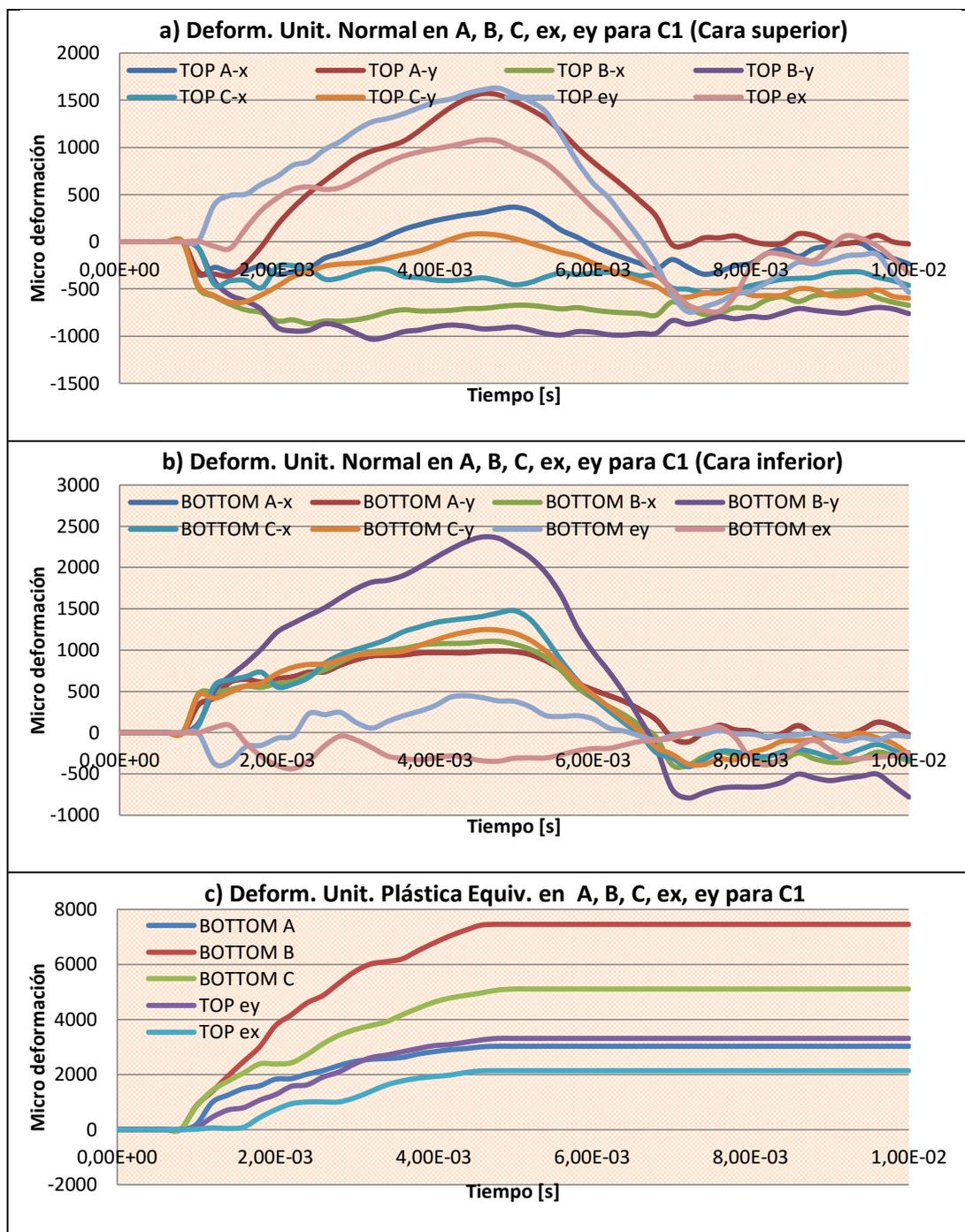
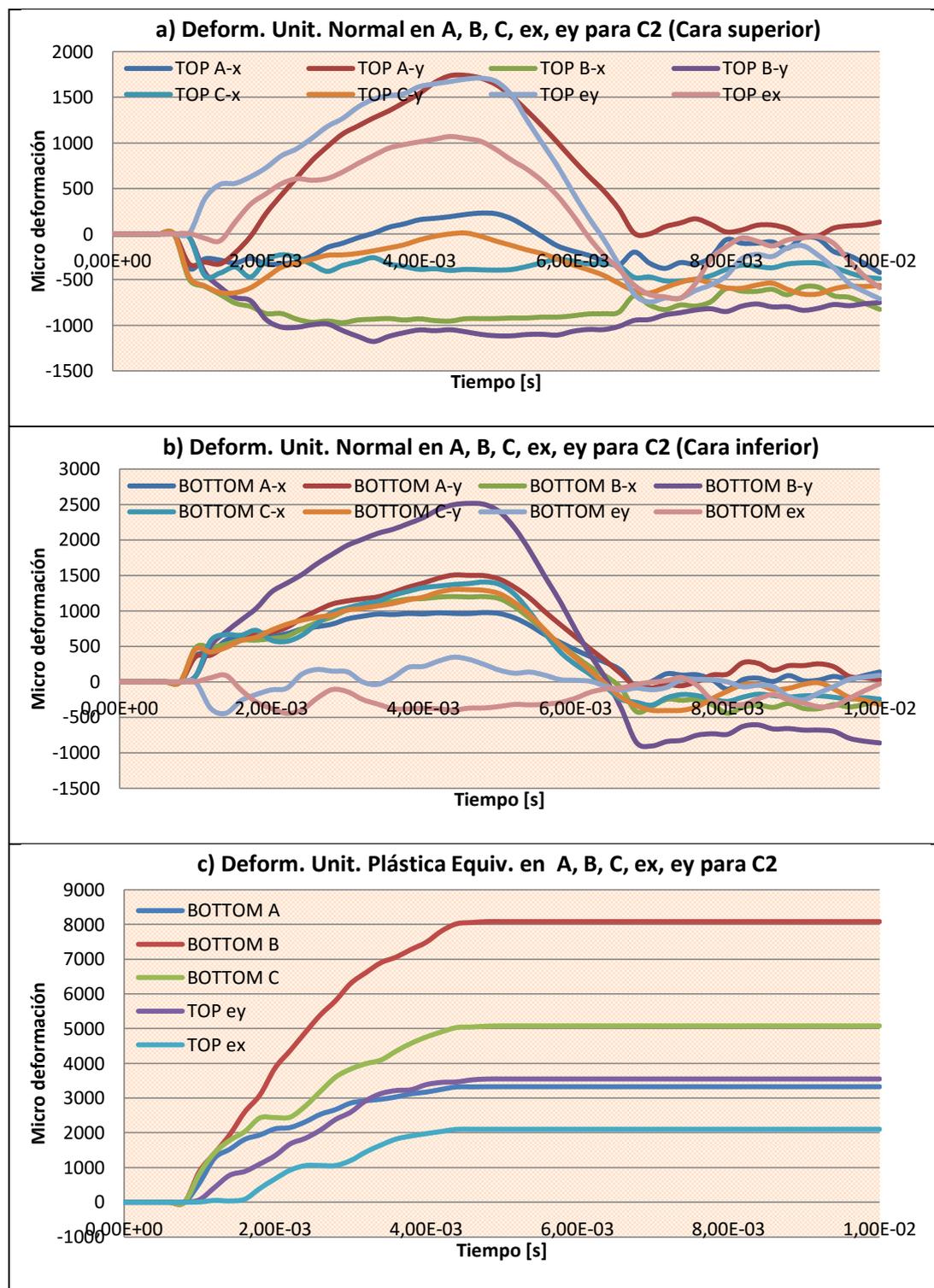
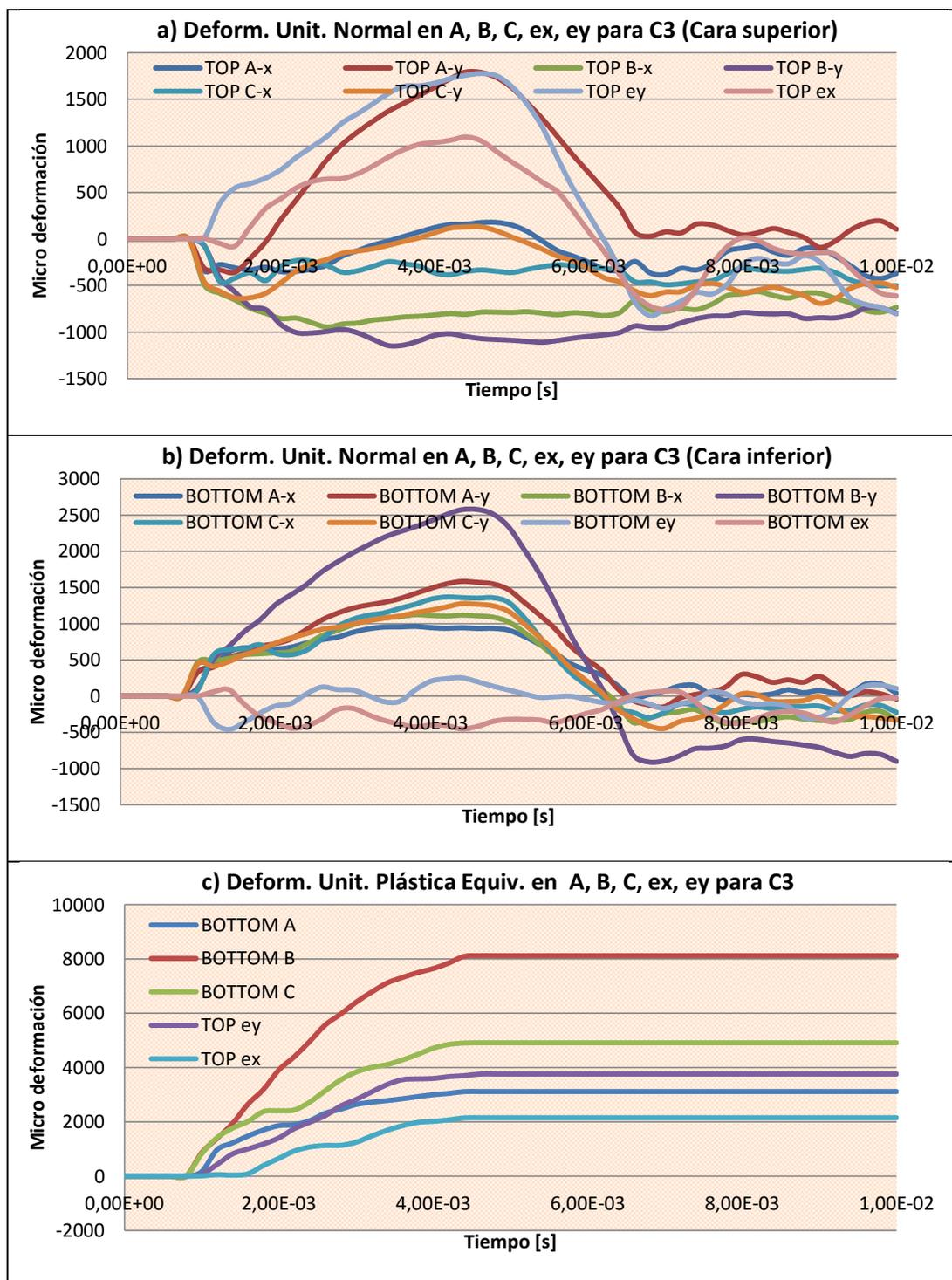


Figura C. 5. Deformación unitaria normal (a y b) y plástica equivalente (c), en diferentes puntos y ambas caras de la plancha para la configuración 1.



**Figura C. 6. Deformación unitaria normal (a y b) y plástica equivalente (c), en diferentes puntos y ambas caras de la plancha para la configuración 2.**



**Figura C. 7. Deformación unitaria normal (a y b) y plástica equivalente (c), en diferentes puntos y ambas caras de la plancha para la configuración 3.**

## ANEXO D

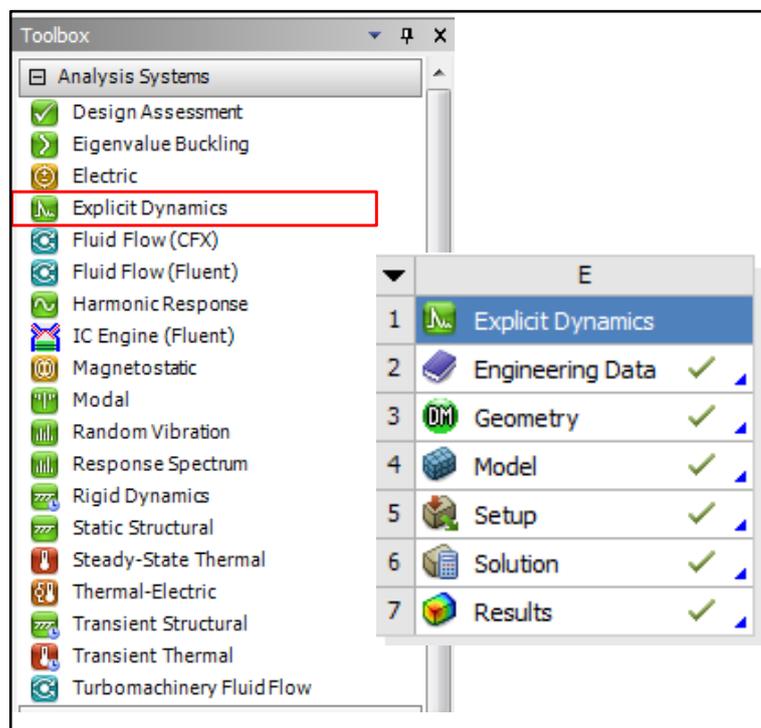
### **PROCESO DE SIMULACIÓN NUMÉRICA PARA MODELAR FENÓMENOS DE IMPACTO USANDO ANSYS:**

En esta sección se presentan los detalles del desarrollo de la simulación numérica en el sistema dinámico explícito de ANSYS Workbench paso a paso. Se inicia con la definición de un material con una curva de esfuerzo deformación que permite obtener una respuesta plástica. Luego, se define la geometría del modelo en el módulo de diseño de ANSYS. Entonces se procede con la discretización del modelo y se definen los parámetros del análisis. Finalmente se especifican el tipo de resultados que se requieren y se obtiene una solución.

A continuación se presentan una serie de figuras que describen el proceso a seguir paso a paso.

#### **Sistemas de Análisis.**

El sistema de análisis que se emplea en este trabajo es el dinámico explícito, ya que permite determinar la respuesta dinámica de fenómenos que suceden en un corto instante de tiempo en el orden de una milésima de segundo, como por ejemplo el impacto. La figura D.1 presenta los sistemas de análisis disponibles en la caja de herramientas de ANSYS. También se muestra el módulo del sistema de análisis explícito dinámico (en este caso E) y los componentes que lo conforman. El flujo de trabajo se organiza según los componentes del módulo E.



**Figura D. 1. Sistemas de Análisis disponibles en ANSYS.**

El módulo E, cuenta con varios componentes que se ordenan según la secuencia del desarrollo de la simulación. Los componentes 2, 3 y 4 pueden editarse en interfaces diferentes, los componentes 5, 6 y 7 son editados dentro del interfaz del componente 4. Para acceder al interfaz de cada componente se debe hacer doble clic sobre ese ícono. La denominación de estas interfaces es biblioteca de materiales (*Engineering Data*) para el componente 2, modelador de diseño (*Design Modeler*) para el componente 3 y modelo mecánico (*Model Mechanical*) para el componente 4.

#### **Creación de propiedades plásticas para un material.**

Al hacer doble clic en *Engineering Data* se abre la biblioteca de materiales. Por defecto el programa asigna un material estándar al módulo de trabajo (en este caso módulo E). Sin embargo ANSYS cuenta con una gama de materiales según las necesidades del fenómeno que se desea simular. También se puede crear un

material con propiedades personalizadas. La figura D.2 a continuación muestra el interfaz de la biblioteca de materiales.

The screenshot displays the software interface for material management. On the left is a 'Toolbox' with categories like Physical Properties, Linear Elastic, Hyperelastic, etc. The main window shows an 'Outline of Schematic A2: Engineering Data' with a table listing materials. Row 3 is 'Structural Steel'. Below this, a 'Properties of Outline Row 3: Structural Steel' window is open, showing a table of material properties.

	A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data		Source		Description
2	Material				
3	Structural Steel				Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
*	Click here to add a new material				

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	7850	kg m <sup>-3</sup>		
3	Isotropic Elasticity				
4	Derive from	Young'...			
5	Young's Modulus	2E+11	Pa		
6	Poisson's Ratio	0,3			
7	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa		
8	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa		
9	Specific Heat	434	J kg <sup>-1</sup> ...		

**Figura D. 2. Biblioteca de materiales.**

Obsérvese que existe un material asignado por defecto y sus características se observan en la ventana de propiedades para el acero estructural. En la parte izquierda en la caja de herramientas están disponibles las diferentes propiedades que pueden ser asignadas a un material existente o a uno nuevo. Al hacer clic en la celda debajo del acero estructural se crea un nuevo material, al cual se le deben asignar las propiedades según se desee.

En este trabajo se debe agregar propiedades plásticas al material de aluminio de construcción naval AL 5086-H32. Para ello se despliega la pestaña de propiedades de plasticidad y se selecciona la que más se acerque a lo que se desea. La figura D.3 muestra las propiedades asignadas al nuevo material, observese que hay un signo de interrogación junto a cada propiedad, esto se debe a que no se han ingresado los valores numéricos que se requieren, a la izquierda se encuentran

celdas, cuyo color es amarillo. Estas son las celdas donde se deben ingresar los valores para densidad, coeficiente de Poisson y módulo de Young, el color amarillo de la celda cambiara a blanco cuando se ingrese el valor.

The screenshot shows the software interface for assigning properties to a new material. The 'Toolbox' on the left lists various material models. The 'Outline of Schematic A2: Engineering Data' window shows a table with columns A, B, C, D, and E. Row 4 is highlighted, showing 'AL 5086-H32' selected. Below it, the 'Properties of Outline Row 4: AL 5086-H32' window is open, showing a table with columns A, B, C, D, and E. Row 2 is highlighted, showing 'Density' with a value of 2670 and unit 'kg m^-3'.

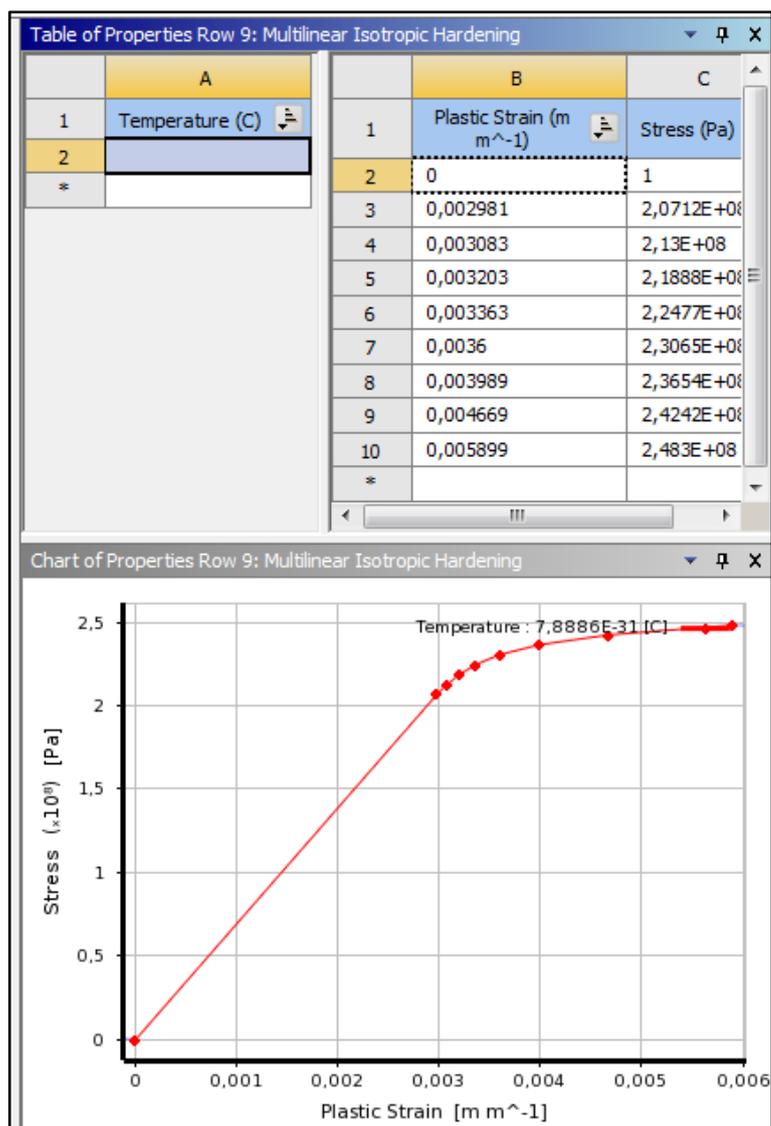
**Figura D. 3. Propiedades asignadas al material nuevo.**

Properties of Outline Row 4: AL5086-H32				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Density	2670	kg m <sup>-3</sup>	
3	Isotropic Elasticity			
4	Derive from	Young's Modulu...		
5	Young's Modulus	7,18E+10	Pa	
6	Poisson's Ratio	0,33		
7	Bulk Modulus	7,0392E+10	Pa	
8	Shear Modulus	2,6992E+10	Pa	
9	Multilinear Isotropic Hardening	Tabular		
10	Scale	1		
11	Offset	0	Pa	

**Figura D. 4. Propiedades ingresadas para el nuevo material.**

Obsérvese que la densidad se ingresa por defecto. La propiedad seleccionada corresponde a comportamiento multilinear isotrópico, para la cual se requiere

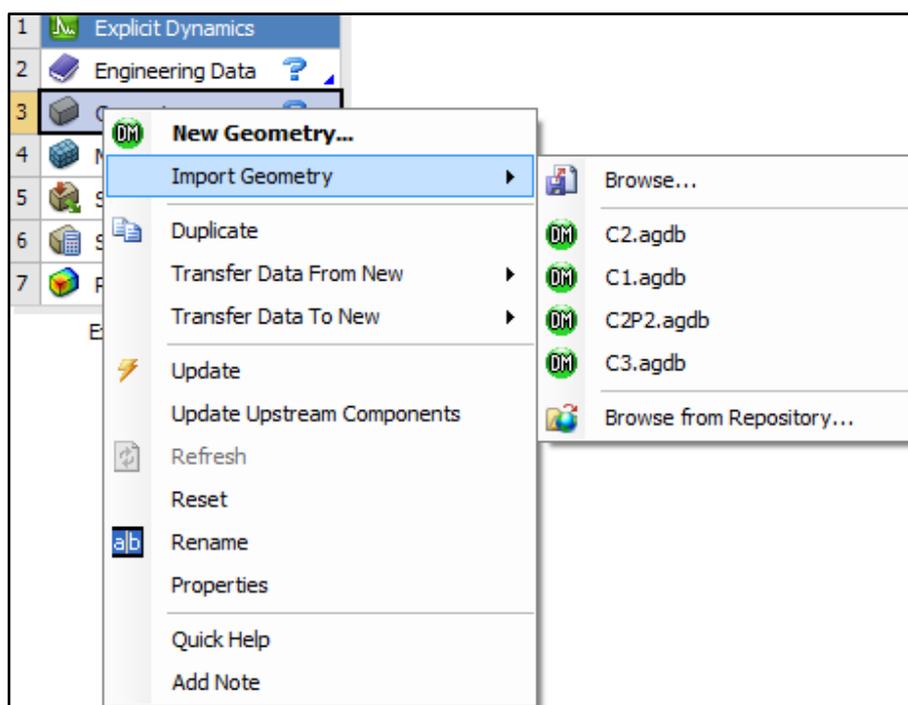
ingresar una tabla de datos con los valores de la curva de esfuerzo deformación (No se deben ingresar más de 10 pares ordenados). La figura D.4 muestra la tabla de valores para la curva de esfuerzo deformación y el correspondiente gráfico. En esta curva el primer punto siempre es el origen (el programa no acepta un valor de esfuerzo nulo, por eso se coloca 1). El segundo punto en la curva corresponde al límite de elasticidad para este material.



**Figura D. 5. Tabla con pares ordenados de esfuerzo deformación y curva de esfuerzo deformación multilineal para el Al5086-H32.**

### Geometría del modelo.

El componente 3 del proceso de simulación corresponde a la geometría. Al hacer clic derecho sobre esta celda en el módulo ANSYS permite crear una geometría empleando el modelador de diseño o también permite importar una geometría.



**Figura D. 6. Opciones para la geometría.**

La figura D.6 muestra las opciones para la geometría, aquí se puede crear una geometría empleando el módulo de diseño o importar una geometría con un formato específico admitido por ANSYS. Sin embargo, suelen presentarse inconvenientes en la geometría importada. SOLIDWORKS es uno de los programas de diseño que tiene gran compatibilidad con ANSYS, y las geometrías importadas desde este sistema CAD son representadas sin inconvenientes. En este trabajo se emplea el módulo de diseño de ANSYS para crear la geometría. Para acceder solo debe hacerse doble clic sobre la pestaña “nueva geometría”. La figura D.7 muestra el interfaz de este módulo de diseño. El árbol de trabajo permite trabajar con planos,

sobre estos se hacen gráficos en 2D, luego se crean superficies y estas pueden ser extruidas y modificadas con los diferentes operadores. Es decir que se puede crear todo tipo de cuerpo tridimensional.

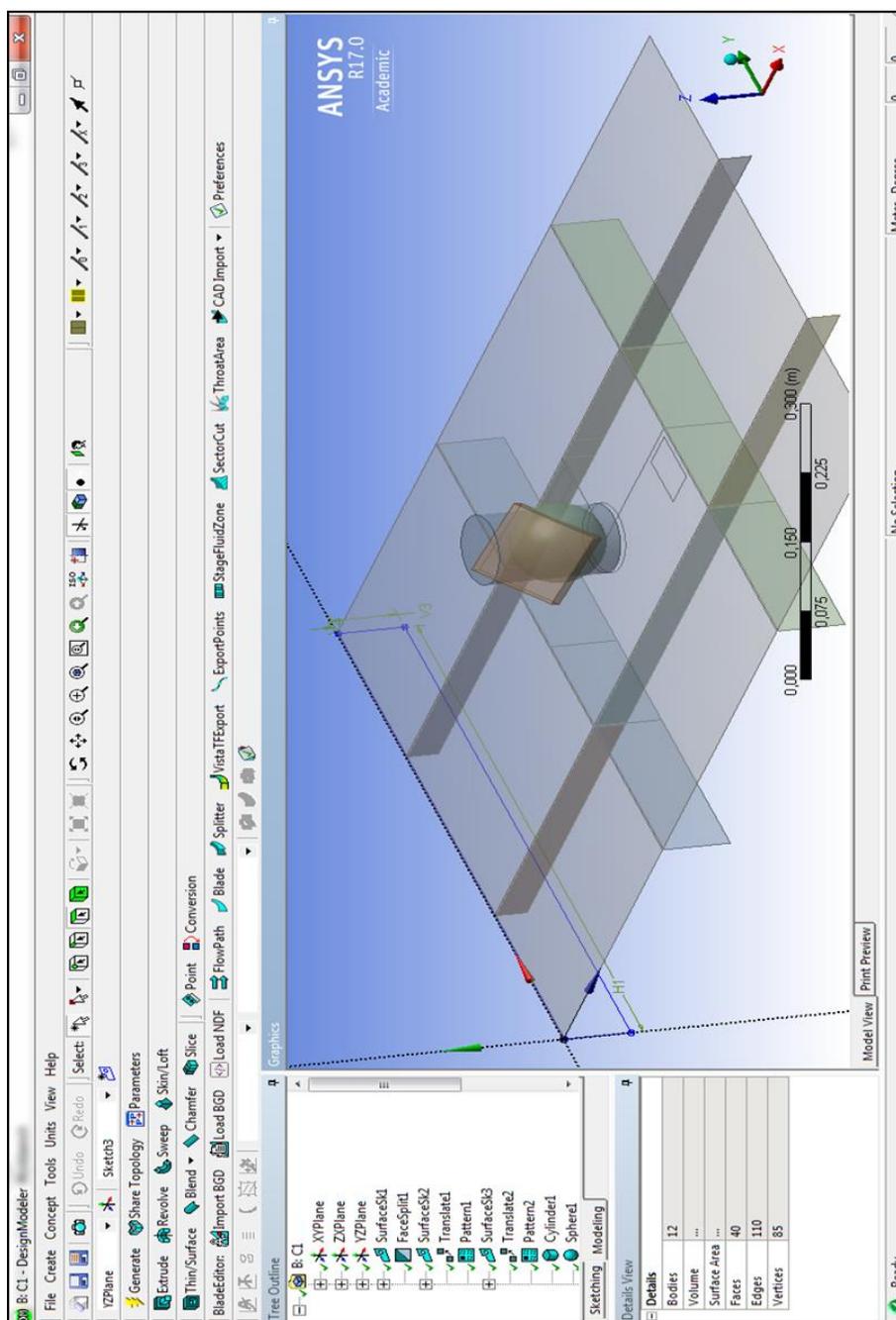
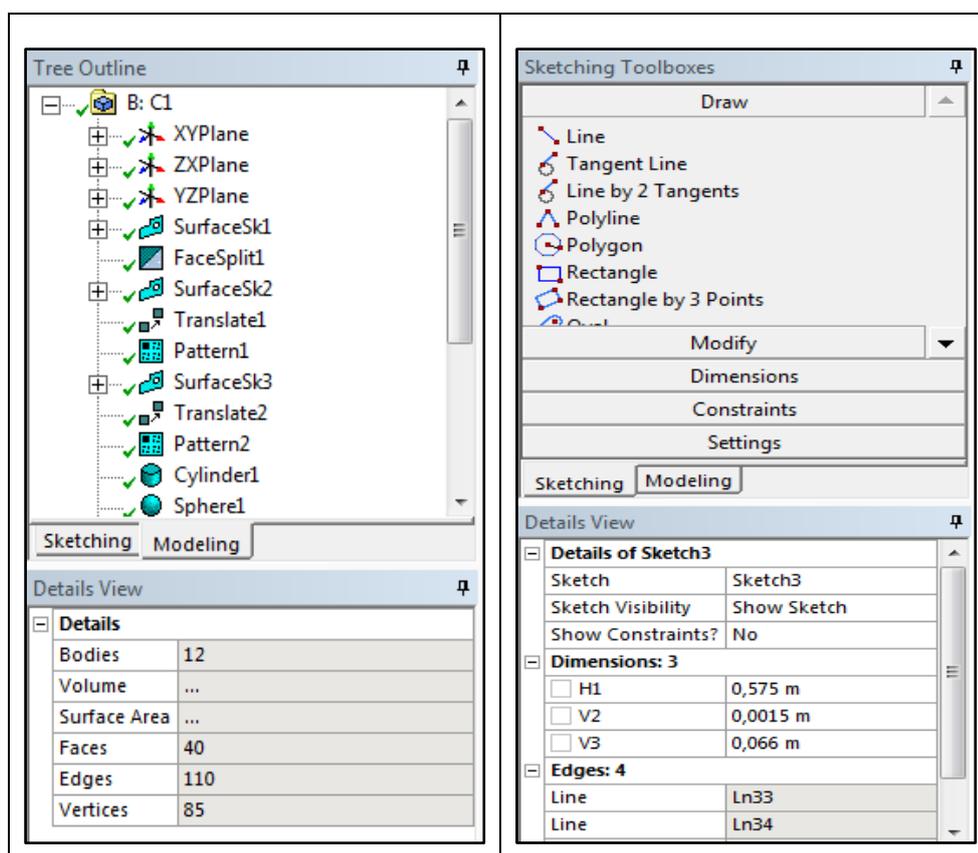


Figura D. 7. Interfaz del módulo de diseño de ANSYS.

En la figura D.7 también se muestra el panel estructural con sus refuerzos y tres formas diferentes de cuerpo golpeador en el centro. Este módulo de diseño cuenta con herramientas comunes de dibujo. La figura D.8 muestra el árbol de trabajo para dibujos 2d (derecha) y el árbol de trabajo de modelado (izquierda).

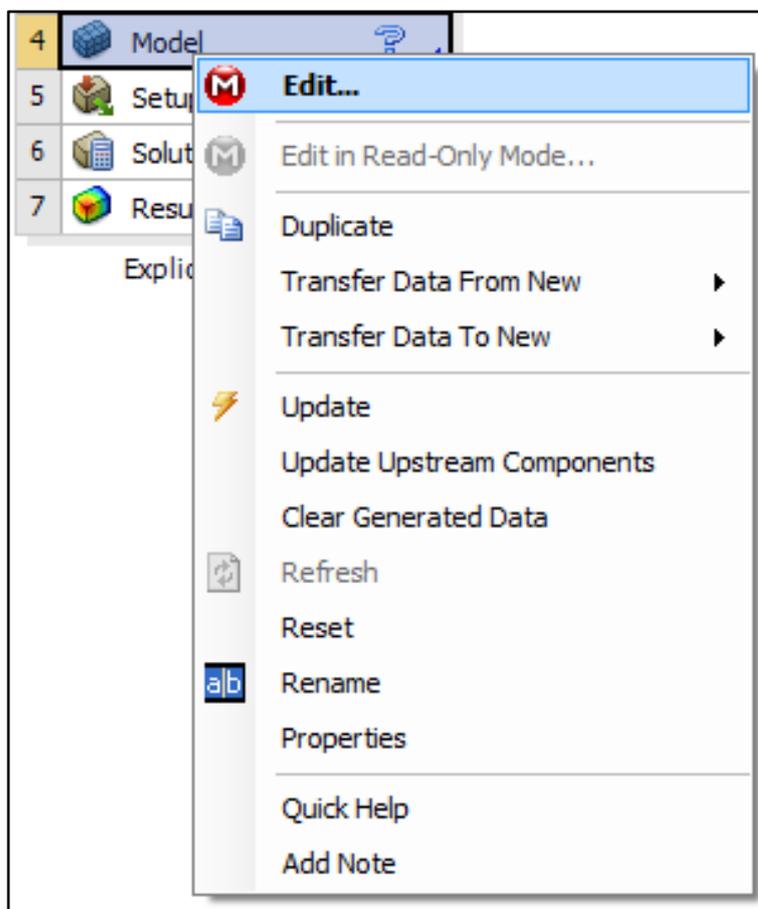


**Figura D. 8. Caja de herramientas para dibujos (derecha), árbol de trabajo para el modelado (izquierda)**

Un aspecto importante en esta sección es que ANSYS permite emplear parámetros para agilizar la obtención de resultados. En la figura D.8 a la derecha se observan pequeñas casillas cuadradas junto a la variable de dimensión asignada. La casilla puede seleccionarse indicando que esta variable se convierte en un parámetro. Esto permite luego de calcular la solución obtener valores máximos de resultados especificados por el usuario para diferentes valores del parámetro. Para lo cual no es necesario abrir el módulo de diseño, ya que se edita desde ventana principal de ANSYS. En este trabajo no se hará uso de esta herramienta de parametrización.

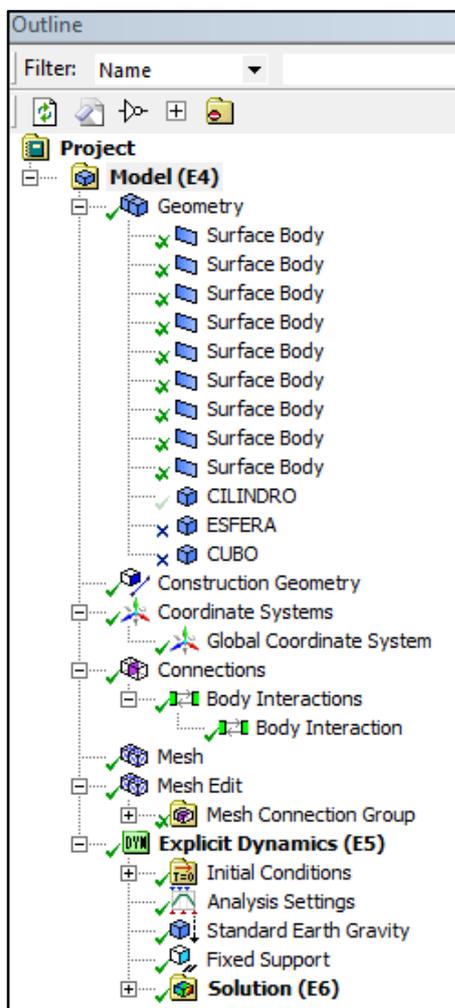
### Discretización del modelo.

Una vez que se ha terminado el modelo se procede con el “*model mechanical*”, para lo cual se hace doble clic sobre el componente 4 en el módulo E. véase figura D.9



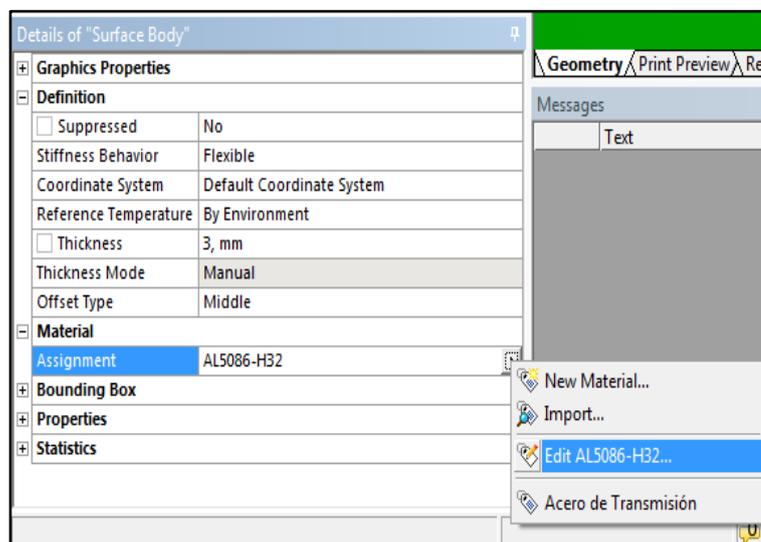
**Figura D. 9. Opciones en el componente 4, abre el módulo de modelo mecánico.**

Aquí se presentan todas las opciones que se muestran en la figura D.9. Se debe seleccionar “*edit*”, ya que aún no se ha editado este componente. El módulo de mechanical “*model*” se abre al hacer clic en “*edit*” en la figura anterior.



**Figura D. 10. Árbol de trabajo para los componentes 4, 5 y 6.**

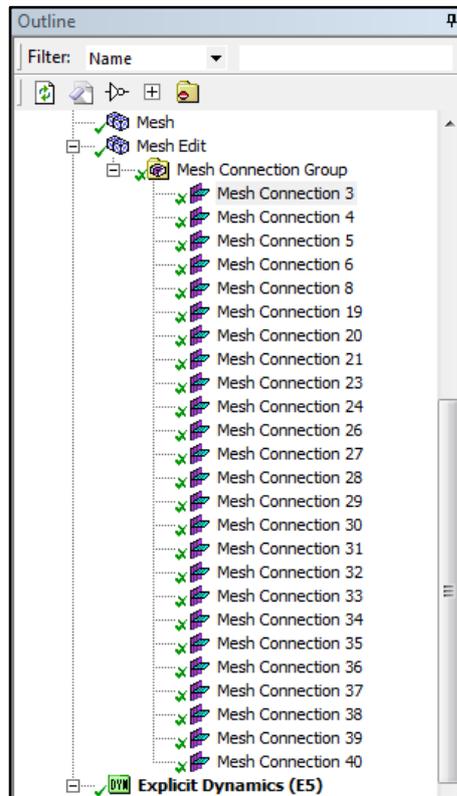
Obsérvese en la figura D.10 que los componentes 5 y 6 del módulo (en este caso módulo E) están dentro del árbol de trabajo en esta interfaz, es decir que esta es la última interfaz que se empleará para terminar la simulación. La geometría ha sido cargada automáticamente. En este caso solo se está empleando la figura cilíndrica del golpeador. En este punto debe asignarse manualmente las propiedades del material a cada cuerpo existente en el modelo, véase figura D.11.



**Figura D. 11. Selección de material para la geometría.**

El panel está compuesto por cuerpos que se unen en sus aristas. Esto hace necesario el uso de un asistente para determinar las conexiones y las interacciones entre los cuerpos. Esto se hace de forma automática, pero siempre es necesario revisar que las conexiones estén correctas.

Obsérvese que en este componente 4 se especifican también las características del mallado. Es necesario agregar un asistente para determinar en la malla las conexiones antes de realizar el mallado del cuerpo. El grupo de mallado de conexiones determina todas las uniones entre los cuerpos y genera una malla cuyos nodos en las intersecciones coincidan. La figura D.12 a continuación muestra todas las conexiones que existen en el modelo.



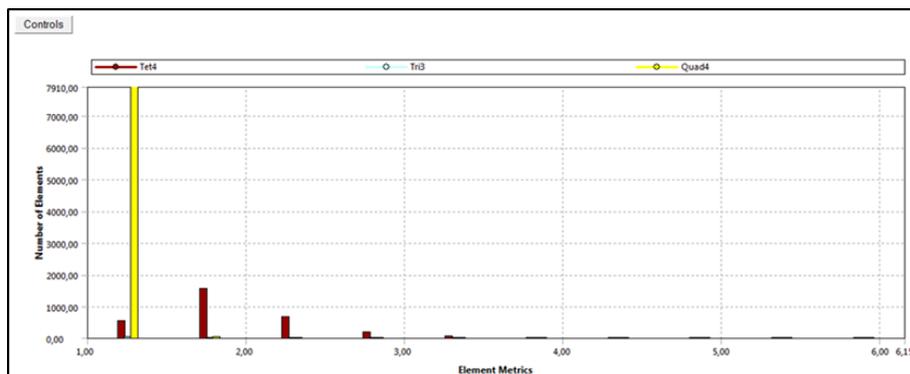
**Figura D. 12. Conexiones en la geometría.**

Al seleccionar “Mesh”, en la parte inferior se despliegan las características del mallado, aquí todos los aspectos de la malla son editables. Entre los principales tenemos el tamaño de los elementos en la malla, en este caso se define *1 cm* de longitud. La función de tamaño de los elementos se escoge como adaptativa, ya que se esperan grandes desplazamientos y la malla debe adaptarse a estos cambios en la geometría. La figura D.13 muestra el detalle de las características del mallado.

Details of "Mesh"	
+ Display	
+ Defaults	
- Sizing	
Size Function	Adaptive
Relevance Center	Medium
<input type="checkbox"/> Element Size	10,0 mm
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	High
Transition	Slow
Span Angle Center	Coarse
Automatic Mesh Base...	On
<input type="checkbox"/> Defeaturing Tolera...	Default
Minimum Edge Length	20,0 mm
+ Inflation	
+ Advanced	
- Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	8856
<input type="checkbox"/> Elements	10963
Mesh Metric	Aspect Ratio
<input type="checkbox"/> Min	1,
<input type="checkbox"/> Max	6,1549
<input type="checkbox"/> Average	1,2803
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,45775

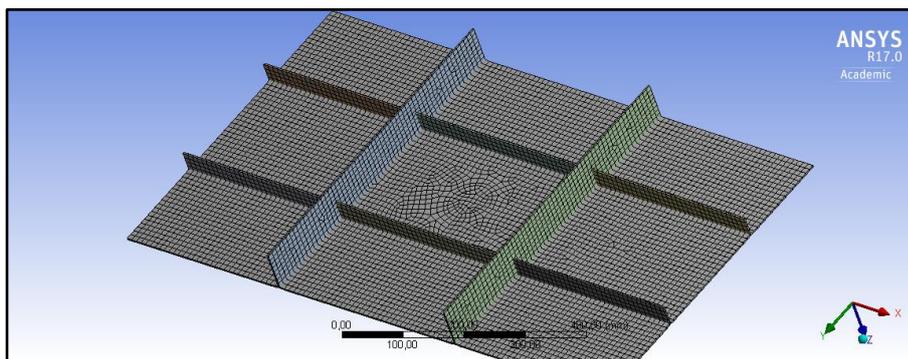
**Figura D. 13. Características de mallado.**

Obsérvese también en la figura D.13 que existen un total de 10963 elementos en todo el modelo, esto incluye los elementos del panel y del cuerpo golpeador. Ansys también permite chequear la eficiencia de los elementos; una de las características que describe que tan eficiente es un elemento es la razón de aspecto. La siguiente figura D.14 presenta un histograma con un rango de razón de aspecto entre 1 y 6. Obsérvese que los elementos de color amarillo corresponden a cuadriláteros, es decir que están en el panel, mientras que los restantes son tetraédricos. Existen 7900 elementos cuadriláteros con una razón de aspecto menor a 1.5. Por lo que se puede afirmar que en este panel los elementos son eficientes.



**Figura D. 14. Histograma de razón de aspecto para elementos en el panel y el golpeador.**

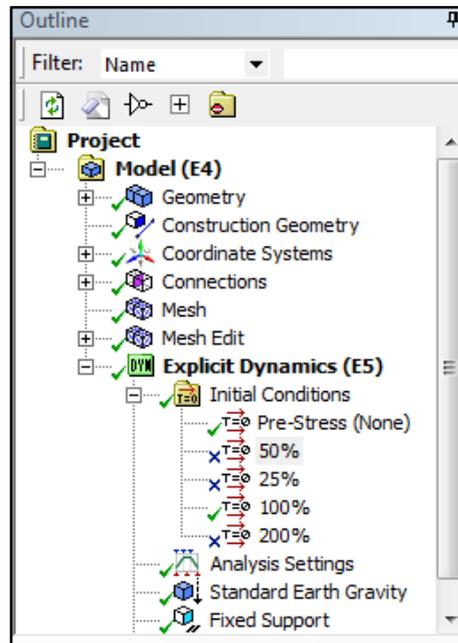
Finalmente se muestra el mallado del panel en la siguiente figura D.15. Obsérvese que en las uniones los nodos si coinciden, esto es gracias al asistente de grupo de conexión de malla que se empleó anteriormente.



**Figura D. 15. Mallado final del panel reforzado.**

### **Configuración del análisis.**

El componente 5 en la figura D.16 presenta las herramientas para establecer las características del análisis, entre otras se tiene las condiciones iniciales, en donde se asignan velocidades a los cuerpos. También las características de la simulación, como tiempo de simulación, etc.



**Figura D. 16. Campos de configuración del análisis en el componente 5.**

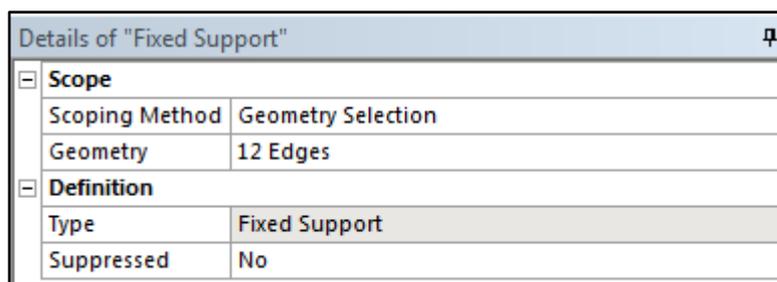
Obsérvese que en la figura D.16 se agregan 4 velocidades, estas pueden ser aplicadas a diferentes o un mismo cuerpo. En este caso solo una velocidad está activada, las demás están suprimidas.

En la figura D.17 la casilla de unidades de solución está bloqueada, esto es porque en el sistema de análisis explícito dinámico no se puede emplear ningún otro sistema de unidades. Solo el que se especifica en la figura a continuación.

Details of "Analysis Settings"	
[-] Analysis Settings Preference	
Type	Program Controlled
[-] Step Controls	
Resume From Cycle	0
Maximum Number of Cycles	1e+07
End Time	0,01
Maximum Energy Error	0,1
Reference Energy Cycle	0
Initial Time Step	Program Controlled
Minimum Time Step	Program Controlled
Maximum Time Step	Program Controlled
Time Step Safety Factor	0,9
Characteristic Dimension	Diagonals
Automatic Mass Scaling	No
[-] Solver Controls	
Solve Units	mm, mg, ms

**Figura D. 17. Detalles de configuración del análisis.**

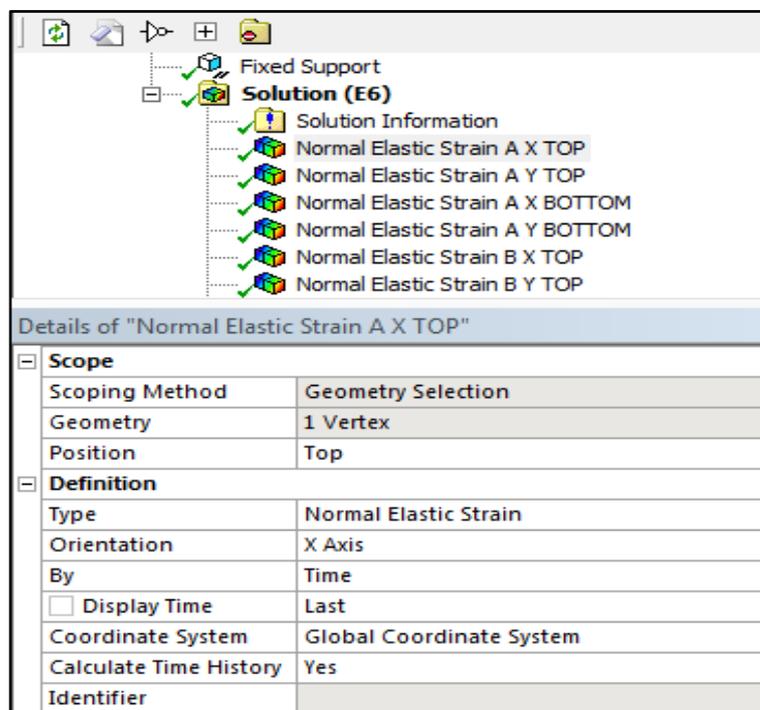
La condición de borde también se especifica en esta sección, existen diferentes modelos de soportes que sirven para representar una condición real de borde. La figura D.18 muestra la ventana de detalle del soporte, se han seleccionado 12 ejes en el contorno del panel y se especifica el tipo de soporte como “soporte fijo”.



**Figura D. 18. Detalle de la condición de borde en el panel.**

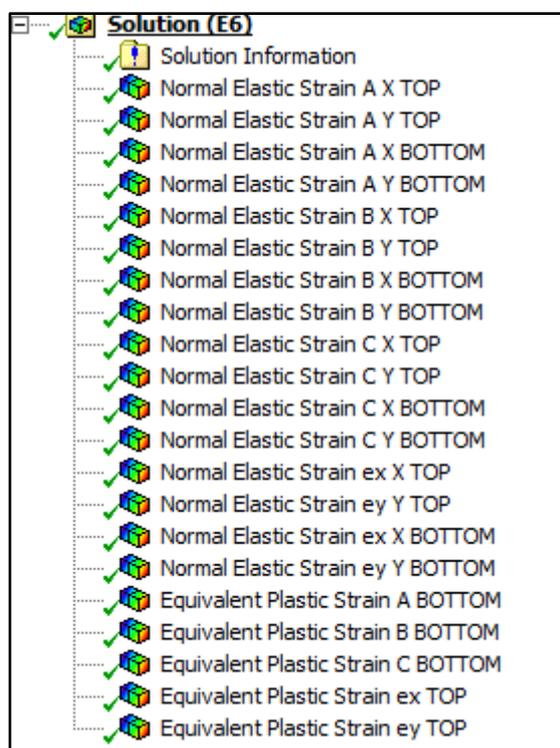
Finalmente se procede con la solución.

### Resultados.



**Figura D. 19. Resultado y detalle de las características de este resultado.**

El componente 6 del módulo E abre las opciones de solución del programa, y existen diferentes parámetros que se pueden reportar a partir de los comandos en ANSYS. Principalmente se tiene deformación o desplazamiento en una dirección en específico, deformación unitaria, esfuerzos, etc. El proceso consiste en seleccionar el tipo de resultado que se espera obtener y en la ventana de características especificar la geometría a la que se hace referencia, véase figura D.19. Además la dirección en que se desea el valor resultante, etc. La figura D.20 muestra la lista de resultados para la deformación unitaria en diferentes puntos de interés en el panel estructural con configuración 1.



**Figura D. 20. Resultados obtenidos para deformación unitaria en diferentes puntos de interés en el panel estructural.**

Cabe recalcar que en este trabajo todos los resultados se obtienen en puntos de interés. Para ello es necesario que en la geometría se formen secciones o regiones proyectadas sobre la superficie de tal manera que los vértices de estas regiones coincidan con los puntos de interés. Ya que las opciones de selección de geometría

en la ventana de características de resultados solo permiten seleccionar puntos que existan previamente en la geometría, como por ejemplo vértices, centro de círculos, etc. Esto funciona de igual manera con las curvas y líneas donde se desea conocer un resultado. Todos los resultados obtenidos en esta simulación se presentaron en el Anexo C.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. Agila, “Resistencia Experimental de Paneles de Plancha Reforzados Ortogonalmente Sometidos a Carga de Impacto”, Tesis de grado de Ingeniero Naval, FIMCBOR, Espol, Ecuador, 2015.
- [2] J. Goicolea, “Estructuras Sometidas a Impacto”, E.T.S. Ingenieros de Caminos, Universidad Politécnica Madrid, España, 2010.
- [3] ASM International, 2th, “Atlas of stress – strain curves”, ASM International print, United States of America, 2002.
- [4] N. Jones, “Structural Impact“, 2th ed. Cambridge, University press, 1989.
- [5] S. Timoshenko, “Vibration Problems in Engineering “, 2th ed. New York, 1937.
- [6] DNV • GL, “Finite Element Analysis”, DNVGL-CG-0127, DNV-GL-AS, Oct. 2015.
- [7] ANSYS Inc. “PDF Documentation for Release 17.0 - © SAS IP”, Inc. Southpointe, 2015.
- [8] G. Barrientos, L. Baeza, R. Sampaio, “Impacto de elementos rígidos con elementos flexibles”, Mecánica Computacional Vol XXI, Argentina, Oct. 2002.
- [9] A. Vargas, “Determinación experimental de la carga última de una conexión estructural en una embarcación planeadora construida en aluminio”, Tesis de grado de Ingeniero Naval, FIMCBOR, Espol, Ecuador, 2013.