



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería Marítima, Ciencias Biológicas, Oceánicas y
Recursos Naturales**

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DEL MECANISMO DE FALLA DE PANELES REFORZADOS BAJO CARGA LATERAL DISTRIBUIDA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Previa la obtención del Título de

INGENIERA NAVAL

Presentado por

Yesmania Betzabeth Esparza Villacís

Guayaquil – Ecuador

2016

AGRADECIMIENTO

A Dios por guiarme en cada paso, a mis padres Manuel y Patricia por su apoyo incondicional y amor fue lo que impulso a seguir siempre adelante a pesar de las dificultades, a mis hermanos Ítalo, Samantha y Josué por su comprensión y cariño. A mi director de tesis PhD. José Marín por compartir sus conocimientos durante mis años de estudio y durante la elaboración de este proyecto de investigación. A Samanta Castillo, por su colaboración en las pruebas experimentales. A todos mis amigos que de una u otra manera siempre estuvieron en el transcurso de mi vida estudiantil. Especialmente a Daniel R.

DEDICATORIA

A Dios por darme fuerzas para seguir adelante, a mis padres por enseñarme el valor del esfuerzo y la importancia de la educación, a mis hermanos por estar siempre a mi lado. A mi bisabuelita Bellita (+) que desde el cielo sigue orando por mí. A mis abuelitos, demás familiares y amigos por sus consejos y apoyo en todo momento.

DECLARACIÓN EXPRESA

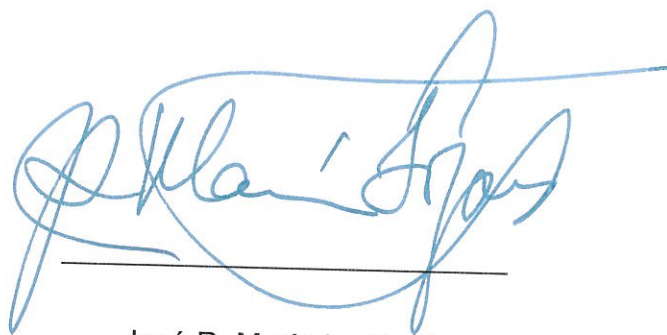
“La responsabilidad por las ideas y doctrinas expuestas en esta tesis, corresponden exclusivamente a su autor, y el patrimonio intelectual de la Tesis de Grado corresponderá a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Exámenes y Títulos Profesionales de la ESPOL)

A handwritten signature in blue ink. The name 'Betzabeth' is written in a cursive script, followed by the initials 'EV' which are enclosed in a circle.

Yesmania Betzabeth Esparza Villacís

TRIBUNAL DE GRADO



José R. Marín L., Ph.D.

Director de Tesis



Ing. Guillermo García, M.Sc.

Miembro Tribunal

RESUMEN

Se analiza experimental y numéricamente la respuesta de paneles reforzados de aluminio sometidos a carga lateral distribuida. Los paneles reforzados utilizados son de 1.125x0.675 m con refuerzos primarios y secundarios de dimensiones 60x3 mm y 30x3 mm, respectivamente, ambos tipo platina. Se presenta una descripción del Método de la Rejilla, el cual es empleado para el análisis de estructuras secundarias de buques, que consiste en la modelización del panel reforzado como un conjunto de vigas equivalentes. Para facilitar su uso se implementó un programa computacional denominado "GRILLAGE". La solución aproxima valores de deflexiones en los nodos, a partir de estos se calculan las fuerzas internas, y, los momentos de flexión y torsión para cada elemento, y con ellos se determinan los esfuerzos. Se realizó luego un análisis numérico con Elementos Finitos planos de 4 nodos, usando el programa ANSYS APDL 15.0, empleando un tamaño de malla de 1.0 cm, y considerando como empotrado los bordes del panel. Comparando ambas soluciones numéricas se estima valores cercanos para los esfuerzos en y (refuerzo primario) con una variación del 35%, mientras que en los secundarios en dirección x con 64%.

Para las pruebas experimentales, se construyen tres especímenes del panel reforzado de aleación de aluminio 5086 de 3 mm espesor. Se realizan tres tipos de pruebas con cada espécimen: Pruebas con Cargas Puntuales, Pruebas Experimentales Preliminares y Pruebas Experimentales Destructivas.

Las pruebas destructivas sometidas a carga lateral se desarrollan aplicando presión uniforme con la ayuda de una bolsa de aire: la lectura máxima que se reportó fue de 23 psi (160 kN/m^2) sobre una superficie de 1.116×0.605 metros, con una fuerza total correspondiente de 12.4 toneladas aproximadamente. En estas pruebas el máximo valor de deformación unitaria fue de $3160 \mu\epsilon$, teniendo 1.08 veces por encima del nivel de deformación para la Fluencia.

Para analizar la influencia de los refuerzos, se tiene de los resultados experimentales que al exceder el límite elástico, implica que no se puede desarrollar tanto esfuerzo y por lo tanto esa carga la absorbe el refuerzo secundario, porque el principal cede. También, debido a que la fuerza horizontal influye en la zona que se encuentra “empotrado”, esta fuerza colabora en aumentar la resistencia del panel en forma evidente, pero esto se considera un efecto no lineal de elevada complejidad.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	vi
ÍNDICE GENERAL.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABLAS	xv
ÍNDICE DE ANEXOS	xvi
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO GENERAL	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
BENEFICIOS	4
HIPÓTESIS.....	4
CAPÍTULO 1	5
1.1. Descripción del Método de la Rejilla (“Grillage”).....	5
Fuerzas y Momentos Externos	12
1.2. Implementación del Método de la Rejilla	14
Descripción del Programa	15
Descripción de las Variables y Archivo de Datos	17

Descripción del Archivo de Resultados	22
1.3. Análisis de la Plancha Reforzada utilizando Elementos Finitos.	23
Descripción de la Lancha Patrullera	24
Esquema de los especímenes a analizar	26
Desarrollo del Modelo geométrico con elementos finitos	28
1.4. Descripción del Mecanismo de Falla de paneles reforzados por Resistencia Última.....	31
CAPITULO 2.....	35
2.1. Fabricación de Especímenes.....	35
2.2. Descripción del Programa Experimental.....	40
Diseño y construcción del marco de acero.....	40
Fabricación de la Bolsa de aire a presión.....	41
Ubicación de los medidores de deformación	43
Registro de la Presión Aplicada	48
Desarrollo de las pruebas.....	52
Inconvenientes Técnicos	57
2.3. Resumen de Resultados Experimentales	59
CAPITULO 3.....	63

3.1. Análisis de la distribución de esfuerzos y deformaciones obtenidas con los modelos Numéricos.	63
Análisis y comparación de deflexiones.....	66
Análisis y comparación de esfuerzos	68
3.2. Comparación de Resultados Numéricos y Experimentales.	72
Alma del Refuerzo Primario.....	73
Alma del Refuerzo Secundario	75
Plancha en dirección “y”.....	76
Plancha en dirección “x”.....	77
3.3. Descripción de los Mecanismos de Falla de los Paneles.	80
Influencia de la Fuerza Horizontal	88
CONCLUSIONES	89
RECOMENDACIONES.....	92
BIBLIOGRAFÍA.....	93
ANEXOS.....	94

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. Esquematización del Panel Reforzado a Rejilla.	7
FIGURA 2. Elemento Viga.	8
FIGURA 3. Fuerzas internas nodales del elemento Viga.	10
FIGURA 4. Esquema de la doble interpolación lineal.	12
FIGURA 5. Fuerzas y Momentos externos equivalentes.	13
FIGURA 6. Diagrama de Flujo del Programa para análisis de paneles reforzados.	16
FIGURA 7. Numeración de Nodos y Elementos.	19
FIGURA 8. Ilustración de las variables de la geometría del panel y refuerzos.	21
FIGURA 9. Simbología utilizada para los refuerzos en dirección-x.	22
FIGURA 10. Posición del panel seleccionado de la L/P.	25
FIGURA 11. Esquema de los tres especímenes del panel reforzado.	27
FIGURA 12. Esquema de panel reforzado con AutoCAD, Configuración 1..	28
FIGURA 13. Geometría de la conf. 2 en ANSYS APDL 15.0	29
FIGURA 14. Condiciones de contorno del Panel reforzado.	30
FIGURA 15. Consideraciones de diseño estructural basado en el Estado Límite Último.	32
FIGURA 16. Construcción de un panel reforzado.	36

FIGURA 17. Esquema de los especímenes.	37
FIGURA 18. Base estructural de acero	40
FIGURA 19. Tubo con la válvula en su nueva posición, comenzando a forrarla con caucho.	42
FIGURA 20. Ubicación de la bolsa de aire a presión dentro de la base estructural de acero, con el sistema de alimentación de aire.	42
FIGURA 21. Esfuerzos en dirección transversal (S_y).	44
FIGURA 22. Esfuerzos en dirección longitudinal (S_x).	45
FIGURA 23. Posición de extensómetros para pruebas experimentales sobre la plancha reforzada.	46
FIGURA 24. Esquema de la posición de los 4 extensómetros instalados. ...	46
FIGURA 25. Niveles de esfuerzos en las conexiones de empotramiento.....	48
FIGURA 26. Medidor SPSA-1 instalado	48
FIGURA 27. Circuito del Medidor de Presión Utilizado.....	49
FIGURA 28. Conexión del equipo de adquisición de datos.	49
FIGURA 29. Voltaje vs Presión SPSA-1.....	50
FIGURA 30. Diagrama de flujo de las configuración del medidor SPSA-1 ...	51
FIGURA 31. Esquema final de los equipos durante las pruebas	53
FIGURA 32. Deformaciones unitarias aplicando pesos concentrados.	54
FIGURA 33. Deformaciones unitarias y presión, en Pruebas Preliminares. .	55
FIGURA 34. Deformaciones unitarias, prueba final.	56
FIGURA 35. Panel deformado, aplicando presión de 98000 N/m ²	64

FIGURA 36. σ_x en el panel en el sistema de referencia global.	65
FIGURA 37. σ_y en el panel en el sistema de referencia global.	65
FIGURA 38. Distribución longitudinal de la deflexión, aplicando presión de 98000 N/m ²	67
FIGURA 39. Distribución transversal de la deflexión, aplicando presión de 98000 N/m ²	67
FIGURA 40. Distribución de σ_y a lo largo de distintos cortes del panel, aplicando presión de 98000 N/m ²	69
FIGURA 41. Distribución de σ_x a lo largo de distintos cortes del panel, aplicando presión de 98000 N/m ²	70
FIGURA 42. Esquema de la posición de los 4 extensómetros instalados. ...	73
FIGURA 43. Comparación de resultados numéricos y experimentales a la altura del refuerzo primario.	74
FIGURA 44. Comparación de resultados numéricos, experimentales y programa "GRILLAGE " a la altura del refuerzo secundario.	75
FIGURA 45. Comparación de resultados numéricos, experimentales y programa "GRILLAGE " a la altura de la plancha en dirección y.	76
FIGURA 46. Comparación de resultados numéricos, experimentales y programa "GRILLAGE " a la altura de la plancha en dirección x.	77
FIGURA 47. Influencia del tamaño de la soldadura:	78
FIGURA 48. Resultados experimentales en la fibra más alejada de los refuerzos en cada dirección.	81

FIGURA 49. Primera razón de incremento de la prueba 1.	82
FIGURA 50. Segunda razón de incremento de la prueba 1.	83
FIGURA 51. Resultados experimentales en la fibra más alejada de los refuerzos primario y secundario.	84
FIGURA 52. Primera razón de incremento de la prueba 2.	85
FIGURA 53. Resultados experimentales en la fibra más alejada del refuerzo primario y secundario.	86
FIGURA 54. Primera razón de incremento de la prueba 3.	87
FIGURA 55. Segunda razón de incremento de la prueba 3.	87
FIGURA 56. Esquema del refuerzo principal sometido a presión uniforme. .	88

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA I. Grados de Libertad de la Estructura: Condiciones de Soporte.	9
TABLA II. Dimensiones y Características principales de la L/P.	24
TABLA III. Características del panel reforzado.	26
TABLA IV. Configuración de los tres especímenes a analizar.	27
TABLA V. Dimensiones finales de cada espécimen	38
TABLA VI. Valores de espesores de cada espécimen, por áreas.....	39
TABLA VII. Posición de los extensómetros	47
TABLA VIII. Deformaciones unitarias por unidad de peso aplicado.	60
TABLA IX. Microdeformación unitaria y presión máxima pruebas preliminares	61
TABLA X. Microdeformación unitaria y presión máxima pruebas destructivas	62
TABLA XI. Valor de micro deformación en el alma del refuerzo primario. ...	74
TABLA XII. Valor de micro deformación en el alma del refuerzo secundario.	75
TABLA XIII. Valor de micro deformación en la plancha en dirección y.	76
TABLA XIV. Valor de micro deformación en la plancha en dirección x.	77

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A.....	95
ANEXO B.....	97
ANEXO C.....	98
ANEXO D.....	101
ANEXO E.....	102

INTRODUCCIÓN

Cuando se diseña la estructura del fondo de un buque normalmente se establece como límite la Fluencia del material, pero la estructura no se va a romper sino que se producen deformaciones permanentes. Además del mencionado, Plasticidad Local, otros modos de falla estructurales son, [1]: Inestabilidad (Pandeo), Deformación excesiva, Fatiga, y, Fractura frágil o dúctil. Sería muy beneficioso entender cómo, después de que se presenta la plasticidad local, se puede incrementar la carga y finalmente alcanzar la Resistencia Última. Para analizar paneles reforzados, conjuntos que forman la estructura secundaria de un buque, los métodos comúnmente empleados son, [2]: Teoría de las Planchas Ortotrópicas, Teoría de la Viga sobre Base Elástica, Teoría de Rejillas ("Grillage") y Método de Elementos Finitos. Sin embargo si se desea alcanzar la falla total de una estructura, se producen elevadas deformaciones, que requieren de un análisis no lineal, de elevada complejidad analítica, por eso se hace necesario complementarlo con experimentación.

Para analizar planchas reforzadas a nivel lineal la Teoría de las Planchas Ortotrópicas, [3], las considera como placas homogéneas con propiedades elásticas diferentes en dos direcciones ortogonales; la Teoría de la Viga sobre una Base Elástica, considera que cada refuerzo puede ser analizado como una viga individual que tiene un soporte elástico en su punto de intersección; la Teoría de Rejillas ("Grillages") las considera como un sistema de vigas con

cargas perpendiculares que se apoyan entre sí; finalmente, el método de Elementos Finitos, MEF, discretiza y aplica una interpolación en cada segmento en función de los valores nodales. El MEF provee mucha precisión en casos estructurales, pero el tiempo para preparar el modelo es elevado, por lo que alguno de los otros métodos podría servir como análisis a nivel preliminar.

El Método de la Rejilla ("Grillage"), MdIR, consiste en la conversión de la estructura del panel reforzado en un conjunto de vigas conectadas rigidamente entre sí, es decir, idealiza el panel por una rejilla equivalente. En general las rejillas son ortogonales, es decir, se constituye de dos conjuntos de vigas que se unen entre sí en ángulos rectos. Para el análisis matemático del MdIR, Hughes, [4], considera la flexión de un elemento viga, que está cargado por fuerzas y momentos en cada nodo y se supone que es de rigidez flexural, EI , uniforme. A partir de ellos se obtiene una Matriz de Rigidez de los Elementos, en función de los desplazamientos de los nodos, aplicando la ecuación de la Teoría de Vigas, y con este un sistema de ecuaciones. El proceso es bastante complejo, y por esta razón la implementación en un programa computacional se hace necesaria.

Entre los varios estudios con paneles reforzados, Murilo, [5], analizó numéricamente el colapso de paneles estructurados de aluminio sometidos a carga uniaxial compresiva para analizar Pandeo. Smith, [6], realizó pruebas

de colapso con rejillas de acero soldado a escala real bajo compresión axial, y compresión axial combinada con presión lateral, analizando la cubierta y fondo simple de una embarcación. Belenkiy & Raskin, [7], analizaron el comportamiento plástico con elementos finitos de estructuras típicas de una embarcación; específicamente analizaron vigas, rejillas y placas sometidas a extremas cargas laterales. Los estudios mencionados, trabajaron con paneles reforzados en acero y no realizaron una comparación entre resultados experimentales y numéricos. Teniendo la necesidad de entender el comportamiento de paneles del fondo en varamiento violento, se podrían realizar pruebas destructivas aplicando carga lateral distribuida extrema a modelos de paneles estructurados en aluminio, típicos de embarcaciones fluviales. Se pretende observar el mecanismo de falla, con la aplicación de carga extrema normal al panel reforzado.

OBJETIVO GENERAL

Describir los mecanismos de falla del conjunto plancha más refuerzos durante ensayos destructivos aplicando carga lateral extrema.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Implementar el método de la Rejilla (“Grillage”) para analizar planchaje reforzado de diseño local para uso fluvial y compararlo con los resultados de Elementos Finitos.
2. Desarrollar pruebas experimentales del modelo de plancha con refuerzos de embarcaciones fluviales típicas locales aplicando carga lateral distribuida extrema.
3. Describir el mecanismo de falla del modelo de plancha refuerzo sometido a carga lateral extrema, en base a los resultados numéricos y experimentales.

BENEFICIOS

En nuestro país, se tiene poca experiencia en el Análisis de Resistencia Última en Paneles Estructurales, fenómeno de alta complejidad analítica o numérica. Mediante la experimentación se podría entender los mecanismos de falla, por la aplicación de cargas laterales extremas a planchas reforzadas, para en el futuro tener más confianza en los resultados de los modelos numéricos.

HIPÓTESIS

La interacción entre plancha y refuerzos en el fondo de una embarcación sometida a carga lateral extrema puede estudiarse mediante pruebas experimentales con modelos.

CAPÍTULO 1

MODELOS MATEMÁTICOS PARA ANALIZAR PANELES REFORZADOS.

1.1. Descripción del Método de la Rejilla (“Grillage”)

En el Método de la Rejilla, MdIR, cada segmento de los dos conjuntos de los miembros ortogonales que refuerzan a una plancha, se lo representa como una viga + eje tursor. Dicho sistema está conectado entre sí, en los dos extremos, con desplazamientos y rotaciones comunes, que representan los grados de libertad en cada punto de conexión. Para que las vigas alcancen el equilibrio, se relacionan las fuerzas externas con los desplazamientos nodales a través de la Matriz de Rigidez, definida con la geometría y propiedades

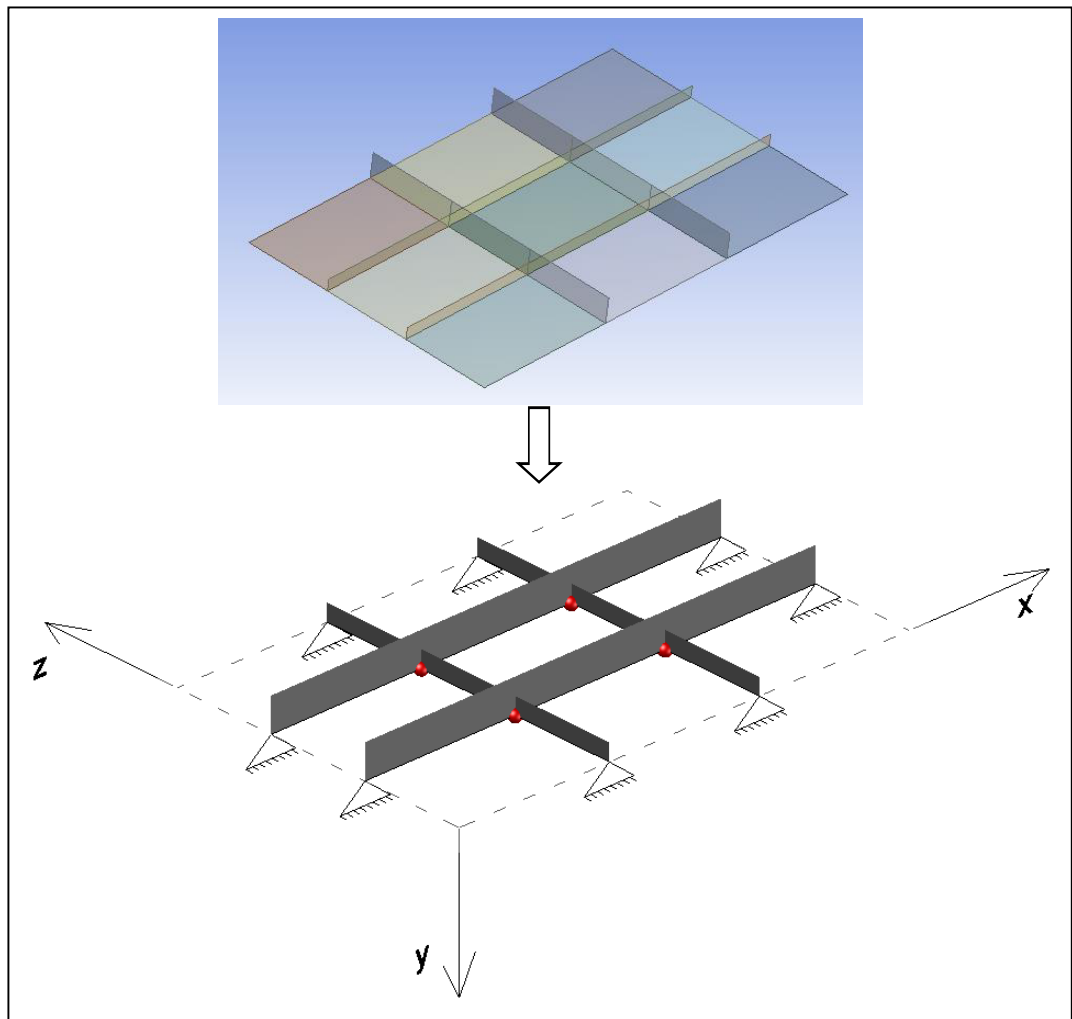
elásticas de cada elemento. El concepto de Ancho Efectivo se emplea para transformar el conjunto plancha más refuerzos, en vigas que incluye rigidez torsional.

La carga lateral distribuida que se aplica perpendicular al panel reforzado, se transforma en fuerzas y momentos equivalentes en las intersecciones de los dos sistemas de vigas. Equilibrando en forma conjunta todos los elementos, se forma un sistema global de ecuaciones, y aplicando las condiciones de soporte que afecta a los bordes del sistema, se lo resuelve empleando la eliminación de Gauss-Jordan. Dado que el proceso es algebraicamente largo, para su aplicación se desarrolla un programa computacional.

El MdIR, permite resolver problemas de plancha reforzada modelados como grupos de vigas conectadas entre sí en dos direcciones, formando una malla que se conecta ortogonalmente llamada "rejilla". En cada segmento de refuerzo del conjunto de vigas se emplea el concepto de Ancho Efectivo para transformar el conjunto plancha más refuerzo, en una viga simple + eje torsor. De esta manera, el análisis se reduce a la de una rejilla sin plancha, ver figura 1. La rotación flexural en una dirección implica rotación en torsión del otro elemento y por ello el equilibrio torsional también es establecido. En este método la carga distribuida que tiene unidades de fuerza/área, se convierte en fuerza/longitud aplicada en las intersecciones de las vigas y luego se calculan las Fuerzas y Momentos Flexionantes y Torsionales externos equivalentes

aplicados en los nodos. La solución de la rejilla utiliza la teoría de Vigas y Ejes Torsores, lo que implica acoplar los elementos del sistema para determinar las deflexiones comunes en los puntos de conexión.

FIGURA 1. Esquematización del Panel Reforzado a Rejilla.

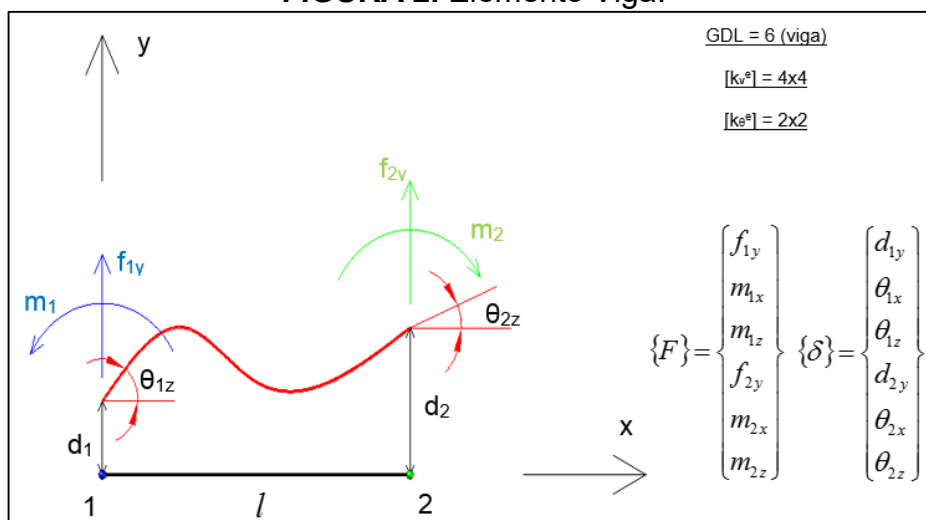


Fuente: Autora.

Si se tiene n_x refuerzos en dirección longitudinal y n_z en dirección transversal, el número total de nodos de la estructura, N , es $(n_x + 2) * (n_z + 2)$, y los grados de libertad totales del sistema serían $3N$. El sistema está conformado por las ecuaciones de equilibrio en los puntos de intersección $(n_x * n_z)$ y las condiciones de contorno $(n_x * 2) + (n_z * 2)$. El resultado es un sistema de $3N$ ecuaciones con igual número de incógnitas.

Se define como grados de libertad a las variables que son seleccionados para definir el sistema de ecuaciones de la Matriz de Rigidez. En el caso de una viga-eje tursor, dicha matriz es de orden 6x6, ya que cada elemento consta de 2 nodos y 3 grados de libertad por cada nodo, como se muestra en la figura 2. Por lo tanto se tendrán dos grupos de fuerzas y desplazamientos, equilibrando la flexión y torsión, que dependen de los grados de libertad de cada elemento:

FIGURA 2. Elemento Viga.



Fuente: HUGHES, Ship Structural Design.

En el MdIR cada elemento entre puntos de conexión es considerado como una viga + eje torsor, teniendo como grados de libertad en cada extremo: la deformación vertical, d_{iy} , y, las rotaciones flexural, θ_{ix} , y torsional, θ_{iz} ; $u_i^T = [d_{iy} \cdot \theta_{ix} \cdot \theta_{iz}]$. En los nodos que están ubicados en el borde de la plancha reforzada, a sus grados de libertad se asignan valores conocidos como condiciones de soporte, ver tabla I.

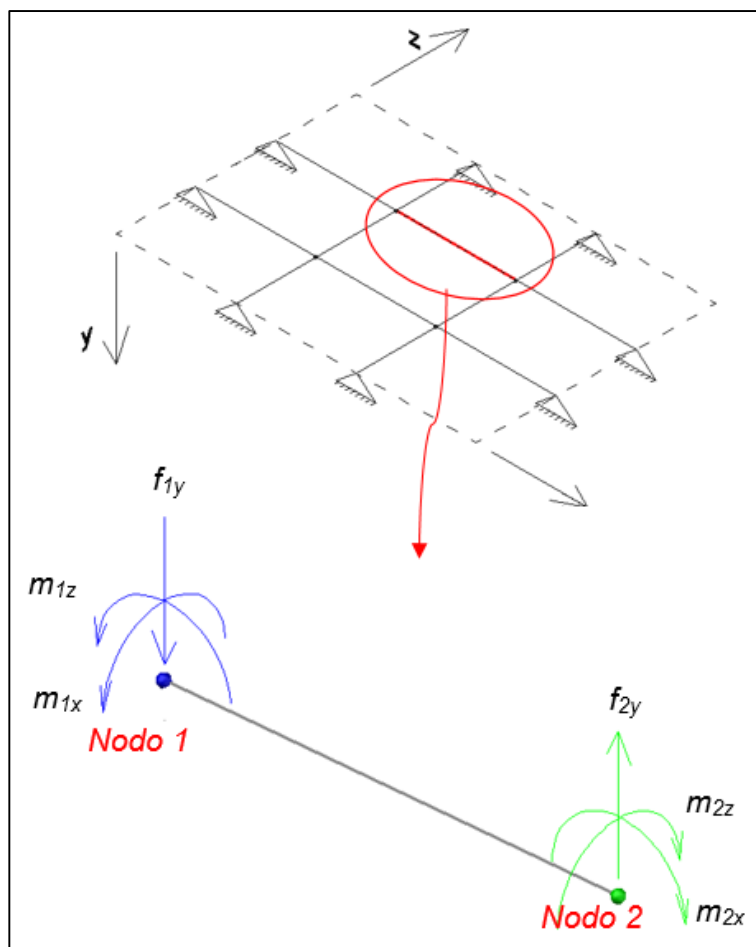
TABLA I. Grados de Libertad de la Estructura: Condiciones de Soporte.

	Desplazamiento	Rotaciones	
	y	x	z
Empotrada	0	0	0
Simpl. Soportada	0	1	0
Libre	1	0	1

Fuente: Autora.

En una viga actúan fuerzas verticales y momentos externas respecto de los dos ejes principales en el plano y momento de torsión alrededor de su propio eje. Las fuerzas internas que actúan sobre el eje de la viga longitudinal son: fuerza cortante $-f_{1y}$ y f_{2y} y momentos internos m_{1z} y $-m_{2z}$. El signo negativo en los términos de fuerza y momento es para mantener el equilibrio de la viga + eje torsor. Mientras que sobre el eje axial de la viga transversal los momentos en torsión m_{1x} y $-m_{2x}$ como se presenta en la figura 3.

FIGURA 3. Fuerzas internas nodales del elemento Viga.



Fuente: Autora.

Acorde con Hughes, [4], y Logan, [9], capítulo 5, a través de las ecuaciones de equilibrio de la viga pueden obtener los coeficientes del sistema de vigas de la rejilla. La matriz de rigidez es la combinación de “pequeñas” sub-matrices, en la cual se relacionan Fuerzas Externas y desplazamientos nodales de cada elemento. Determinando las sub-matrices que conforman la matriz de rigidez de cada elemento se tiene, la matriz k_v correspondiente al equilibrio de las

fuerzas verticales y momentos flectores en el plano x-z; en forma similar se puede determinar la matriz k_θ que corresponde a los momentos de torsión en el plano y-z. En el anexo A, se describe con detalle las ecuaciones y coeficientes de la matriz. Combinando las matrices mencionadas, se obtiene la matriz de rigidez, [9], de cada elemento del panel reforzado a analizar:

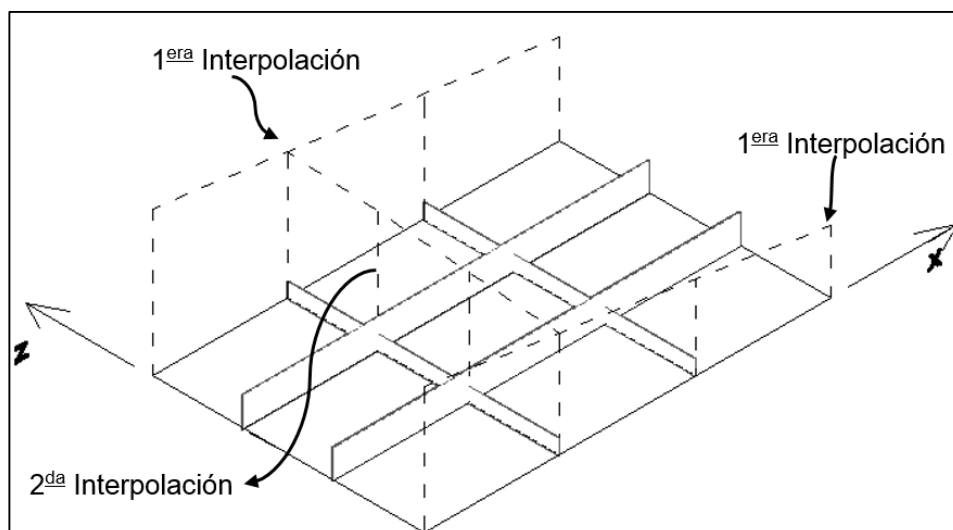
$$\begin{Bmatrix} f_{1y} \\ m_{1x} \\ m_{1z} \\ f_{2y} \\ m_{2x} \\ m_{2z} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{12EI}{L^3} & 0 & \frac{6EI}{L^2} & -\frac{12EI}{L^3} & 0 & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 & -\frac{GJ}{L} & 0 \\ \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{12EI}{L^3} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & 0 & \frac{12EI}{L^3} & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 \\ 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 & \frac{4EI}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} d_{1y} \\ \theta_{1x} \\ \theta_{1z} \\ d_{2y} \\ \theta_{2x} \\ \theta_{2z} \end{Bmatrix} \quad (1.1)$$

donde: E es el módulo de Young, G es el módulo de rigidez, I es el momento de inercia de la sección transversal, J es la inercia polar y L es la longitud de cada viga. Se asume que en cada dirección las vigas tienen rigidez constante a la flexión, EI , y, torsión GJ .

Fuerzas y Momentos Externos

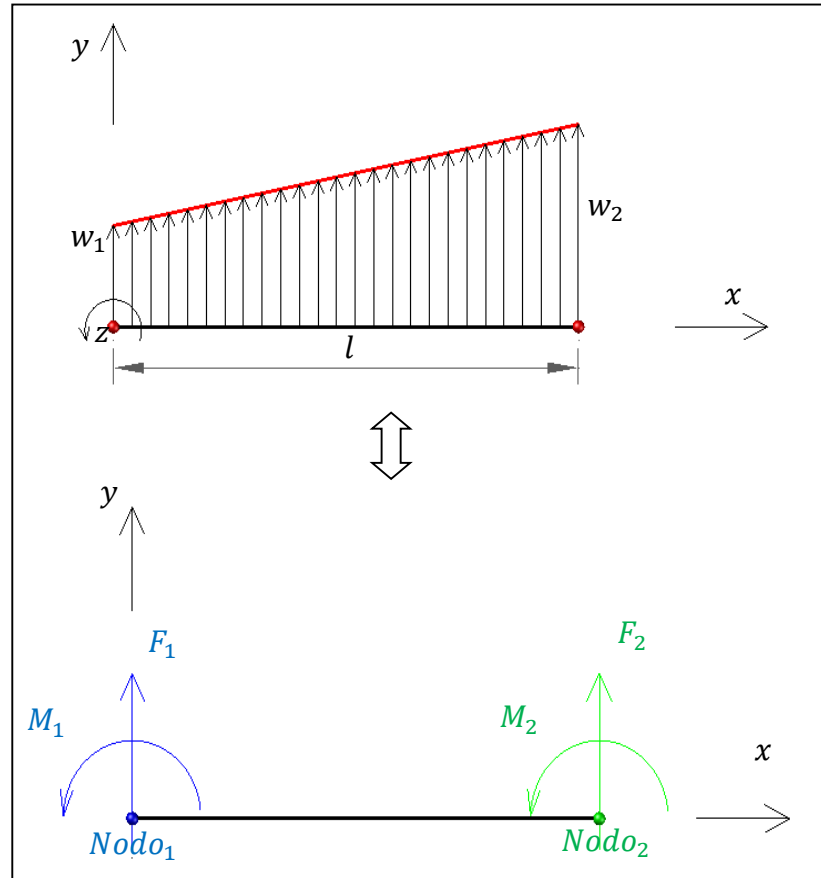
La carga externa aplicada perpendicular a la plancha reforzada de la estructura debe de estar en equilibrio con las fuerzas internas en cada elemento. En el MEF las cargas externas se aplican sólo en los nodos y para ello la carga distribuida se convierte en fuerzas y momentos externos equivalentes en las intersecciones de cada viga, figura 4. En el presente caso la carga por unidad de área se especifica en los cuatro bordes del panel reforzado, y luego de una doble interpolación lineal se estima w_1 y w_2 que representa la carga distribuida por unidad de longitud en los extremos de cada elemento, [4].

FIGURA 4. Esquema de la doble interpolación lineal.



Fuente: Autora.

FIGURA 5. Fuerzas y Momentos externos equivalentes.



Fuente: Autora.

De la referencia [4], se aplican las siguientes expresiones para estimar las Fuerzas y Momentos externos equivalentes:

Para el nodo 1:
$$F_1 = l \cdot \left(\frac{7}{20} w_1 + \frac{3}{20} w_2 \right) \quad (1.2)$$

$$M_1 = l^2 \cdot \left(\frac{1}{20} w_1 + \frac{1}{30} w_2 \right) \quad (1.3)$$

Para el nodo 2:

$$F_2 = l \cdot \left(\frac{3}{20} w_1 + \frac{7}{20} w_2 \right) \quad (1.4)$$

$$M_2 = -l^2 \cdot \left(\frac{1}{30} w_1 + \frac{1}{20} w_2 \right) \quad (1.5)$$

La Matriz de Rigidez Global se forma combinando las matrices rigidez de todos los elementos que forman el sistema de panel reforzado. Luego se aplican las condiciones de contorno, que dependen del tipo de soporte. De este proceso algebraico se obtiene desplazamientos y rotaciones del sistema global. Luego se pueden calcular las fuerzas y momentos internos en cada elemento, y, finalmente los esfuerzos que se desarrollan en el panel reforzado. Para facilitar la solución numérica de un panel se desarrolla un programa computacional, que implementa el método de la rejilla para la respuesta mecánica de un panel rigidizado que se describe en el siguiente subcapítulo.

1.2. Implementación del Método de la Rejilla

La solución del equilibrio de fuerzas en cada viga entre los puntos de conexión, equivale a la de un sistema de ecuaciones con la Matriz de Rigidez del sistema global como los coeficientes. Los términos independientes corresponden a las cargas externas equivalentes y las reacciones de soportes. El proceso descrito se implementa en un programa computacional cuyos datos de entrada son: dimensiones de la plancha, dimensiones y número de los

refuerzos en cada dirección, propiedades del material, tipo de carga y condiciones de soporte. Se utiliza como base el algoritmo del libro de Logan, D. llamado “Two-Dimensional Frame and Grid” que implementa el método de Elementos Finitos, para analizar vigas con cargas perpendiculares al plano y el resultado es un programa que modela paneles reforzados.

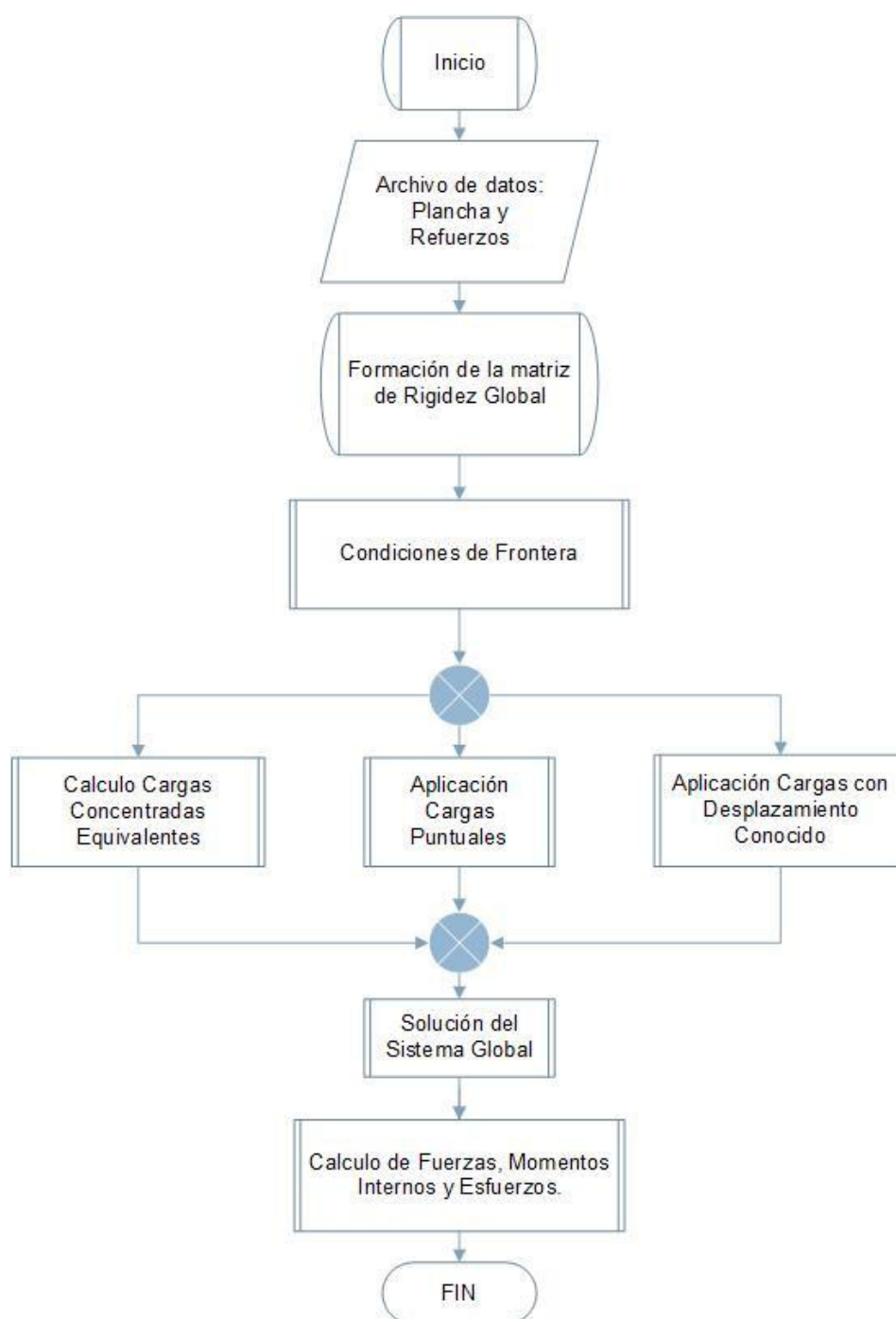
Para el análisis de flexión de planchas reforzadas por el Método de la Rejilla, se utiliza como base el programa PFRAME, presentado en el apéndice del capítulo 5 del libro de Logan [9]. A dicho programa se le añaden 4 subrutinas, las cuales tienen como objetivo:

1. Lectura de datos del panel reforzado y partición del dominio en elementos viga,
2. Cálculo de las propiedades seccionales de los refuerzos equivalentes,
3. Cálculo de las cargas externas equivalentes en cada nodo a partir de la distribución de presión,
4. Implementación de la solución para nodos con desplazamiento dado.

Descripción del Programa

El algoritmo del programa tiene el diagrama de flujo, de la figura 6:

FIGURA 6. Diagrama de Flujo del Programa para análisis de paneles reforzados.



Fuente: Autora.

Para realizar el algoritmo descrito en la figura anterior se adapta el programa principal que se relaciona con 14 subrutinas, que analizan numéricamente el problema. El programa principal requiere el ingreso del nombre del archivo de datos externo y el de resultados (con formato *texto*), como se describe a continuación.

Descripción de las Variables y Archivo de Datos

La subrutina data.F90, requiere los siguientes parámetros del panel reforzado. Las unidades del problema son definidas por las del módulo de Young.

- Nombre del Proyecto, (alfanumérico de 40 caracteres)
- Dimensiones de la Plancha:
 - Longitud $[L]$, en dirección x
 - Ancho $[L]$, en dirección z
 - Espesor $[L]$
- Propiedades del Material:
 - Módulo de Young del material $[F / L^2]$
 - Coeficiente de Poisson
- Dimensiones de los refuerzos en cada dirección:
 - Alto y espesor del alma de los refuerzos en dirección z $[L]$
 - Ancho y espesor del ala de los refuerzos en dirección z $[L]$

- Alto y espesor del alma de los refuerzos en dirección x [L]
- Ancho y espesor del ala de los refuerzos en dirección x [L]
- Número de refuerzos de la plancha:
 - Número de refuerzos en dirección z
 - Número de refuerzos en dirección x
- Ancho efectivo
 - Ancho efectivo de plancha para los refuerzos longitudinales, entre 0 y 1.0.
 - Ancho efectivo de plancha para los refuerzos transversales, entre 0 y 1.0.
- Condiciones de Soporte

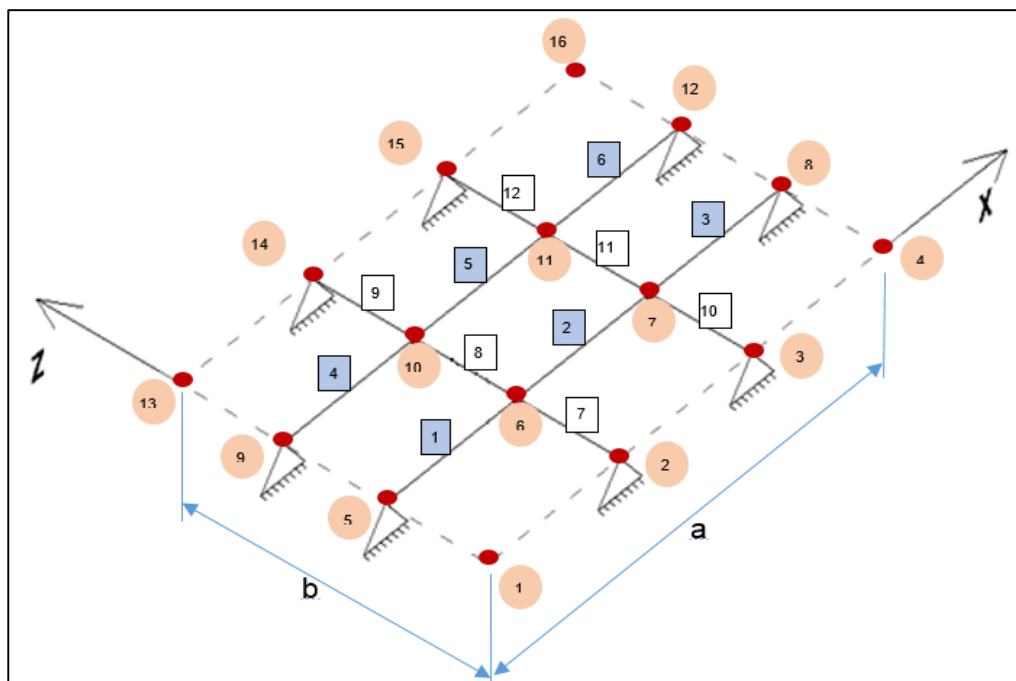
Las condiciones de frontera se asignan a cada borde del panel, donde 1: empotrada, 2: simplemente soportada, 3: libre.

- Borde inferior del panel (desde el nodo 1 al 4)
- Borde derecho del panel (desde el nodo 4 al 16)
- Borde superior del panel (desde el nodo 13 al 16)
- Borde izquierdo del panel (desde el nodo 1 al 13)
- Tipos de Carga
 - Presión aplicada en las esquinas del panel [F / L^2]
 - Ps1 (nodo 1)
 - Ps2 (nodo 2)
 - Ps3 (nodo 3)

- Ps4 (nodo 4)
 - Número de nodos totales con desplazamiento dado
 - Nodo, grado de libertad y desplazamiento dado
 - Número de nodos totales con carga puntual
 - Nodo, fuerza y, momento x y momento z

La implementación del programa continúa con la identificación y numeración de los elementos y nodos el sistema, como se presenta en la figura 7. La identificación comienza en la posición (0,0) hacia derecha en el eje x. Además el programa enumera los elementos, primero en dirección-x, y después en dirección-z, como se describe en la siguiente figura:

FIGURA 7. Numeración de Nodos y Elementos.



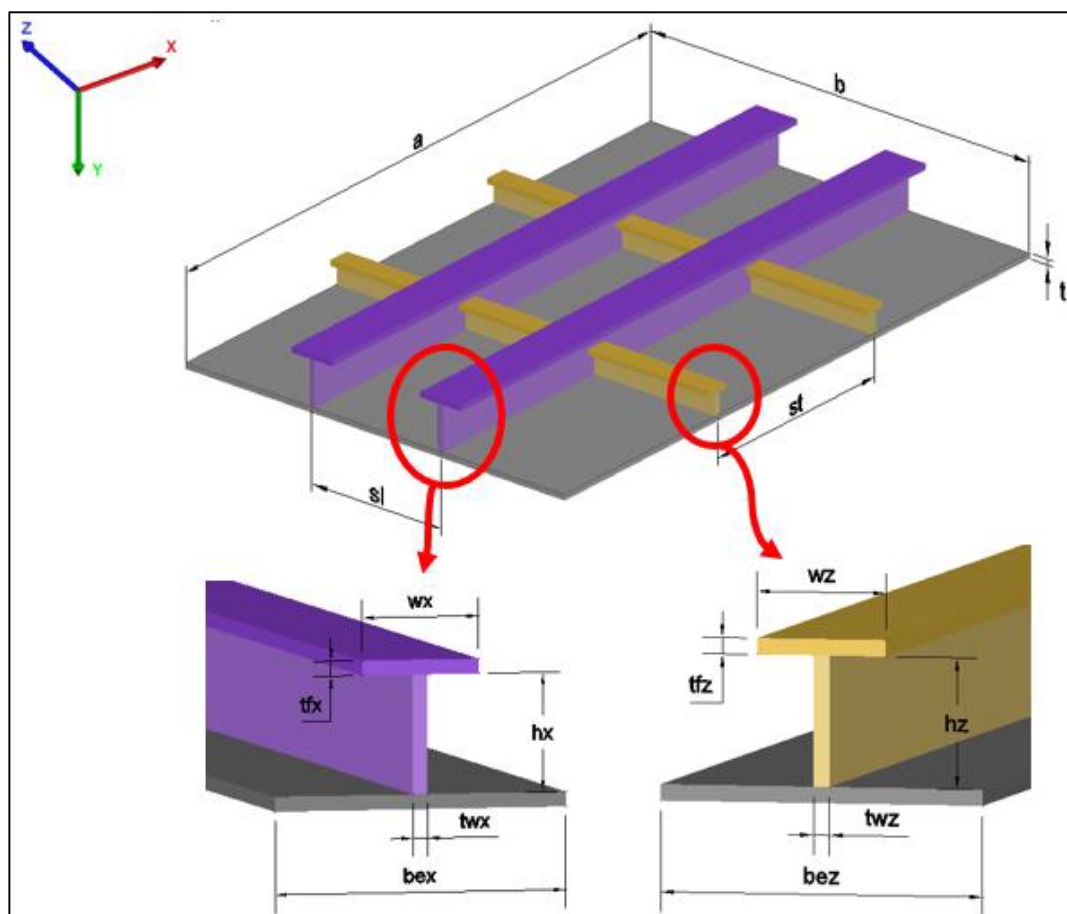
Fuente: Autora.

En la siguiente subrutina `prop_element.F90` se calculan las propiedades seccionales del sistema de vigas que representa el panel reforzado:

- ✓ Se hace el cálculo de las propiedades seccionales en cada dirección.
Debido a que los refuerzos pueden ser de diferente tamaño, por lo que se los identifica como refuerzos longitudinales (dirección x) y transversales (dirección z).
- ✓ A partir del número de refuerzos y las dimensiones de las plancha se determina el número de elementos y la separación entre ellos.
- ✓ Se calcula las propiedades de cada elemento: área total de la sección transversal, posición del centroide, inercia respecto al eje neutro, módulo seccional, e , inercia polar.

Dado que se va a calcular los mismos parámetros para ambas direcciones se explica de forma general como se han definido las características principales del panel reforzado en una de ellos.

FIGURA 8. Ilustración de las variables de la geometría del panel y refuerzos.

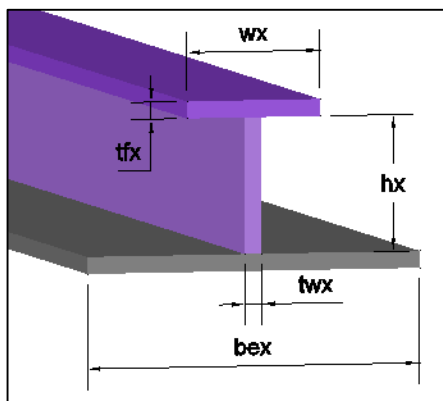


Fuente: Autora.

En la figura 8, se presenta la sección transversal de los refuerzos con las dimensiones correspondientes. En esta parte se utiliza la referencia, [10], de la Sociedad Clasificadora Det Norske Veritas, se obtiene el ancho efectivo, de acuerdo a la configuración del panel reforzado a analizar, en anexo B se presenta el valor que se utiliza en este caso. Este valor se ingresa como parte del archivo de datos.

Con respecto a la torsión, se tiene de la referencia [9]:

FIGURA 9. Simbología utilizada para los refuerzos en dirección-x.



Fuente: Autora.

$$J = \frac{1}{3} \cdot (b_{ex} t^3 + h_x t_{wx}^3 + w_x t_{fx}^3) \quad (1.6)$$

Descripción del Archivo de Resultados

Los datos ingresados y los resultados del análisis del panel reforzado se graban en un archivo externo, ver anexo C; primero se incluyen las características principales del panel reforzado, dimensiones de los refuerzos, y el número total de nodos y elementos. Luego se presentan las posiciones de los nodos en el plano xz, y, se identifican las condiciones de frontera que van a tener los nodos en los cuatro bordes del panel. Luego se presentan las fuerzas y momentos externos equivalentes que actúan en los nodos del panel reforzado. También se presentan las características principales de los

elementos como son: área, inercia, constante torsional y módulo seccional. Finalmente se incluyen los resultados de deflexión y la distribución de fuerzas, momentos y los esfuerzos en los extremos de cada elemento.

1.3. Análisis de la Plancha Reforzada utilizando Elementos Finitos.

Se representa con elementos Planos una plancha reforzada correspondiente al modelo del fondo de una lancha patrullera construido de aluminio 5086, de 13 metros de eslora. Se desarrolla el análisis estructural con el método de Elementos Finitos por carga lateral distribuida. Se esquematiza primero en AutoCAD un mapa de áreas de los paneles reforzados, guardando el archivo con formato IGES para importarlo desde el software ANSYS APDL 15.0. Para definir el modelo estructural, se establecen las propiedades del material a ser usado y se realiza la partición de cada área para el enmallado; para esto se usan elementos planos con 4 nodos, que permiten analizar planchas con carga en el plano y lateral. Se analizan tres paneles reforzados variando el tamaño de los refuerzos tipo platinas con relación de escala 2 a 1, teniendo los paneles longitud de 1.125 metros y ancho de 0.675 metros y espesor de la plancha de 3 mm. La carga se aplica como presión distribuida uniforme sobre la plancha y los bordes se consideran empotrados. Los resultados de este proceso permiten visualizar el comportamiento secundario de la plancha más refuerzos, y, el terciario representado por la pancha entre refuerzos.

Descripción de la Lancha Patrullera

En este trabajo se va a analizar el panel reforzado del fondo de la lancha patrullera LP-AST-1304 de 13 metros de eslora, que tiene superestructura y casco contruidos con Aluminio Naval 5086; el casco tiene sección transversal en V, y, diseñada para alcanzar una velocidad máxima de 25 nudos, [8]. La estructura es de cuadernaje longitudinal, conformado por 17 cuadernas y 3 mamparos estancos transversales. Tiene un espaciamento entre cuadernas de 500 mm desde la C1 hasta la C10, y, 750 mm desde la C10 hasta el Espejo, con un espaciamento entre refuerzos longitudinales de 450 mm, conectados a un planchaje de 6.35 mm (1/4") de espesor.

Las dimensiones y características principales de la L/P que será motivo de estudio, se presentan en la tabla II.

TABLA II. Dimensiones y Características principales de la L/P.

Características Principales	Proporción	Unidades
Eslora total	13.0	metros
Manga Total	3.8	metros
Puntal	1.96	metros
Calado de diseño	0.8	metros
Desplazamiento al calado de diseño	23.91	tons
Velocidad	25	nudos
Angulo de astilla muerta	12	°
Manga en china	3.6	metros
Longitud proyectada de china	12.68	metros

Fuente: ASTINAVE, LP-AST-1304.

TABLA III. Características del panel reforzado.

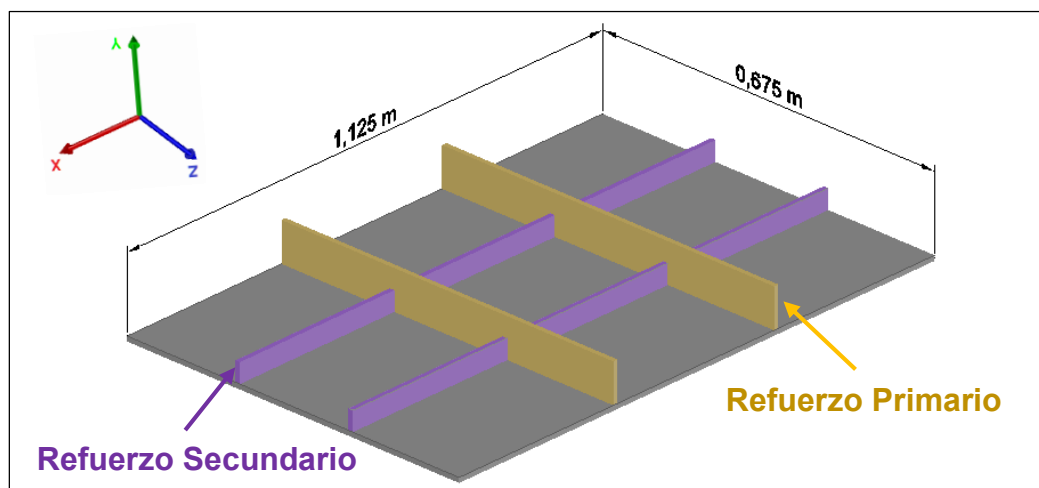
Características Principales		
Material	Aluminio 5086	
Módulo de Elasticidad	7.10E+04 N/mm ²	
Límite Elástico	207.08 N/mm ²	
Coefficiente de Poisson	0.33	
Espesor fondo	1/4"	6.35 mm
Cuadernas C8 -C9	2x2x3/16"	50.8x50.8x4.76 mm
Longitudinales Fondo	2x2x1/4"	50.8x50.8x6.35 mm
Separación entre Longitudinales	375 mm	
Separación entre Cuadernas	225 mm	

Fuente: ASTINAVE, LP-AST-1304.

Esquema de los especímenes a analizar

Ya identificado el panel a ser analizado, se determinan tres tipos de modelos a ser construidos con escala 2:1, manteniendo la separación entre cuadernas de 375 mm y longitudinales de 225 mm, y, variando el tamaño de los refuerzos. Para simplificar la fabricación de los especímenes se reemplaza el ángulo de los refuerzos por platinas. En cada configuración se varía el tamaño de los refuerzos en cada dirección, para probar su participación en la resistencia estructural del panel reforzado. En la figura 11 se presenta el esquema de los especímenes a ser analizados.

FIGURA 11. Esquema de los tres especímenes del panel reforzado.



Fuente: Autora.

A continuación se presentan las dimensiones de los refuerzos de los especímenes construidos:

TABLA IV. Configuración de los tres especímenes a analizar.

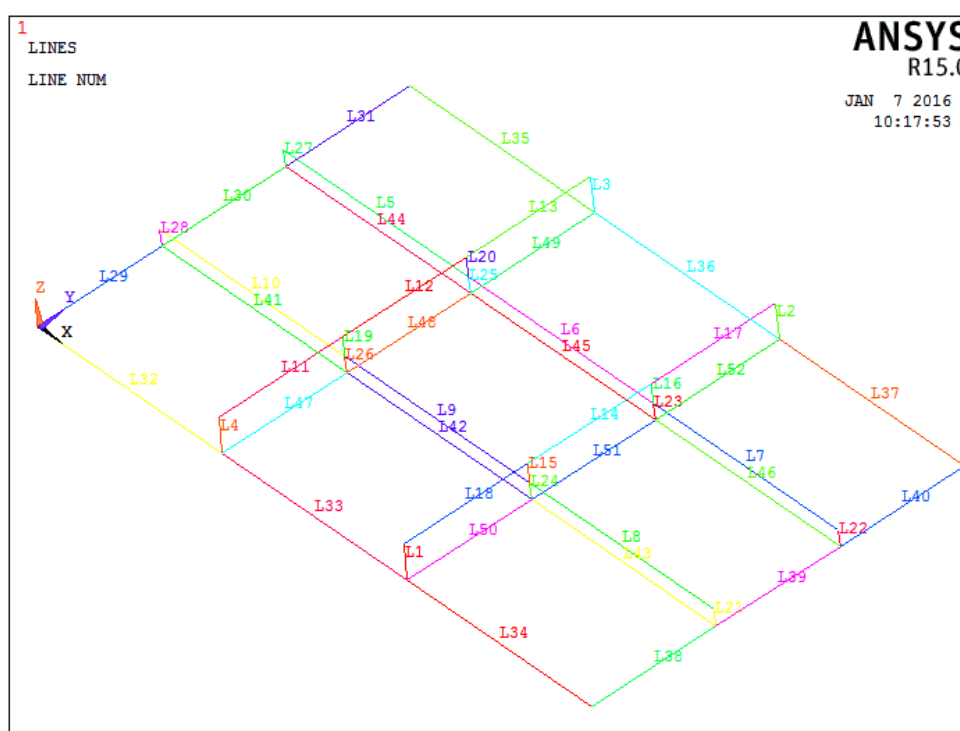
Especímenes	Refuerzo Primario	Refuerzo Secundario		
	h_x [cm]	tw_x [mm]	h_z [cm]	tw_z [mm]
Espécimen 1	6.61	3.0	3.12	3.0
Espécimen 2	6.63		3.10	
Espécimen 3	6.58		3.09	

Fuente: Autora.

Desarrollo del Modelo geométrico con elementos finitos

Para analizar los especímenes con MEF, se utiliza primero el software Rhinoceros para esquematizar el mapa de las áreas, es decir, se dibujan líneas y puntos de control que representan la estructura del panel. El archivo que se genera se guarda con formato IGES; las 52 líneas generadas sirven como frontera para generar las 21 áreas, y luego se le asignan propiedades mecánicas y estructurales.

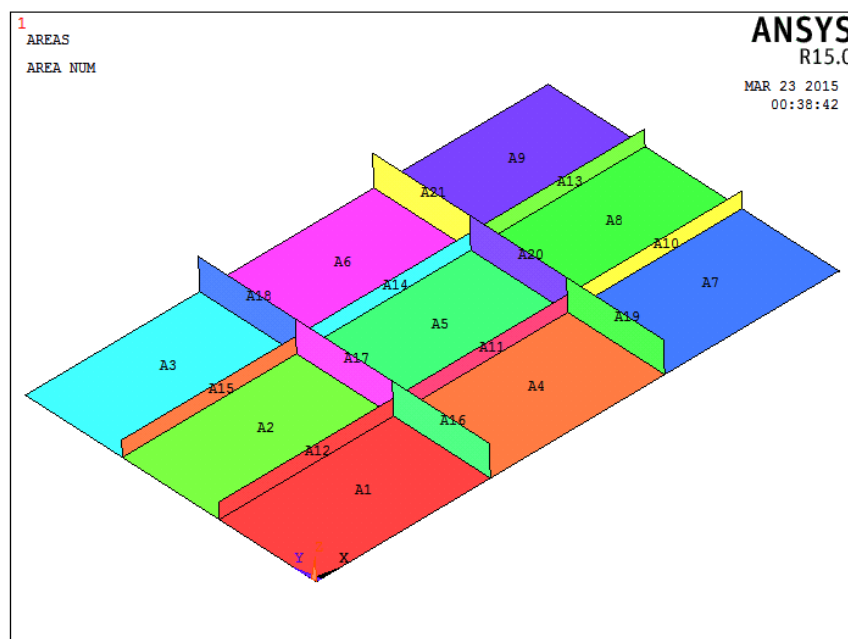
FIGURA 12. Esquema de panel reforzado con AutoCAD, Configuración 1.



Fuente: Autora.

En la siguiente figura se presenta la geometría de la configuración 1.

FIGURA 13. Geometría de la conf. 2 en ANSYS APDL 15.0



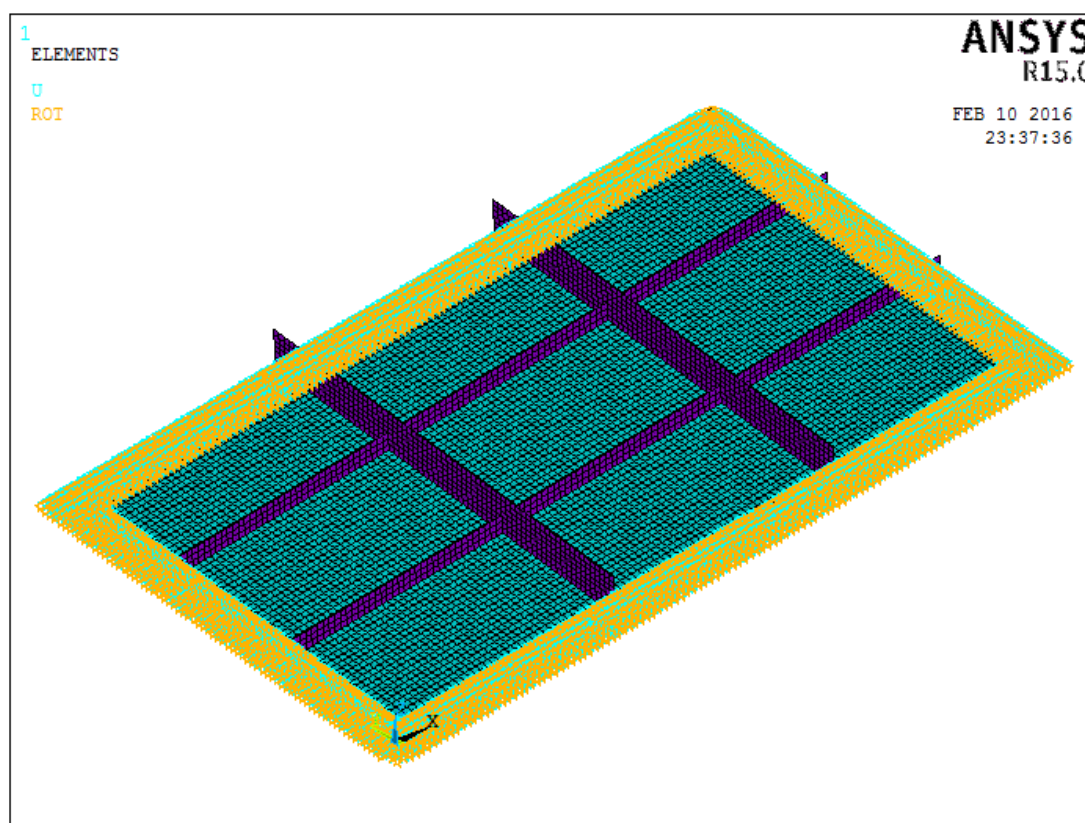
Fuente: Autora.

El esquema de mapa de áreas de los modelos, es importado desde el programa ANSYS APDL 15.0. para realizar el modelo con Elementos Finitos. Tanto en Rhinoceros como Ansys, hay que tener el mismo sistema de referencia. Para el modelo estructural se utiliza el elemento SHELL 181 que está definido por cuatro nodos y soporta carga en el plano y lateral.

Luego de la definición geométrica se realiza la discretización del dominio del panel, la cual define el tamaño mínimo y la razón de aspecto adecuados para aplicar a los elementos. Para esto se realiza un análisis de convergencia de la malla, etapa importante para definir un tamaño mínimo y adecuado para las

divisiones del dominio, ver anexo D. Se realiza entonces una discretización del dominio en elementos de 1 cm de lado, como se presenta en la figura 14. Ya establecida la dimensión para la discretización del dominio del modelo, se enmalla y se definen como empotrados todos los 6 nodos ubicados en los 4 bordes del panel reforzados, como se muestra en la siguiente figura. Estos nodos son los que se ubican sobre el marco estructural en el que se va a instalar el espécimen para las pruebas experimentales.

FIGURA 14. Condiciones de contorno del Panel reforzado.



Fuente: Autora.

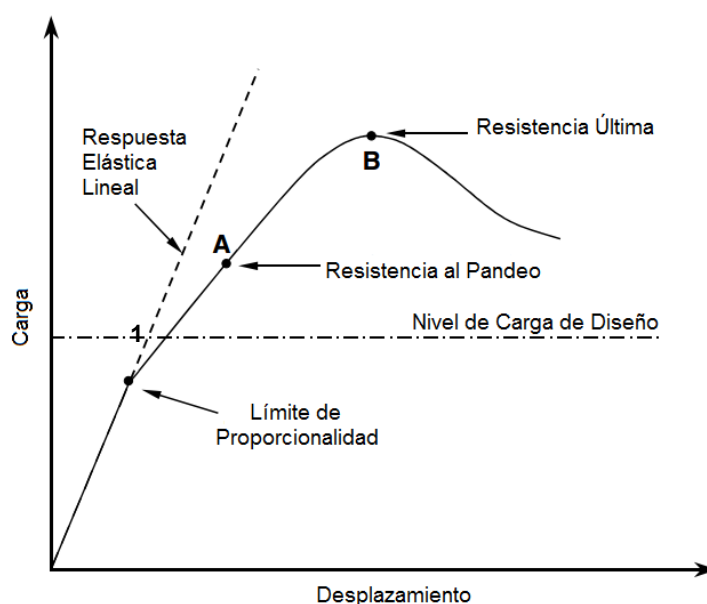
1.4. Descripción del Mecanismo de Falla de paneles reforzados por Resistencia Última.

Una zona de la estructura al soportar carga puede llegar al esfuerzo de Fluencia del material, con deformación permanente al retirarse la carga; si la fuerza continúa incrementándose, el esfuerzo alcanza un valor máximo y luego desciende hasta finalmente producirse la ruptura de la estructura. La carga máxima que puede aplicarse sobre la estructura se denomina Resistencia Última. Cuando los esfuerzos que se desarrollan en la estructura están por debajo del Límite Elástico y las deformaciones son pequeñas, la relación entre carga y esfuerzo es lineal. En el presente caso, al incrementarse la presión, en algún punto del panel reforzado se excede el esfuerzo de Cedencia, y la estructura empieza a comportarse no linealmente. Es posible seguir aumentando la carga sobre la estructura hasta alcanzar un valor máximo, y luego, aun cuando la deformación se incrementa, la presión aplicada se reduce. La Resistencia de la plancha y de los refuerzos se complementa entre sí, pero es muy complicado determinar qué elemento contribuye más en dicho parámetro. El estudio experimental del mecanismo de falla de un panel reforzado permite observar la resistencia entre plancha y refuerzo al tratar de alcanzar la carga máxima.

Cuando se desarrolla un experimento de ensayo uniaxial, la parte elástica implica una relación lineal entre la carga y el desplazamiento. El punto 1 de la

figura 15, recibe el nombre de Límite de Proporcionalidad o Elástico. No se presentará ninguna deformación permanente si la carga no sobre pasa ese punto. A partir del Límite de proporcionalidad se nota un cambio en la pendiente, y si se excede este valor se espera que luego que se retire la carga se tenga una deformación permanente de la estructura. Sin embargo la estructura puede seguir soportando mayor carga, hasta un valor máximo, punto B de la figura, que se denomina Resistencia Última. Luego de ello, la estructura no soporta más presión, básicamente se empieza a reducir la carga que puede soportar, y finalmente se rompe.

FIGURA 15. Consideraciones de diseño estructural basado en el Estado Límite Último.



Fuente: PAIK & THAYAMBALLI, Ultimate Limit State Design of Steel-Plated Structures.

Un Estado Límite se define formalmente como “una condición por la cual un elemento estructural o una estructura completa falla para realizar la función que se espera de ella”, [1]. Uno de estos Estados Límites, el Último, también llamado Resistencia Última representa típicamente el colapso de la estructura debido a la pérdida de rigidez y resistencia estructural. Es decir cuando se llega a este estado la estructura de un panel reforzado completa o parte de ella puede colapsar. Se pueden producir fallas por deformaciones plásticas excesivas, pérdida del equilibrio de la estructura o fallas por acumulación de deformaciones, [1] y [11].

En contraste con el diseño de una estructura por esfuerzo admisible, el cálculo del estado límite se basa en la “explícita consideración de las diversas condiciones en las que la estructura puede dejar de cumplir con su función prevista”, [11]. Para estas condiciones, la carga última se estima y se utiliza en el diseño como un límite para tal comportamiento. El problema es que para calcular la Resistencia se debe considerar el comportamiento no lineal del material, y, elevados desplazamientos y rotaciones, por lo que es un proceso analíticamente muy complejo.

En este trabajo se va a estudiar experimentalmente el comportamiento mecánico de paneles reforzados del fondo de una embarcación rápida, sometiendo a presión progresiva y registrando la deformación resultante. Para lo cual se aplica presión uniforme sobre el panel, y se pretende identificar los

puntos donde se va a exceder con mayor rapidez el límite de elasticidad. A un cierto nivel de presión, ellos no pueden mantener la relación elástica lineal, lo que significa que otros elementos van a tener que desarrollar mayor nivel de carga. Se desea observar cómo luego de exceder el límite elástico, los esfuerzos se empiezan a redistribuir entre los elementos estructurales que participan en el panel, además se espera que a cierto valor de presión simplemente la estructura no pueda soportar mayor carga, lo que representará la Resistencia Última.

CAPITULO 2

EXPERIMENTACIÓN SOBRE LA RESISTENCIA ÚLTIMA DE PANELES REFORZADOS.

2.1. Fabricación de Especímenes

En este subcapítulo se describe la fabricación de los especímenes a ser analizados experimentalmente, que corresponden al panel reforzado de la zona de proa de la lancha patrullera LP-AST-1304. Los especímenes son contruidos con plancha de aleación de aluminio 5086 de 3 mm espesor, y la razón de escala del conjunto de panel es 2:1. Por facilidad de construcción los refuerzos tipo L se sustituyen por platinas, y con soldadura MIG se las une a los paneles para formar el conjunto, conforme a las dimensiones mencionadas en el capítulo 1.

Se construyen tres especímenes de panel reforzado, que serán analizados en este trabajo conforme a las especificaciones de la tabla IV del capítulo 1. A continuación se presenta una foto de un panel construido que representa al modelo de un panel reforzado de la zona de proa de la lancha patrullera analizada:

FIGURA 16. Construcción de un panel reforzado.

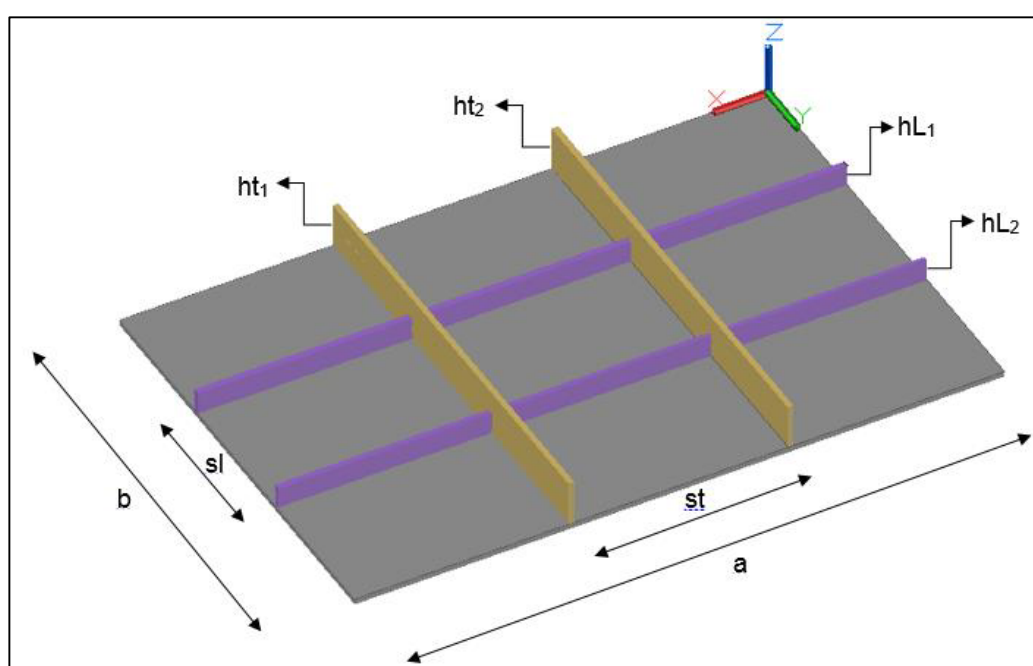


Fuente: Autora.

En el proceso de fabricación de cada espécimen, se corta y suelda cada pieza que forman los refuerzos y plancha de fondo. Esto implica cambios de las dimensiones de dichos elementos, debido a que los cordones de soldadura alteran las medidas. Dado esto, se toman las dimensiones finales de los tres especímenes y el espaciamiento entre refuerzos. En la figura siguiente se

presenta un esquema general con simbología para las dimensiones del panel, y, en la tabla V se muestran las dimensiones de la plancha y refuerzos, separación entre refuerzos de los especímenes construidos:

FIGURA 17. Esquema de los especímenes.



Fuente: Autora.

TABLA V. Dimensiones finales de cada espécimen

Parámetros		Espécimen 1	Espécimen 2	Espécimen 3	Valor Promedio	Max. Desviación
a	[cm]	111.5	111.6	111.4	111.5	0.10
b	[cm]	66.6	66.4	66.2	66.4	0.20
hT11	[cm]	6.65	6.65	6.60	6.63	0.02
hT12	[cm]	6.60	6.65	6.60	6.62	0.03
hT13	[cm]	6.60	6.65	6.60	6.62	0.03
hT21	[cm]	6.60	6.65	6.55	6.6	0.05
hT22	[cm]	6.60	6.60	6.55	6.58	0.03
hT23	[cm]	6.58	6.55	6.58	6.57	0.02
hL11	[cm]	3.10	3.10	3.05	3.08	0.03
hL12	[cm]	3.20	3.10	3.05	3.12	0.08
hL13	[cm]	3.20	3.15	3.05	3.13	0.08
hL21	[cm]	3.10	3.10	3.15	3.12	0.03
hL22	[cm]	3.10	3.08	3.15	3.11	0.04
hL23	[cm]	3.00	3.05	3.10	3.05	0.05
sT1	[cm]	37.5	37.4	37.4	37.43	0.06
sT2	[cm]	36.8	37.5	37.1	37.13	0.37
sT3	[cm]	37.4	37.4	37.6	37.47	0.17
sL1	[cm]	22.5	22	22.5	22.33	0.17
sL2	[cm]	22.1	22.4	22.1	22.2	0.20
sL3	[cm]	22.5	22.5	22.5	22.5	0.00

Fuente: Autora.

Con la ayuda de un medidor de espesores ultrasónico, se verifican los espesores de cada espécimen. Las mediciones se realizan en el centro de

cada cuadrante que se encuentra limitada por los refuerzos, registrándose 9 medidas como se muestra en la tabla VI. Los espesores promedio registrados son 3.10, 3.10 y 3.20 mm en cada espécimen, respectivamente. Los valores promedios son cercanos al espesor nominal de la plancha, que se utilizó para construir los especímenes.

TABLA VI. Valores de espesores de cada espécimen, por áreas.

Espécimen	ESPESOR (mm)									Valor Promedio	Max./Min. Desviación
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9		
1	2.90	2.90	3.00	2.90	2.90	3.10	2.90	2.90	2.90	2.93	0.17/-0.03
2	2.90	2.90	2.90	2.90	2.90	3.10	3.10	2.90	2.90	2.94	0.16/-0.04
3	3.00	3.20	2.90	2.90	2.90	2.90	2.90	2.90	2.90	2.96	0.24/-0.06

Fuente: Autora.

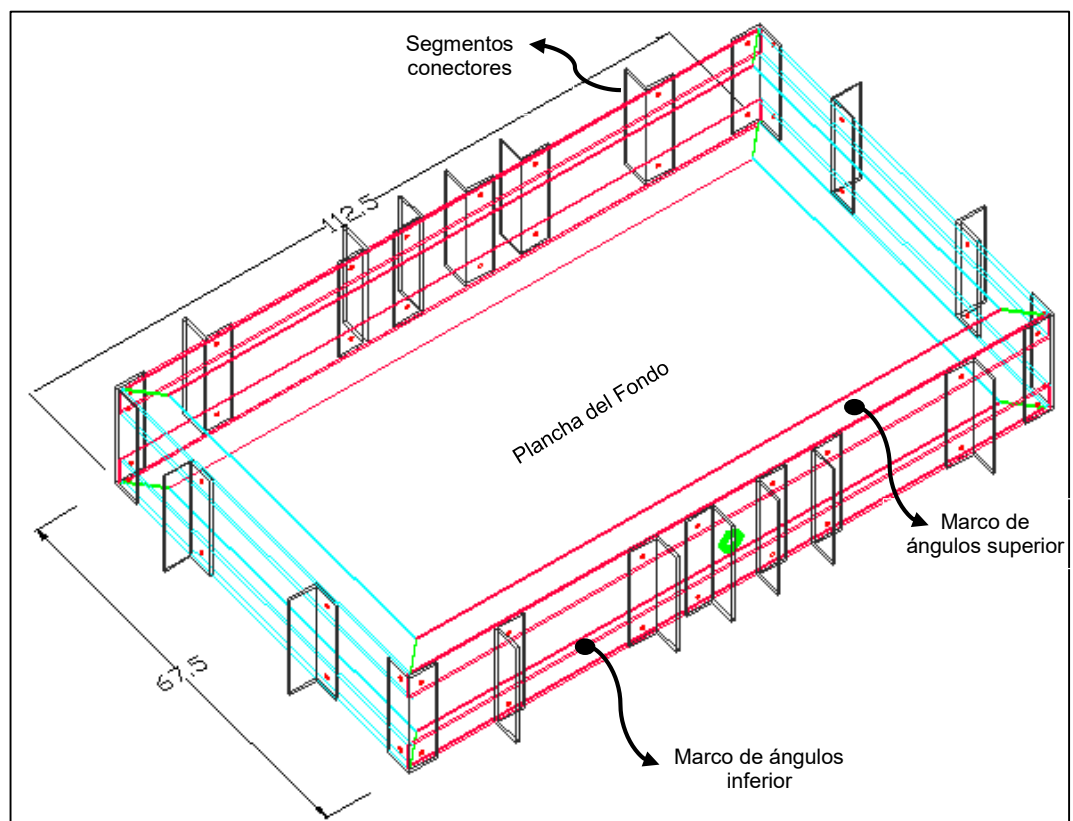
Se usan pernos de acero de $\frac{1}{4}$ " de diámetro para conectar el espécimen al marco superior de la base de acero, que ayudan a simular que los bordes del panel son empotrados. Es importante la ubicación de los orificios para colocar los pernos, ya que se va aplicar presiones altas. Por eso la separación promedio entre pernos es de 8 cm en el lado más largo, mientras que para el lado corto es de 10 cm.

2.2. Descripción del Programa Experimental

Diseño y construcción del marco de acero

En la siguiente figura se muestra un esquema de la base estructural que se utiliza en el desarrollo de las pruebas experimentales. En la parte superior se instalará el espécimen empotrado a un marco de acero, y dentro del espacio se coloca una bolsa de aire a presión para aplicar carga en la superficie inferior del espécimen.

FIGURA 18. Base estructural de acero



Fuente: Autora.

La base fue construida con segmentos de ángulos y planchas de acero negro. Los marcos inferior y superior son de L 50x50x4 mm y están unidos por segmentos de ángulos de 20 cm de alto: 6 segmentos en el lado más largo del marco, y 2 en el corto. Además la base de estructural de acero está cerrada totalmente por pedazos rectangulares de planchas en cada lado, para evitar deformaciones de la bolsa de aire.

Fabricación de la Bolsa de aire a presión

Para simular la presión distribuida que se aplica al panel reforzado, se diseñó una bolsa de aire a presión, que es una especie de colchón de caucho que con la ayuda de un compresor eléctrico, se la alimenta con aire para aplicar la fuerza distribuida. La construcción de la bolsa de aire a presión, se basa en tubos de llantas, como se menciona a continuación:

- Refuerzo de Tubo de serie GR14 (4 unidades)
- Tubo con numeración 1200 – 24 (1 unidad)

Para fabricar la bolsa de aire a presión y que este tome la forma que se desea (forma rectangular similar a la base estructural de acero), se colocó el tubo más grande en la parte central, y luego se lo forra con 4 refuerzos de los tubos pequeños. Además se modificó la entrada de aire del tubo grande, para poder introducir el aire comprimido a la bolsa de aire por la parte exterior.

FIGURA 19. Tubo con la válvula en su nueva posición, comenzando a forrarla con caucho.



Fuente: Autora.

FIGURA 20. Ubicación de la bolsa de aire a presión dentro de la base estructural de acero, con el sistema de alimentación de aire.



Fuente: Autora.

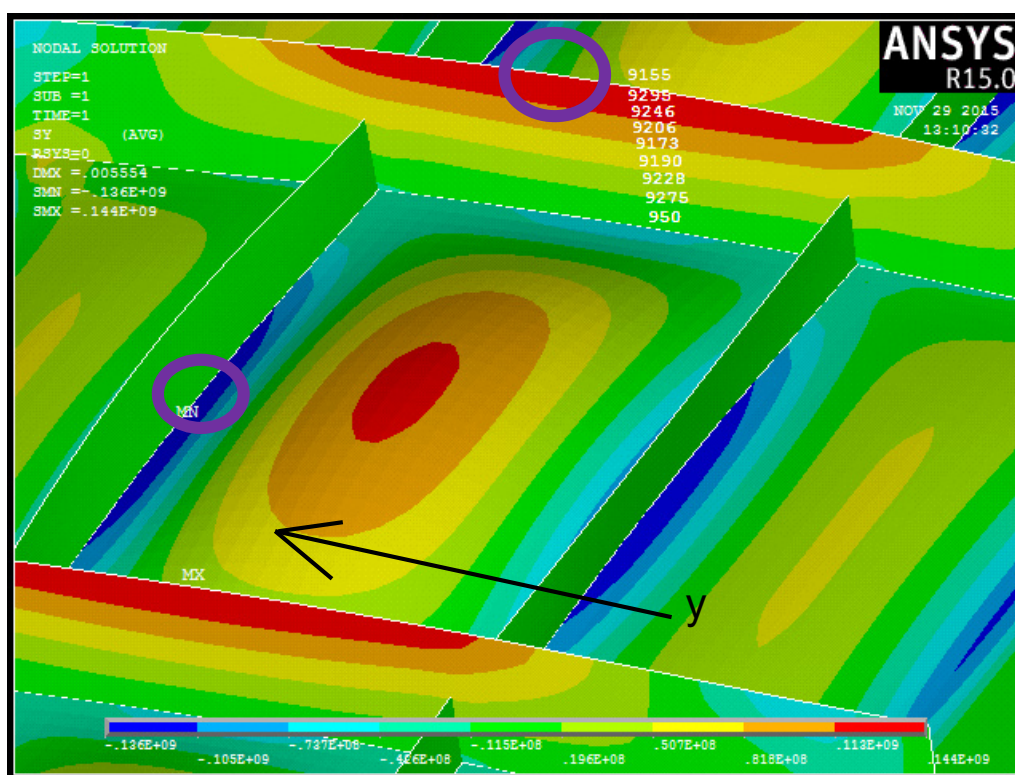
Pero con este diseño de la bolsa de aire, se tiene un inconveniente que la carga que se aplica al panel no es uniforme. Debido a se comienza a llenar de aire primero la zona contraria al ingreso de aire.

Ubicación de los medidores de deformación

Para determinar los puntos donde instalar los medidores de deformación (extensómetros o “strain gages”) se realiza un análisis con elementos finitos para determinar las zonas de mayor esfuerzo. Se identifican las zonas superiores de los refuerzos y el área de la plancha cercana a la conexión con los refuerzos, como los de máximos esfuerzos y es donde se instalan los medidores de deformación. Los extensómetros que se utilizan en las pruebas son de la marca EMEME, tipo EA-06-120LZ-120, con resistencia nominal de 120 Ω , y factor de medidor (“Gage Factor”) de 2.05. Para la instalación de los extensómetros se prepara adecuadamente la superficie (lijada y limpiada), y se utiliza goma epóxica para pegarlo al espécimen.

A continuación se presentan los resultados del análisis preliminar con el MEF, que señalan los puntos donde se esperan los máximos valores de esfuerzo y por ende de deformación unitaria. En dirección transversal, los esfuerzos (σ_y) producidos sobre el panel reforzado, dan como resultado dos zonas importantes para análisis, como son el refuerzo primario y la plancha en dirección y, figura 21. Se nota que en la parte superior del refuerzo transversal se producen los máximos esfuerzos, mientras que en la plancha los máximos esfuerzos se presentan en la zona cercana al refuerzo secundario.

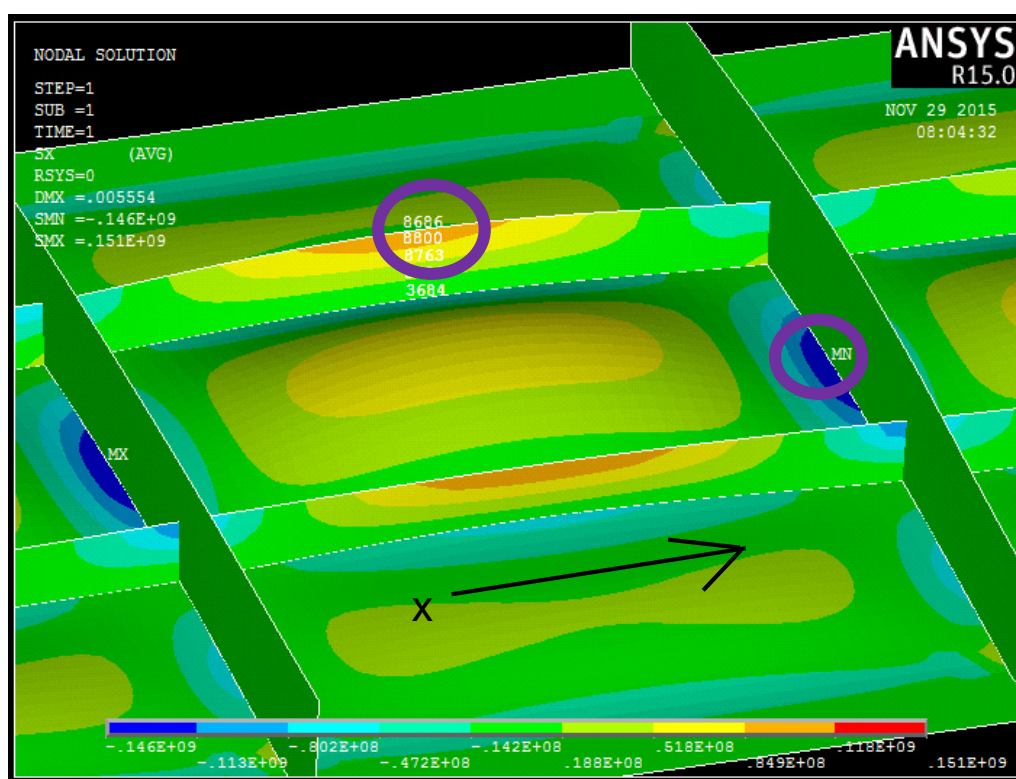
FIGURA 21. Esfuerzos en dirección transversal (S_y).



Fuente: Autora.

Así mismo en dirección longitudinal, los esfuerzos (s_x) producidos sobre el panel reforzado, dan como resultado dos zonas importantes para análisis, como son el refuerzo secundario y en la plancha, figura 22. Se nota que en la parte superior del refuerzo transversal se producen los máximos esfuerzos en dirección x , mientras que en la plancha los esfuerzos importantes se desarrollan en la zona cercana al refuerzo primario (dirección transversal). Estos esfuerzos se espera que sean un poco más pequeños que en dirección y .

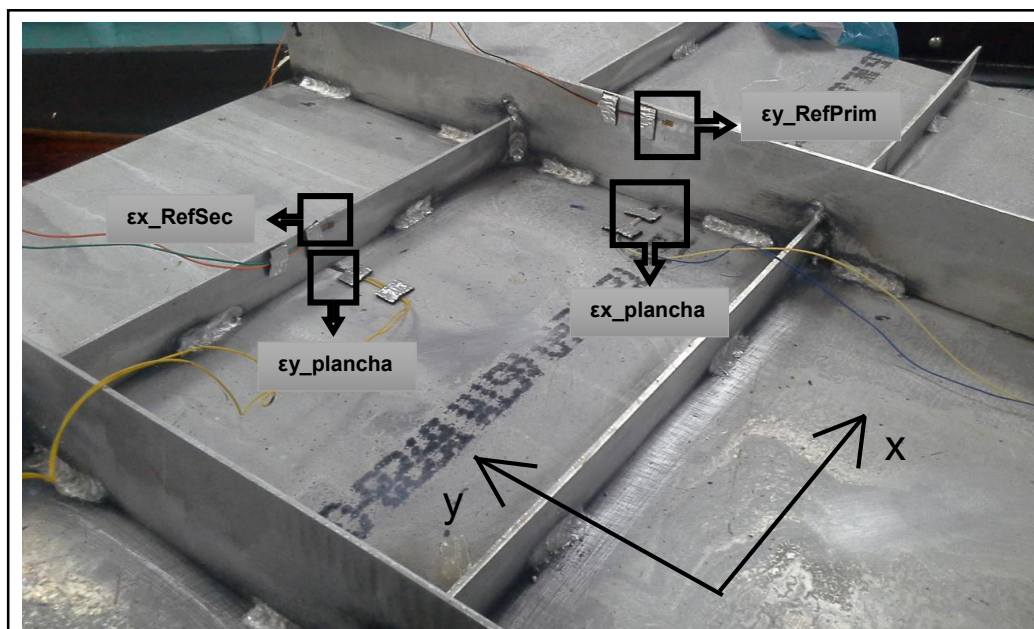
FIGURA 22. Esfuerzos en dirección longitudinal (S_x).



Fuente: Autora.

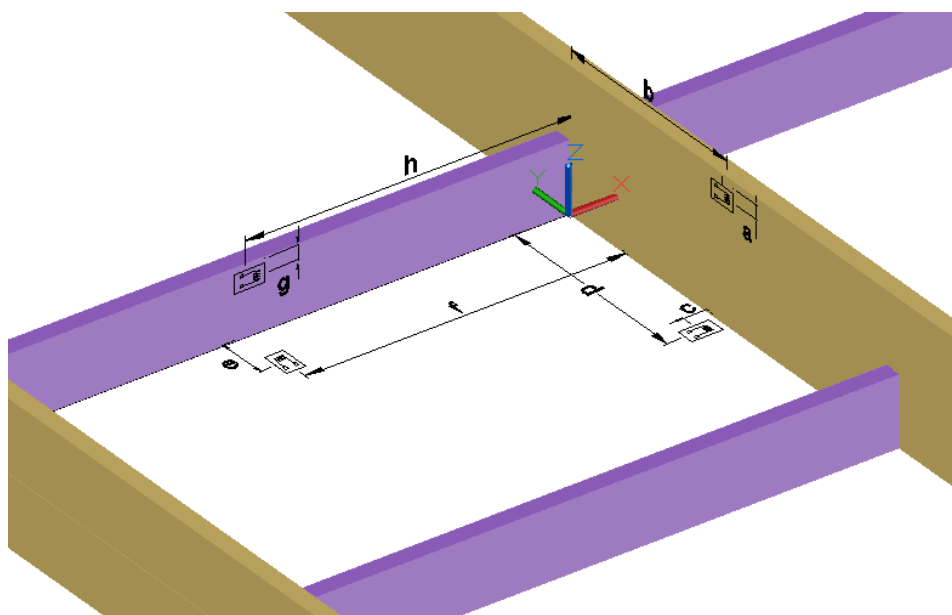
En la figura 23, se observa una foto con la posición de los 4 extensómetros sobre el panel reforzado. Hay que tener en cuenta que la ubicación de los extensómetros en cada espécimen varía, y debido a esto se registran las posiciones de cada medidor de deformación. En la figura 24 se presenta un esquema de la ubicación de los extensómetros y en la tabla VII se registraron las posiciones exactas, en cada espécimen:

FIGURA 23. Posición de extensómetros para pruebas experimentales sobre la plancha reforzada.



Fuente: Autora.

FIGURA 24. Esquema de la posición de los 4 extensómetros instalados.



Fuente: Autora.

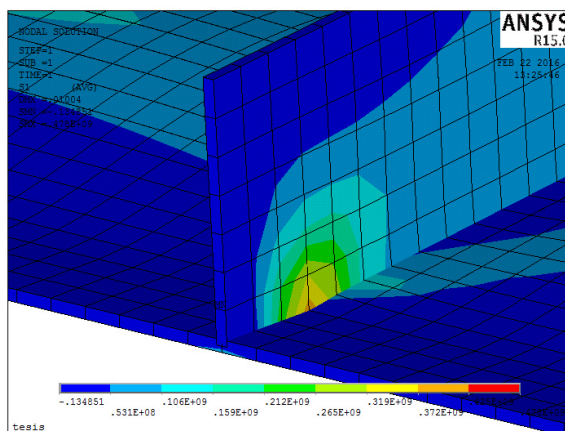
TABLA VII. Posición de los extensómetros

	Parámetro	Espécimen 1	Espécimen 2	Espécimen 3
$\epsilon_{y_RefPrim}$	a [cm]	0.35	0.36	0.5
	b [cm]	11.4	11.3	11.2
$\epsilon_{x_plancha}$	c [cm]	0.55	0.6	0.55
	d [cm]	11.2	11.1	11.2
$\epsilon_{y_plancha}$	e [cm]	0.55	0.6	0.55
	f [cm]	17.9	18	18
ϵ_{x_RefSec}	g [cm]	0.6	0.6	0.55
	h [cm]	17.2	17.5	18

Fuente: Autora.

Como en este caso se tiene una viga (Refuerzo Primario) empotrado en los extremos por lo tanto se sabe que la concentración de esfuerzos, ver figura 25, también se produce en estos puntos. Pero en este trabajo no se consideró de interés estos puntos de conexión, debido a que es una zona de problema por ser difícil instalar los extensómetros. Ya que en las pruebas experimentales esta zona no se considera totalmente empotrada, porque los pernos permiten que la plancha se levante parcialmente, por lo tanto este punto no representa de importancia.

FIGURA 25. Niveles de esfuerzos en las conexiones de empotramiento.



Fuente: Autora.

Registro de la Presión Aplicada

Este parámetro se registra de manera continua durante las pruebas. El medidor de presión digital utilizado en las pruebas es de la marca TPC, modelo SPSA-1, teniendo un rango de Presión: 0 – 1000 kPa (145 psi).

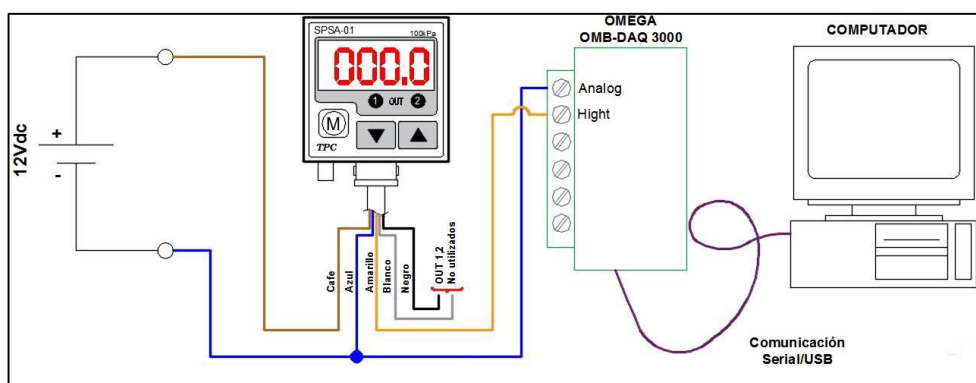
FIGURA 26. Medidor SPSA-1 instalado



Fuente: Autora.

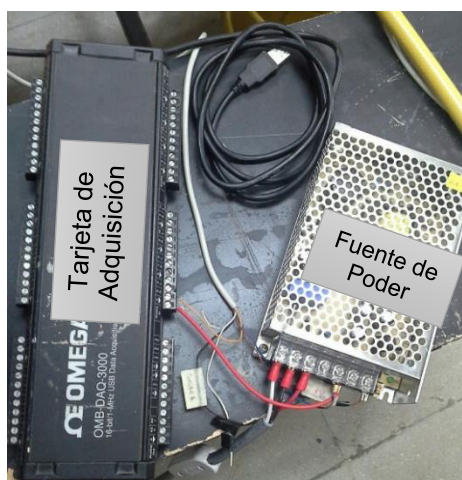
Para la operación del medidor de presión, se lo conecta a una fuente de poder de 12V DC. Para registrar los valores en la computadora se conecta el cable de salida (“output”) a una tarjeta de adquisición de datos marca Omega, y, usando el programa *DaqView* se registra en un computador la señal a lo largo de la prueba. La figura 27 ilustra en detalle la conexión final de los equipos.

FIGURA 27. Circuito del Medidor de Presión Utilizado



Fuente: Autora.

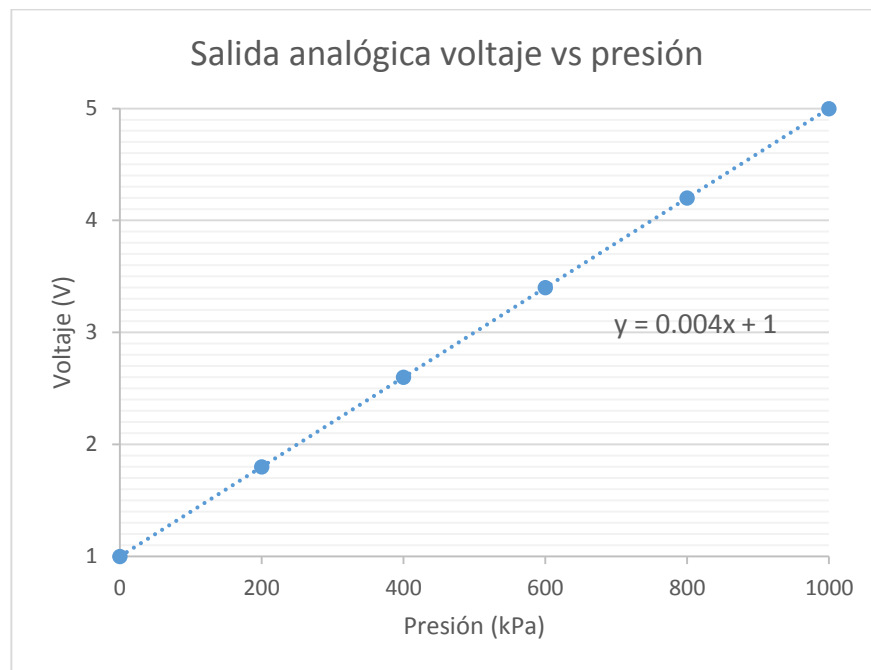
FIGURA 28. Conexión del equipo de adquisición de datos.



Fuente: Autora.

El medidor de presión, tiene salida analógica entre 1 y 5 VDC, y, para convertir este valor a unidades de presión el manual del equipo, [9], proporciona la siguiente gráfica:

FIGURA 29. Voltaje vs Presión SPSA-1.



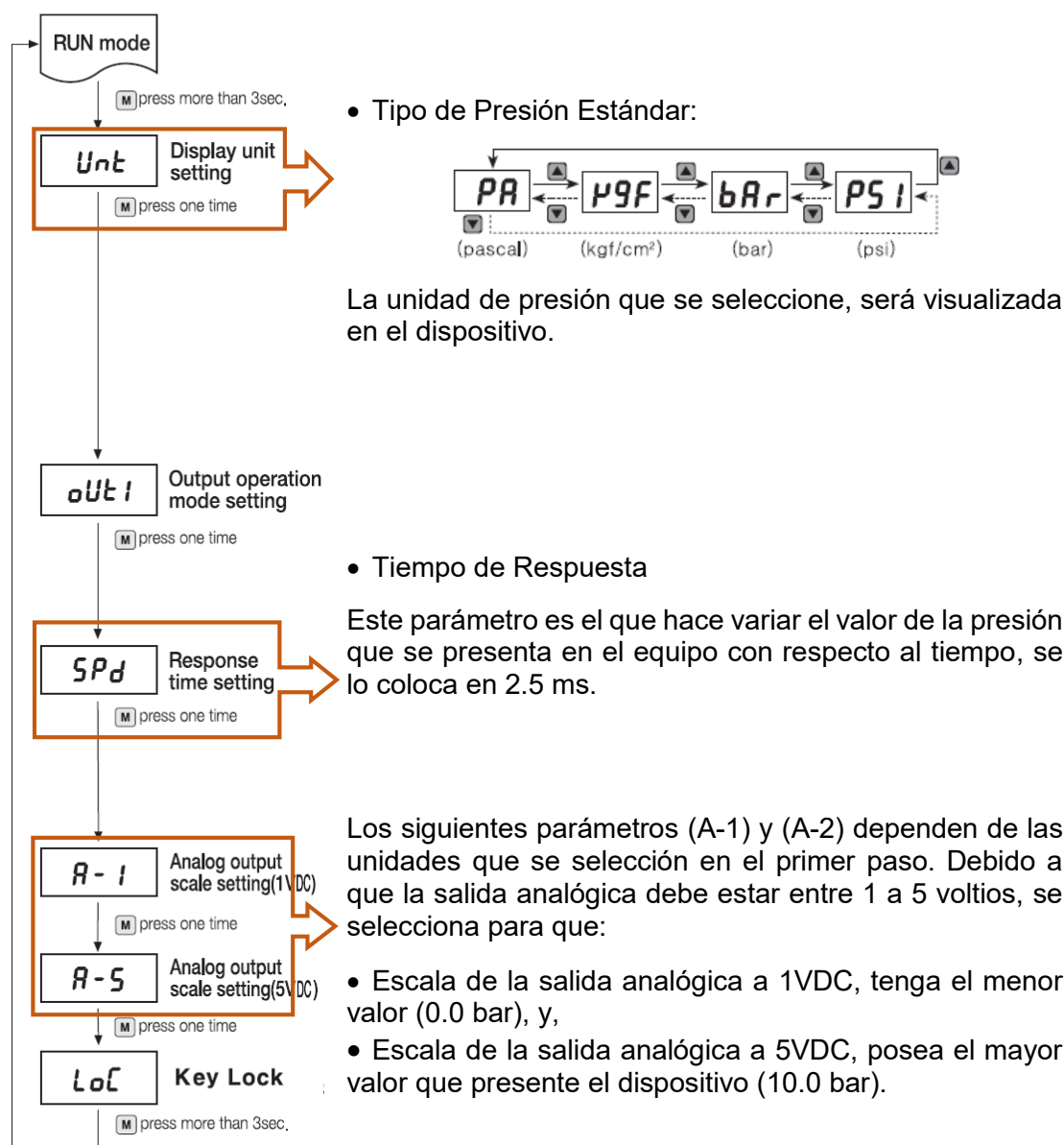
Fuente: Digital Pressure Sensor.

La fórmula con la que se trabaja para convertir la señal de voltios a unidades de presión, es:

$$P[kPa] = (V - 1) \cdot 250 \quad (2.1)$$

En el siguiente diagrama de flujo, se presentan los valores de los parámetros del equipo que son modificados en el presente trabajo:

FIGURA 30. Diagrama de flujo de las configuración del medidor SPSA-1



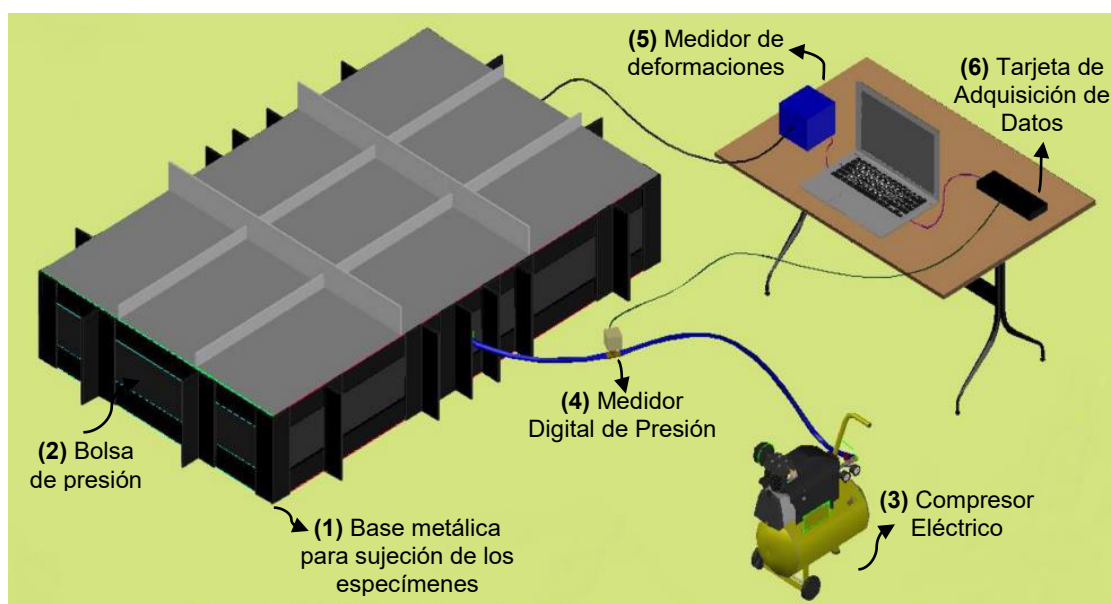
Fuente: Manual Digital Pressure Sensor, con explicación de la autora.

Desarrollo de las pruebas

Las mediciones registradas en el computador en cada prueba son la deformación unitaria en los cuatro puntos, y, la presión ejercida por la bolsa. Se emplea una razón de escaneo 10 registros/segundo. El equipo empleado para el registro de las deformaciones unitarias de los extensómetros es el *instruNet i555*, que incluye una tarjeta de adquisición de datos y envía los registros al computador de escritorio del Laboratorio de Ing. Naval – FIMCBOR. En la figura 31 se muestra el esquema final de los equipos utilizados en las pruebas, y son:

1. Base metálica para la sujeción de los paneles construída en acero.
2. Bolsa de aire a presión.
3. Compresor de aire.
4. Medidor de Presión digital.
5. Registrador de deformaciones unitarias.
6. Tarjeta de adquisición de datos.

FIGURA 31. Esquema final de los equipos durante las pruebas

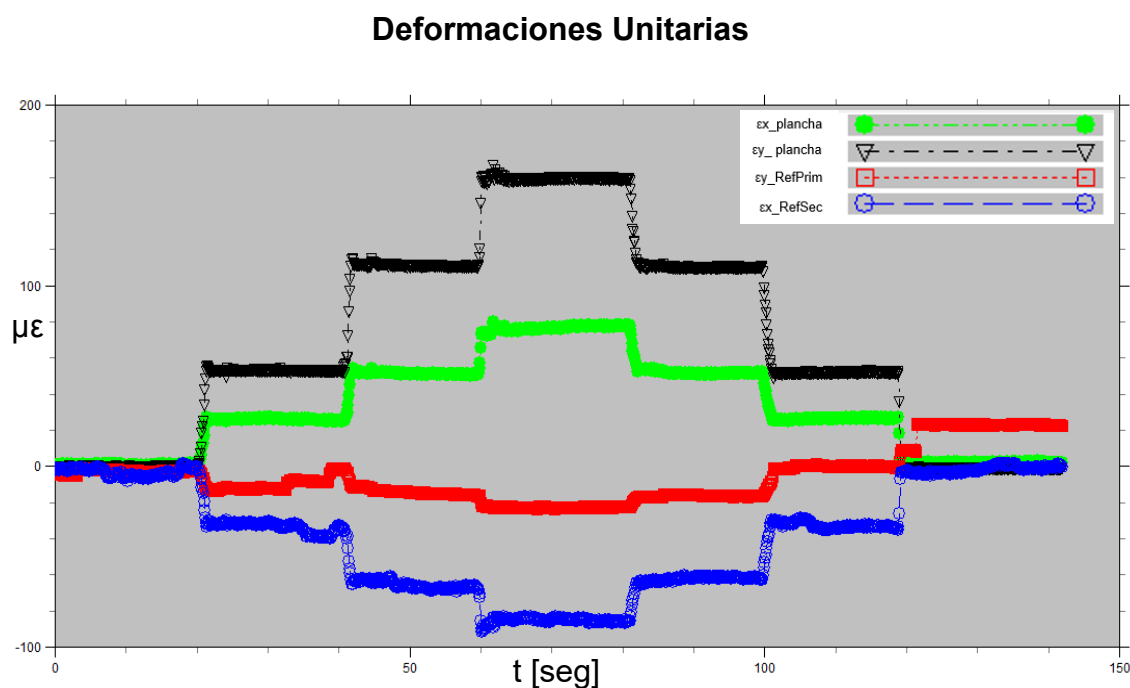


Fuente: Autora.

Para asegurarse que el equipo funcione correctamente se realizan pruebas preliminares.

i. Pruebas con Cargas Puntuales.

En forma escalonada, se aplican 3 pesos concentrados en el centro del espécimen y se miden las deformaciones unitarias que se producen. En la siguiente figura se muestran resultados en esta prueba. Las deformaciones positivas se producen en la plancha, mientras que las negativas se presentan en los refuerzos.

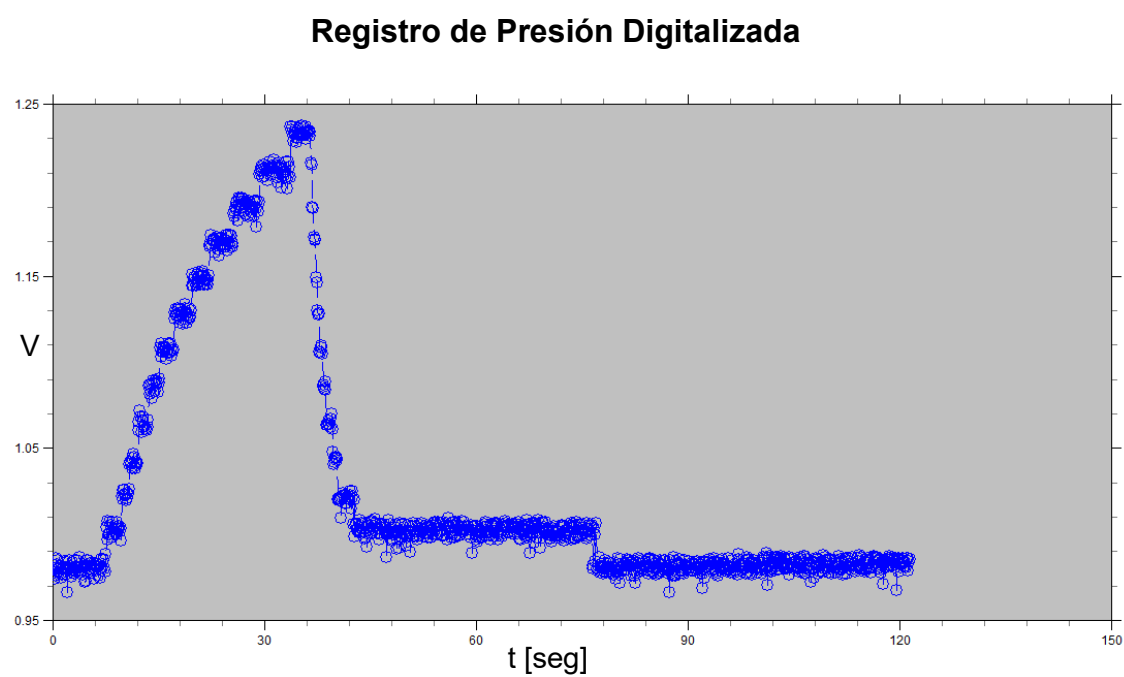
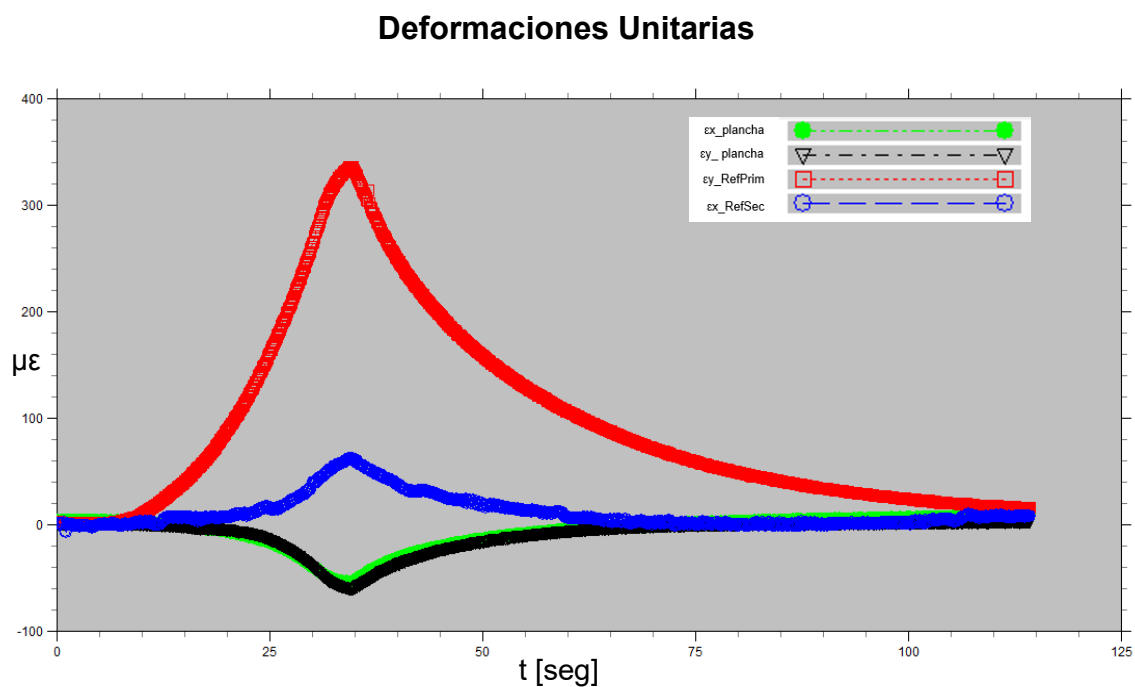
FIGURA 32. Deformaciones unitarias aplicando pesos concentrados.

Fuente: Autora.

ii. Pruebas Experimentales Preliminares.

Luego se realizan pruebas preliminares con un rango de presión máxima (entre 55 y 69 kN/m², o, 8 y 10 psi), con el fin de comprobar el funcionamiento correcto de los equipos. En este caso, los registros alcanzan un máximo de 1500 $\mu\epsilon$ en deformación unitaria. En la siguiente figura se muestran resultados de esta prueba, con un tiempo para alcanzar la presión máxima de 40 segundos aproximadamente.

FIGURA 33. Deformaciones unitarias y presión, en Pruebas Preliminares.

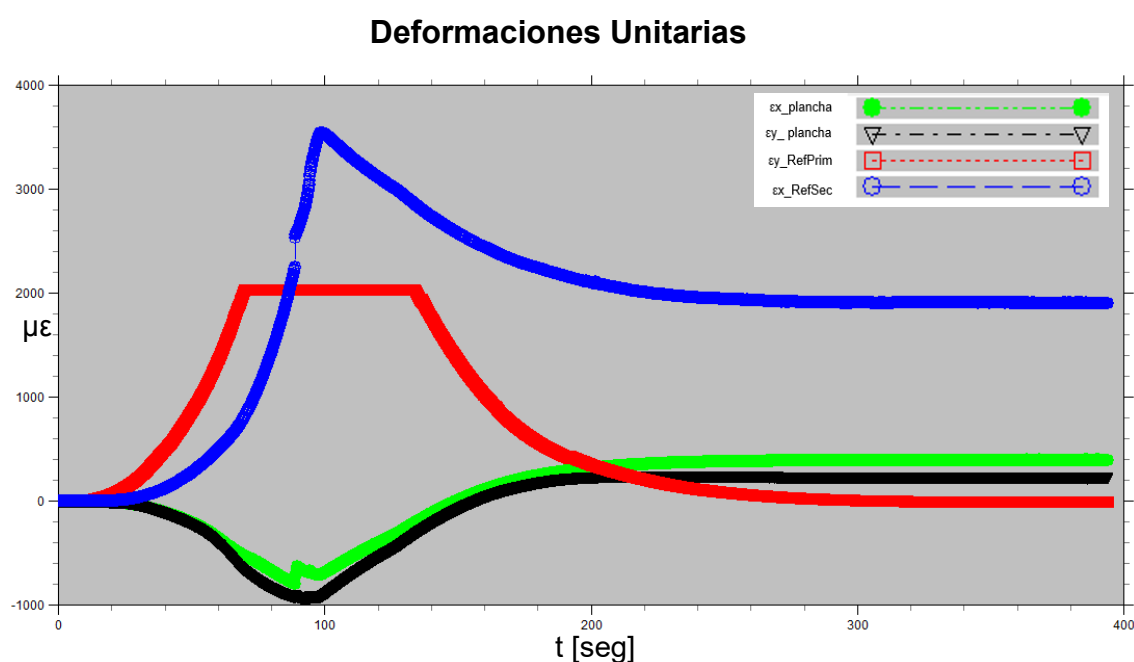


Fuente: Autora.

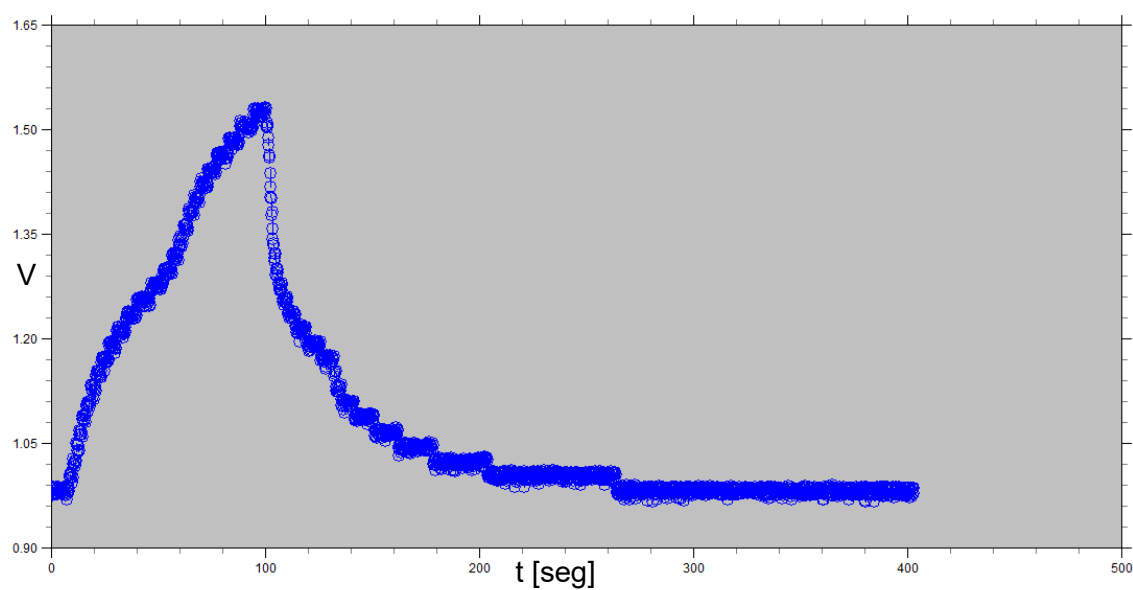
iii. Pruebas Experimentales Destructivas.

En este caso se incrementan los rangos máximos de registro de deformaciones unitarias, porque se esperan medidas mayores a $3000 \mu\epsilon$. Hay que tener en cuenta que esta prueba no se puede repetir, ya que el espécimen resulta dañado permanentemente. En este caso, se trata de alimentar continuamente la bolsa de aire hasta que el panel falle. En la siguiente figura se muestran resultados de una de estas pruebas; nótese los elevados valores que se registran.

FIGURA 34. Deformaciones unitarias, prueba final.



Registro de Presión Digitalizada



Fuente: Autora.

Inconvenientes Técnicos

i. Prueba 1

En esta primera prueba, al momento de aplicar carga final distribuida se tuvo un daño en el marco superior de acero. Los pernos que lo sostenían conectando al inferior se rompieron en corte y todo el marco de acero se dobló. Para asegurar esta zona para las pruebas siguientes, se colocaron 2 segmentos extra de ángulos de cada lado, y además por seguridad, se colocan ahora pernos de 5/8". Nótese que alcanzando una presión de 20 lb/plg² (138

kN/m²), sobre la superficie de 1.116x0.605 metros, la fuerza total correspondiente es de 10 toneladas aproximadamente.

ii. Prueba 2

Aquí se tuvieron dos inconvenientes, uno con la bolsa de aire y otro con el almacenamiento de los registros. El principal problema fue que al aplicar la carga final, se rompió la bolsa de presión. Mientras el otro inconveniente fue con una limitación en el valor máximo de registro. Se espera un valor máximo de lectura de alrededor de 4000 $\mu\epsilon$, pero el programa de adquisición de datos solo registra hasta el valor que se le asigna como máximo, y, no se tuvieron registros de los valores superiores, desafortunadamente. Por lo explicado se tuvo que fabricar una bolsa nueva pero mejorada, es decir, se buscaron tubos de un mayor tamaño para que se adapte más cercanamente al interior y evitar que se vuelva a romper.

iii. Prueba 3

Para esta prueba se usa una nueva bolsa de aire a presión, que se considera que es mejor, porque toma más cercanamente la forma rectangular de la base de acero. Con esto se produce un problema, ya que se expande toda la base

por la presión de la bolsa de aire, y las planchas de acero ubicadas en los cuatro lados de la base se desplazan causando con molestos golpes. En la prueba se produjo un estruendo al reacomodarse una plancha y se detuvo la prueba por seguridad del equipo.

2.3. Resumen de Resultados Experimentales

Se reportan los valores extremos de deformación unitaria registrados en cada prueba: aplicando carga puntual, preliminar con carga distribuida, y, final con carga distribuida. Las pruebas experimentales preliminares sirven para estimar la presión que debe ser aplicada al panel reforzado para alcanzar deformación unitaria en Cedencia. Finalmente las pruebas destructivas permiten determinar la razón de deformación unitaria y la presión alcanzada en los paneles permanentemente deformados. Los registros en cada prueba se incluyen en el anexo E del presente trabajo.

i. Pruebas con Cargas Puntuales.

De los resultados obtenidos al aplicar carga puntual a los especímenes, se presentan en la siguiente tabla en resumen las deformaciones unitarias promedio por peso aplicado. Los pesos aplicados fueron de 5.6 kg, 5.45 kg y 4.32 kg, sucesivamente.

TABLA VIII. Deformaciones unitarias por unidad de peso aplicado.

Prueba	$\epsilon_y/W_RefPrim$	ϵ_x/W_RefSec	$\epsilon_y/W_plancha$	$\epsilon_x/W_plancha$
2 (Esp. 2)	-4.0	-2.0	6.7	2.1
3 (Esp. 1)	-5.5	-1.5	10.6	5.1
Promedio	-4.7	-1.7	8.7	3.6

Fuente: Autora.

En los refuerzos las deflexiones unitarias son negativas, debido a que los extensómetros están ubicados en la parte superior del ala y debido a la carga hacia abajo, esta zona se encuentra en compresión. Mientras que en las planchas, los medidores de deformación están instalados cerca de los refuerzos y por tanto están en tensión. En este caso la carga está aplicada concentrada en el centro del panel reforzado, y por eso el efecto se manifiesta más en la plancha antes que en los refuerzos.

ii. Pruebas Experimentales Preliminares.

Para este tipo de prueba se aplica presión sobre el espécimen pero sin exceder de 1500 para las micro deformaciones unitarias, para evitar exceder el límite elástico del material. Los resultados se resumen en la siguiente tabla.

TABLA IX. Microdeformación unitaria y presión máxima pruebas preliminares

Prueba	# Repetición	Presión max [kN/m ²]	$\epsilon y_{\max}$ RefPrim	$\epsilon x_{\max}$ RefSec	$\epsilon y_{\max}$ plancha	$\epsilon x_{\max}$ plancha
1 (Esp. 3)	1	38.26 (5.5 psi)	912	335	-234	-210
	2	64.65 (9.3 psi)	523	112	-107	-94
Promedio			719	224	-171	-152

2 (Esp. 2)	1	46.80 (6.8 psi)	1500	510	-478	-352
	2	59.72 (8.7 psi)	1164	400	-3634	-260
Promedio			1332	455	-421	-306

3 (Esp. 1)	1	59.26 (8.59 psi)	147	11	-23	-16
	2	59.34 (8.6 psi)	336	62	-60	-54
Promedio			242	36	-41	-35

Fuente: Autora.

La aplicación de la carga en las Pruebas 1 y 2 (Espécimen 3 y 2), es diferente al de la prueba 3 (Espécimen 1), ya que la carga es más uniforme porque la bolsa de aire de presión es de mayor tamaño, y por eso los resultados no se los puede comparar directamente. Se presenta una variación notoria entre pruebas, probablemente por la diferente razón de entrada de aire a presión. Posiblemente también el aire no actúa de forma uniforme en toda la cámara, por lo que en las siguientes pruebas se intentará suministrar fluido en forma “lenta”.

iii. Pruebas Experimentales Destructivas.

En las pruebas destructivas se determinan los valores extremos de deformación unitaria que se alcanza y la presión que las causan. El resumen de resultado se reporta a continuación.

TABLA X. Microdeformación unitaria y presión máxima pruebas destructivas

Prueba	Presión max [kN/m ²]	ϵy_{max} RefPrim	ϵx_{max} RefSec	ϵy_{max} plancha	ϵx_{max} plancha
1 (Esp. 3)	173.61 (25 psi)	2760	2967	-787	-728
2 (Esp. 2)	142.95 (21 psi)	3160	1833	-1026	-673
3 (Esp. 1)	132.72 (19 psi)	3539	2030	-918	-802

Fuente: Autora.

El nivel de deformación para la fluencia es 2916.6 $\mu\epsilon$ para la aleación de Aluminio 5086, usando los valores reportados en la tabla III del capítulo 1. Teniendo una nueva bolsa aire en la última prueba, se pudo registrar el valor más alto que la deformación para la fluencia, que es lo que se esperaba obtener en estas pruebas.

CAPITULO 3

COMPARACIÓN DE RESULTADOS NUMÉRICOS Y EXPERIMENTALES.

3.1. Análisis de la distribución de esfuerzos y deformaciones obtenidas con los modelos Numéricos.

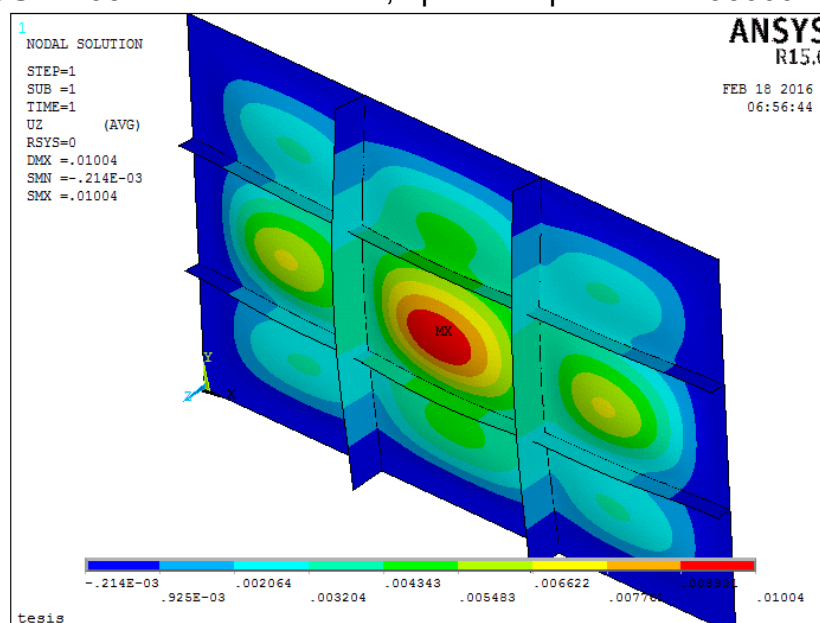
En este subcapítulo se realiza la comparación de resultados de las deflexiones y distribución de esfuerzos en la plancha reforzada soportando carga distribuida uniformemente, obtenidas a través de los programas GRILLAGE y ANSYS APDL 15.0. Es decir, se comparan los resultados correspondientes a la aplicación del Método de Elementos Finitos modelando el panel con elementos planos y el Método de la Rejilla ("Grillage") que modela los refuerzos como un sistema de vigas equivalentes. En general los resultados son muy cercanos entre sí, en los puntos de conexión entre

refuerzos.

El modelo numérico con MEF del panel reforzado desarrollado con el programa ANSYS y discutido en el capítulo 1, se le aplica carga distribuida uniforme y los bordes del panel se los considera como empotrados. En el caso del método de la Rejilla se calculan deflexiones y Fuerzas Internas en los puntos de conexión entre refuerzos de manera que será en estos puntos en donde se comparan los resultados.

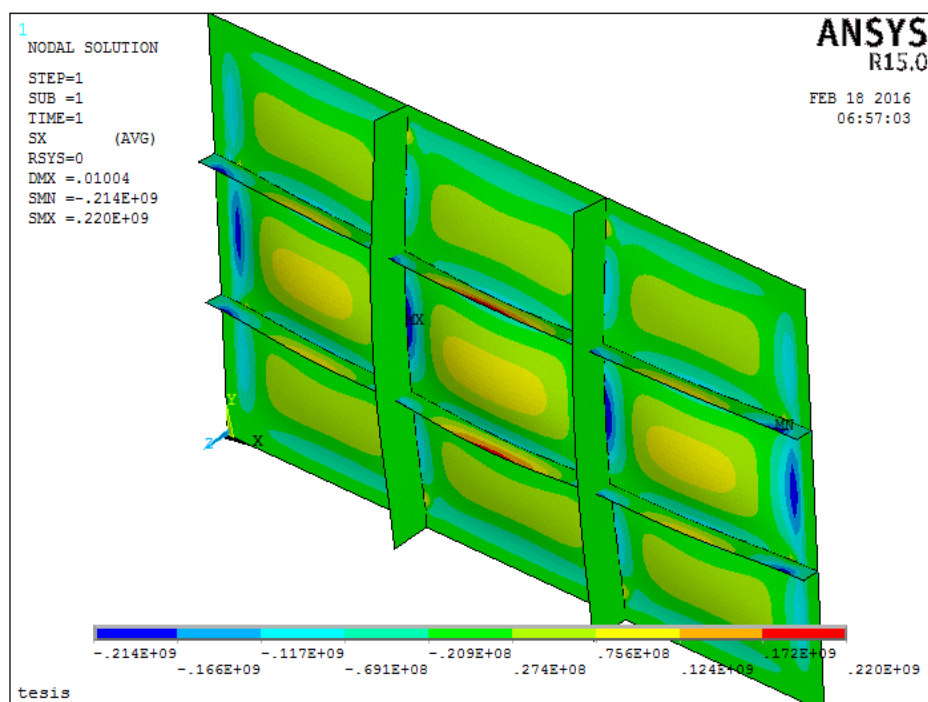
La figura 35 presenta la deflexión del panel empleando ANSYS, en la que el color rojo indica la máxima deflexión y la azul la mínima. Se observa que los refuerzos primarios se deflectan como vigas empotradas. En las figuras 36 y 37, se presenta las distribuciones de las dos componentes de esfuerzo.

FIGURA 35. Panel deformado, aplicando presión de 98000 N/m².



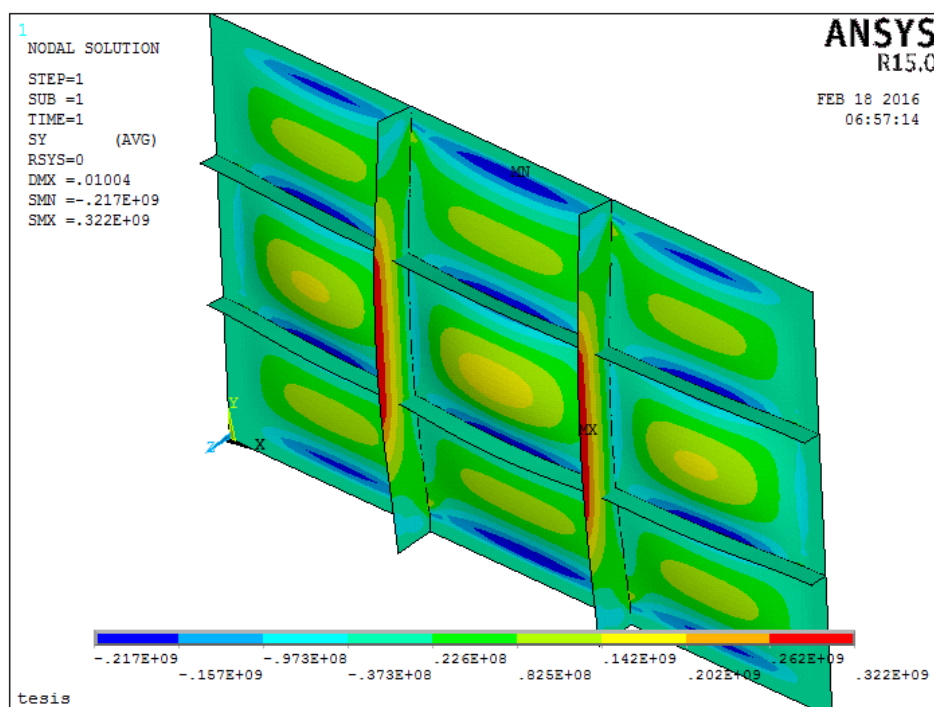
Fuente: Autora.

FIGURA 36. σ_x en el panel en el sistema de referencia global.



Fuente: Autora.

FIGURA 37. σ_y en el panel en el sistema de referencia global.



Fuente: Autora.

En la figura 35 se puede observar que los máximos valores de deflexión ocurren en la parte central del panel, y en las figuras 36 y 37, existe mayor nivel de esfuerzo en el borde del alma de los refuerzos, por la mayor distancia vertical al eje neutro correspondiente.

Análisis y comparación de deflexiones

En las siguientes gráficas se presentan los resultados obtenidos de los programas GRILLAGE y ANSYS, para el panel reforzado analizado linealmente mediante el MdLR y el MEF. En la figura 38 se muestran la distribución de las deflexiones en dirección z, a lo largo del centro de la plancha, y, a la altura de uno de los refuerzos secundarios. Mientras que, en la figura 39 se presenta la distribución de deflexión del modelo numérico en la otra dirección, a lo largo de las posiciones equivalentes. Los resultados del MdLR corresponden a las deflexiones en los puntos de conexión entre refuerzos, y para efectos de comparación se los unió con un polinomio cuadrático.

FIGURA 38. Distribución longitudinal de la deflexión, aplicando presión de 98000 N/m^2 .

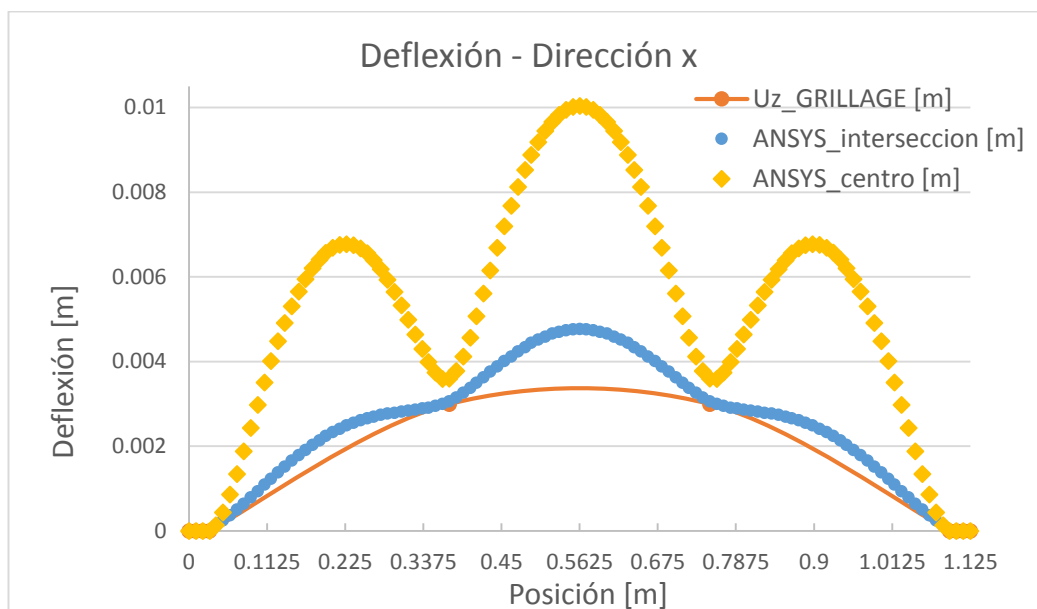
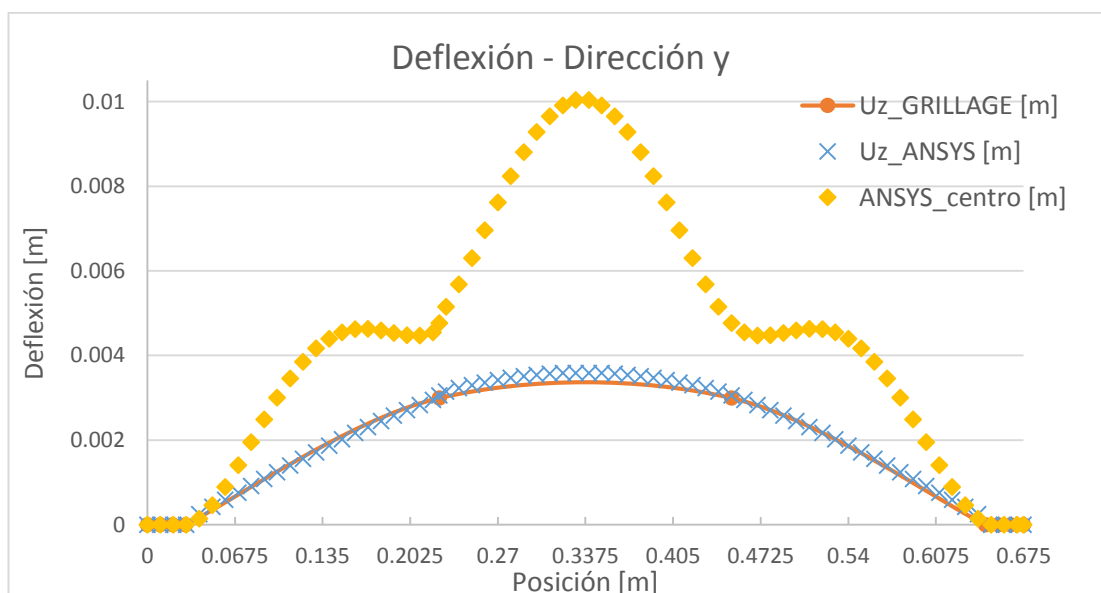


FIGURA 39. Distribución transversal de la deflexión, aplicando presión de 98000 N/m^2 .



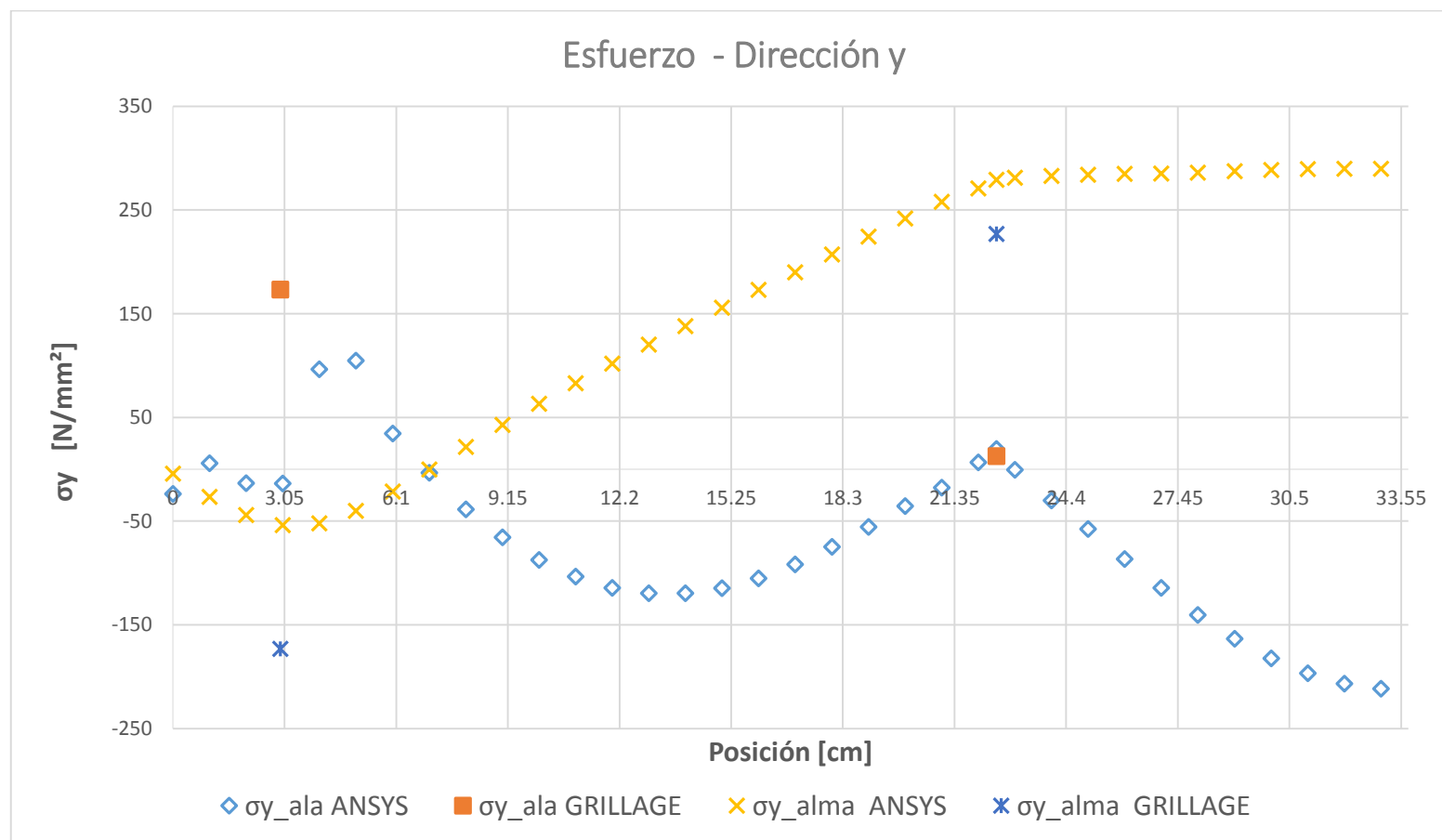
Fuente: Autora.

De los resultados obtenidos, se observa que los valores de deflexión obtenidos con el programa GRILLAGE, son cercanos a los obtenidos con ANSYS a la altura de los refuerzos. En la zona del ala del refuerzo (conexión plancha-refuerzo), el MdIR determina valores de deflexión muy cercanos al de ANSYS, diferenciando en aproximadamente 2%. Por efectos de comparación se grafican los resultados de ANSYS en el centro del panel y la diferencia es notable. Esto se esperaba, ya que recordando del subcapítulo 1.1, el MdIR esquematiza la plancha reforzada como un conjunto de vigas conectadas por nodos.

Análisis y comparación de esfuerzos

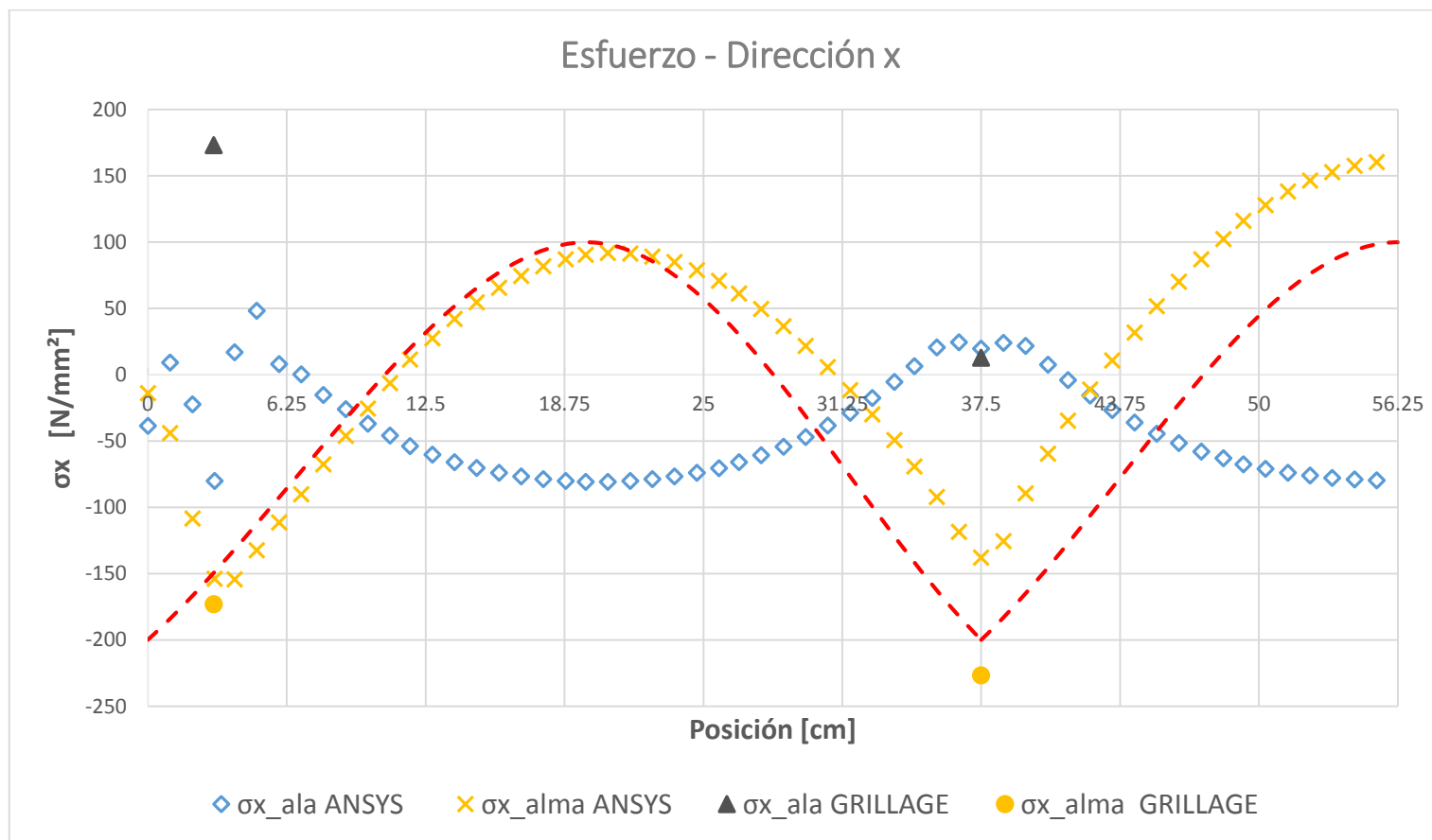
De igual manera, se realiza la comparación de la distribución de los esfuerzos que se producen en el panel, por acción de la carga lateral distribuida. En las siguientes gráficas se presentan los resultados de la distribución de los esfuerzos en dirección x , y , y , en la fibra más alejada de cada refuerzo, y , en el ala inferior de los refuerzos (plancha). Debido a la simetría, solo se ha graficado la mitad de la longitud. En el caso de los resultados con el programa ANSYS, se promedian los valores en las caras superiores e inferiores de los nodos de los elementos planos y de esta forma se determinó el esfuerzo secundario desarrollado en los puntos mencionados.

FIGURA 40. Distribución de σ_y a lo largo de distintos cortes del panel, aplicando presión de 98000 N/m².



Fuente: Autora.

FIGURA 41. Distribución de σ_x a lo largo de distintos cortes del panel, aplicando presión de 98000 N/m².



Fuente: Autora.

De las gráficas se puede observar que nuevamente para realizar la comparación, solo se consideran los puntos de conexión entre refuerzo y plancha. De las figuras 40 y 41, los resultados del programa GRILLAGE son bastante cercanos a los de ANSYS, cuando se consideran los esfuerzos en el ala, en la intersección entre plancha+refuerzo. Pero cuando se realiza la comparación de la distribución de esfuerzos obtenida en el alma en la fibra más alejada del refuerzo, esta diferencia porcentual está entre 64% en dirección x, y, 16% en dirección y.

Analizando en forma simplificada el comportamiento secundario del panel reforzado se asume que los refuerzos secundarios ("*stiffeners*") se soportan en los refuerzos primarios ("*girders*") por lo tanto en cada conexión se asume que se tiene una viga simple que está empotrada en sus extremos; en cambio el primario "*girder*" se considera que recibe la carga de los "*stiffeners*" y se soporta en los bordes de la plancha. En las figuras anteriores, se puede apreciar el comportamiento secundario simplista antes mencionado. Lo que quiere decir que en dirección y, a la altura del refuerzo (alma) se tiene distribución del esfuerzo del modelo simplista (curva roja) muy cerca a la obtenida por ANSYS (curva azul). La diferencia entre ellos es porque se asume en el modelo simplista del refuerzo secundario que se soporta en el refuerzo principal, pero hay que tener en cuenta que el refuerzo principal también se deforma y por lo tanto hay una redistribución en la forma en que se transmite la carga hacia los bordes. Así mismo en la otra dirección, figura 41, la

distribución obtenida por ANSYS (curva amarilla) y del modelo simplista tienen un comportamiento similar.

3.2. Comparación de Resultados Numéricos y Experimentales.

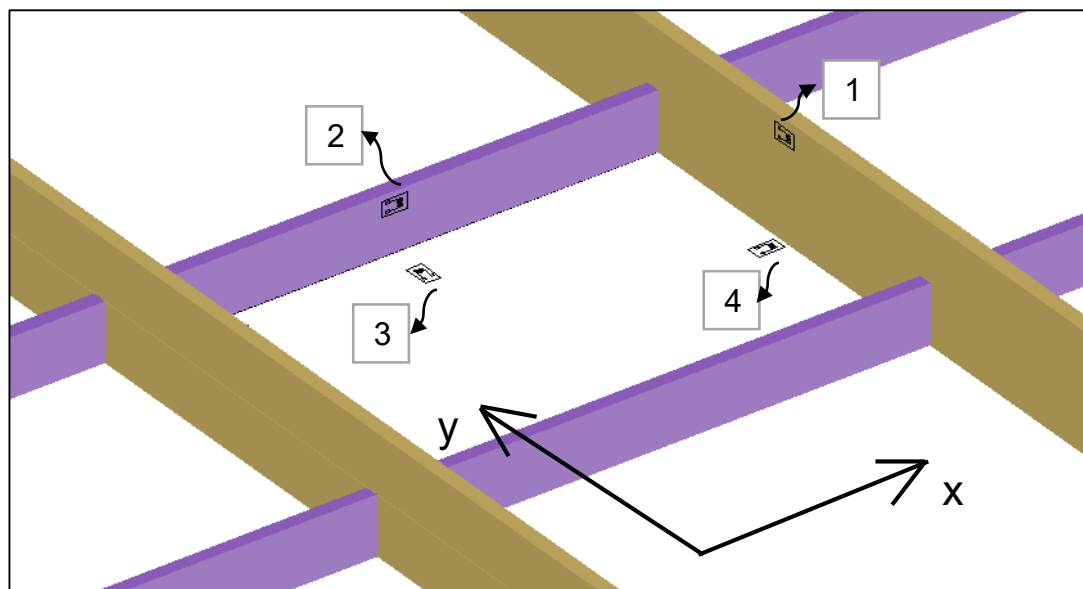
En este subcapítulo se realiza la comparación de resultados experimentales y numéricos, obtenidas a través de la ejecución de los programas GRILLAGE y ANSYS APDL 15.0. Se van a presentar 4 gráficas de microdeformaciones vs Presión, y cada una contiene las 3 pruebas experimentales y los resultados del cálculo con ANSYS. Dado que los cálculos desarrollados son lineales, los resultados se presentan como rectas desde el origen. Los resultados experimentales se presentan hasta una presión de 120 kN/m² (17.4 psi), que se considera todavía no causan daño inelástico.

Hay que tener en cuenta que las condiciones de frontera modeladas en el MEF no son iguales en el caso experimental, ya que por la influencia de los pernos no permite considerar empotrada esta zona.

En la figura 42 se recuerda la posición en donde se tienen los registros de los resultados experimentales, teniendo así:

1. Alma del Refuerzo Primario,
2. Alma del Refuerzo Secundario,
3. Plancha en dirección y, y,
4. Plancha en dirección x.

FIGURA 42. Esquema de la posición de los 4 extensómetros instalados.



Fuente: Autora

Alma del Refuerzo Primario

Para el cálculo de la deformación unitaria, se considera la ley de Hooke para material isotrópico, incluyendo los tres componentes del esfuerzo normal:

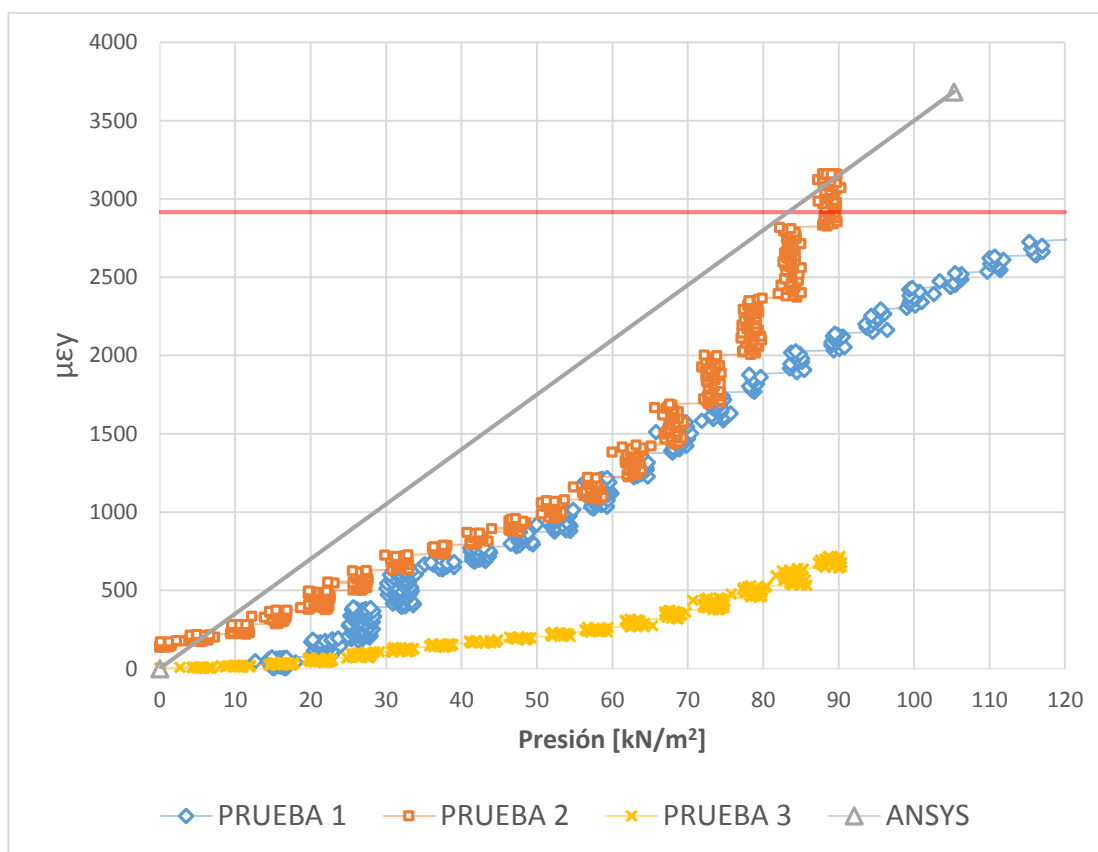
$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} (\sigma_y - \nu\sigma_x - \nu\sigma_z) \quad (3.1)$$

En la siguiente tabla se presenta un resumen del cálculo de las microdeformaciones, a partir de los resultados obtenidos de ANSYS. En la figura 43 se presentan los resultados obtenidos del MEF y los experimentales para la deformación unitaria.

TABLA XI. Valor de micro deformación en el alma del refuerzo primario.

Ubicación de Strain Gages			Deflex Z	Sx	Sy	Sz	$\mu\epsilon_y$
	Posición [cm]		[mm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	
$\epsilon_{y_RefPrim}$	a	0.37	9016	2.04	0.00	261.31	-0.69
	b	10.66					

Fuente: Autora

FIGURA 43. Comparación de resultados numéricos y experimentales a la altura del refuerzo primario.

Fuente: Autora

Alma del Refuerzo Secundario

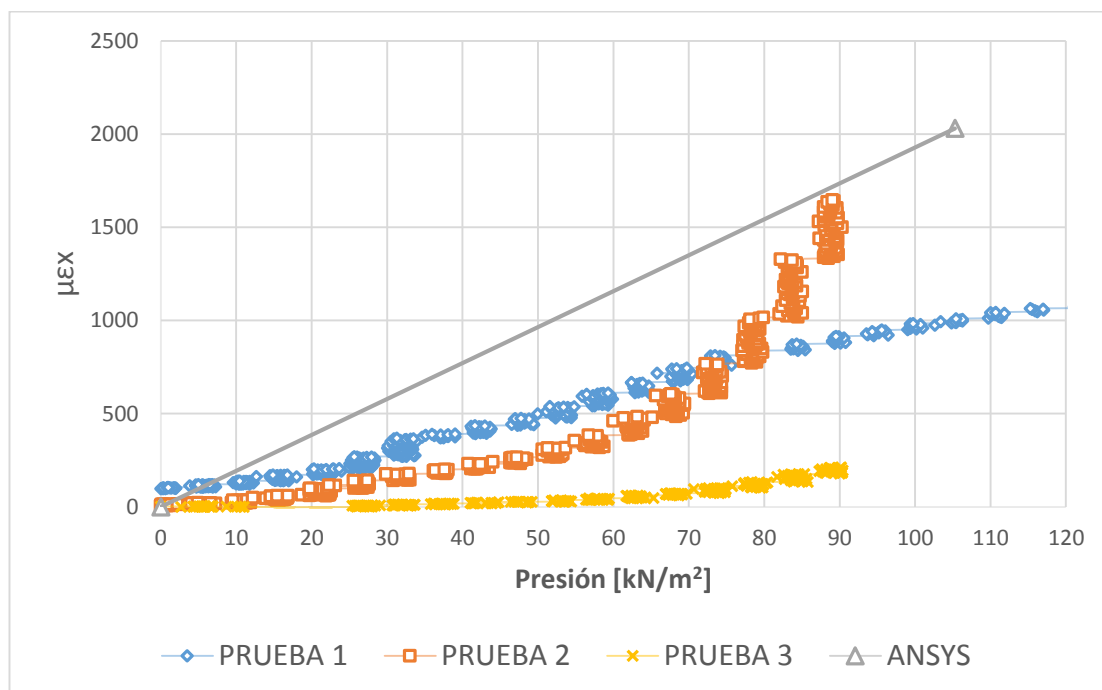
Así mismo, para el refuerzo secundario se presenta en la siguiente tabla un resumen del cálculo de las microdeformaciones. En la figura 44 se presentan los resultados obtenidos con MEF y los resultados experimentales para la deformación unitaria.

TABLA XII. Valor de micro deformación en el alma del refuerzo secundario.

Ubicación de Strain Gages			Deflex Z	Sx	Sy	Sz	$\mu\epsilon x$
	Posición [cm]		[mm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	
ϵx_{RefSec}	g	0.4	8607	3.12	135.98	0.00	1.23
	h	18.28					
							2030.20

Fuente: Autora

FIGURA 44. Comparación de resultados numéricos, experimentales y programa "GRILLAGE " a la altura del refuerzo secundario.



Fuente: Autora

Plancha en dirección “y”

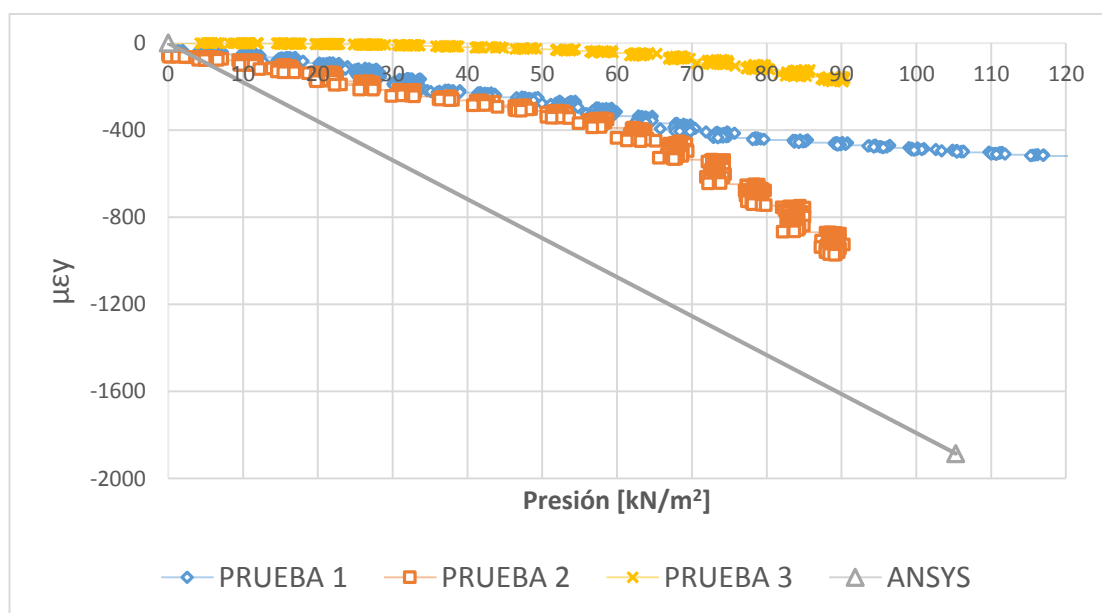
Así mismo, para la plancha en dirección y se presenta en la siguiente tabla un resumen del cálculo de las microdeformaciones. En la figura 45 se presentan los resultados obtenidos con MEF y los resultados experimentales para la deformación unitaria.

TABLA XIII. Valor de micro deformación en la plancha en dirección y.

Ubicación de Strain Gages				Deflex Z	Sx	Sy	Sz	μϵy
	Posición [cm]		#Nodo	[mm]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	
ϵy_plancha	e	0.565	4098	3.51	-58.40	-153.16	0.00	-1885.76
	f	18.135						

Fuente: Autora

FIGURA 45. Comparación de resultados numéricos, experimentales y programa "GRILLAGE " a la altura de la plancha en dirección y.



Fuente: Autora

Plancha en dirección "x"

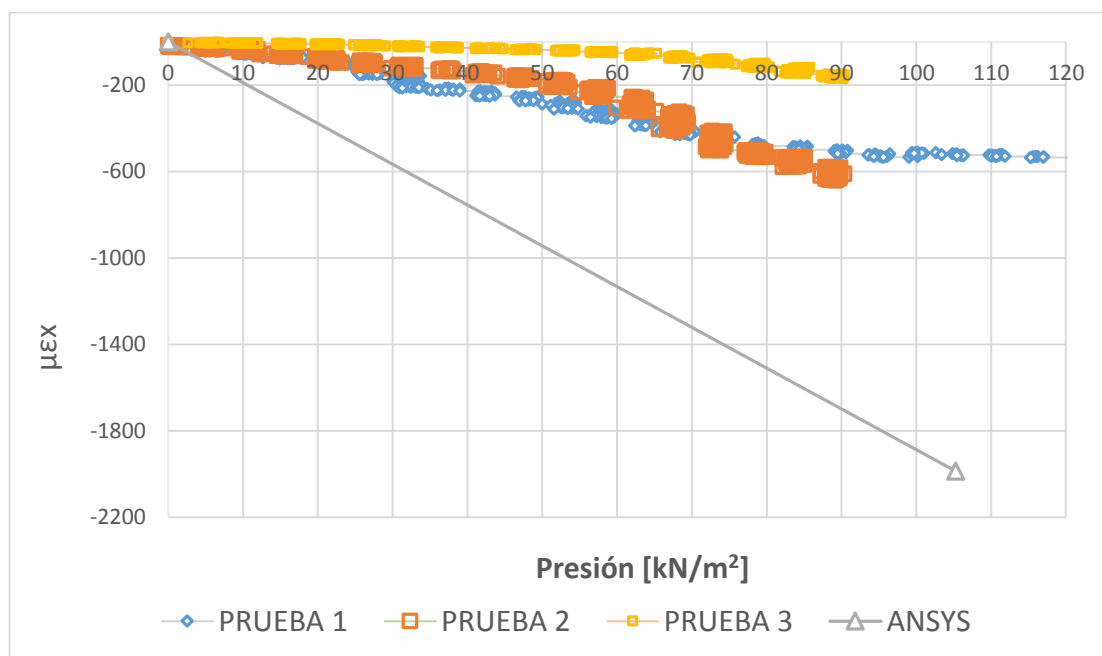
Así mismo, para la plancha en dirección x se presenta en la siguiente tabla un resumen del cálculo de las microdeformaciones. Y en la figura 46 se presentan los resultados obtenidos con MEF y los resultados experimentales para la deformación unitaria.

TABLA XIV. Valor de micro deformación en la plancha en dirección x.

Ubicación de Strain Gages				Deflex Z	Sx	Sy	Sz	$\mu\epsilon_x$
	Posición [cm]		#Nodo	[mm]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	
$\epsilon_{x_plancha}$	c	0.56	3714	2.23	-161.01	-60.72	0.00	-1985.54
	d	11.1						

Fuente: Autora

FIGURA 46. Comparación de resultados numéricos, experimentales y programa "GRILLAGE " a la altura de la plancha en dirección x.

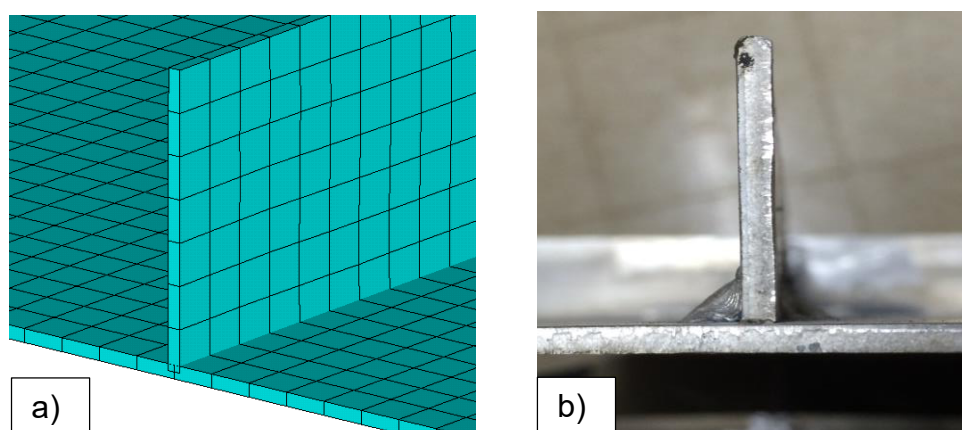


Fuente: Autora

De las figuras 43 y 44, en todas las curvas de los resultados experimentales se nota que no siguen un comportamiento lineal, sin embargo las razones de incremento en ciertas zonas coinciden razonablemente con resultados numéricos predicho por elementos finitos. En el caso de los refuerzos, los valores máximos predichos son cercanos a los experimentales, pero se nota bastante diferencia entre las dos primeras pruebas y la tercera, posiblemente eso se deba al cambio en la bolsa de presión, lo cual aplica carga en forma diferente. Así mismo se notaba que las razones de ingreso de aire incidían en los valores de presión registrada, desafortunadamente no se pudo lograr un control completo de este problema.

FIGURA 47. Influencia del tamaño de la soldadura:

a) Modelo Numérico b) Foto real panel reforzado



Fuente: Autora

En el caso de la plancha, figuras 45 y 46, la influencia del tamaño de la soldadura, como se observa en la figura 47, donde se tiene un modelo numérico de elementos finitos y una foto real de la soldadura en los paneles reforzados es notoria. Si se instala un extensómetro cerca del cordón de soldadura su dimensión extra interfiere en los resultados, lo cual no ocurre en el modelo de elementos finitos. Como se tiene un espesor de la plancha de 3 mm y el espesor cordón de soldadura es alrededor de 5.5 mm, esto incide en la deformación del punto de análisis. Además ABS [12] indica cuando se tiene un material soldado el esfuerzo permisible disminuye a un 60%. Esto incide en el valor de la presión a lo cual ocurre el límite elástico.

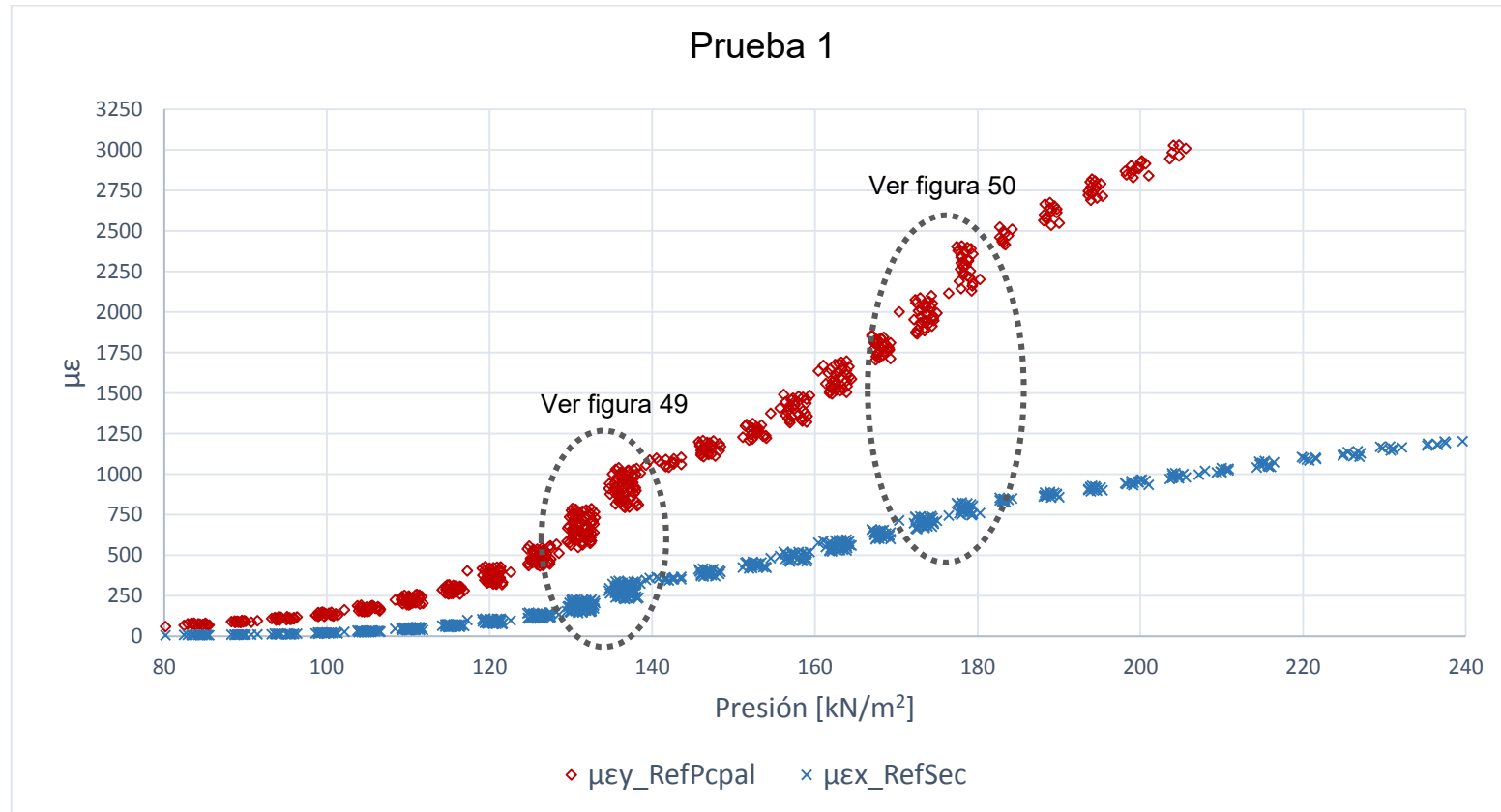
Lo que se debería realizar en el futuro es tratar de mejorar la soldadura para nuevas pruebas experimentales, para comparar directamente con resultados numéricos.

3.3. Descripción de los Mecanismos de Falla de los Paneles.

En este subcapítulo se describe cómo interactúan los elementos en el panel reforzado, aplicando carga lateral extrema. Los resultados numéricos muestran que la falla se produce en la zona central del refuerzo primario, lo que lleva a que los refuerzos secundarios absorban más carga para mantener el equilibrio del conjunto. Dada la alta dificultad analítica del fenómeno de los modos de falla que se producen en el panel, se toma como referencia los cálculos lineales con el MEF. Para describir los resultados experimentales se describe la influencia de los refuerzos secundarios sobre los primarios, a partir de los resultados en las pruebas.

En la figura 48 se presentan los resultados de la prueba 1, donde son notorios dos cambios en la razón de incremento de la deformación del refuerzo primario en función de la presión. A su vez estos cambios inciden sobre el comportamiento del refuerzo secundario. En las figuras 49 y 50 se realiza un acercamiento de dicho detalle.

FIGURA 48. Resultados experimentales en la fibra más alejada de los refuerzos en cada dirección.



Fuente: Autora

Debe recordarse primero que los extensómetros no pudieron colocarse en los puntos de máximo esfuerzo, de manera que los valores reportados son referenciados de los extremos. Tanto en la figura 49 como en la 50, se nota un incremento local de las deformaciones unitarias del refuerzo principal (curva roja), conforme va aumentando la presión. Dado que es el punto de máximo esfuerzo, posiblemente esta región sobrepase la Fluencia. Lo que implica que el refuerzo secundario (curva azul) adquiere un poco de la carga que debería ser absorbida por el refuerzo principal.

Los valores registrados de las deformaciones en la plancha tanto en dirección x , y , y , no superan las $800 \mu\epsilon$. Por tanto en este trabajo no será tema de discusión.

FIGURA 49. Primera razón de incremento de la prueba 1.

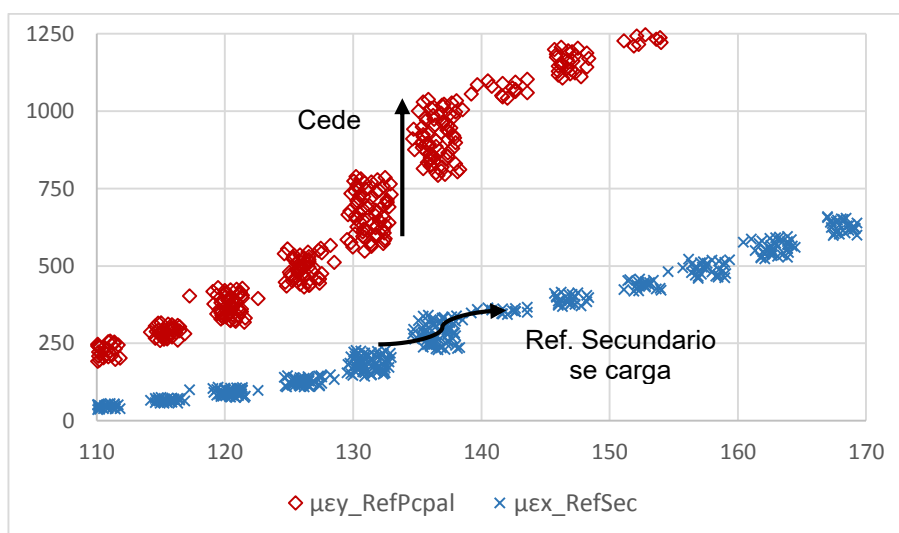
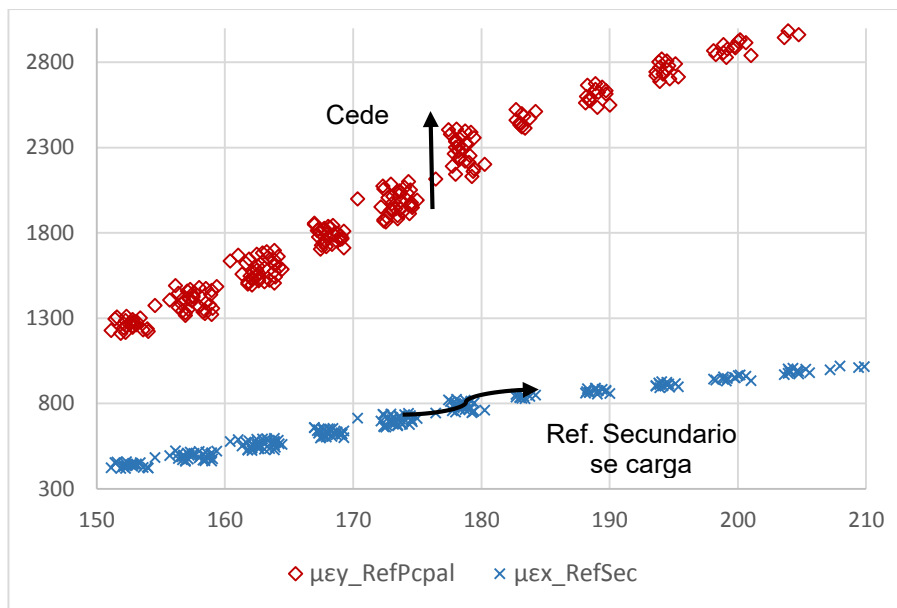
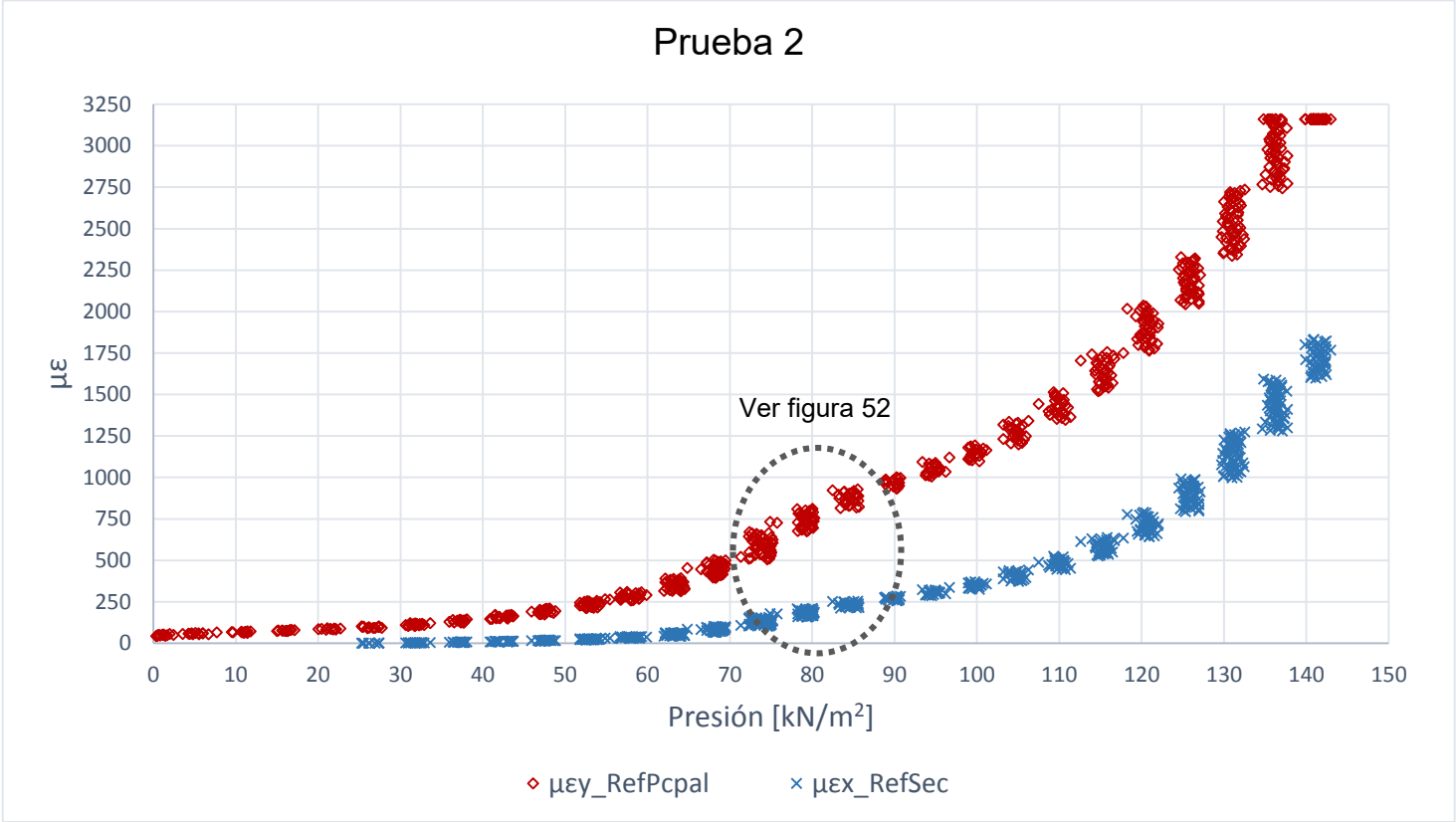


FIGURA 50. Segunda razón de incremento de la prueba 1.**Fuente:** Autora

En la figura 51 se presentan los resultados de la prueba 2, donde es notorio un solo cambio en la razón de incremento del refuerzo primario sobre el secundario; en la figura 52 se presenta un acercamiento de dicho problema.

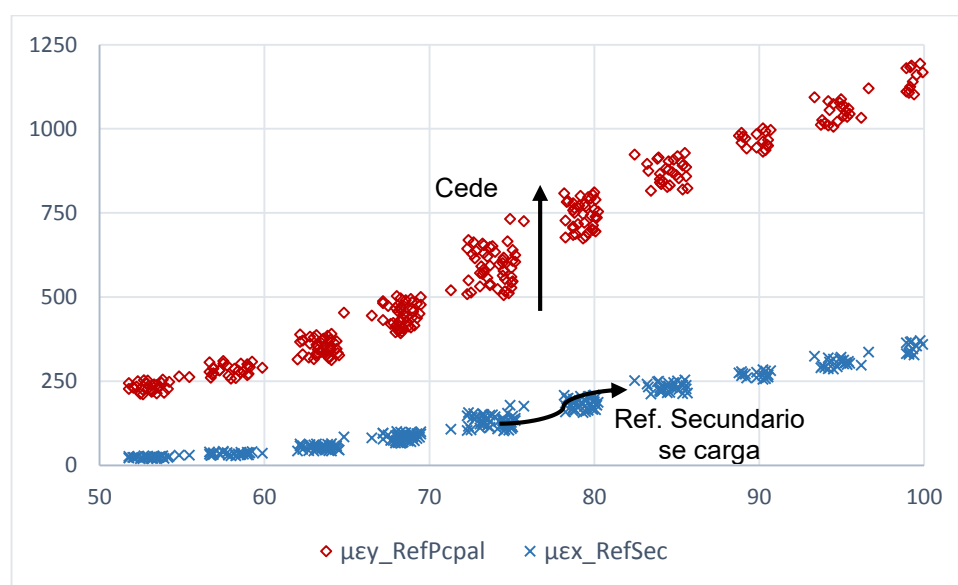
FIGURA 51. Resultados experimentales en la fibra más alejada de los refuerzos primario y secundario.



Fuente: Autora

En la figura 52, así mismo se nota un incremento local de las deformaciones unitarias a la altura del refuerzo principal, conforme va aumentando la presión. Se observa que el refuerzo secundario soporta un incremento en la carga, como se esperaba. En esa misma prueba solo se tiene un incremento debido a que súbitamente la bolsa de presión se rompió.

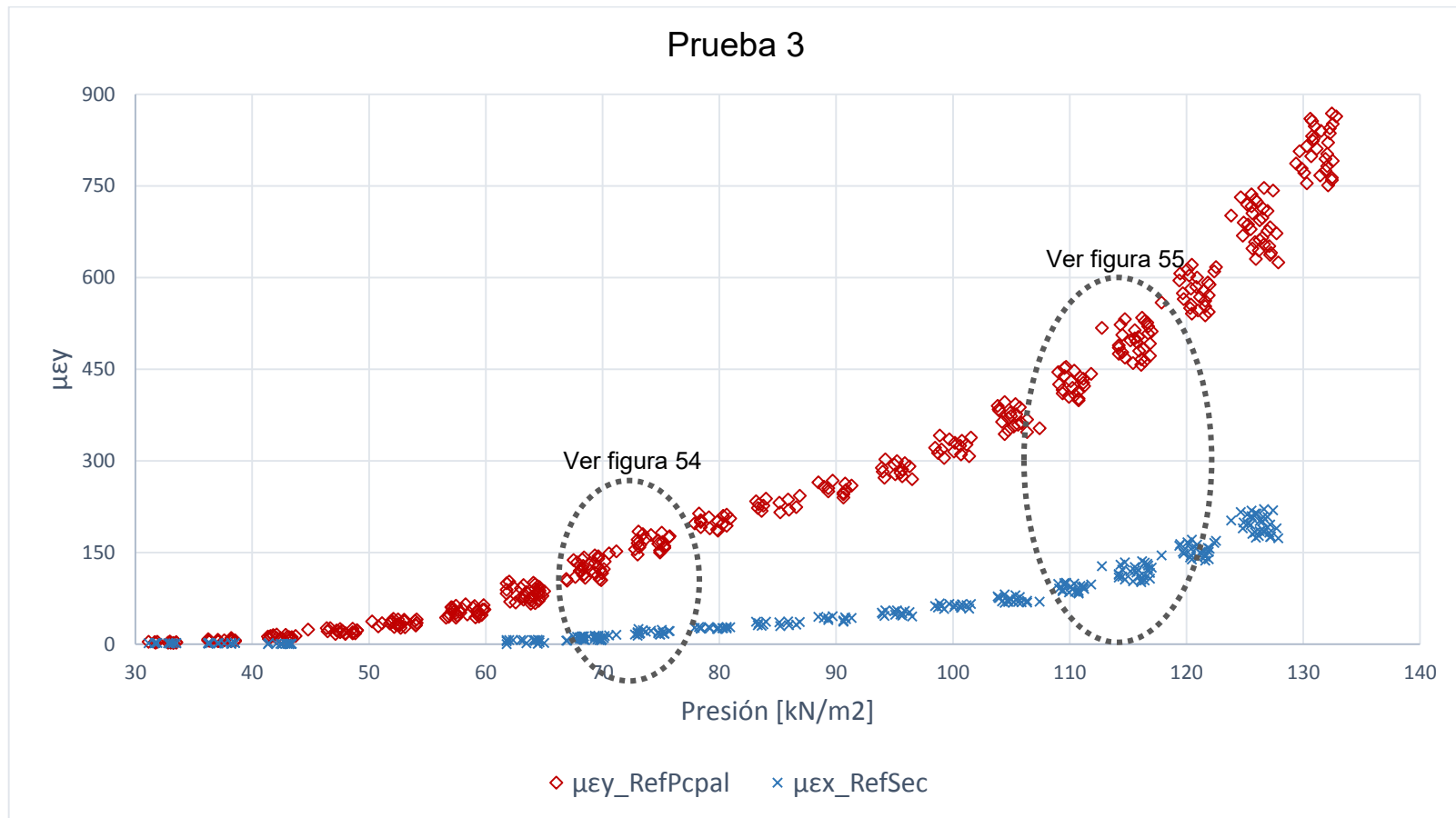
FIGURA 52. Primera razón de incremento de la prueba 2.



Fuente: Autora

Tanto en la prueba 1 y 2, se mantiene como microdeformación máxima de registro alrededor de 3160 $\mu\epsilon$ que está sobre el nivel de Fluencia que es 2916.6 $\mu\epsilon$. Pero en la prueba 3 se llegó solo hasta 900 $\mu\epsilon$ debido a que se realizó la carga con una nueva bolsa de presión y al producirse un ruido “fuerte” se detuvo la prueba por seguridad. Por esta razón, se obtuvieron registros muy diferentes a las dos primeras pruebas.

FIGURA 53. Resultados experimentales en la fibra más alejada del refuerzo primario y secundario.



Fuente: Autora

En las figuras 54 y 55 correspondientes a la prueba 3 con el espécimen 1, se nota un pequeño incremento de las deformaciones unitarias en el refuerzo principal, conforme va aumentando la presión. Lo que implica que el refuerzo secundario se carga, absorbido un poco de la carga del refuerzo principal ya que este cede.

FIGURA 54. Primera razón de incremento de la prueba 3.

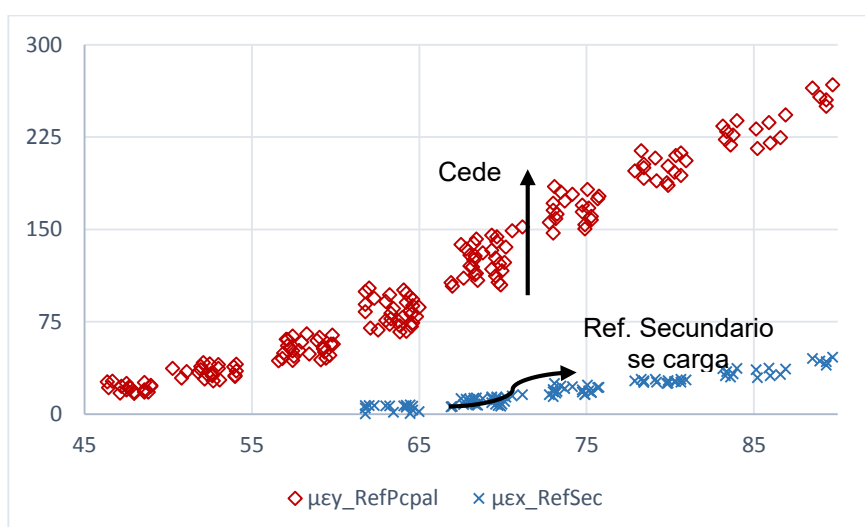
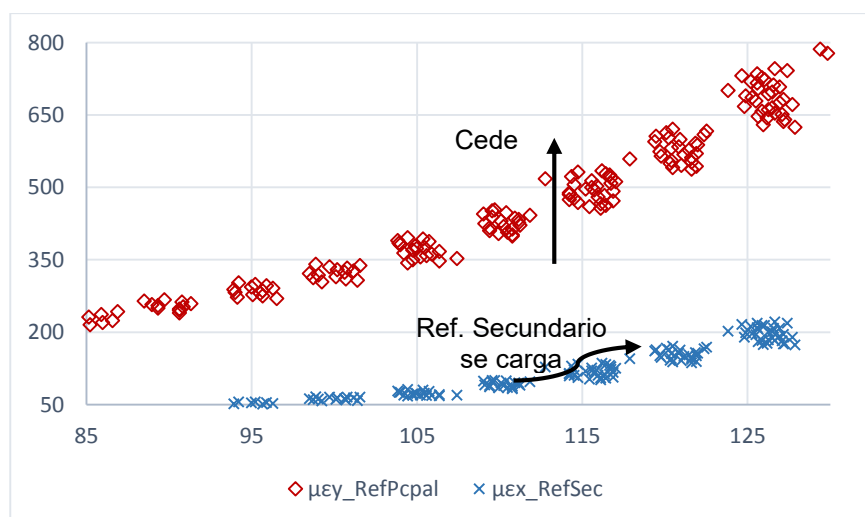


FIGURA 55. Segunda razón de incremento de la prueba 3.

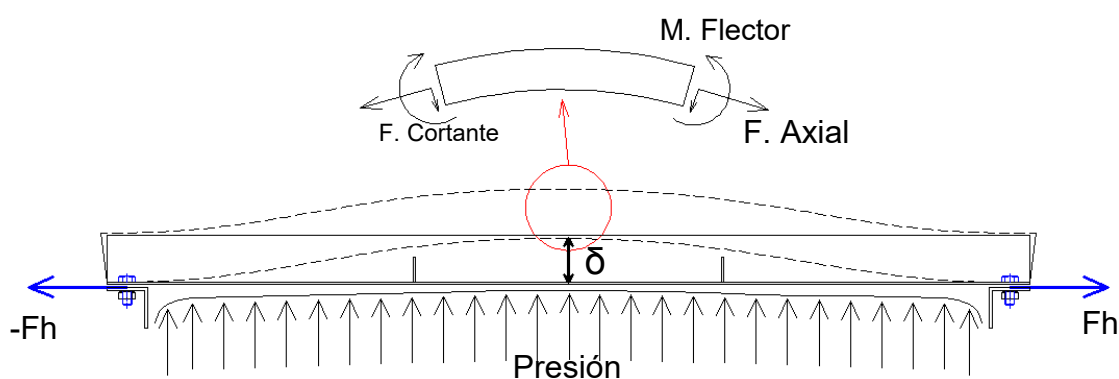


Fuente: Autora

Influencia de la Fuerza Horizontal

Debido a la presión aplicada sobre el panel reforzado, el refuerzo principal sufre alta deflexión en su zona central. En la figura 56, se presenta un esquema simplificado donde se presenta un corte horizontal del panel reforzado que se encuentra “empotrado” en los extremos. Debido a un elevado valor de deflexión, las fuerzas en el plano que colaboran en el equilibrio, reducen un poco el efecto de flexión. Es decir, cuando se produce la falla en paneles debido a la alta deformación por la acción de la fuerza en dirección horizontal a la altura de los pernos, estos colaboran a aumentar la resistencia en dirección vertical, por lo tanto incrementa la resistencia del panel en forma efectiva. Este efecto es de orden no lineal, y muy complicado de evaluar analíticamente.

FIGURA 56. Esquema del refuerzo principal sometido a presión uniforme.



Fuente: Autora

CONCLUSIONES

En este trabajo se analizó un panel reforzado del fondo de la lancha LP-AST-1304 de construcción nacional en forma analítica y experimental. Primero se implementó el Método de la Rejilla, MdIR, en lenguaje de programación Visual Fortran para analizar en forma simplificada paneles reforzados y luego se desarrolló un análisis con el Método de Elementos Finitos. Para la parte experimental, se construyeron tres especímenes los cuales fueron sometidos a carga lateral extrema. Finalmente se compararon resultados a nivel secundario (MdIR y MEF) y a nivel terciario (MEF y Resultados Experimentales). Completado el trabajo, se concluye lo siguiente:

1. Una estructura formada por plancha con refuerzos en el área de Ingeniería Naval se analiza con comportamientos secundario y terciario. El MdIR que se ha implementado en este trabajo corresponde al análisis

secundario, es decir, analiza de manera simplificada el panel reforzado convertido como un conjunto de vigas equivalentes. En este trabajo se han comparado resultados aplicando MdIR y MEF (ANSYS) de la distribución de esfuerzos y deflexión de un panel con dos refuerzos en cada dirección, con bordes empotrados y soportando carga uniforme. La aplicación del MdIR corresponde un modelo más simple que el desarrollo del análisis de un modelo estructural con elementos finitos planos. Considerando las deflexiones y los esfuerzos primarios, en los nodos que son los puntos en los que se puede comparar los resultados, se encontró muy buena correlación. Entonces, es de mucha utilidad el Método de la Rejilla para análisis preliminar de una estructura secundaria formada por plancha con refuerzos.

2. Para poder desarrollar las pruebas experimentales para analizar paneles reforzados para la preparación de los especímenes se debe trabajar con dimensiones pequeñas lo que implica separarse del sistema real. Por ejemplo el tamaño del cordón de la soldadura altera la conexión entre los refuerzos y eso interfiere en cómo el panel responde al aplicar carga. También es muy difícil construir en forma geoméricamente similar el modelo porque eso implica tener secciones muy pequeñas que tengan ala y es muy complicado por la soldadura, considerando el bajo espesor del material que se usó en este trabajo. Además de ello, las pruebas de tipo destructivo, implican que las fuerzas son bien elevadas; por ejemplo en el caso actual se alcanzó

las 10 toneladas de fuerza. De tal manera que a partir de esta experiencia un programa experimental de tipo destructivo con paneles reforzados debe considerar materiales y facilidades adecuadas para mantener el nivel de seguridad requerido, y así alcanzar la similaridad necesaria para el análisis.

3. Comparando los resultados experimentales y teóricos de la plancha reforzada, se nota similaridad en el sentido de que los valores relativos de las deformaciones unitarias en los diferentes puntos es el que se esperaba. Esto es, el valor más alto se presenta en el refuerzo primario en la fibra más alejada al Eje Neutro, luego en el refuerzo secundario, seguido en la plancha en dirección y, y, el más bajo en dirección x. Es decir, cualitativamente la fase experimental confirma lo que se había previsto de manera teórica. De la observación de los registros con carga extrema una vez que se alcanza la carga máxima, no se nota cambios en la respuesta secundaria. De manera que parece que este refuerzo va a fallar de manera prácticamente independiente del panel reforzado. Es posible que la relación entre resistencias de los refuerzos (primario y secundario) resulte muy diferente, debido a la elevada altura del alma del refuerzo primario lo que explique este comportamiento.

RECOMENDACIONES

- ✓ Con respecto al laboratorio de Ingeniería Naval, se recomienda que al momento de realizar pruebas de tipo destructivo se tenga una pared divisoria entre el equipo y las personas que realizan la práctica. Esto para evitar lesiones debido a los altos niveles de presión que se tienen que aplicar al panel reforzado para lograr su falla.
- ✓ Dada la naturaleza de las pruebas experimentales es recomendable mejorar la soldadura, para evitar que en la cercanía a los cordones de soldadura se desarrollen o interfieran en los resultados.

BIBLIOGRAFÍA

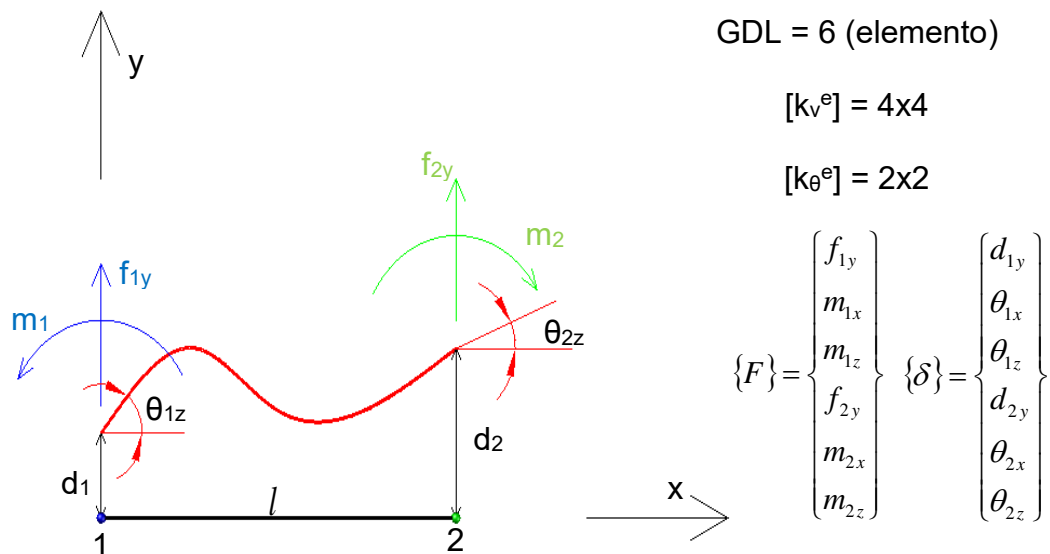
- [1] **PAIK, J. & THAYAMBALLI, A.**, Ultimate Limit State Design of Steel-Plated Structures. John Wiley & Sons, Ltd, 2006.
- [2] **PAULLING, J.R.**, Strength of Ships, Cap 4 en PNA Volumen I., editado por Lewis, E., SNAME, 1998.
- [3] **MANSOUR, A.**, Gross Panel Strength under Combined Loading. Ship Structure Committee, 1977.
- [4] **HUGHES, O.**, Ship Structural Design, Cap 5. SNAME, 1988.
- [5] **MURILO, A. & SAT'ANA BASTOS, P.**, Método semi-analítico para estimar la resistencia de paneles reforzados. Congreso Nacional de Transporte de Vía Fluvial, Const Naval y Offshore, Rio de Janeiro, 2012.
- [6] **SMITH, C.S**, Compressive strength of well steel ship grillages. Trans. RINA, 1976.
- [7] **BELENKIY, L. & RASKIN, Y.**, Estimate of the Ultimate Load on Structural Members Subjected to Lateral Loads, SNAME, 2001.
- [8] **ASTINAVE**, Planos Estructurales y Líneas de Formas: Lancha Patrullera, LP-AST-1304, 2011.
- [9] **LOGAN, D.**, The First Course in the Finite Element, Rose-Hulman Institute of Technology, Boston, 1985.
- [10] **DNV**, Hull Structural Design Ships with length less than 100 metres, Hull and Equipment main class, Part 3 Chapter 2, January 1991.
- [11] **TPC PNEUMATICS**, Digital Pressure Sensor, Series SPSA.
- [12] **ABS**, Rules for Materials and Welding, Part 2, Aluminum and Fiber Reinforced Plastics (FRP), 2014.

ANEXOS

ANEXO A

DEDUCCIÓN DE LA MATRIZ DE RIGIDEZ

Para obtener los coeficientes de la matriz de Rigidez de un elemento, sometido a flexión y torsión, se consideran tres grados de libertad en cada nodo: desplazamiento y rotación vertical, y, rotación torsional.



1) Sumatoria de Fuerzas

$$\sum F_y = 0$$

$$f_{y1} + f_{y2} = 0$$

$$f_{y1} = -f_{y2}$$

2) Sumatoria de Momentos

$$\sum M_z = 0$$

$$m_{z1} + m_{z2} - f_{y1} \cdot l = 0$$

Flexión Pura Vertical

$$EI \frac{d^2 v}{dx^2} = m_{z2} = f_{y1} \cdot x - m_{z1}$$

$$EI \frac{dv}{dx} = f_{y1} \cdot \frac{x^2}{2} - m_{z1} \cdot x + C_1$$

$$EI v = f_{y1} \cdot \frac{x^3}{6} - m_{z1} \cdot \frac{x^2}{2} + C_1 \cdot x + C_2$$

Cuando $x=0 \wedge \frac{dv}{dx} = \theta_{z1} \wedge v = v_1$

Por lo tanto:

$$EI\theta_{z1} = C_1$$

$$EIv_1 = C_2$$

Cuando $x=L \wedge \frac{dv}{dx} = \theta_{z2} \wedge v = v_2$ y reemplazando las constantes $C_1 \wedge C_2$

Por lo tanto:

$$\begin{Bmatrix} F_{1y} \\ M_{1x} \\ M_{1z} \\ F_{2y} \\ M_{2x} \\ M_{2z} \end{Bmatrix} = \frac{EI}{L^3} \begin{Bmatrix} 12v_1 & 6L\theta_{z1} & -12v_2 & 6L\theta_{z2} \\ 6Lv_1 & 4L^2\theta_{z1} & -6Lv_2 & 2L^2\theta_{z2} \\ -12v_1 & -6L\theta_{z1} & 12v_2 & -6L\theta_{z2} \\ 6Lv_1 & 2L^2\theta_{z1} & -6Lv_2 & 4L^2\theta_{z2} \end{Bmatrix}$$

Torsión Pura

$$M_x = -GJ\theta_{x1} + C_1$$

Cuando $x=L \wedge \theta_{x1} = 0 \Rightarrow C_1 = M_{x1}L$

Cuando $x=0 \wedge \theta_{x1} = \theta_{x2} \Rightarrow M_{x1} = \frac{GJ}{L}\theta_{x2}$

Estableciendo la condición de equilibrio, entre momentos torsores:

$$M_{x1} = -M_{x2}$$

Por lo tanto:

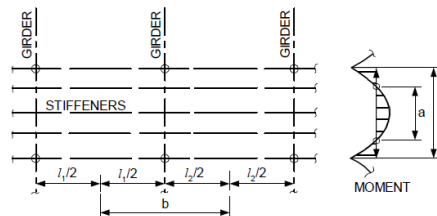
$$\begin{Bmatrix} M_{x1} \\ M_{z2} \end{Bmatrix} = \frac{GJ}{L} \begin{Bmatrix} \theta_{x1} & -\theta_{x2} \\ -\theta_{x1} & \theta_{x2} \end{Bmatrix}$$

ANEXO B

PORCENTAJE DE EFECTIVIDAD EN EL PANEL REFORZADO

La efectividad de la plancha a la cual está unido un refuerzo es definida como se indica en la figura B I, [10]. En la tabla B I dado por DNV, está definida por el número de refuerzos y la relación a/b que este caso da 1.08 en dirección x y 3.0 en dirección y. Teniendo así el valor de efectividad para las dos dirección en la tabla x.

FIGURA B I. Diagrama para la efectividad.



Fuente: DNV, [10].

TABLA B I. Valor de C que depende de a/b y número de refuerzos

a/b	0	1	2	3	4	5	6	7
C ($r \geq 6$)	0.00	0.38	0.67	0.84	0.93	0.97	0.99	1.00
C ($r=5$)	0.00	0.33	0.58	0.73	0.84	0.89	0.92	0.93
C ($r=4$)	0.00	0.27	0.49	0.63	0.74	0.81	0.85	0.87
C ($r \leq 3$)	0.00	0.22	0.40	0.52	0.65	0.73	0.78	0.80

Fuente: DNV, [10].

En las siguientes tablas se presentan los valores usados y el resultado de efectividad para el panel reforzado de interés en este trabajo.

TABLA B II. Efectividad para cada direccion

Dirección x			Dirección y		
	Proporción	Unidades		Proporción	Unidades
b	0.375	m	b	0.225	m
S	0.675	m	S	1.125	m
$a = 0.6 \cdot S$	0.405	m	$a = 0.6 \cdot S$	0.675	m
r	2		r	2	
a/b	1.08		a/b	3.0	
C	0.227		C	0.52	

ANEXO C

ARCHIVO DE RESULTADOS DEL PROGRAMA GRILLAGE

El archivo de resultados del programa GRILLAGE implementado en este proyecto, está dividido en dos partes: resumen de los datos de entrada, y, resultados; estos últimos se presentan en el siguiente orden:

- Características principales del panel reforzado,
- Dimensiones de los refuerzos,
- Número total de nodos y elementos,
- Posiciones de los nodos en el plano xz,
- Se identifican las condiciones de frontera que van a tener los nodos en los cuatro bordes del panel.
- Luego se presentan las fuerzas y momentos externos equivalentes que actúan en los nodos del panel reforzado.
- Características principales seccionales de los elementos: área, inercia, constante torsional y módulo seccional.
- Finalmente se incluyen los resultados de deflexión y la distribución de fuerzas, momentos y los esfuerzos en los extremos de cada elemento.

En la figura, se presenta un ejemplo del archivo de resultados obtenido del programa GRILLAGE al terminar la ejecución.

```

****                                WELCOME                                ****
****                                PROGRAM ANALYSIS GRILLAGE METHOD        ****
****                                RESEARCH PROJECT                       ****
****                                By: BETZABETH ESPARZA VILLACÍS         ****

PROJECT : Especimen1 FONDO LANCHA PATRULLERA

Number of Elements = 12
Number of Nodes = 16

*Mechanical Properties
Modulus of Elasticity = 0.710E+11 [N/m^2]
Shear Modulus = 0.267E+11 [N/m^2]

*Panel Dimensions
Plate length "a" = 1.125 [m]
Plate Width "b" = 0.675 [m]
Plate thickness "t" = 0.003 [m]

*Stiffeners Dimensions

Direction x
Flange height "hx" = 0.030 [m]
Web thickness "twx" = 0.003 [m]
Web width "wx" = 0.000 [m]
Flange thickness "tfx" = 0.000 [m]
Effective Width = 0.23 [%]

Direction z
Flange height "hz" = 0.060 [m]
Web thickness "twz" = 0.003 [m]
Web width "wz" = 0.000 [m]
Flange thickness "tfz" = 0.000 [m]
Effective Width = 0.52 [%]

```

Datos de entrada

N O D E D A T A							
	Position			BOUNDARY CONDITIONS	Force_y	Moment_x	Moment_z
	xc(node)	yc(node)	zc(node)				
Node 1 :	0.000	0.000	0.000	Fixed	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
Node 2 :	0.225	0.000	0.000	Fixed	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
Node 3 :	0.450	0.000	0.000	Fixed	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
Node 4 :	0.675	0.000	0.000	Fixed	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
Node 5 :	0.000	0.000	0.375	Fixed	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
Node 6 :	0.225	0.000	0.375		0.8883E+04	0.3552E-05	-.6986E-05
Node 7 :	0.450	0.000	0.375		0.8883E+04	0.3552E-05	-.6986E-05
Node 8 :	0.675	0.000	0.375	Fixed	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
Node 9 :	0.000	0.000	0.750	Fixed	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
Node 10 :	0.225	0.000	0.750		0.8883E+04	0.3552E-05	-.6986E-05
Node 11 :	0.450	0.000	0.750		0.8883E+04	0.3552E-05	-.6986E-05
Node 12 :	0.675	0.000	0.750	Fixed	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
Node 13 :	0.000	0.000	1.125	Fixed	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
Node 14 :	0.225	0.000	1.125	Fixed	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
Node 15 :	0.450	0.000	1.125	Fixed	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
Node 16 :	0.675	0.000	1.125	Fixed	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00

FIGURA C I. Estructura del archivo de resultados generado por el programa.

E L E M E N T D A T A							
		node i	node j	Area	Inertia	Inert-Polar	Mod-Secc
Element	1 :	5	6	0.2432E-03	0.2230E-07	0.7289E-09	0.1487E-04
Element	2 :	6	7	0.2432E-03	0.2230E-07	0.7289E-09	0.1487E-04
Element	3 :	7	8	0.2432E-03	0.2230E-07	0.7289E-09	0.1487E-04
Element	4 :	9	10	0.2432E-03	0.2230E-07	0.7289E-09	0.1487E-04
Element	5 :	10	11	0.2432E-03	0.2230E-07	0.7289E-09	0.1487E-04
Element	6 :	11	12	0.2432E-03	0.2230E-07	0.7289E-09	0.1487E-04
Element	7 :	2	6	0.7650E-03	0.1910E-06	0.2293E-08	0.1273E-03
Element	8 :	6	10	0.7650E-03	0.1910E-06	0.2293E-08	0.1273E-03
Element	9 :	10	14	0.7650E-03	0.1910E-06	0.2293E-08	0.1273E-03
Element	10 :	3	7	0.7650E-03	0.1910E-06	0.2293E-08	0.1273E-03
Element	11 :	7	11	0.7650E-03	0.1910E-06	0.2293E-08	0.1273E-03
Element	12 :	11	15	0.7650E-03	0.1910E-06	0.2293E-08	0.1273E-03

NODE	DISPLACEMENT Y	THETA-X	THETA-Z
1	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
2	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
3	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
4	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
5	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
6	0.3731E-02	-.9945E-02	0.1652E-01
7	0.3731E-02	-.9945E-02	-.1652E-01
8	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
9	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
10	0.3731E-02	0.9945E-02	0.1652E-01
11	0.3731E-02	0.9945E-02	-.1652E-01
12	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
13	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
14	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
15	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
16	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00

3.7307900E-03

E L E M E N T S											
K	NODE(I,K)	FORCE-Y	MOMENT-X	MOMENT-Z	SIGMA x	SIGMA y	FORCE-Y	MOMENT-X	MOMENT-Z	SIGMA x	SIGMA y
1	5 6	-0.3124E+04	0.8600E+00	-0.4676E+03	-0.3145E+08	0.6753E+04	0.3124E+04	-0.8600E+00	-0.2352E+03	-0.1582E+08	-0.6753E+04
2	6 7	0.1434E-02	-0.7684E-07	0.2325E+03	0.1564E+08	-0.6034E-03	-0.1434E-02	0.7684E-07	-0.2325E+03	-0.1564E+08	0.6034E-03
3	7 8	0.3124E+04	-0.8600E+00	0.2352E+03	0.1582E+08	-0.6753E+04	-0.3124E+04	0.8600E+00	0.4676E+03	0.3145E+08	0.6753E+04
4	9 10	-0.3124E+04	-0.8600E+00	-0.4676E+03	-0.3145E+08	-0.6753E+04	0.3124E+04	0.8600E+00	-0.2352E+03	-0.1582E+08	0.6753E+04
5	10 11	0.2468E-03	-0.3697E-08	0.2325E+03	0.1564E+08	-0.2903E-04	-0.2468E-03	0.3697E-08	-0.2325E+03	-0.1564E+08	0.2903E-04
6	11 12	0.3124E+04	0.8600E+00	0.2352E+03	0.1582E+08	0.6753E+04	-0.3124E+04	-0.8600E+00	0.4676E+03	0.3145E+08	-0.6753E+04
7	2 6	-0.5759E+04	-0.2695E+01	-0.1440E+04	-0.9683E+08	-0.2117E+05	0.5759E+04	0.2695E+01	-0.7202E+03	-0.4844E+08	0.2117E+05
8	6 10	0.4115E-03	-0.3300E-06	0.7193E+03	0.4838E+08	-0.2592E-02	-0.4115E-03	0.3300E-06	-0.7193E+03	-0.4838E+08	0.2592E-02
9	10 14	0.5759E+04	0.2695E+01	0.7202E+03	0.4844E+08	0.2117E+05	-0.5759E+04	-0.2695E+01	0.1440E+04	0.9683E+08	-0.2117E+05
10	3 7	-0.5759E+04	0.2695E+01	-0.1440E+04	-0.9683E+08	0.2117E+05	0.5759E+04	-0.2695E+01	-0.7202E+03	-0.4844E+08	-0.2117E+05
11	7 11	-0.2030E-02	0.6340E-06	0.7193E+03	0.4838E+08	0.4978E-02	0.2030E-02	-0.6340E-06	-0.7193E+03	-0.4838E+08	-0.4978E-02
12	11 15	0.5759E+04	-0.2695E+01	0.7202E+03	0.4844E+08	-0.2117E+05	-0.5759E+04	0.2695E+01	0.1440E+04	0.9683E+08	0.2117E+05

Resultados de deflexiones en los nodos y en la parte de abajo resultados de momentos y esfuerzos para cada elemento

FIGURA C II. Continuación de la estructura del archivo de resultados generado por el programa.

ANEXO D

ANÁLISIS DE CONVERGENCIA POR EL TAMAÑO DE LA MALLA - MEF

Se realizan diferentes enmallados al modelo geométrico del panel, definiendo la presión de 98000 N/m² y considerando empotrados todos los bordes para definir el tamaño adecuado de los elementos. Se ha considerado emplear una malla cuadrangular y regular para todas las áreas del panel. La elección del tamaño adecuado se realiza en base a la convergencia de los valores de los esfuerzos normales máximos. En la Tabla D I se presenta un resumen de los resultados obtenidos, iniciando con una malla de pocos elementos e incrementando el número hasta determinar la malla adecuada.

TABLA D I. Análisis de convergencia de la malla.

Tamaño E.F	#	σ_x	σ_y
[cm ²]	Elementos	[N/m ²]	
2.5 x 2.5	1573	1.49E+08	1.75E+08
2.0 x 2.0	2568	1.58E+08	2.24E+08
1.75 x 1.75	3150	1.69E+08	1.78E+08
1.5 x 1.5	4125	1.73E+08	2.03E+08
1.0 x 1.0	9516	1.85E+08	2.70E+08
0.75 x 0.75	10320	1.85E+08	2.70E+08

Los resultados de la tabla, muestran que entre enmallados con 9516 y con 10320 elementos existe una diferencia de 0.15 y 0.05 % respectivamente. Por ello, para el análisis se utiliza un tamaño de 1.0 cm para todos los lados de los elementos que forman la malla del modelo numérico del panel.

ANEXO E

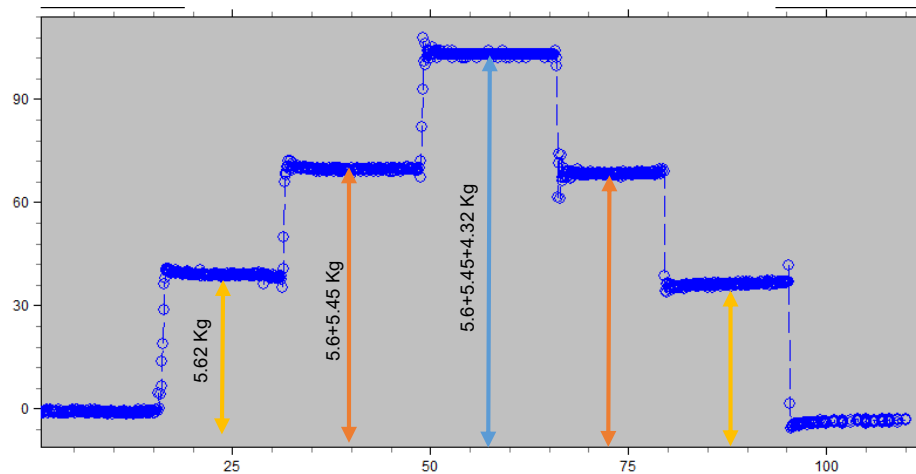
RESULTADOS EXPERIMENTALES

i. Pruebas con Cargas Puntuales.

A continuación se presentan los resultados de las microdeformaciones aplicando pesos de manera concentrada en el centro del panel:

Prueba	$\epsilon y_{RefPrim}$					ϵx_{RefSec}					$\epsilon y_{plancha}$					$\epsilon x_{plancha}$				
2 (Esp. 2)	-28.1	-46.4	-61.1	-47.2	-33.4	-15.8	-26.1	-30.0	-19.8	-9.7	39.4	69.1	103.7	69.2	36.6	12.8	20.5	32.7	24.3	15.9
3 (Esp. 1)	-31.2	-67.1	-84.0	-61.5	-35.3	-11.8	-14.8	-22.9	-15.1	-0.6	53.1	111.1	162.2	110.6	53.2	25.9	50.9	77.9	52.0	27.1

FIGURA E I. Micro deformación unitaria de las carga puntuales con su peso aplicado correspondiente.



Como resultado en la siguiente tabla se tienen los valores de las micro deformaciones correspondiente al peso aplicado, por cada medidor de deformación (2 refuerzos + 2 plancha). Se registran 5 valores correspondientes a la acción de carga y descarga de pesos durante la prueba.

Prueba	$\epsilon y/W_{RefPrim}$					$\epsilon x/W_{RefSec}$					$\epsilon y/W_{plancha}$					$\epsilon x/W_{plancha}$				
2 (Esp. 2)	-5.1	-4.2	-4.0	-4.3	-6.0	-2.9	-2.4	-2.0	-1.8	-1.7	7.2	6.3	6.7	6.3	6.5	2.3	1.9	2.1	2.2	2.8
3 (Esp. 1)	-5.7	-6.1	-5.5	-5.6	-6.3	-2.2	-1.3	-1.5	-1.4	-0.1	9.7	10.1	10.6	10.0	9.5	4.8	4.6	5.1	4.7	4.8

ii. Pruebas Experimentales Preliminares.

A continuación se presentan los resultados de las microdeformaciones tanto para los refuerzos como en la plancha, en función de la presión aplicada sobre el panel:

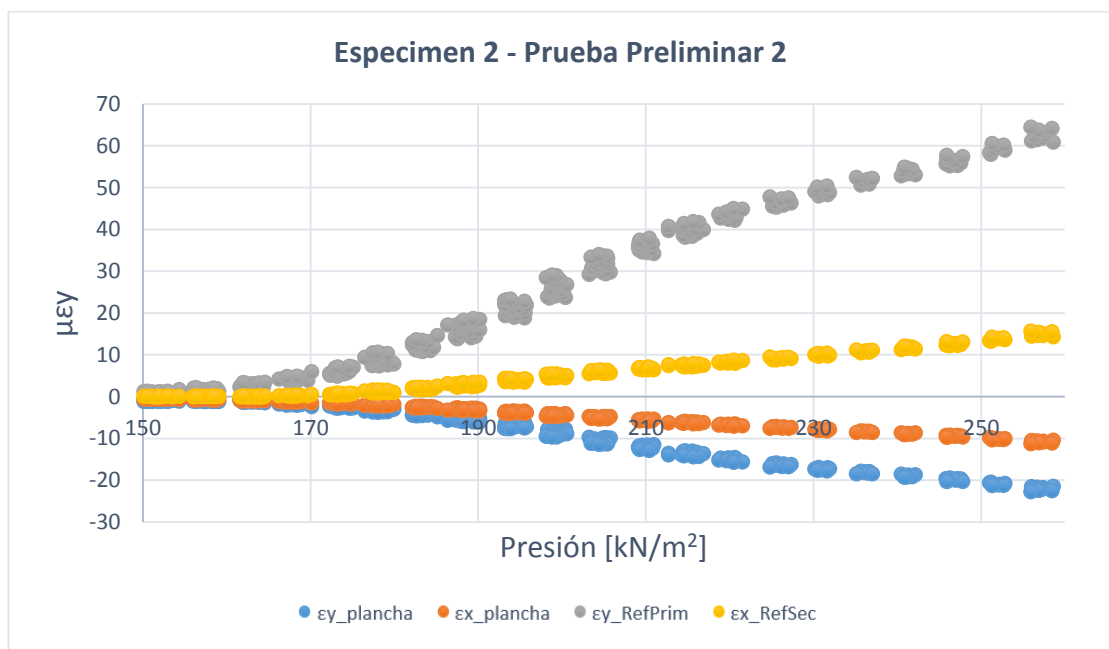
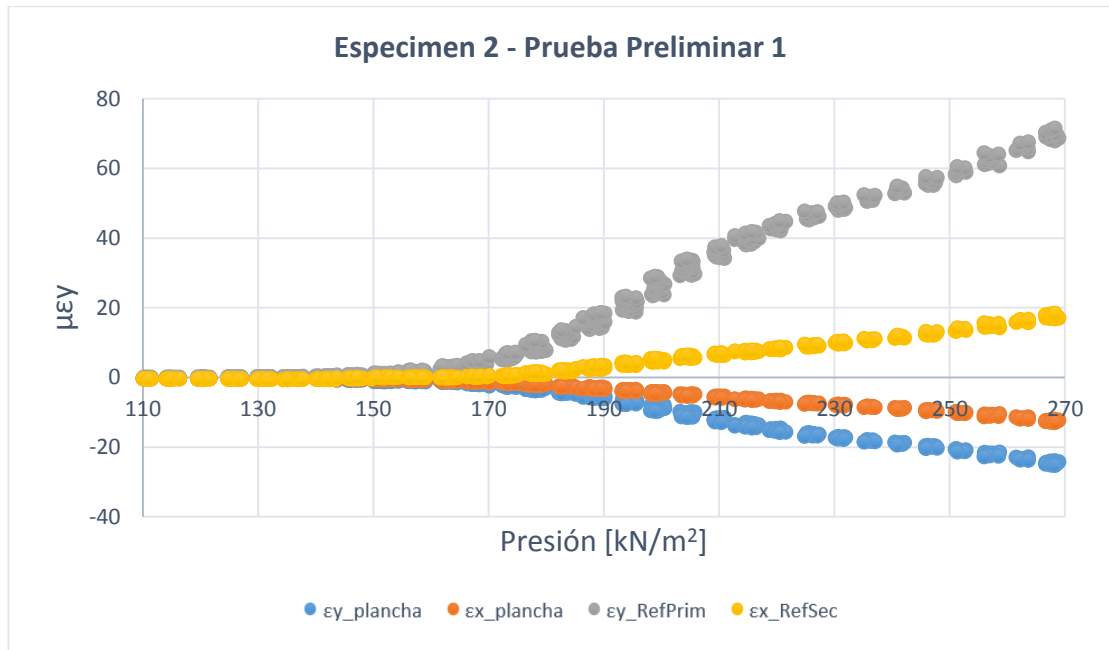
Prueba 1:

FIGURA E II. Microdeformación unitaria por acción de la presión extrema



Prueba 2:

FIGURA E III. Microdeformación unitaria por acción de la presión extrema



Prueba 3:

FIGURA E IV. Microdeformación unitaria por acción de la presión extrema.

