



Influence of the reinforcements in panels of the bottom of a planing boat under impact load

José Rolando Marín Lopez, Miguel Engracia and Carina Agila

EasyChair preprints are intended for rapid dissemination of research results and are integrated with the rest of EasyChair.

July 23, 2018

Influencia de los refuerzos en paneles del fondo de una lancha planeadora bajo carga de impacto

José R. Marín L., PhD.¹, Miguel A. Engracia, Ing. Naval², y Carina A. Agila, Ing. Naval³

¹Escuela Superior Politécnica del Litoral, Facultad de Ingeniería Marítima, Ciencias Biológicas, Oceánicas y Recursos Naturales, Km. 30.5 Vía Perimetral, Guayaquil, Ecuador, jrmarin@espol.edu.ec

²Supervisor de Construcción de Buques, Varadero Polaris, maez2287@hotmail.com

³Verificador de Operaciones, Astilleros Navales Ecuatorianos, cagila@astinave.com.ec

Abstract— Influence of the reinforce stiffness in the impact of a cylindrical body on reinforced panels is investigated experimentally and numerically. The panel corresponds to a bottom module of a 13-m long planning boat built with aluminum alloy. Experimental tests are developed using the weight drop technique with a steel cylinder sliding inside a vertical tube impacting 1.25x0.65 m test panels. Each panel model has two stiffeners of different height in each direction, and to facilitate its construction flat bars were installed instead of the original angles. Three configurations are tested with different stiffener heights. Response is registered in time with two strain-gages and a displacement sensor. For the numerical part the Explicit Dynamics module of ANSYS is employed, defining the striker and the panel as two independent bodies. To start the process the striker was placed a very small distance from the panel and with an initial velocity of 5.83 m/s. Panel mesh was developed following recommendations from a ship classification society for local analysis. The zone of impact is defined with circular shape for a correct discretization of the contact zone.

Keywords—Experimental & numerical impact, stiffened panel.

Resumen— La influencia de la rigidez de los refuerzos en el impacto de un cuerpo cilíndrico sobre paneles reforzados se investiga experimental y numéricamente. El panel corresponde a un módulo del fondo de una embarcación planeadora de 13 metros de eslora construida con aleación de aluminio. Las pruebas experimentales se desarrollan usando la técnica de Caída de peso, con un cilindro de acero deslizándose por un tubo vertical sobre el panel de prueba de 1.25x0.65 m. Cada modelo del panel probado tiene dos refuerzos de diferente altura en cada dirección, y para facilitar su construcción se emplea platinas en lugar de los ángulos originales. Se prueban tres configuraciones con diferentes alturas de refuerzos, y se construyen 3 especímenes de cada una. La respuesta se registra en tiempo con dos extensómetros y un sensor de desplazamiento. Para el análisis numérico se emplea el módulo Explicit Dynamics de ANSYS, definiéndose el cilindro golpeador y el panel como dos cuerpos independientes. Al inicio del proceso se ubica el golpeador a una pequeña distancia del panel y con una velocidad inicial de 5.83 m/s. La malla del panel se desarrolla siguiendo las recomendaciones de una sociedad clasificadora de buques para análisis locales. La zona de impacto se define en forma circular para una correcta discretización de la zona de contacto.

Palabras claves— Impacto experimental y numérico, panel reforzado

I. INTRODUCCIÓN

El transporte fluvial puede traer muchos beneficios a comunidades situadas en zonas alejadas de las ciudades

desarrolladas, pero para su amplia utilización se deben resolver algunos inconvenientes técnicos. Entre estos problemas de diseño de embarcaciones fluviales, está el peligro de que al navegar a alta velocidad el impacto con bancos de arena ó elementos sólidos flotantes cause daños al fondo de la embarcación. De manera que conociendo la forma en que la estructura del fondo, compuesta de planchas reforzadas, responde a impactos, en el futuro se podrá mejorar los diseños, ahorrando material pero sin comprometer la seguridad de los pasajeros.

A nivel lineal, es decir con deformaciones muy pequeñas y el material comportándose en el rango lineal elástico, estructuras formadas por plancha con refuerzos bajo carga estática pueden analizarse empleando métodos clásicos como planchas Ortotrópicas, de Rejillas, Vigas sobre base elástica, ó, Elementos Finitos, [7]. En el caso de impacto debido a la elevada concentración y nivel de la carga, este límite elástico lineal fácilmente se sobrepasa, y hasta es posible que se produzca penetración con fractura del material. Ante esta situación, es necesario estudiar el proceso que conduce a la falla de un panel reforzado expuesto a carga de impacto para lograr que futuros diseños estructurales sean capaces de enfrentar este problema y la estructura permanezca sustancialmente intacta, aunque deformada.

Se han desarrollado algunos trabajos experimentales y numéricos sobre pruebas de impacto, entre las que se puede mencionar, Liu et al. [6], probaron especímenes de planchas sin refuerzos sometidos a impacto; ellos examinaron las características de falla de planchas de Aluminio rectangulares empotradas golpeadas por penetradores cilíndricos y esféricos. Jones [5], estudió el comportamiento de placas delgadas sometidas a cargas de impacto considerando el material como rígido – perfectamente plástico. Estos estudios y otros no consideran la influencia de los refuerzos con las proporciones típicas de la estructura de una lancha planeadora que soportan el impacto de sólidos flotantes. Estos paneles reforzados son estructuras típicas que constituyen el casco de una embarcación, por lo que es este elemento estructural el que debe ser analizado.

Dada la complejidad de los problemas estructurales no lineales, soluciones analíticas son prácticamente imposibles de obtener, de manera que las opciones son métodos Numéricos ó bien Experimentación. En este trabajo se pretende analizar en forma experimental y numérica la influencia de los refuerzos de un panel sometido al impacto sin penetración.

II. DESCRIPCIÓN DE LOS PANELES

A. Características de la embarcación planeadora

Las características de la lancha planeadora, uno de cuyos paneles del fondo es analizado en este trabajo se presentan en la Tabla I. La alta velocidad de la embarcación hace pensar que al navegar en zonas de descarga al mar, la posibilidad de un impacto en el fondo es alta.

TABLA I
CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LA LANCHA PLANEADORA

Característica	Valor	Unid.
Eslora Total	13	m
Manga Total	3.80	m
Puntal	1.96	m
Calado de Diseño	0.80	m
Velocidad de Servicio	25	nudos
Desplazamiento de Diseño	23.91	ton
Coefficiente Prismático	0.823	-----
Coefficiente Sección media	0.732	-----
Ángulo de Astilla Muerta	12	°

B. Características del panel del fondo

La embarcación analizada en este trabajo tiene cuadernaje longitudinal, con cuadernas y longitudinales de fondo separados 75 y 45 cm, respectivamente, ambos con sección tipo ángulo. El planchaje del fondo es de 6.35mm (1/4"). En la figura 1 se presenta un esquema del panel del fondo que es analizado y que incluye dos refuerzos en cada dirección.

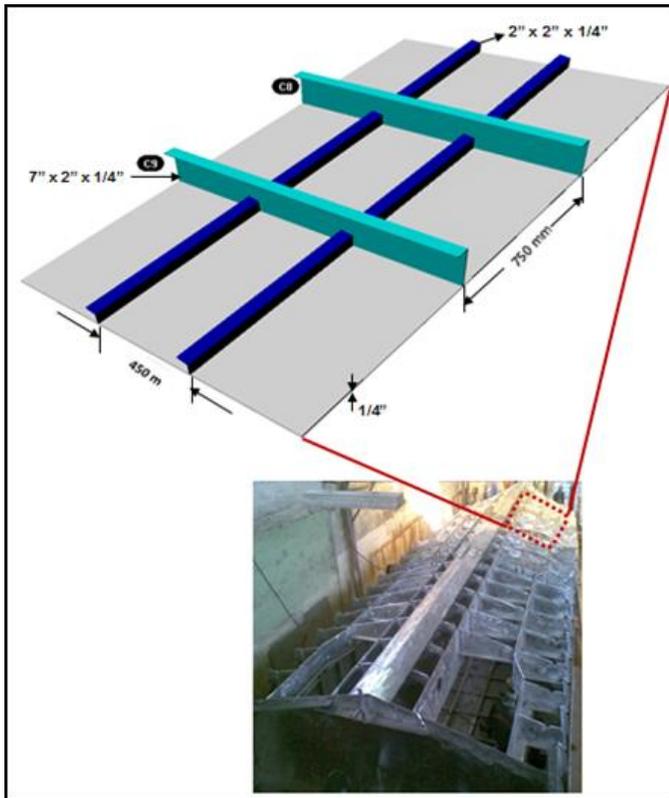


Fig. 1 Panel estructural del fondo de lancha planeadora, [1].

El material de construcción de la embarcación y de los paneles de prueba, es aleación de aluminio 5086, comúnmente usada en embarcaciones rápidas, y cuyas propiedades se presentan en la Tabla II.

TABLA II
PROPIEDADES MECÁNICAS DEL MATERIAL

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Límite elástico	σ_y	207.08	N/mm ²
Módulo de elasticidad	E	7.1E+04	N/mm ²
Módulo de corte	G	2.5E+04	N/mm ²
Peso específico	γ	2.62E-05	N/mm ³
Razón de Poisson	ν	0.33	-

La aleación de aluminio Al-5086-H32 tiene una relación esfuerzo-deformación unitaria que no presenta claramente la Fluencia. Para desarrollos numéricos esta curva se la aproxima aplicando la formulación de Ramberg y Osgood, [8], ec. (1). En el presente trabajo se emplean los siguientes valores de los parámetros de la ecuación mencionada: exponente $n=28$, deformación plástica arbitraria, $\epsilon_0=0.0035$, y el esfuerzo de fluencia arbitrario, $\sigma_0=250$ N/mm².

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} + \frac{3}{7} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad (1)$$

La relación esfuerzo-deformación unitaria usada para describir el comportamiento mecánico del material en la parte numérica de este trabajo se presenta en la Fig. 2.

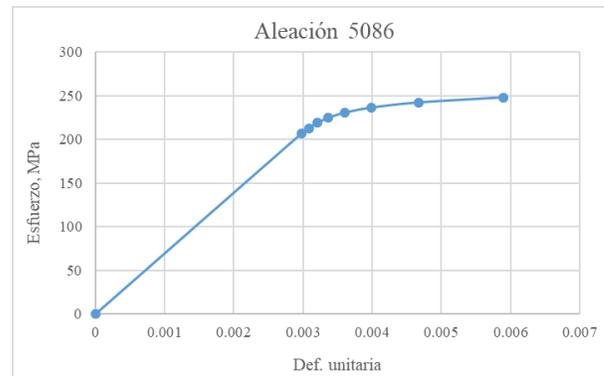


Fig. 2 Relación esfuerzo deformación de la aleación de aluminio 5086.

C. Configuración de paneles:

Para estudiar la influencia de la rigidez de los refuerzos en la respuesta al impacto se construyen paneles con tres configuraciones. Para simplificar la construcción los refuerzos se representan con platinas, en lugar de los ángulos originales. En la figura 3 se muestran las características de los refuerzos de cada configuración, los que corresponden a los promedios de los especímenes usados en la experimentación, [2]. Todos los especímenes fueron construidos con plancha aleación de aluminio 5086, de 3 mm.

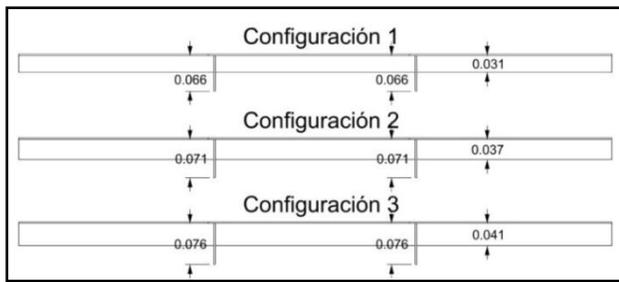


Fig. 3 Dimensiones de los refuerzos en cada configuración.

III. RESUMEN DEL TRABAJO EXPERIMENTAL

A. Descripción del trabajo experimental

En el trabajo de Agila, [3], se reportan los resultados de las pruebas de impacto con 3 especímenes de la configuración 3 del panel reforzado, empleando la técnica de Caída de peso. Posteriormente en el desarrollo del proyecto semilla “Mejora de la Seguridad Estructural en Transporte Fluvial: Mecanismo de Falla de Paneles Reforzados”, se completan las pruebas de los otros 6 especímenes de las dos configuraciones restantes. El equipo usado consta de una base metálica, que tiene un marco superior construido con un ángulo de acero, en donde se instalan los especímenes que reciben el impacto. El panel de prueba se instala con los refuerzos en la cara inferior, y en dicha cara también se pegan los extensómetros (120Ω) con esquemas de cuarto de puente, y a través de un registrador Instrunet i555, se las almacena en un computador (833 registros/seg). El desplazamiento se registra con un medidor Celesco PT1A-2-DN-500, y con una tarjeta de adquisición de datos, Omega DAQ 3000 se las digitaliza y almacena en computador (1000 reg/seg). El impactador se construye con eje de acero de transmisión, de 7.65 cm de diámetro, 22.5 cm de altura y 8.07 kg de peso, y, se desliza por un tubo vertical de 2 m de altura.

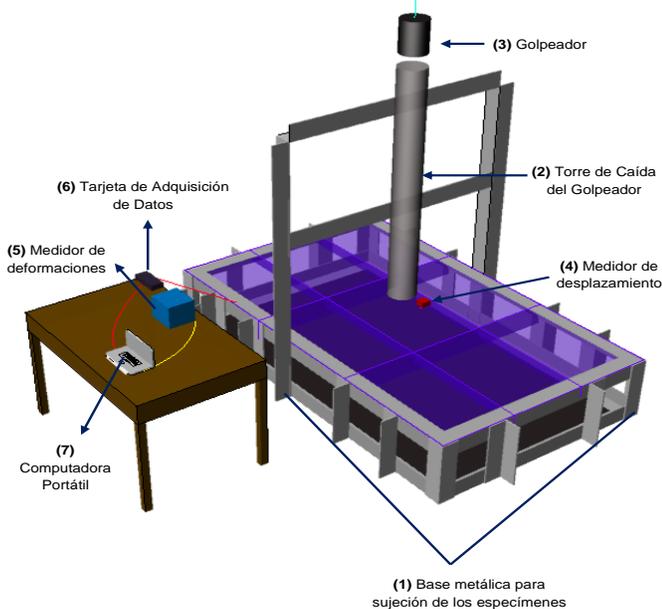


Fig. 4 Equipo para las pruebas de impacto, [3]

En las siguientes figuras se muestra la posición del impactador inmediatamente antes y después del contacto.

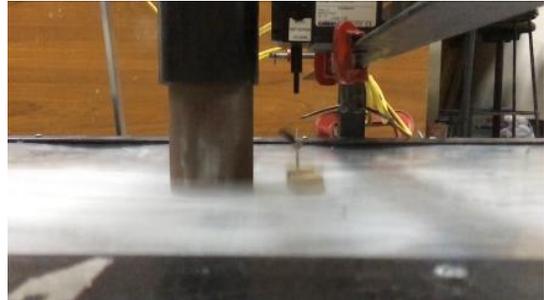
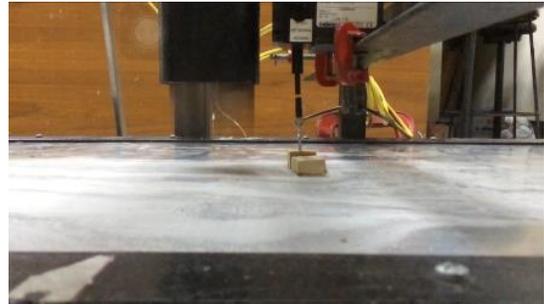
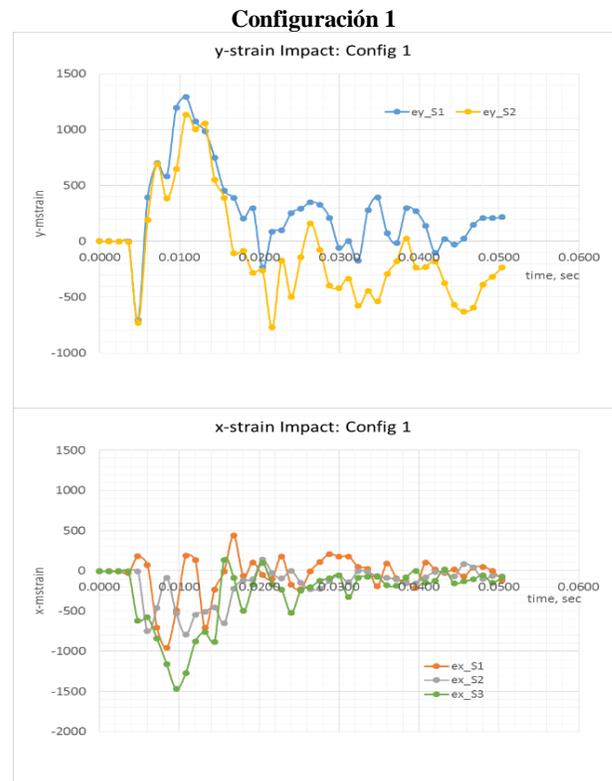


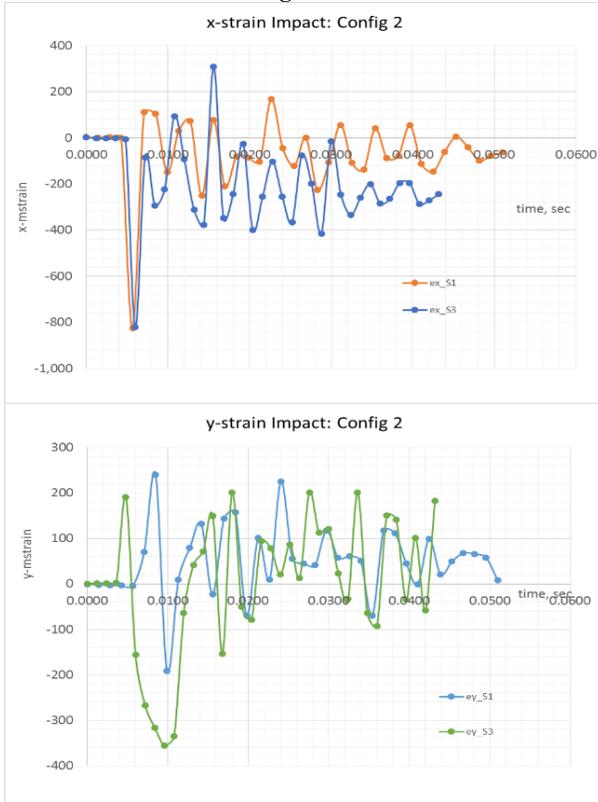
Fig. 5 Antes y luego del contacto entre impactador y plancha

B. Resumen de resultados experimentales

La velocidad de impacto se estima con el tiempo que toma al impactador el desplazarse entre dos rayos láser [3], registrándose una velocidad promedio de 5.63 m/seg.



Configuración 2



Configuración 3

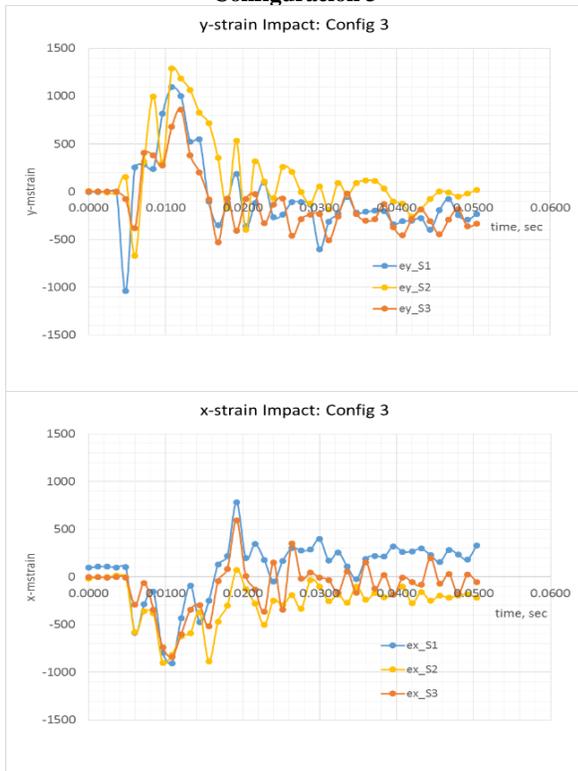


Fig. 6 Registros de deformación unitaria en tiempo

En la tabla III se resumen los resultados experimentales de deformación unitaria máxima y residual, en las dos posiciones registradas. También se reporta la deflexión máxima y el tiempo luego del contacto para alcanzar dicha posición.

TABLA III
RESUMEN DE RESULTADOS DE IMPACTO EXPERIMENTALES

	Espec.	$\mu\epsilon_{y_{max}}$	$\mu\epsilon_{y_{res}}$	$\mu\epsilon_{x_{max}}$	$\mu\epsilon_{x_{res}}$	w_{max}, mm	t_{max}, seg
Conf. 1	1	-708	-172	-969	-95	-19.7	0.00949
	2	-729	-318	-747	-76		
	3			-1474	-127		
	Prom.	-718	-245	-1063	-99	-19.7	0.00949
Conf. 2	1			-828	-55	-7.8	0.01660
	2					-10.1	
	3			-820	-268	-15.4	0.01000
	Prom.			-824	-162	-11.1	0.01330
Conf. 3	1	-1041	-184	-580	33		
	2	-675	-64	-565	-188	-19.9	0.00970
	3	-388	-304	-291	-22	-15.5	0.01090
	Prom.	-701	-184	-479	-59	-18	0.01030

IV. DESARROLLO DEL MODELO ESTRUCTURAL NUMÉRICO

Para analizar numéricamente el impacto de un golpeador sobre paneles, se desarrolla en ANSYS un proyecto con dos cuerpos independientes, el golpeador y el panel. El primero se representa con elementos sólidos y el segundo con elementos planos que tienen resistencia en el plano y en flexión.

Para reducir el proceso de comprobación de la convergencia de la solución, se aplican las recomendaciones de la sociedad clasificadora de buques DNV-GL, [3], considerando que la respuesta de un panel reforzado sometido a impacto corresponde al caso de esfuerzo local. En la referencia mencionada se especifica que el tamaño de los elementos en la zona de malla fina para el análisis de esfuerzo local no debe exceder los 50x50 mm². Además recomienda que todos los cuerpos que estén a menos de 500 mm alrededor de la zona de interés deban ser modelados en detalle con superficies de espesor virtual.

En el manual del programa ANSYS se establecen los límites de velocidad que pueden ser empleados en un análisis de impacto. El rango aplicable es 1 - 5000 m/s. En este trabajo la velocidad de impacto entre el cuerpo golpeador y el panel estructural es de 5.63 m/seg, de manera que dicho parámetro está dentro del rango posible de análisis del programa.

A. Modelo estructural

El modelo geométrico del panel del fondo está compuesto por nueve superficies para la plancha y ocho segmentos que representan los refuerzos que se conectan a esta, dos transversales y seis longitudinales. Además se realizan proyecciones en la plancha y refuerzos para subdividirlos, y ubicar en algunos vértices de estas regiones puntos de observación, en los cuales se reportan resultados del análisis; en otros casos estos vértices coinciden con las conexiones entre cuerpos. Véase la figura 7.

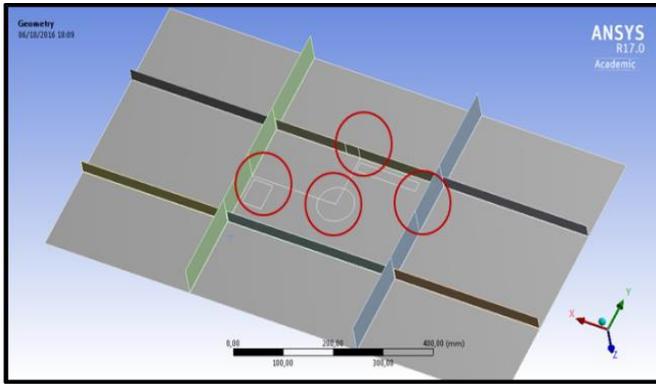


Fig. 7 Definición geométrica del panel, [4]

A continuación se presenta un acercamiento del panel de plancha central entre refuerzos, notándose la definición circular de elementos para un adecuado análisis del contacto entre impactador y panel.

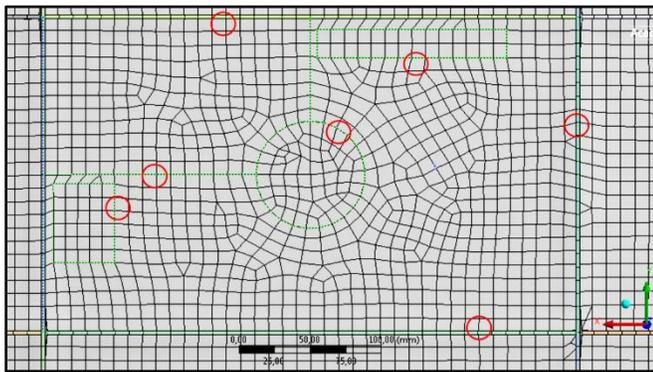


Fig. 8 Detalle de la discretización en la zona de impacto.

B. Características de las simulaciones

Para las simulaciones se emplea el módulo *Explicit Dynamics* de ANSYS y a continuación se describen las características principales del proceso.

Material.- Se lo define como un grupo de valores de la curva esfuerzo-deformación unitaria (“*Multilinear Isotropic Hardening*”). Ver Fig. 2.

Condiciones de frontera.- El panel reforzado está formado por una plancha de 1.125x0.675 m, con refuerzos separados de forma equidistante en ambas direcciones. Como soporte, los bordes de la plancha se asientan sobre un anillo de ángulo de 5 cm de ala, y se aseguran con pernos. En este trabajo se va a modelar el panel sin incluir la porción de plancha que se asienta sobre el anillo de acero, considerando que la zona central es la de interés. Los nodos que corresponden a los bordes se modelan como con simple soporte, y la restricción de los nodos del alma de los refuerzos ayuda a representar la situación experimental.

Tiempo de duración del Impacto.- De acuerdo con los resultados de la parte experimental, [3], se considera que en 0.01 segundos aproximadamente, se ha completado el primer impacto. Entonces, en la parte numérica se toma dicho valor para la duración de la simulación.

Posición y velocidad del golpeador.- En las simulaciones numéricas se empieza con el golpeador ubicado 5 mm encima de la plancha del panel, Fig. 9, y con la velocidad inicial antes mencionada. Esto implica que deben transcurrir 0.0008 segundos antes de hacer contacto con la plancha.

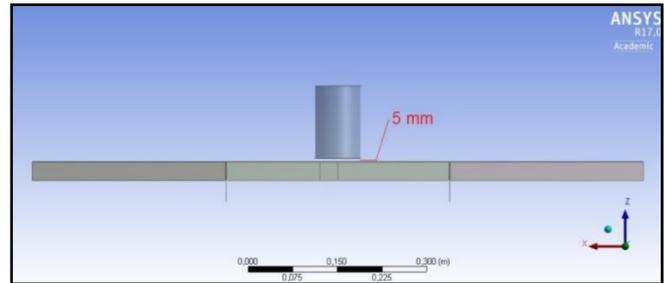


Fig. 9 Posición inicial del golpeador respecto del panel estructural.

Puntos de interés.- En los experimentos de impacto se registra la deflexión del panel central de la plancha reforzada y las deformaciones unitarias en dos puntos sobre la plancha central, y estos son los puntos en donde se va a reportar resultados de las simulaciones numéricas. Estas posiciones se denominan *ex* y *ey*. También se reportan los esfuerzos normales en dos puntos adicionales *RD-X* y *RE-Y* ubicados en las partes superiores de las almas de los refuerzos. En la fig. 10 se muestran además de los mencionados, los puntos sobre la plancha en los cuales se reporta la deflexión del panel, denominados *A*, *B*, *C*, *D* y *E*. Véase también la tabla IV.

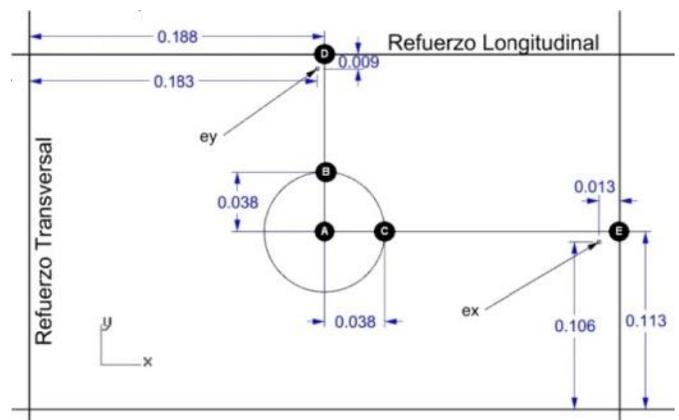


Fig. 10 Posición de los puntos de interés (metros).

V. ANÁLISIS DE RESULTADOS NUMÉRICOS

TABLA IV
PARÁMETROS DE RESPUESTA REPORTADOS, [4]

	Punto	Defl.	Deformación unitaria					Esfuerzo normal			
		Dir.Z	Dir.X		Dir.Y		PIEq.	Dir.X		Dir.Y	
			Sup	Inf	Sup	Inf		Inf	Sup	Inf	Sup
Plancha Central	A	x					x	x	x	x	x
	B	x				x	x			x	x
	C	x		x			x	x	x		
	D	x			x		x				
	E	x	x				x				
	ex			x							
	ey					x					
Ref	RD-X		x				x	x			
	RE-Y				x		x			x	

A. Resultados numéricos típicos

A continuación se presentan resultados típicos para la Config. 2 en el instante de máxima deflexión, Fig. 11; el color rojo significa valores extremos. La diferencia entre valores reportados en las zonas superior e inferior de la plancha, posiblemente se deba a la discretización del dominio. Las figuras (a) y (b) muestran el esfuerzo normal-Y en las caras inferior y superior del panel central de plancha, es decir zona sin refuerzos. Los valores más altos se registran en (a) y superan el límite elástico del material 207 MPa; esto muestra el efecto de la sujeción de la plancha que desarrolla esfuerzos en el plano. Estas zonas de mayor esfuerzo incluyen al punto de interés B de la Fig. 10. 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.

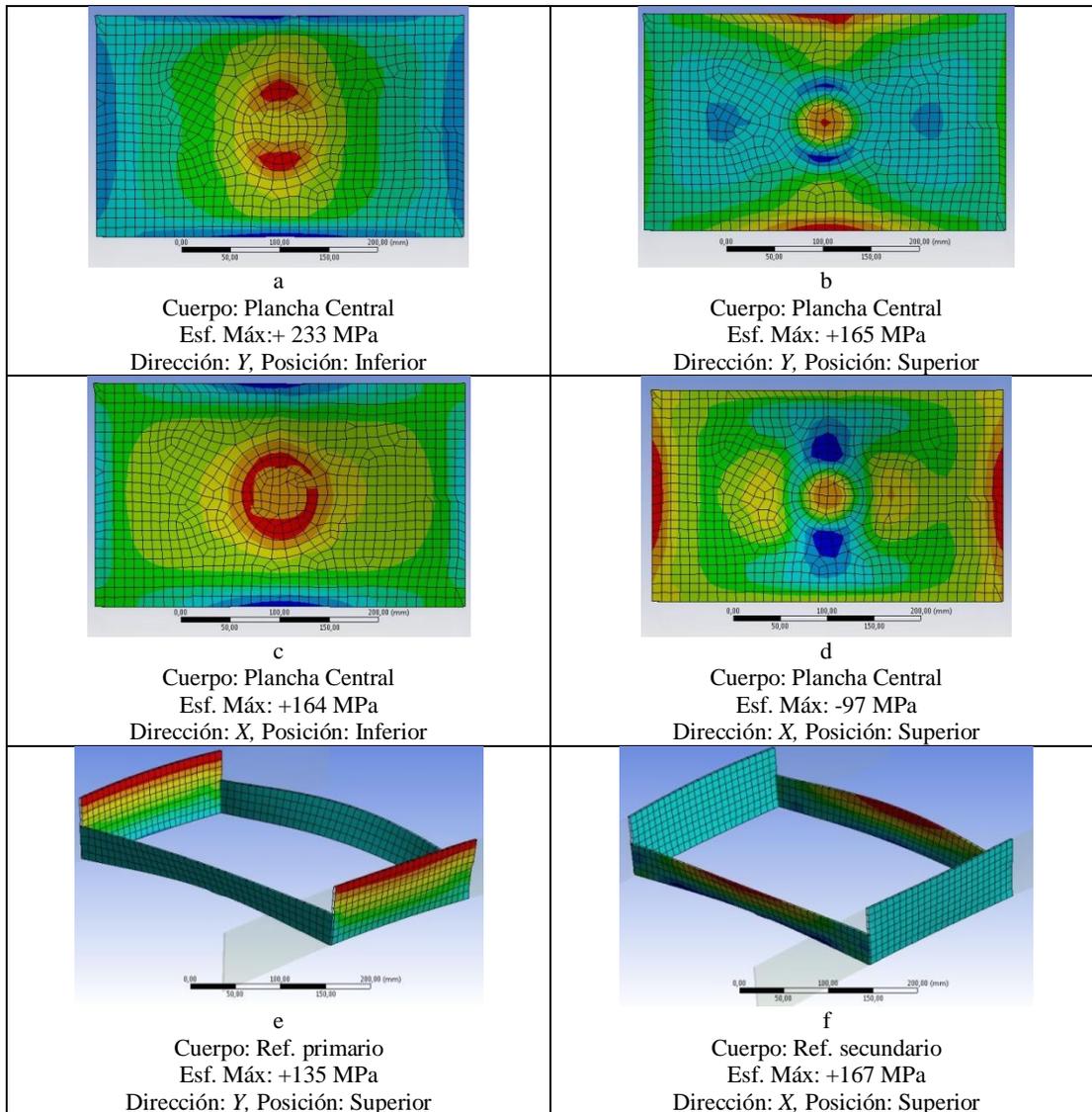


Fig. 11 Valores extremos del esfuerzo, configuración 2

Las figuras 11 (c) y (d) presentan la distribución del esfuerzo normal- X en las caras inferior y superior, respectivamente, del panel de plancha central, zona sin refuerzos. Los valores máximos de esfuerzo no superan el límite elástico y se presentan en (c) alrededor de la zona de contacto entre el panel y el golpeador. El punto denominado C 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 que coincide con los refuerzos transversales. El punto de interés E se ubica en esta zona de concentración de esfuerzos.

Finalmente las figuras 11 (e) y (f) presentan el esfuerzo normal- Y y - X , respectivamente, en la parte alta del alma (fibra más alejada del eje neutro) de los refuerzos. En esta zona se espera un alto nivel de esfuerzos considerando el efecto de flexión; sin embargo se observa que en ambos casos no se supera el límite de fluencia. Estas zonas coinciden con los puntos de interés $RD-X$ y $RE-Y$.

A continuación se presentan las variaciones en tiempo de algunos parámetros en los puntos de interés ya mencionados. La Fig. 12 muestra la deflexión del punto A para las tres configuraciones de refuerzos, definiéndose 4 instantes representativos: 1- tiempo de inicio del contacto, 2- acción máxima, 3- separación de los cuerpos, 4- etapa final. En todas las gráficas se nota que el inicio del contacto se produce 0.008 segundos después de iniciada la simulación. Nótese que la configuración 3 con refuerzos más altos presenta menor deflexión y menor período de oscilación. La Fig. 13 presenta la deflexión en los puntos A, B y C para la configuración 2, 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 Fig. 14. La Fig. 15 presenta la deformación unitaria en dirección Y para el punto B, en las tres configuraciones. La Fig. 16 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 17 se presenta el esfuerzo normal Y para el punto B, y en X para el punto C, para la cara inferior de la plancha.

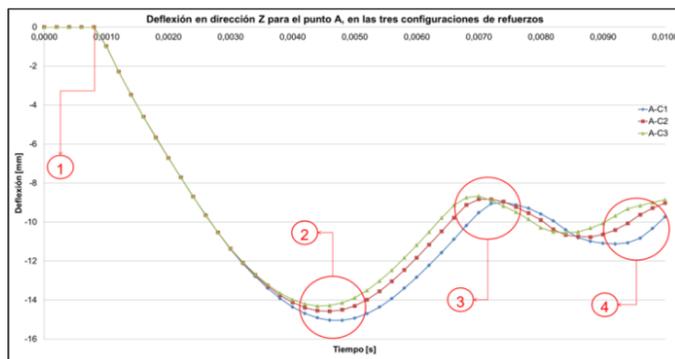


Fig. 12 Deflexión, punto A, configuraciones Conf1, Conf2 y Conf3.

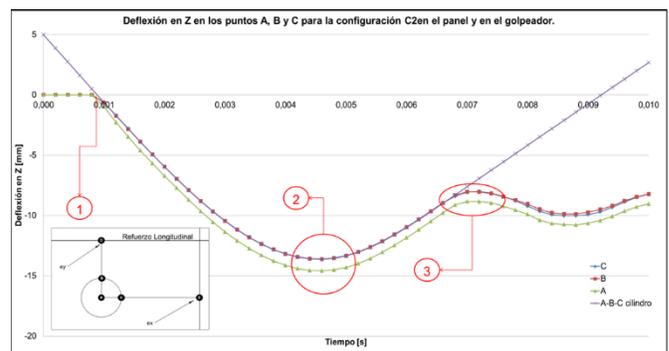


Fig. 13 Deflexión, puntos A, B y C, y golpeador, Configuración 2.

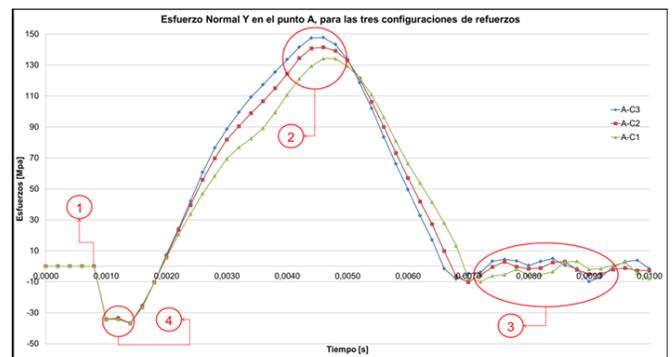


Fig. 14 Esfuerzo normal Y, punto A, configuraciones. 1, 2 y 3, cara superior

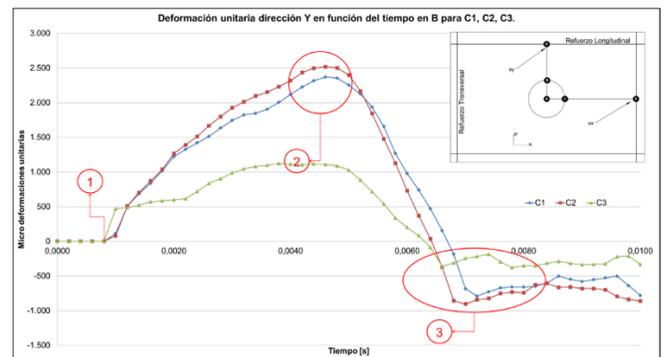


Fig. 15 Deformación unitaria normal Y, punto B, Configs. 1, 2 y 3, c. inferior

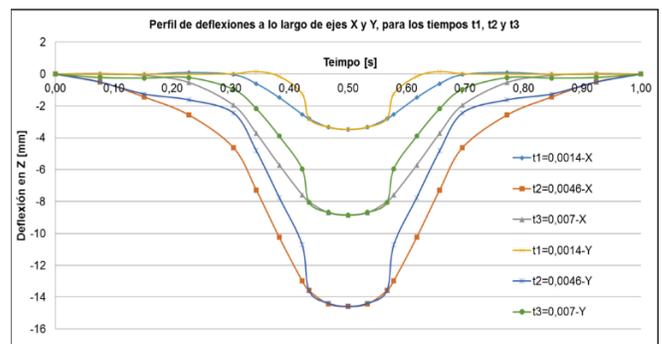


Fig. 16 Perfil de deflexión a lo largo de ejes x y, tiempos t_1 , t_2 y t_3

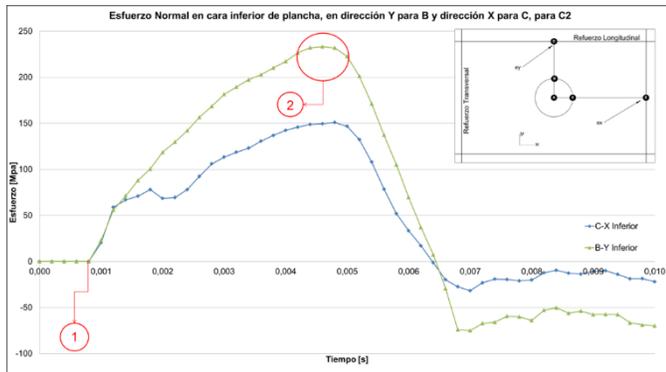


Fig. 17 Esfuerzos normales Y, puntos B y C, cara inferior Configuración 2

Finalmente la deformación unitaria plástica equivalente se presenta en la Fig. 18, este parámetro fue reportado también en el punto B cara inferior de la plancha para las tres configuraciones. En el manual del programa ANSYS se presenta una descripción de la deformación unitaria plástica equivalente. Se la describe como “una 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:

$$\varepsilon_{eq} = \left(\frac{1}{1+\nu} \right) \sqrt{\frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}{2}} \quad (2)$$

donde:

ν : razón de Poisson,

ε_{eq} : deformación unitaria plástica equivalente.

ε_i : deformación unitaria plástica principal en las tres direcciones: $1=X$, $2=Y$, $3=Z$.

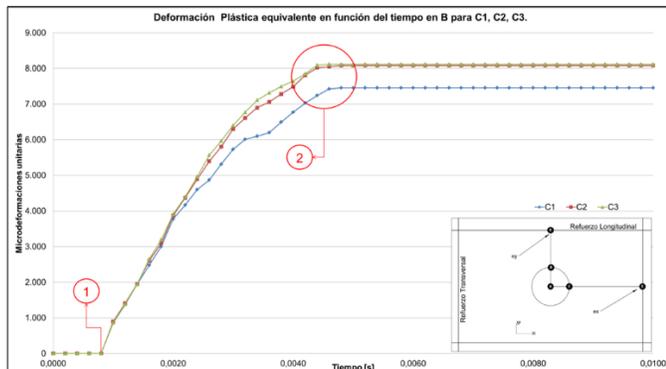


Fig. 18 Deformación plástica equivalente, punto B, c. inferior, Config. 1, 2 y 3

En la tabla IV se resumen los resultados extremos obtenidos en forma numérica, con los números en negritas correspondiendo a la cara inferior.

TABLA IV
RESULTADOS NUMÉRICOS EXTREMOS
(NEGRITAS INDICAN CARA INFERIOR)

Parámetro	Punto de interés	Configuración			tiempo [seg]
		1	2	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
Microdeformación Unitaria	ey Inf.	447.2	-445.2	-460.9	0.0046
	ex Inf.	-436.2	-444.9	-454.1	0.0044
	B (Direcc. Y)	2370.3	2516.7	1123.3	0.0046
	B (Plástica Equiv.)	7454.5	8082.6	8119.5	0.0046
Esfuerzo Normal [MPa]	A-Y	134.2	141.5	147.7	0.0046
	B-Y	223.7	233.2	240.1	0.0044
	C-X	156.7	150.8	150.0	0.0044
	RD-Y	139.4	135.4	125.2	0.0042
	RE-X	191.6	167.3	157.2	0.0046

VI. COMPARACIÓN DE RESULTADOS

A. Comparación de resultados numéricos y experimentales

En la experimentación del impacto desarrollada en este proyecto se emplean tres especímenes para cada una de las tres configuraciones de panel reforzado. Los parámetros reportados son la deformación unitaria elástica en ex y ey en la cara inferior de la plancha ubicados como se muestra en la figura 7, en dirección X y Y respectivamente en función del tiempo. También se reporta la deflexión en el punto A ubicado en un punto cercano al centro del panel estructural.

La Fig. 19 presenta los resultados experimentales y numéricos para la deformación en los puntos ex y ey , en función del tiempo, para las tres configuraciones. Las figuras muestran variaciones evidentes entre las curvas experimentales de los especímenes para una misma configuración. Únicamente la configuración 3 presenta resultados con comportamiento similar en sus tres especímenes; se observa que la mayor parte del tiempo de análisis, la deformación en el punto ey tiene signo negativo y en ex , es positivo. Este comportamiento se observa también en los resultados numéricos para esta configuración.

La figura 19(a) muestra un comportamiento similar en las pendientes de las curvas de deformación, experimentales y numéricas en los puntos ex y ey . También el signo de este parámetro en ambos resultados concuerda en la mayor parte del contacto. Por otra parte la figura 19(c) presenta valores de deformación unitaria experimentales y numéricos muy diferentes, al parecer erróneos.

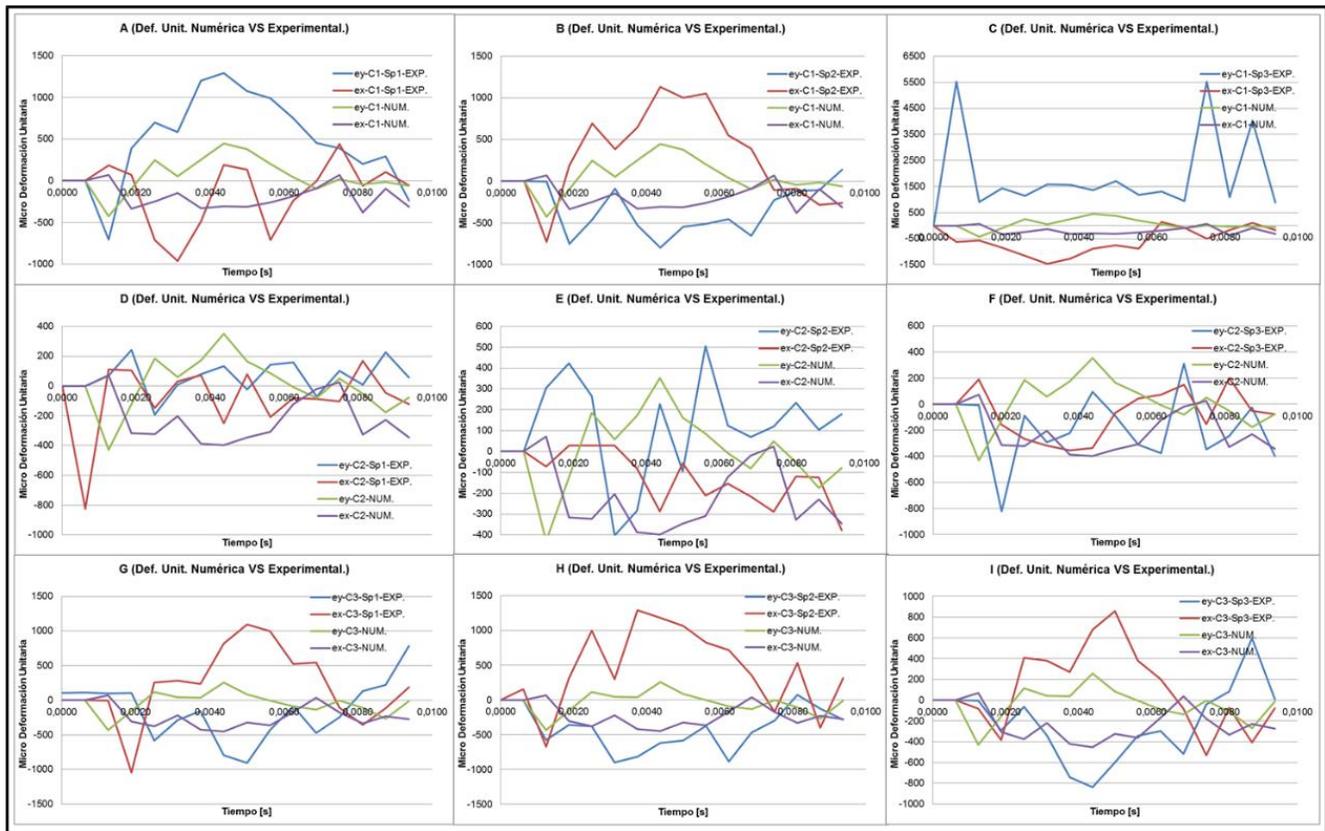


Fig. 19 Deformación unitaria numérica y experimental en posiciones ex y ey

La tabla V muestra los valores máximos de la figura 19, donde los especímenes de la configuración 3 muestran bastante consistencia entre sí y basándose en estos resultados se puede establecer que en ex se produce elongación en dirección X , mientras que en ey , dirección Y , el panel se comprime. Esto para la cara inferior de la plancha. Nótese que los numéricos son aproximadamente la mitad de los resultados experimentales.

Tabla V

DEFOR. UNITARIA MÁXIMA, POSICIONES EX Y EY (CARA INFERIOR PLANCHA)

Conf.	Punto	Experimental			Promedio	Numérico Cara Inferior
		Esp1	Esp2	Esp3		
1	ex	-960.0	1133.4	-1469.3	-1214.6	-379.0
	ey	1293.5	-793.6	5521.6		446.0
2	ex	-825.8	-376.9	-356.4	-591.08	-397.0
	ey	240.3	504.7	-820.4	372.5	-429.6
3	ex	1092.5	1290.9	857.8	975.19	-450.6
	ey	-905.7	-898.4	-837.5	-871.62	-430.3

B. Influencia de los refuerzos

A continuación se consideran únicamente los resultados numéricos para desarrollar el análisis de la influencia de los

refuerzos. La figura 20 presenta los esfuerzos normales en función del tiempo, registrados en el centro del panel (punto B) y en los refuerzos. Previamente se notó 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.

El comportamiento calculado indica que la configuración de refuerzos 3, la que incluye los refuerzos más grandes, presenta un mayor nivel de esfuerzo en la zona de contacto; la *Conf1* con los refuerzos más bajos, desarrolla el menor esfuerzo entre las tres configuraciones. Luego, el comportamiento de los refuerzos no es el esperado en comparación con la zona central. Los refuerzos con configuración *Conf1* presentan valores de esfuerzo máximo, mayores de la configuración 3. 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.

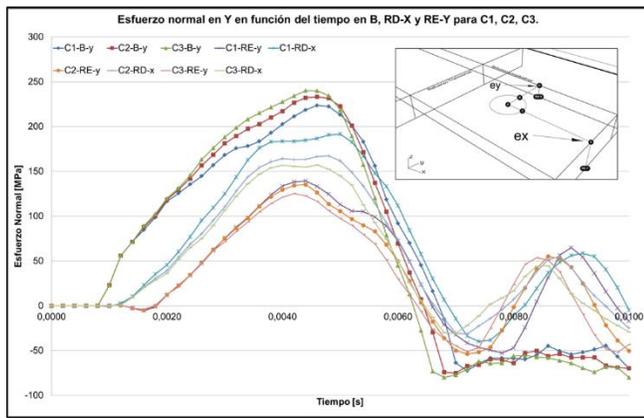


Fig. 20 Esfuerzo normal-Y, en puntos B, RD-X y RE-Y, para Conf. 1, 2 y 3

CONCLUSIONES

Se han desarrollado experimentación y simulaciones numéricas del impacto de un golpeador cilíndrico sobre paneles de plancha con tres configuraciones de refuerzos; para estas últimas se emplea el módulo *Explicit Dynamics* del programa ANSYS. Dado que se esperaba un comportamiento que sobrepasa el límite elástico del material, se incluye una curva que describe la relación esfuerzo-deformación sobre el punto de Fluencia. Finalmente se comparan resultados numéricos y experimentales, y, los numéricos obtenidos para las tres configuraciones analizadas.

La frontera de la región de contacto entre golpeador y plancha desarrolla los más altos esfuerzos, según los resultados numéricos. Esto se debe a la geometría de la esquina del golpeador. En las pruebas experimentales esto se manifestaba como marcas remanentes luego del impacto, y que caracterizan a las deformaciones permanentes en el panel de plancha central de los especímenes.

De los resultados del esfuerzo en las simulaciones numéricas, se esperaba por la curvatura que toma la plancha por el impacto, se produzcan valores negativos de deformación unitaria en la cara del impacto, sin embargo se registraron esfuerzos tensionales. Esto se debe a la alta deflexión que sufre la plancha, que excede los 10 mm para los valores máximos, lo que a través del acoplamiento con el efecto de membrana, 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.

Se compararon los resultados experimentales disponibles de paneles sometidos a impacto, con los obtenidos numéricamente. Las respuestas 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.

Se analizó la influencia de la configuración de refuerzos sobre la respuesta por carga de impacto de un panel. Conforme se incrementa la rigidez de los refuerzos, la deflexión del panel 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 del material de la plancha a soportar el desgarre.

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. 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.

RECOMENDACIONES

El tiempo de cómputo para desarrollar simulaciones con el esquema 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 mado óptimos en el modelo discreto.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen el apoyo de la ESPOL a través del proyecto semilla “Mejora de la Seguridad Estructural en Transporte Fluvial: Mecanismo de Falla de Paneles Reforzados”.

REFERENCIAS

- [1] Astilleros Navales Ecuatorianos, Planos lancha patrullera AST1304, 2011
- [2] Agila, C., Resistencia Experimental de Paneles de Plancha Reforzados Ortogonalmente Sometidos a Carga de Impacto, Tesis de grado de Ingeniero Naval, FIMCBOR-ESPOL, 2015.
- [3] DNV • GL, Finite Element Analysis, Det Norske Veritas-Germanischer Lloyd, DNVGL-CG-0127, DNV-GL-AS, Oct. 2015.
- [4] Engracia, M., Simulación de la respuesta de paneles reforzados de uso común en lanchas de planeo sometidos a carga de impacto. Tesis de grado de Ingeniero Naval, FIMCBOR-ESPOL, 2016
- [5] Jones, N., On the Mass Impact Loading of Ductile Plates. Defence Science Journal, vol. 53, No1, Enero 2003.
- [6] Liu, B., Villavicencio, R. & Guedes Sorares, C., Shear and tensile failure of thin aluminium plates struck by cylindrical and spherical indenters.
- [7] Paulling, J.R., Strength of ships, capítulo 4 en Principles of Naval Architecture, vol. I. SNAME, 1988
- [8] Popov, E., Introduction to mechanics of solids. Prentice-Hall, 1968.
- [9] Timoshenko, S., Vibration Problems in Engineering, Wiley, 2da ed., 1974.