



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

**“Inestabilidad estructural de un cilindro considerando la influencia
de reducción localizada de espesor”**

TESIS DE POSTGRADO

Previo a la obtención del Título de:

**MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA CON
MENCION EN SISTEMAS NAVALES Y OCEÁNICOS**

Presentada por:

Jorge Isaac Mendoza Marchán

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2022

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por darme la vida, por su amor incondicional y por permitirme terminar esta etapa con bendición. A los docentes que son parte de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería Mecánica, en especial a mi tutor PhD. José Marín por compartir sus conocimientos y guiarme en el proceso de titulación.

DEDICATORIA

Este proyecto es dedicado a mi esposa Gina Ayala y a mis hijos Efraín y Ezequiel Mendoza, los cuales me han acompañado en este proceso, siendo mi soporte y motivación.

TRIBUNAL DE TITULACIÓN

Ana Rivas F., PhD.
DECANA DE LA FIMCP
PRESIDENTE

José Marín L., PhD.
DIRECTOR DE TESIS

Iván Arias V., MSc.
CO DIRECTOR

Marcos Salas I., PhD.
VOCAL

Carlos Cuenca, MSc.
VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta tesis de titulación, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual del mismo a la Escuela Superior Politécnica del Litoral”

Jorge Isaac Mendoza Marchan

RESUMEN

Comúnmente las fallas que ocurren en un submarino son por inestabilidad estructural (global o local) debido a la geometría y la elevada carga hidrostática externa que soporta el casco. La carga sobre esta estructura es de tipo compresiva y para alcanzar un pandeo local es mucho menor a la carga para alcanzar un pandeo global del casco. Existe algunos estudios en la literatura respecto a la inestabilidad estructural de cascarones cilíndricos con espesor uniforme. Sin embargo, existen diferentes fenómenos que pueden causar una variedad de imperfecciones locales en el espesor del cascarón, lo que a su vez afecta significativamente a la carga que puede soportar el casco de presión de un submarino. El objetivo de este trabajo es conocer la carga última que puede soportar un cilindro considerando la influencia de reducción localizada de espesor.

Este trabajo se desarrolló en dos etapas. La primera etapa consistió en el análisis post-pandeo de un modelo simplificado (plancha plana) íntegro y considerando reducción de espesor localizado aplicando métodos experimentales y numéricos. En esta etapa, se construyeron 4 modelos con tres especímenes de cada uno. El modelo 0 corresponde a la plancha íntegra y los tres modelos restantes presentan reducción de espesor de 1 mm de profundidad y con forma circular de diámetro de 75,100 y 150 mm, respectivamente. Los paneles rectangulares simplemente soportados tenían 500mmx500mmx3mm de acero estándar. Los resultados experimentales sirvieron para validar por simulaciones numéricas no lineales desarrolladas con el programa Ansys. La segunda etapa consistió en el análisis post-pandeo de un cilindro con espesor constante y considerando reducción localizada de espesor aplicando el método de elementos finitos. Para completar esta etapa se desarrollaron 4 modelos numéricos, uno con espesor íntegro y dos con reducción de espesor de 300 mm de diámetro y con profundidad de 7 y 10mm respectivamente. El último modelo corresponde a la expansión del cilindro con reducción de espesor.

De la primera etapa en la que se analizó la carga última de una plancha plana, debido a la razón de aspecto de los modelos 0, 1, 2 y 3, se alcanza la carga crítica de pandeo en el rango elástico disminuyendo su resistencia y acelerando su falla al

colapso. Las variaciones de fuerza y deformación unitaria obtenidas de forma numérica y experimental muestran similitud en su variación. El modo de pandeo produce una elevada deflexión en la zona central mientras que las laterales se mantienen razonablemente rectas por influencia de los soportes. De manera que el afectar la zona central donde se produce la deflexión por pandeo no influye mayormente en la resistencia última del panel. También, se observó numéricamente que al duplicar la amplitud de predeformación con forma del primer modo de pandeo la resistencia última disminuye ligeramente. Esta etapa permitió validar el modelo numérico para aplicarlo en segunda etapa del trabajo.

A continuación, se analizó en forma numérica la carga última de un cilindro de acero de alta resistencia sometido a presión lateral y compresión axial simultáneas. La reducción de espesor considerando un diámetro del 78% del espacio entre cuadernas y 30% de profundidad fue aplicada al modelo numérico. Se empleó el método de elementos finitos considerando grandes deformaciones y el comportamiento plástico del material, el cual fue validado en la primera etapa del trabajo. Debido a la razón de aspecto de la estructura, los modelos probados fallan por pandeo elástico, avanzando rápidamente al colapso. Esta razón se puede visualizar entre la longitud circular del cilindro dividida para la separación entre cuadernas. Para analizar la influencia de la reducción de espesor y curvatura se calculó la carga crítica y última de modelos cilíndricos y rectangulares. Tomando como referencia el modelo cilíndrico íntegro se obtuvo una reducción de carga crítica del 5% para el modelo cilíndrico con reducción de espesor y del 85% para el modelo rectangular con la misma reducción de espesor del anterior. En conclusión, se tiene que la reducción de espesor disminuye la capacidad de soportar carga externa en el cilindro y definitivamente la curvatura del modelo influye altamente en la resistencia estructural y por ende limita la profundidad de operación.

Palabras Clave: Cilindro, plancha plana, reducción de espesor, pandeo elástico y pandeo inelástico.

ABSTRACT

Commonly, the failures that occur in a submarine are due to structural instability (global or local) due to the geometry and the high external hydrostatic load that the hull supports. The load on this structure is of the compressive type and to achieve local buckling is much lower than the load to achieve global buckling of the hull. There are some studies in the literature regarding the structural instability of cylindrical shells with uniform thickness. However, there are different phenomena that can cause a variety of local imperfections in the thickness of the shell, which in turn significantly affect the load that a submarine's pressure hull can support. The objective of this work is to know the ultimate load that a cylinder can support considering the influence of localized thickness reduction.

This work was developed in two stages. The first stage consisted of the post-buckling analysis of a simplified model (flat plate) in full and considering localized thickness reduction applying experimental and numerical methods. At this stage, 4 models were built with three specimens of each. Model 0 corresponds to the entire sheet and the three remaining models have a thickness reduction of 1 mm in depth and with a circular shape with a diameter of 75, 100 and 150 mm, respectively. The simply supported rectangular panels were 500mmx500mmx3mm standard steel. The experimental results served to validate by non-linear numerical simulations developed with the Ansys program. The second stage consisted of the post-buckling analysis of a cylinder with constant thickness and considering localized thickness reduction applying the finite element method. To complete this stage, 4 numerical models were developed, one with full thickness and two with reduced thickness of 300 mm in diameter and with depths of 7 and 10 mm, respectively. The last model corresponds to the expansion of the cylinder with thickness reduction.

From the first stage in which the ultimate load of a flat plate was analyzed, due to the aspect ratio of models 0, 1, 2 and 3, the critical buckling load is reached in the elastic range, decreasing its resistance and accelerating its failure to collapse. The variations of force and unit strain obtained numerically and experimentally show similarity in their variation. The buckling mode produces a high deflection in the central area while

the lateral ones remain reasonably straight due to the influence of the supports. Thus, affecting the central area where the buckling deflection occurs does not greatly influence the ultimate strength of the panel. Also, it was observed numerically that by doubling the prestrain amplitude with the shape of the first buckling mode, the ultimate strength decreases slightly. This stage allowed validating the numerical model to apply it in the second stage of the work.

Next, the ultimate load of a high-strength steel cylinder subjected to simultaneous lateral pressure and axial compression was analyzed numerically. The thickness reduction considering a diameter of 78% of the space between frames and 30% of depth was applied to the numerical model. The finite element method was used considering large deformations and the plastic behavior of the material, which was validated in the first stage of the work. Due to the aspect ratio of the structure, the tested models fail by elastic buckling, rapidly advancing to collapse. This ratio can be visualized by the circular length of the cylinder divided by the frame spacing. To analyze the influence of thickness and curvature reduction, the critical and ultimate load of cylindrical and rectangular models were calculated. Taking the integral cylindrical model as a reference, a critical load reduction of 5% was obtained for the cylindrical model with thickness reduction and 85% for the rectangular model with the same thickness reduction as the previous one. In conclusion, the reduction in thickness decreases the ability to support external loads in the cylinder and definitively the curvature of the model highly influences the structural resistance and therefore limits the depth of operation.

Keywords: Cylinder, flat plate, thickness reduction, elastic buckling and inelastic buckling.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	I
<i>ABSTRACT</i>	III
ÍNDICE GENERAL.....	V
ABREVIATURAS	VIII
SIMBOLOGÍA	IX
ÍNDICE DE FIGURAS.....	X
ÍNDICE DE TABLAS	XIII
CAPÍTULO 1	
1.Introducción	1
1.1 Antecedentes y Problemática	1
1.2 Justificación	2
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivo General	3
1.3.2 Objetivos Específicos	3
CAPÍTULO 2	
2.Marco Teórico	2
2.1 Geometría de un submarino	2
2.2 Material del casco de presión	5
2.3 Modos de fallas de la estructura de un Submarino	7
2.3.1 Modo de falla por fluencia	8
2.3.2 Modo de falla por pandeo local o lobular.....	9
2.3.3 Modo de falla por pandeo Global	10
2.3.4 Influencia sobre la reducción localizada de espesor en la estructura del submarino.....	12

2.4	Aplicación de elementos finitos a nivel no lineal	12
2.5	Experimentación para carga última de paneles	16

CAPÍTULO 3

3. Metodología	5
3.1 Método Numérico	5
3.1.1 Análisis de pandeo elástico	5
3.1.2 No Linealidades.....	25
3.1.3 Cálculo de carga última.....	27
3.2 Desarrollo Experimental.....	29
3.2.1 Construcción del Armazón	29
3.2.2 Construcción de los especímenes.....	30
3.2.3 Configuración del experimento.....	32

CAPÍTULO 4

4. Resultados y Análisis	36
4.1 Carga última del modelo simplificado	36
4.1.1 Convergencia y calidad de malla del modelo numérico	38
4.1.2 Pre-deformación del modelo simplificado.....	43
4.1.3 Comparación Numérica-Experimental de la Fuerza última	44
4.2 Carga última de un cilindro con espesor constante y considerando reducción local de espesor.....	67
4.2.1 Calidad de malla.....	68
4.2.2 Aplicación de la carga	70
4.2.3 Pandeo.....	71
4.2.4 Carga última.....	73
4.2.5 Influencia de la reducción de espesor y curvatura	79

CAPÍTULO 5

5. Conclusiones y Recomendaciones	83
--	----

5.1 Conclusiones 83

5.2 Recomendaciones 85

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
HY80	High yield strength of 80Ksi
GRP	Glass reinforced plastic
FRP	Fibre reinforced polymers
DTMB	David Taylor Model Basin
UBS	US Bureau of Standards

SIMBOLOGÍA

m	Metro
mm	Milímetro
Kg	Kilogramo
N	Newton
KN	Kilo newton
min	Minuto
Mpa	Mega pascal
Hz	Hertz
E	Módulo de Young
h,t	Espesor
R, a	Radio
σ_y	Esfuerzo de fluencia
σ_u	Esfuerzo último
P_{cri}	Presión crítica
F_{cri}	Fuerza crítica
$F_{últ}$	Fuerza última
ρ	Densidad
v	Razón de poisson
L	espacio entre cuadernas

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1 Geometría típica del caco de presión y modos de pandeo	2
Figura 2.2 Modo de la falla por fluencia	8
Figura 2.3 Pandeo local de la estructura	9
Figura 2.4 Pandeo local con diferentes lóbulos	10
Figura 2.5 Inestabilidad Global de la Estructura	11
Figura 2.6 Comportamiento elástico y plástico de los materiales	13
Figura 2.7 Método de Newton-Raphson	15
Figura 2.8 Método de Longitud de arco	15
Figura 2.9 Configuración para compresión de planchas, US Bureau of Standards ...	16
Figura 2.10 Soporte Simple-Ranura en V	17
Figura 2.11 Ejemplo de borde simplemente soportados.....	17
Figura 3.1 Pasos para realizar un análisis no lineal en Ansys	5
Figura 3.2 Análisis de Pandeo elástico usando Ansys Workbench.....	20
Figura 3.3 Configuración total para análisis de pandeo elástico	20
Figura 3.4 Curva Esfuerzo-deformación del acero A36	21
Figura 3.5 Tipo de elementos sólidos	22
Figura 3.6 Ejemplo de Discretización.....	23
Figura 3.7 Geometría y condiciones de frontera	24
Figura 3.8 Representación de la predeformación de columnas.....	25
Figura 3.9 Zona Plástica del Acero A36.....	26
Figura 3.10 Configuración Total-Análisis no lineal	27
Figura 3.11 Configuración No lineal de Ansys Worbench.....	28
Figura 3.12 Modelado del Armazón para compresión de planchas	30
Figura 3.13 Cortado y maquinado de los especímenes.....	32
Figura 3.14 Sistema de referencia	33
Figura 3.15 Configuración de equipo	35
Figura 4.1 Análisis de Convergencia- Modelos 0 y 1	40
Figura 4.2 Análisis de Convergencia- Modelos 2 y 3.....	41
Figura 4.3 Perfiles de predeformación equivalentes de los modelos	44
Figura 4.4 Resultados del colapso del modelo 0 usando Ansys.....	46

Figura 4.5 Prueba experimental de resistencia última del modelo 0.....	47
Figura 4.6 Comparación Numérico-Experimental de fuerza vs deformación unitaria del modelo 0	48
Figura 4.7 Resultados del colapso del modelo 1 usando Ansys	50
Figura 4.8 Prueba experimental de resistencia última del modelo 1.....	51
Figura 4.9 Comparación Numérico-Experimental de fuerza vs deformación unitaria del modelo 1	52
Figura 4.10 Resultados del colapso del modelo 2 usando Ansys	54
Figura 4.11 Prueba experimental de resistencia última del modelo 2.....	55
Figura 4.12 Comparación Numérico-Experimental de fuerza vs deformación unitaria del modelo 2	56
Figura 4.13 Resultados del colapso del modelo 3 usando Ansys	58
Figura 4.14 Prueba experimental de resistencia última del modelo 3.....	59
Figura 4.15 Comparación Numérico-Experimental de fuerza vs deformación unitaria del modelo 3	60
Figura 4.16 Fuerza vs deformación unitaria en la franja central de la zona de reducción de espesor.....	62
Figura 4.17 Fuerza vs deformación unitaria en franjas cercanas a los bordes verticales.....	63
Figura 4.18 Pandeo Elástico de los modelos	64
Figura 4.19 Geometría del problema real	68
Figura 4.20 Condiciones de frontera y cargas	70
Figura 4.21 Pandeo Elástico de los modelos 4 y 5.	72
Figura 4.22 Plasticidad del acero HY80	73
Figura 4.23 Post Pandeo de los modelos 4 y 5	74
Figura 4.24 Distribución de Esfuerzo Equivalente y Esfuerzo Normal en el modelo 4	76
Figura 4.25 Distribución de Esfuerzo Equivalente y Esfuerzo Normal en el modelo 5	77
Figura 4.26 Distribución de Esfuerzo axial en dirección del espesor en los modelos 4 y 5.....	78
Figura 4.27 Modelos Numéricos_ Influencia de reducción espesor y curvatura	80
Figura 4.28 Influencia de la reducción y curvatura sobre la carga última	81

Figura 4.29 Desplazamiento lateral de los modelos	81
Figura 4.30 Profundidad de operación de diferentes condiciones de fallas	82
Figura 0.1 Configuración No lineal.....	93
Figura 0.2 Ejemplos de resultados no lineales	94
Figura 0.3 Configuración deformación unitaria total.....	95

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Propiedades de aceros de alta resistencia	6
Tabla 2 Propiedades de aleaciones de aluminio	6
Tabla 3 Propiedades de aleaciones de titanio	6
Tabla 4 Compuestos de uso marino	7
Tabla 5 Propiedades Mecánicas del Acero A36	21
Tabla 6 Descripción de los especímenes	31
Tabla 7 Posición de los extensómetros en mm.....	33
Tabla 8 Observaciones de pruebas experimentales	37
Tabla 9 Calidad de malla de los modelos numéricos.....	41
Tabla 10 Comparación Numérico-Experimental del máximo desplazamiento lateral	65
Tabla 11 Comparación Numérico-Experimental de la fuerza última	65
Tabla 12 Influencia de la pre-deformación en la $F_{\text{última}}$ numérica.....	66
Tabla 13 Calidad de malla del cilindro con espesor constante y con reducción local de espesor	69

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes y Problemática

Fallas en la estructura de un submarino implican situaciones de altísimo peligro, debido a la posibilidad de una implosión con pérdida total de la embarcación, por lo que sus condiciones críticas de cargas deben ser analizadas. La estructura del casco de un submarino se compone de dos partes: de presión y la exo-estructura (traducción del Inglés “exostructure”) (Allmendinger, 1990). Usualmente, el casco de presión es fabricado con acero de alta resistencia (por ejemplo, HY80) por su disponibilidad, bajo costo y elevada razón esfuerzo-densidad. La geometría más eficiente para el casco de presión de un submarino son secciones transversales circulares de paredes delgadas que transfieren la carga de presión normal a fuerzas de compresión en el plano. Por ello, el casco de presión está típicamente compuesto de una combinación de cilindros con reforzamientos anulares, teniendo sus extremos forma hemisférica y con cambios de sección cónica en la popa. Sobre estas estructuras actúan varios tipos de cargas como: explosiones, golpes de olas, cargas de impacto, fuerzas hidrodinámicas, hidrostáticas, y gravitacionales, etc. (Fricke & Bronsart, 2012) y de ellas, la predominante es la presión hidrostática que se ejerce sobre el casco de presión. Si estas cargas sobrepasan las de diseño, se puede producir una falla catastrófica de la estructura del submarino.

Varios modos de fallas pueden ocurrir en el casco de presión de un submarino: fatiga, fractura, fluencia, inestabilidad y corrosión (Ross, 2011). Fatiga y fractura tienen menos importancia debido a la poca frecuencia de carga cíclica en la vida útil del sumergible. Pero si el cilindro reforzado con anillos es sometido a una carga que sobrepasa los requerimientos de diseño, por ejemplo, la profundidad de operación, este podría fallar por fluencia o inestabilidad producida por la elevada carga compresiva. Además, debido a la zona de operación del submarino o combinación errónea de material, una potencial corrosión puede actuar sobre el material del casco. Esto causa reducción localizada de espesor, y una disminución de la resistencia estructural. De manera que una combinación especial de corrosión, fluencia del material e inestabilidad, podría producir una reducción de resistencia estructural y por tanto falla de la estructura.

Diversos investigadores han realizado estudios de los modos de fallas de cilindros reforzados con anillos de espesor uniforme sometidos a la acción de presión hidrostática externa. Estos modos de fallas son: fluencia de la plancha, pandeo local y pandeo global (Allmendinger, 1990). El modo de falla por fluencia es iniciado al alcanzar el límite elástico las fibras extremas del espesor de la plancha, en el centro del espacio entre cuadernas. Pandeo local es una inestabilidad de la plancha entre refuerzos y es caracterizado por la formación de lóbulos internos o externos que pueden desarrollarse alrededor de la periferia del cilindro. El pandeo global de la estructura es una inestabilidad de la combinación plancha y cuaderna, que puede ocurrir entre mamparos o bulárcamas y es caracterizado por lóbulos internos y externos; normalmente los lóbulos se presentan en menor número (usualmente dos o tres) que en el caso de pandeo local de la plancha (Fricke & Bronsart, 2012).

Comúnmente las fallas que ocurren en un submarino son por inestabilidad estructural debido a la geometría y la elevada carga hidrostática externa que soporta el casco (Ross, 2011). Como se ha mencionado anteriormente, los modos de fallas por inestabilidad son: global y local. La carga compresiva para alcanzar un pandeo local es mucho menor a la carga para alcanzar un pandeo global, por tanto, en este trabajo se analizará la inestabilidad local de la estructura, considerando la influencia de reducción localizada de espesor.

1.2 Justificación

Existe una amplia literatura respecto a la inestabilidad estructural de cascarones cilíndricos con espesor constante (Ross, 2011), (Trilling, 1935), (Salerno & Pulos, 1951), (Timoshenko & Gere, 1963), (Von Mises, 1933), (Lunchick, 1963). Sin embargo, los diferentes efectos posibles, procedimientos de fabricación, combinación de material o corrosión en ambientes agresivos, pueden producir una gran variedad de imperfecciones locales en el espesor del cascarón. Algunos autores han estudiado el efecto de la variación de espesor en la resistencia al pandeo de cascarones sometidos a presión externa. Koiter et al., 1994 se enfoca en la inestabilidad debido a compresión axial de cascarones cilíndricos con pequeñas variaciones de espesor en dirección longitudinal. Nguyen et al., (2009) estudia la inestabilidad debido a presión lateral de cascarones cilíndricos con pequeñas variaciones de espesor en dirección longitudinal.

Gusic et al., (2000) analiza la influencia de variación de espesor en dirección circunferencial en la inestabilidad de cascarones cilíndricos sujetos a presión externa, mediante un análisis de bifurcación de elementos finitos. Concluye que esta reducción de espesor afecta significativamente a la carga que puede soportar el casco de presión por lo que es muy importante estudiar esta influencia.

El objetivo de este trabajo es determinar la carga última que puede soportar un cilindro considerando la influencia de reducción localizada de espesor. Es decir, se va a considerar el fenómeno post pandeo, con elevada influencia de plasticidad del material y de los cambios de geometría del panel para determinar la carga última que puede soportar. Métodos numéricos y experimentales serán aplicados en el análisis, lo que ayudará a conocer las reales condiciones de resistencia estructural de un panel de planchaje considerando su aplicación al análisis de un submarino y evitar el colapso de su estructura.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Analizar la respuesta post-pandeo de un cilindro considerando la influencia de reducción localizada de espesor, mediante métodos numéricos y experimentales para la prevención de una posible implosión estructural.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Analizar un modelo simplificado por medio de una plancha plana con reducción local de espesor para la respuesta post-pandeo mediante métodos numéricos y experimentales.
- Analizar la respuesta post-pandeo de un cilindro con espesor constante y considerando reducción local de espesor mediante métodos numéricos.

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Geometría de un submarino

La estructura del casco de un submarino se compone de dos partes: casco de presión y la exo-estructura del casco (también conocido como como casco exterior) (Allmendinger, 1990). La geometría más eficiente para el casco de presión de un submarino son secciones transversales circulares de paredes delgadas que transfieren la carga de presión normal a fuerzas de compresión en el plano. Por ello, el casco de presión está típicamente compuesto de una combinación de cilindros con reforzamientos anulares, teniendo sus extremos forma hemisférica y con cambios de sección cónico en la popa del submarino. El reforzamiento anular evita que se produzca el pandeo elástico antes que el material alcance su límite de fluencia, de esta manera se obtiene mayor eficiencia estructural. Los mamparos estancos de carga dividen el casco de presión en compartimentos aislados. La Figura 2.1 muestra un esquema típico del casco de presión de un submarino,(Fricke & Bronsart, 2012).

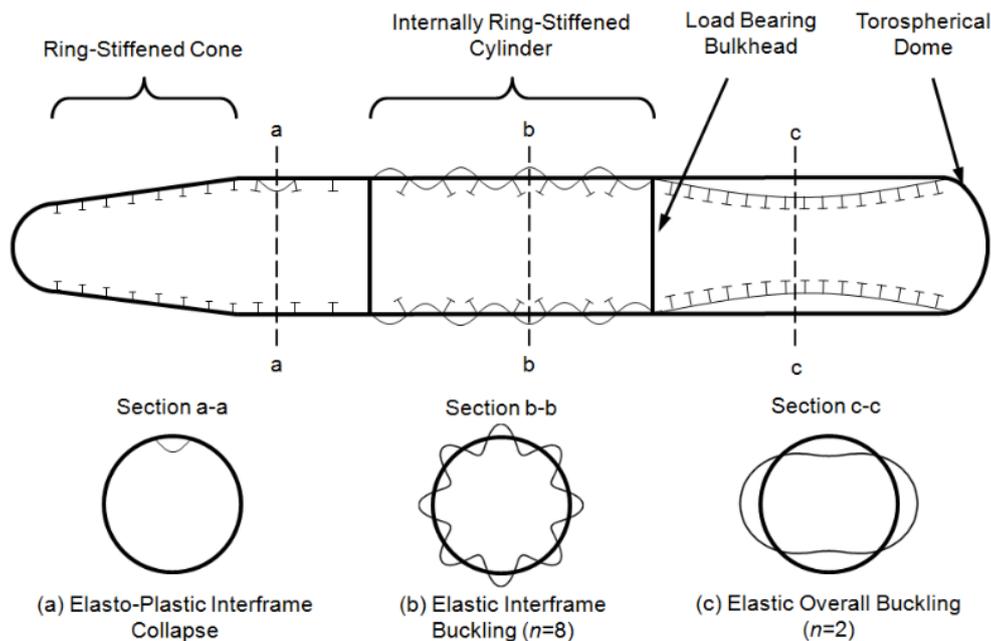


Figura 2.1 Geometría típica del caco de presión y modos de pandeo

Fuente: Fricke & Bronsart, 2012

Los cascos de presión están sometidos a varios tipos de cargas como: explosiones, golpes de olas, cargas de impacto, fuerzas hidrodinámicas, hidrostáticas, y gravitacionales (Fricke & Bronsart, 2012). De ellas, la predominante es la presión hidrostática que se ejerce sobre el casco de presión por las elevadas profundidades de operación. Si estas cargas sobrepasan las de diseño, pueden producir falla catastrófica de la estructura del submarino. Existen otras estructuras submarinas como el casco exterior, superficies de control, torre de mando, tanques y mamparos menores, que desempeñan un papel importante para la navegación, buceo y maniobras del submarino. Sin embargo, el presente trabajo se enfocará en la integridad estructural de un panel del casco de presión.

2.2 Material del casco de presión

El material del casco de presión debe ser seleccionado de acuerdo a la profundidad de operación del submarino. A su vez, a mayor profundidad de operación mayor será el espesor requerido del planchaje del casco. Si se seleccionara un acero estándar por su bajo costo y facilidad de construcción, el espesor requerido sería muy grande y por ende se tendría menor reserva de flotabilidad. Sin embargo, la selección del material del casco de presión no debe enfocarse solamente al requerimiento de profundidad de operación sino también se deben considerar otros factores de entorno de operación, (Ross, 2011), como:

- a) Resistencia a la corrosión
- b) Elevada razón esfuerzo-densidad
- c) Costo del material
- d) Propiedades de fabricación
- e) Susceptibilidad a la temperatura y protección contra incendios.
- f) Vida útil del material

Los principales materiales usados para el casco de presión son: aceros de alta resistencia, aleaciones de aluminio, aleaciones de titanio y compuestos. Usualmente, el casco de presión es fabricado con acero de alta resistencia (HY80) por su disponibilidad, bajo costo, facilidad de fabricación y elevada razón esfuerzo-densidad. La desventaja de este material es que es anódico a la mayoría de otras aleaciones estructurales y, por tanto, vulnerables a la corrosión cuando se usan en estructuras

mixtas; debe mencionarse que estos problemas pueden evitarse mediante especificaciones de diseño. Propiedades mecánicas de materiales empleados para la construcción del casco de presión de submarinos son mostradas en las Tablas 1-4. Como referencia el esfuerzo de fluencia del acero estándar para construcción de buques es 235 MPa.

Tabla 1
Propiedades de aceros de alta resistencia

Material	Specific density	Young's modulus (GPa)	Compressive yield strength (MPa)	Heat treatment
HY80	7.8	207	550	Q&T
HY100	7.8	207	690	Q&T
HY130	7.8	207	890	Q&T
HY180	7.8	207	1240	Q&T

Fuente: Ross, 2011

Tabla 2
Propiedades de aleaciones de aluminio

Material	Specific density	Tensile strength (MPa)	Yield strength 0.2% (MPa)	Young's modulus (GPa)
5086-H116	2.8	290	207	70
6061-T6	2.8	310	276	70
7075-T6	2.9	572	503	70
7075-T73	2.9	434	400	70
L65	2.8	–	390	70

Fuente: Ross, 2011

Tabla 3
Propiedades de aleaciones de titanio

Material	UTS* (MPa)	Yield strength (MPa)	Density (g cm ⁻³)
6-4 Alloy (annealed)	896	827	4.5
6-2-1-1 Alloy	869	724	4.5
6-4 STOA Alloy	870	830	4.5
C.P. Grade 2	345	276	4.5

* Ultimate tensile strength.

Fuente: Ross, 2011

Tabla 4
Compuestos de uso marino

Material	Density (g cm ⁻³)	Fibre volume fraction	Young's modulus (GPa)	Compressive yield strength (MPa)	Relative cost
GRP (epoxy/S-glass UD*)	2.1	0.67	65	1200	1
GRP (epoxy/S-glass filament wound)	2.1	0.67	50	1000	3.2
CFRP (epoxy/HS UD)	1.7	0.67	210	1200	3.0
CFRP (epoxy/HS filament wound)	1.7	0.67	170	1000	5.1
MMC (6061 Al/SiC fibre UD)	2.7	0.5	140	3000	11
MMC (6061 Al/ alumina fibre UD)	3.1	0.5	190	3100	15

* Unidirectional.

Fuente: Ross, 2011

Tabla 3 se muestra que las aleaciones de titanio tienen una elevada razón esfuerzo-densidad y son ideales para el diseño del casco de presión de un submarino. La desventaja de este material es su alto costo, puesto que es 5.5 veces más caro que las aleaciones de aluminio (Ross, 2011), lo que lo limita comercialmente.

En la Tabla 4, se muestran los tipos de materiales compuestos que se usan en estructuras marinas. Las características principales son elevada razón esfuerzo-densidad y bajo costo comparado con otros compuestos. Los compuestos con matriz de metal tienen mayor ventaja que los GRPs y FRPs, pero su costo es elevado.

2.3 Modos de fallas de la estructura de un Submarino

Diversos investigadores han realizado estudios de los modos de fallas de cilindros reforzados con anillos sometidos a la acción de presión hidrostática externa. Estos modos de fallas son: fluencia de la plancha, pandeo local y pandeo global (Allmendinger, 1990). Algunos autores han desarrollado formulaciones para obtener la presión de colapso de cada modo de falla. Estas formas de fallas se deberán tener en cuenta en el diseño estructural preliminar de un casco de presión.

2.3.1 Modo de falla por fluencia

El modo de falla por fluencia es iniciado al alcanzar las fibras extremas del espesor de la plancha el límite elástico del material; esto típicamente ocurre en el centro del espacio entre cuadernas (Cho, 2018). Esta fluencia ocasiona un colapso elástico-plástico que es caracterizado por un pliegue tipo acordeón extendido alrededor de la periferia del cilindro, tal como muestra en la Figura 2.2. Esta falla puede ocurrir en uno o más espacios entre cuadernas.



Figura 2.2 Modo de la falla por fluencia

Fuente: Cho, 2018

Sanden and Gunther et al., (1935) desarrollaron una expresión para calcular la presión de colapso por fluencia (ecuación 2.2), cuyo análisis involucra flexión de la plancha que forma el cascarón entre refuerzos con bordes asumidos como simplemente soportados. La ecuación diferencial para la deflexión lateral w de un cilindro de radio a sujeto a carga hidrostática es presentada en la ecuación 2.1, cuya solución es la presión de colapso (Trilling, 1935).

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + \frac{12(1-\nu^2)w}{t^2 a^2} = \frac{12(1-\nu^2)p}{Et^3} \quad (2.1)$$

La solución analítica de la ecuación previa permite determinar:

$$P_y = \frac{\sigma_y \left(\frac{t}{a} \right)}{1 - \gamma G} \quad (2.2)$$

donde:

w : deflexión radial, a : radio del cilindro, t : espesor del cilindro, E : módulo de Young

ν : Razón de Poisson, p = presión, P_y : presión para alcanzar la fluencia, σ_y : esfuerzo de fluencia del material y γ, G : constantes geométricas.

Salerno and Pulos et al., (1951) introducen el efecto de viga-columna en la ecuación diferencial original de flexión, lo cual es mostrado en la ecuación 2.3. Este efecto puede en ocasiones incrementar en un 10% el esfuerzo longitudinal. Finalmente, Carl Ross et al. (Ross, 2011) presenta una solución a la ecuación diferencial que abarca flexión de plancha y efecto viga-columna, asumiendo que la plancha se deforma simétricamente respecto del centro del espacio entre cuadernas, ec. 2.3. Como resultado de esta solución, se puede conocer la presión en la cual, la plancha entre refuerzos alcanza el esfuerzo de fluencia. Las expresiones 2.4 y 2.5 muestran esta relación.

$$\frac{d^4w}{dx^4} + \frac{6(1-\nu^2)pa}{Et^3} \frac{d^2w}{dx^2} + \frac{12(1-\nu^2)w}{t^2a^2} = \frac{12(1-\nu^2)p(1-\nu/2)}{Et^3} \quad (2.3)$$

$$\sigma_{\text{circunferencial}} = -\frac{Ew}{a} - \frac{pav}{2t} \mp \frac{Et}{2(1-\nu^2)} \left(\frac{w}{a^2} + \nu \frac{d^2w}{dx^2} \right) \quad (2.4)$$

$$\sigma_{\text{longitudinal}} = -\frac{pa}{2t} \mp \frac{Et}{2(1-\nu^2)} \left(\frac{\nu w}{a^2} + \frac{d^2w}{dx^2} \right) \quad (2.5)$$

2.3.2 Modo de falla por pandeo local o lobular

Pandeo local de un panel reforzado es una deflexión por inestabilidad de la plancha entre refuerzos. Se caracteriza por la formación de lóbulos internos o externos que pueden desarrollarse alrededor de la periferia del cilindro, tal como se muestra en la Figura 2.3, (Cho et al., 2018). Esta falla puede ocurrir en uno o más espacios entre cuadernas, e indica que las cuadernas tienen mayor resistencia al pandeo que la plancha entre refuerzos.

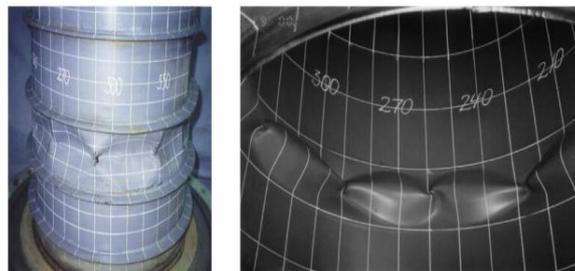


Figura 2.3 Pandeo local de la estructura

Fuente: Cho, 2018

Von Mises et al., (1963) presenta la ecuación 2.6, para calcular la presión de inestabilidad elástica de un cascarón cilíndrico con paredes delgadas. La solución

analítica es obtenida bajo la acción combinada de presión externa lateral y axial sobre el cilindro con extremos asumidos como simplemente soportados.

$$P_{cr} = \frac{E \left(\frac{t}{a} \right)}{n^2 - 1 + 0.5 \left(\frac{\pi a}{l} \right)^2} * \left(\frac{1}{\left(n^2 \left(\frac{l}{\pi a} \right)^2 + 1 \right)^2} + \frac{t^2}{12a^2(1-\nu)^2} \left(n^2 - 1 + \left(\frac{\pi a}{l} \right)^2 \right)^2 \right) \quad (2.6)$$

Donde l es la longitud de la plancha soportado entre refuerzos, a es el radio del cilindro y n es número de lóbulos circunferenciales en el cual la estructura pandea, como se muestra en la Figura 2.4. De forma iterativa con la ecuación 2.6, se puede calcular el valor n , correspondiente al mínimo valor de P_{cr} .

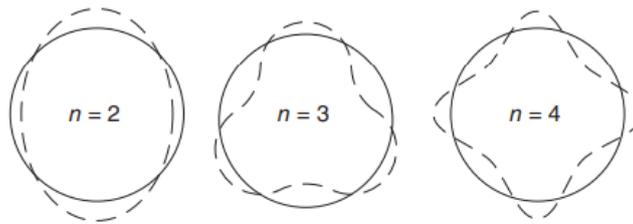


Figura 2.4 Pandeo local con diferentes lóbulos

Fuente: Ross, 2011

Windenburg and Trilling et al., (1933) proveen una versión más simple que la ecuación de Von Mises para predecir el pandeo local. Esta fórmula es también conocida como “David Taylor Model Basin (DTMB)” y es obtenida por experimentación, la cual se presenta en la ecuación 2.7.

$$P_{cr} = \frac{2.42E \left(\frac{t}{2a} \right)^{2.5}}{(1-\nu^2)^{0.75} \left(\frac{l}{2a} - 0.447 \left(\frac{t}{2a} \right)^{0.5} \right)} \quad (2.7)$$

2.3.3 Modo de falla por pandeo Global

El pandeo global de la estructura es una inestabilidad de la combinación plancha y cuaderna, tal como se observa en la Figura 2.5, (Cho et al., 2018). Este modo de falla puede ocurrir entre mamparos o bulárcamas y es caracterizado por la formación de

lóbulo internos y externos, aunque el número de lóbulos es menor (usualmente son dos o tres) que en el caso de pandeo local de la plancha.

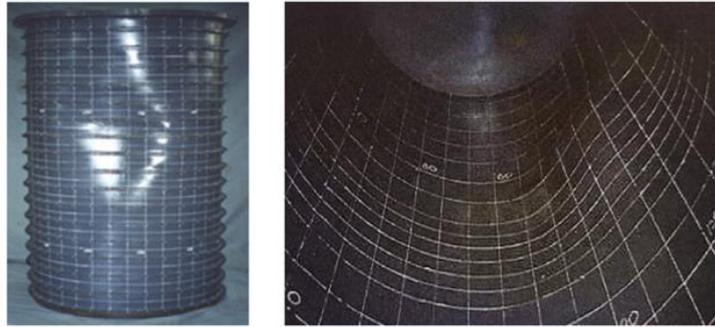


Figura 2.5 Inestabilidad Global de la Estructura

Fuente: Cho, 2018

La teoría de elasticidad de Bryant (Lunchick, 1963) resuelve el problema del pandeo de tubos de planchas con refuerzos y desarrolla una expresión para obtener la presión crítica, la cual se muestra en las ecuaciones 2.8, 2.9 y 2.10. La presión crítica se expresa como la suma de dos componentes, de plancha (P_s) y de cuaderna (P_f). El componente de la plancha representa la presión en la cual el cilindro sin los anillos y soportados en sus extremos por mamparos, podría pandear con media onda longitudinal y n ondas circunferenciales. El componente de la cuaderna es la presión en la que un simple anillo compuesto por la cuaderna y plancha asociada (espacio entre cuadernas), podría pandear formando ondas circunferenciales. Se requiere un valor muy grande de presión externa para alcanzar este modo de falla a diferencia de fluencia o pandeo local.

$$P_{cr} = P_s + P_f \quad (2.8)$$

$$P_s = \frac{Eh}{R} \frac{\lambda^4}{\left(n^2 + \frac{\lambda^2}{2} - 1\right)(n^2 + \lambda^2)^2} \quad (2.9)$$

$$P_f = \frac{(n^2 - 1)EI}{R^3 L_f} \quad (2.10)$$

Donde:

$\lambda = \pi R/L$: espaciamiento entre mamparos o elementos fuertes.

I : Momento de inercia de la combinación plancha y refuerzo.

n : corresponde al valor donde P_{cr} sea mínimo.

2.3.4 Influencia sobre la reducción localizada de espesor en la estructura del submarino

Existe una amplia literatura respecto a la inestabilidad de cascarones cilíndricos con espesor constante, por ejemplo (Ross, 2011), (Trilling, 1935), (Salerno & Pulos, 1951), (Timoshenko & Gere, 1963), (Von Mises, 1933), (Lunchick, 1963). Sin embargo, algunos efectos posibles como procedimientos de fabricación, combinación de material o corrosión en ambientes agresivos, pueden producir una gran variedad de imperfecciones locales en el espesor del cascarón con reducción de la resistencia. Algunos autores han estudiado el efecto de la variación de espesor en la resistencia al pandeo de cascarones sometidos a presión externa. Koiter et al., (1994) se enfoca en la inestabilidad debido a compresión axial de cascarones cilíndricos con pequeñas variaciones de espesor en dirección longitudinal. Nguyen et al., (2009) estudia la inestabilidad debido a presión lateral de cascarones cilíndricos con pequeñas variaciones de espesor en dirección longitudinal. Gusic et al. (Gusic et al., 2000) analiza la influencia de variación de espesor en dirección circunferencial en la inestabilidad de cascarones cilíndricos sujetos a presión externa, mediante un análisis de bifurcación de elementos finitos.

Estos autores siguen un proceso similar para resolver estos problemas de manera analítica. Primero, basados en teoría de cascarones establecen ecuaciones diferenciales gobernantes. Luego, reescriben las ecuaciones diferenciales de forma adimensional y aplican métodos de separación de variables. Después, fórmulas asintóticas son derivadas por la combinación del método residuo ponderado y perturbación. Estas fórmulas asintóticas corresponden a factores de reducción de carga de pandeo debido a la variación de espesor en la plancha. Concluyen que esta reducción de espesor afecta significativamente a la carga que puede soportar el casco de presión por lo que es muy importante estudiar esta influencia.

2.4 Aplicación de elementos finitos a nivel no lineal

Un objeto se comporta linealmente cuando al aplicarle una fuerza, éste regresa a su posición original, es decir, el rango de trabajo es en la zona elástica del material. Por el

contrario, el comportamiento no lineal de una estructura se presenta cuando al aplicarle una fuerza que excede el límite elástico, la estructura queda permanentemente deformada. En la realidad no existen materiales ideales, puesto que los efectos no lineales siempre están presentes. En la Figura 2.6, (Ugural & Fenster, 2016), se muestra la curva típica de la relación esfuerzo-deformación de materiales estructurales dúctiles. La zona elástica tiene como límite de fluencia del material, donde la ley de Hooke es aplicable. La zona plástica se caracteriza generalmente por grandes deformaciones en la estructura y ésta a su vez se subdivide en dos regiones, una limitada por el esfuerzo último y la otra por la ruptura del material.

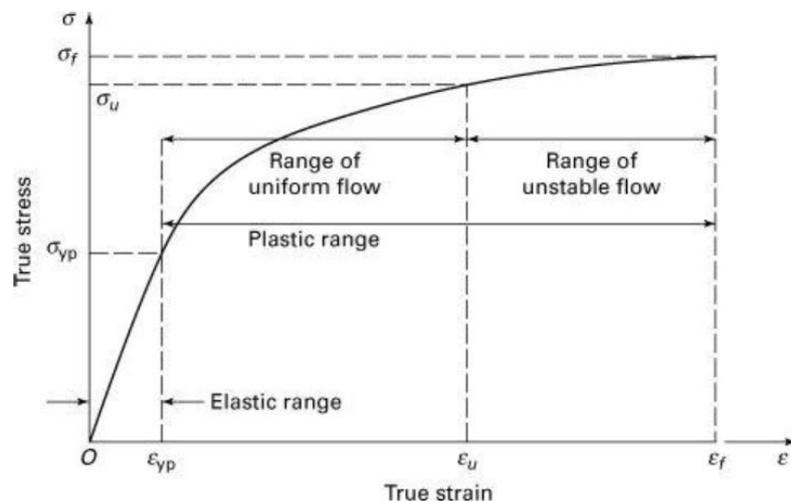


Figura 2.6 Comportamiento elástico y plástico de los materiales

Fuente: Ugural & Fenster, 2016

En un análisis estructural, efectos no lineales pueden ocurrir debido a tres tipos causas: no linealidades geométricas, no linealidades del material y no linealidades de borde o contacto (Madenci & Guven, 2015). La no linealidad geométrica (también podría presentarse cuando por elevadas deflexiones el problema lateral se acopla con el longitudinal) se presenta como imperfecciones en el material provenientes de su fabricación. La no linealidad geométrica que surge de grandes deformaciones, incluye la necesidad de distinguir entre las coordenadas de los estados de deformación inicial y final, y también con la necesidad de utilizar las expresiones completas para los componentes de la deformación. El material puede tener un comportamiento no lineal dependiente o independiente del tiempo. La no linealidad debida a las condiciones de borde surge de una relación no lineal entre las fuerzas y los desplazamientos límites.

Las condiciones de contacto conducen a un análisis no lineal debido a que la extensión de la región de contacto y los esfuerzos de contacto no se conocen previamente.

Las ecuaciones que gobiernan las grandes deformaciones no son lineales con respecto a los desplazamientos y velocidades y su solución se puede lograr mediante un enfoque incremental. La forma incremental de las ecuaciones gobernantes se puede escribir como la ecuación 2.11. En la que, la matriz de rigidez K cambia después de cada incremento de aplicación de la carga P , es decir, la matriz de rigidez es una función del desplazamiento (Ansys, 2021).

$$\Delta P = K(u)\Delta u \quad (2.11)$$

Donde Δu y ΔP representan los incrementos de los vectores desplazamiento y carga respectivamente. La solución es construida por una serie de pasos lineales en la dirección apropiada de tal forma que se aproxime a la solución exacta. Dependiendo de la naturaleza de la no linealidad, la magnitud de cada paso y su dirección involucrarán diversas iteraciones y por ende mayor recurso computacional.

El método de elementos finitos puede aplicarse para resolver problemas no lineales de forma iterativa. Existen algunos paquetes computacionales de elementos finitos que resuelven este tipo de problemas. Uno de éstos y que se va a emplear para este trabajo es ANSYS que usa dos tipos de métodos para resolver problemas no lineales de estructuras: Desplazamiento Controlado y Fuerza Controlada (Ansys, 2021). El desplazamiento controlado utiliza el método de Newton-Raphson que involucra un proceso iterativo para converger a la solución. En este caso, el desplazamiento vertical de una parte de la estructura es considerado para el pandeo inelástico del panel. El método con un enfoque de fuerza controlada utiliza el método de Riks o método de longitud de arco.

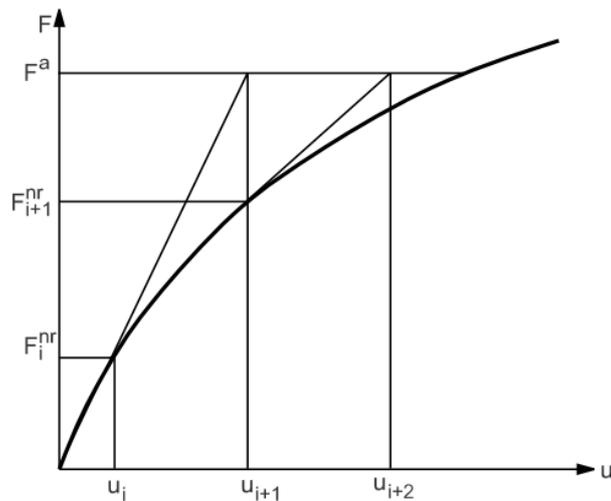


Figura 2.7 Método de Newton-Raphson

Fuente: Ansys, 2021

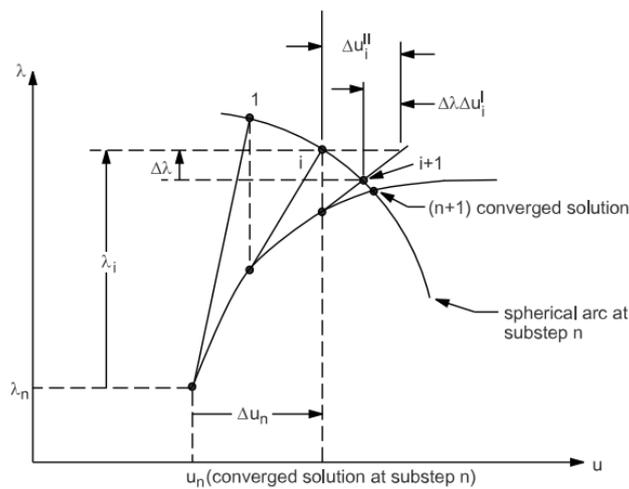


Figura 2.8 Método de Longitud de arco

Fuente: Ansys, 2021

En la Figura 2.7 (Ansys, 2021), se muestran las iteraciones del método de Newton-Raphson. Comenzando con un desplazamiento nulo, se toma un incremento Δu y se calcula la matriz de rigidez y las fuerzas internas (F^{nr}) hasta que el proceso converja en equilibrio, es decir, las fuerzas internas de los elementos igualen a la carga externa aplicada (F^a).

En la Figura 2.8 (Ansys, 2021), se muestra la aplicación del método de longitud de arco, la cual implica el trazado de una trayectoria compleja en la respuesta de carga-

desplazamiento en los regímenes de pandeo y post pandeo. El método de la longitud del arco evita cualquier fluctuación del tamaño del paso durante las iteraciones de equilibrio. Se asume que todas las magnitudes de carga pueden controlarse mediante un solo parámetro escalar, es decir, el factor de carga total (λ).

2.5 Experimentación para carga última de paneles

La configuración de una prueba típica de pandeo de planchas rectangulares sometidas a compresión uniaxial fue desarrollada por Shuman y Back en *US Bureau of Standards* (Schuman & Back, 1931). Esta configuración fue realizada en 1930 y en la actualidad todavía es usada debido al cuidadoso procedimiento experimental y evaluación de resultados.

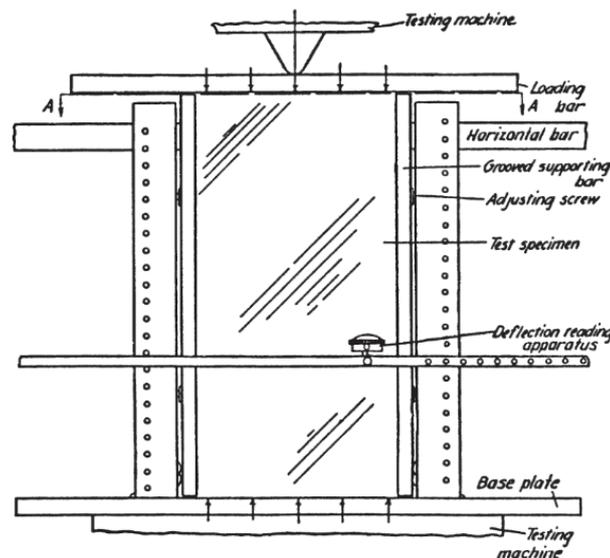


Figura 2.9 Configuración para compresión de planchas, US Bureau of Standards

Fuente: Schuman & Back, 1931

La Figura 2.9 muestra la configuración del experimento para compresión uniaxial de planchas (Schuman & Back, 1931). El equipo consiste en una placa de base con dos canales verticales, los cuales sirven para soportar barras ranuradas. Estas barras tienen las ranuras a 45 grados, en las cuales la plancha es insertada. Una barra horizontal es fijada con pernos en el lado superior de los canales para evitar la extensión del espécimen en esa zona. Las ranuras en las barras son para que el espécimen pueda rotar y deslizarse verticalmente, de manera que los bordes de los costados pueden asumirse como simplemente soportados, ver Fig. 2.10.

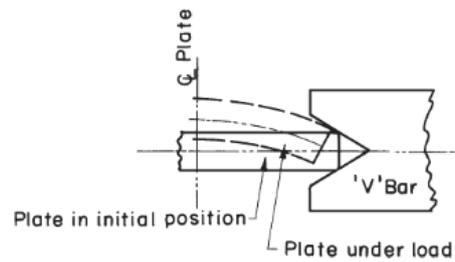


Figura 2.10 Soporte Simple-Ranura en V

Fuente: Singer, 2002

Como se aprecia en la Figura 2.10, los bordes de la plancha no son enteramente libres a rotar y alguna rotación durante el pandeo es acompañada por un movimiento fuera del plano. Algunos investigadores propusieron colocar lubricante y redondear la ranura logrando así que los bordes se comporten muy cerca a los soportes simples. Otros investigadores proponen diferentes arreglos experimentales para obtener un comportamiento de soporte simple en los bordes, los cuales se muestran en la Figura 2.11, (Singer et al., 2002).

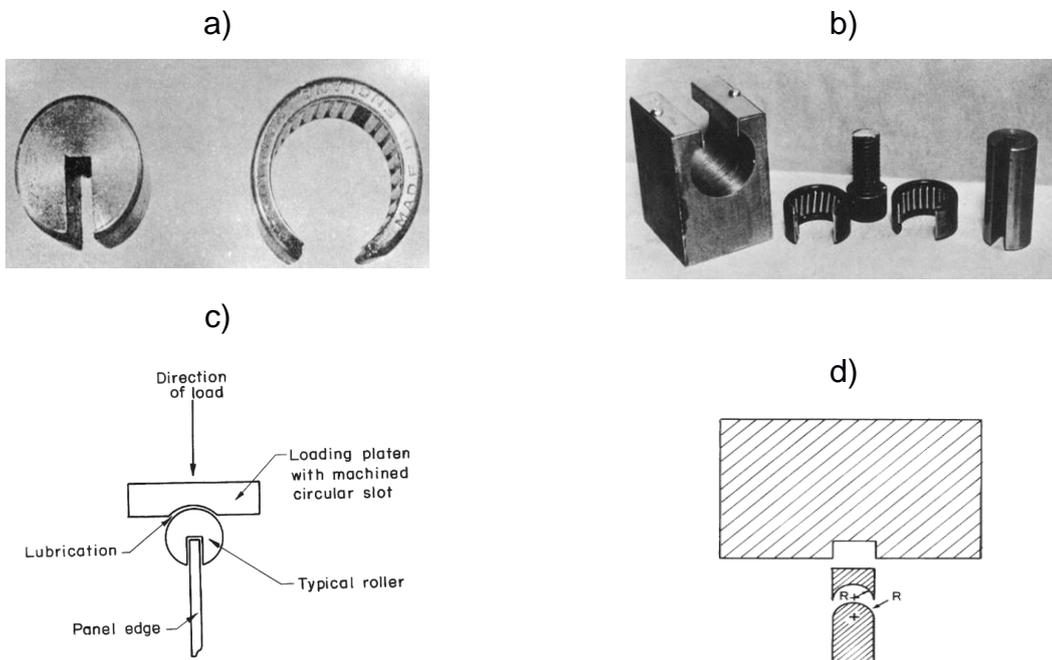


Figura 2.11 Ejemplo de borde simplemente soportados

Fuente: Singer, 2002

Las Figuras 2.11 a) y b) muestran que la combinación de un cojinete de aguja y rodillo forman un bloque donde el espécimen puede ser insertado, permitiendo la rotación y

restringiendo el desplazamiento. Similarmente se puede observar en la Figura 2.11 c), que la aplicación se está realizando en el borde de carga logrando mayor uniformidad de la fuerza sobre todo el borde superior de la plancha. Finalmente se observa en la Figura 2.11 d), un redondeo de la plancha y la ranura simulando así la condición de soporte simple. Como se nota, si se quiere que los bordes de una plancha se comporten como simplemente soportados se debe diseñar adecuadamente el dispositivo, considerando como referencia las configuraciones de bordes presentadas.

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA

3.1 Método Numérico

El método numérico empleado en este proyecto para determinar la máxima carga que puede soportar la plancha y el cilindro, considerando reducción localizada de espesor es el de elementos finitos. Para esto se usa el paquete computacional Ansys Workbench (versión 2021 R1), el cual resuelve primero el problema de pandeo elástico, y luego el problema no lineal hasta alcanzar la máxima carga que la estructura puede soportar. Para esta segunda fase se emplea el enfoque de desplazamiento, que aplica de forma iterativa el método de Newton Raphson para converger a la solución. La Figura 3.1 muestra la secuencia de tres pasos para completar el análisis de carga última en Ansys Workbench.



Figura 3.1 Pasos para realizar un análisis no lineal en Ansys

Fuente: Autor

Para realizar el proceso de la figura anterior se usa los módulos, pandeo y estructural del programa Ansys. A continuación, se explica cómo se efectúa cada uno de estos pasos. Para mayor detalle véase el anexo A.

3.1.1 Análisis de pandeo elástico

El análisis de pandeo elástico determina la carga crítica de una estructura. Para ello, se combina el módulo estructural con el de pandeo disponible en Ansys Workbench como se muestra en la Figura 3.2.

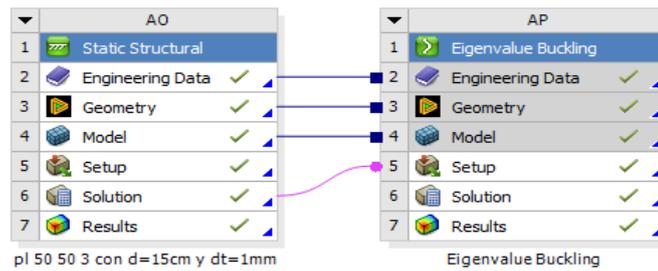


Figura 3.2 Análisis de Pandeo elástico usando Ansys Workbench

Fuente: Autor

La Figura 3.3 muestra la configuración total de la combinación de los módulos anteriores para obtener la carga crítica de pandeo elástico. Esta configuración consiste en: modelado 3D de la estructura, asignación del material, discretización del dominio, aplicación de condiciones de frontera y cargas, y configuración del tipo de resultados que se desea obtener. A continuación, se explica en detalle cada uno de éstos.

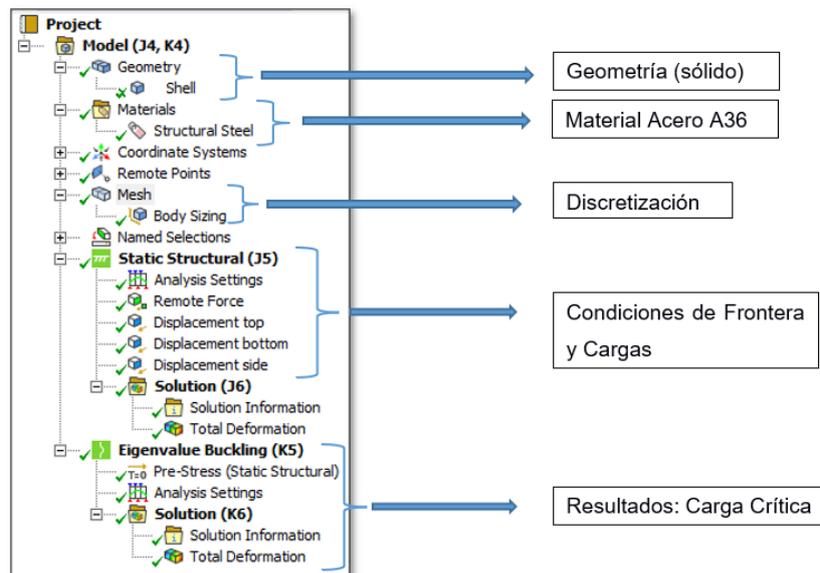


Figura 3.3 Configuración total para análisis de pandeo elástico

Fuente: Autor

Geometría

La Figura 3.7 a) muestra la geometría del sistema físico, elaborada con el programa de modelado 3D, Rhinoceros. El sistema está compuesto por un panel de plancha rectangular de acero estándar con dimensiones 500x500x3mm y un soporte superior (donde se aplica la carga) formado por una viga C con dimensiones 80x40x6mm, la

cual está soldada a una plancha de acero de 8 mm. El cuerpo tiene como sistema de referencia: “x” a lo largo del panel, “y” en dirección vertical y “z” en dirección del espesor de la plancha. Una vez modelada la geometría como una combinación de cuerpos sólidos en Rhinoceros, se puede importar con formato *iges* desde el programa Ansys Workbench para su posterior procesamiento estructural.

Material

Se va a asumir que el material de los especímenes y el armazón es de acero A36. Las propiedades mecánicas de este material, módulo de Young, esfuerzo de fluencia y esfuerzo último se muestran en la Tabla 5 y en la Figura 3.4, (Kang & Kim, 2015).

Tabla 5
Propiedades Mecánicas del Acero A36

E (Gpa)	206
σ_y (Mpa)	250
σ_u (Mpa)	450
ρ (kg/m ³)	7850
ν	0.3

Fuente: Kang & Kim, 2015

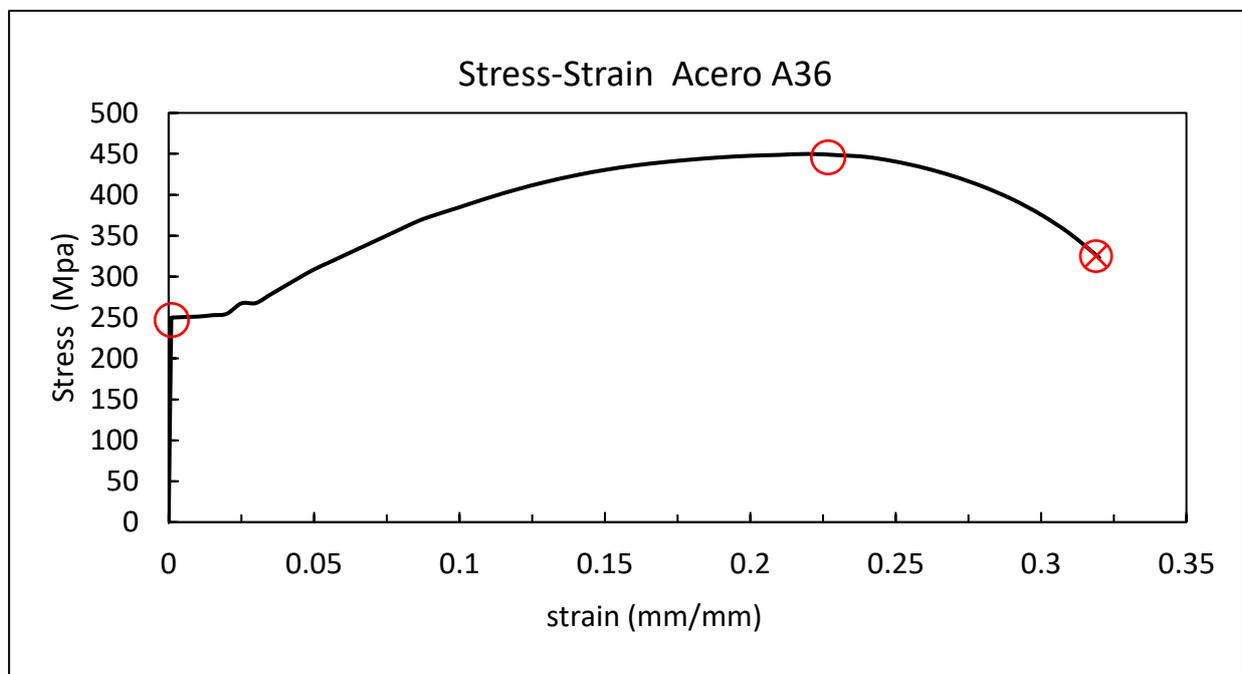


Figura 3.4 Curva Esfuerzo-deformación del acero A36

Fuente: Kang & Kim, 2015

La Figura 3.4 muestra los comportamiento elástico y plástico del material. La parte elástica limitada por el esfuerzo de fluencia, alrededor de 250 Mpa y cuya pendiente es el módulo de Young del material. Luego, se aprecia una transición o cedencia, la cual representa el inicio del comportamiento plástico. Después la curva avanza de forma no lineal al segundo punto (esfuerzo último), identificando el valor máximo de resistencia del material, en este caso 450 Mpa. Si se sobrepasa la carga última aparece el efecto “necking”, el cual culmina con la ruptura del material (tercer punto).

Discretización

Existen varios tipos de elementos finitos para modelar una estructura: línea, planchas y sólidos. Los elementos tipo líneas son usados para representar vigas o barras. Los elementos tipo planos definidos con tres ó cuatro nodos sirven para representar planchas o cascarones. Y los elementos tipo sólido son usados típicamente para representar el comportamiento de cuerpos con dimensiones significativas en las tres direcciones. Para representar adecuadamente el cambio localizado en espesor en una superficie de la plancha, en este proyecto se usó los elementos tipo sólidos. Esto para considerar que el efecto actúa en una cara de la plancha, y no en forma simétrica.

La Figura 3.5 muestra los tipos de sólidos simples y de mayor orden (con nodos intermedios en los lados) disponibles en el programa Ansys para discretizar una estructura. Los especímenes sin reducción de espesor se los discretiza con hexaedros (6 lados) y para los especímenes con reducción de espesor se los discretiza con tetraedros (4 lados), ambos de orden mayor.

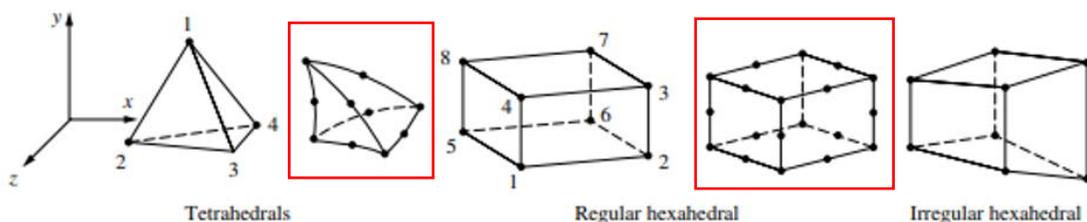


Figura 3.5 Tipo de elementos sólidos

Fuente: Ansys, 2021

La Figura 3.6 muestra un ejemplo de la discretización de los especímenes empleados en este proyecto, con y sin reducción de espesor. Claramente se aprecia en la parte a) de la figura mencionada, la formación de la malla con hexaedros que produce una

discretización uniforme; en la parte derecha de la figura se muestra la discretización del espécimen que incluye reducción de espesor, con tetraedros. Además, en esta última se incluye un refinamiento con forma de anillo circular alrededor de la parte circular central que tiene la reducción de espesor, para una transición adecuada de los tamaños y tipos de elementos.

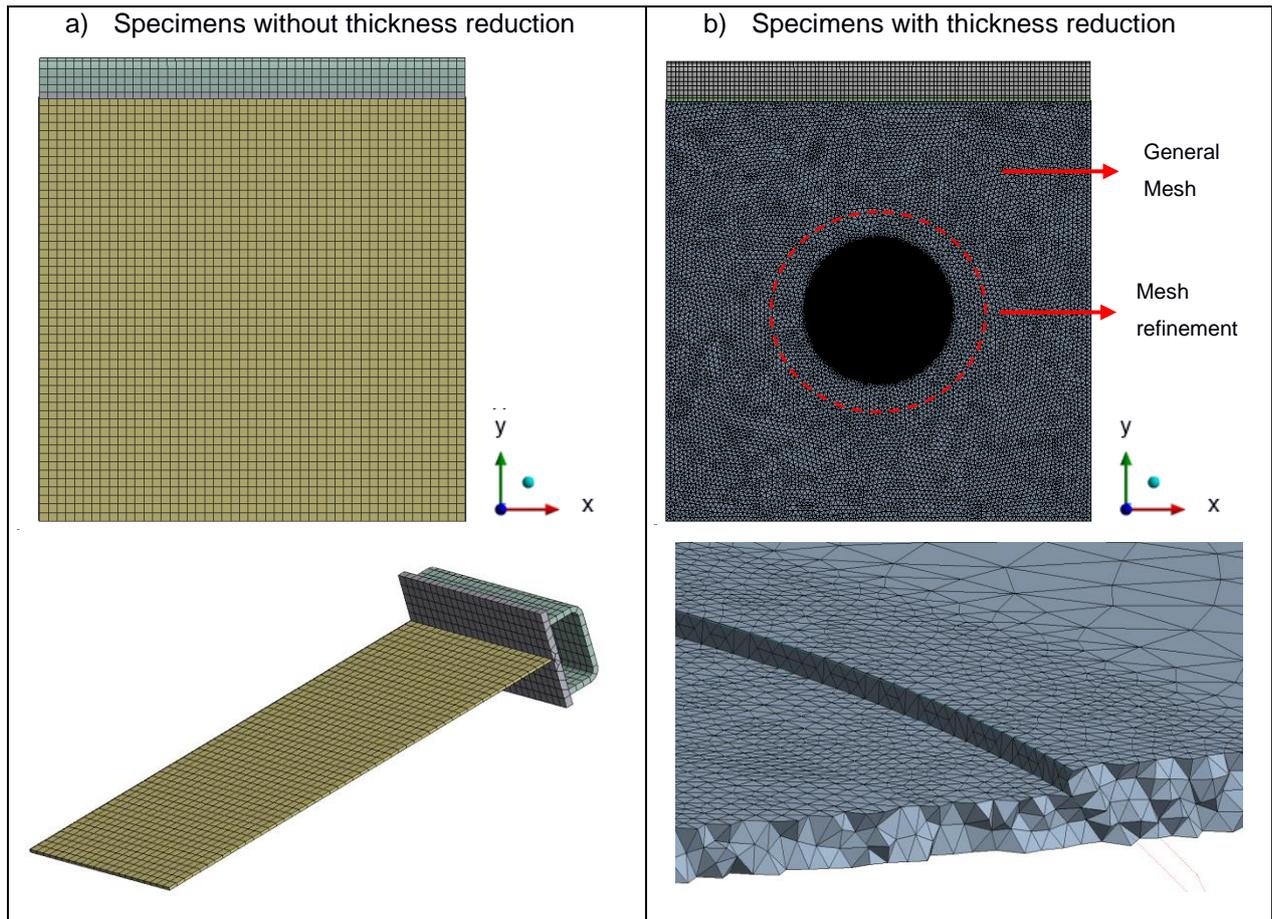


Figura 3.6 Ejemplo de Discretización

Fuente: Autor

Condiciones de Frontera y Cargas

Para la discretización de la estructura, los elementos sólidos en el programa Ansys tienen desplazamientos lineales en las 3 direcciones como grados de libertad (Hassan Ahmed Hassan & Kurgan, 2019). Con el fin de simular los resultados de las pruebas experimentales, restricciones de desplazamiento son aplicados en las caras del panel como se muestra en la Figura 3.7. En la cara superior se restringen el desplazamiento en “x” y en “z” sobre los nodos centrales, esto con el fin de simular el borde como simplemente soportado y considerando la fricción entre la viga superior y la plancha. En

las caras de los costados verticales se restringen el desplazamiento en “z” para que estos bordes se comporten como simplemente soportados. En la cara del fondo se restringió los nodos centrales en dirección vertical y las aristas en dirección “x” y en “z”, de tal manera que, los nodos centrales puedan actuar como pivote en el desarrollo del pandeo. Estas restricciones hacen que los bordes del panel se comporten prácticamente como simplemente soportados. Además, en el soporte superior se aplica un desplazamiento controlado sobre la sección central (franja de 12cm de longitud) en dirección “-y”, que corresponde a la zona de contacto de la muela de la máquina de ensayo universal.

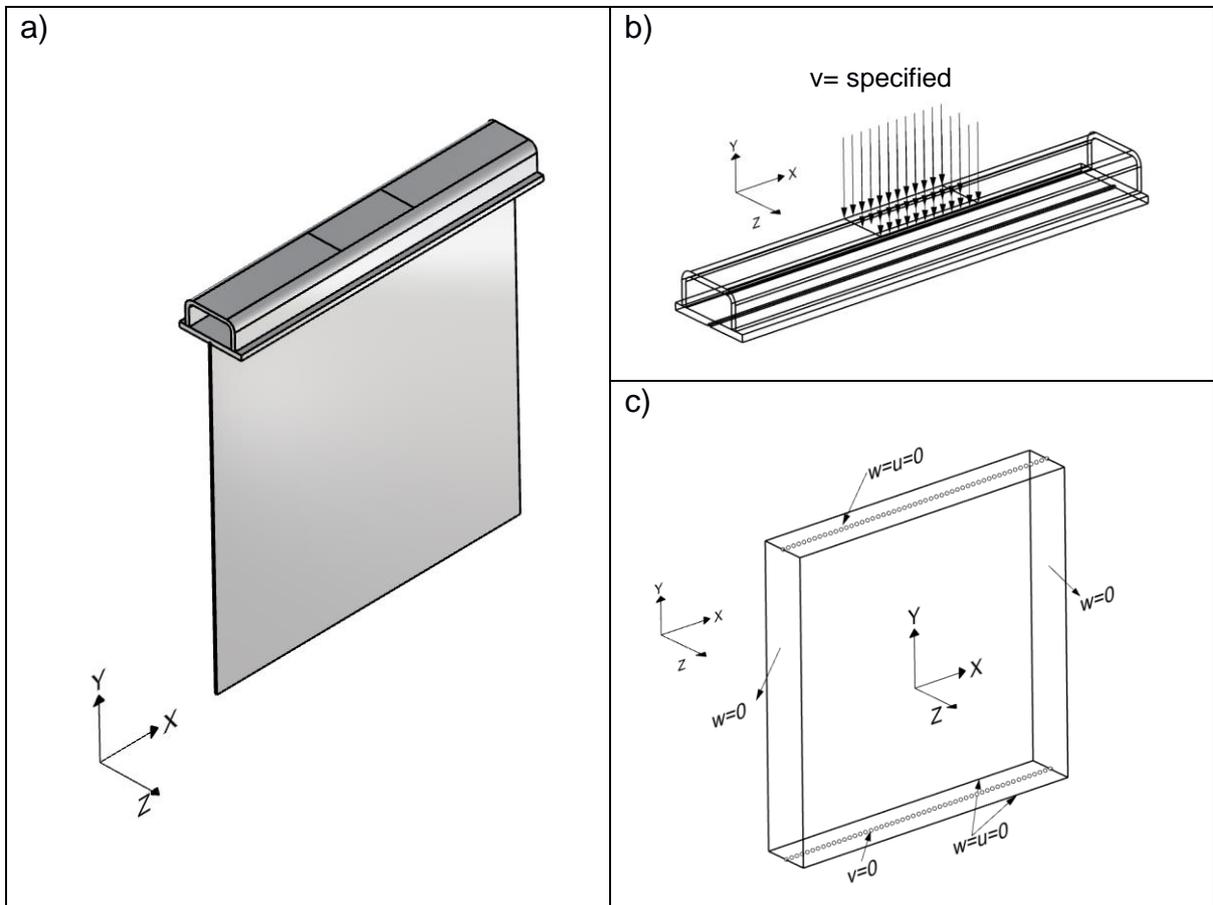


Figura 3.7 Geometría y condiciones de frontera

Fuente: Autor

Una vez realizado una discretización confiable a la estructura, incluyendo la descripción del comportamiento elástico del material, y establecido adecuadas condiciones de frontera y carga, se configura el tipo de resultado que se desea obtener. En este caso,

para esta parte lineal se selecciona *Total Deformation* para conocer el modo de pandeo y la carga Crítica.

El cálculo de pandeo elástico es muy importante debido a que sirve como condicional inicial para el cálculo no lineal. Con los resultados del pandeo elástico se configura el modo y magnitud de la predeformación inicial del panel. Este modelo predeformado es introducido como dato de entrada para el cálculo no lineal del modelo. La predeformación del modelo podría generar efectos no lineales, cuando éste está sujeto a grandes deformaciones.

3.1.2 No Linealidades

Las no linealidades estructurales consideradas en el modelo numérico fueron: geométricas y del material. También se incluye las predeformaciones de los paneles.

No linealidad Geométrica y Predeformación de los especímenes

La no linealidad geométrica surge del desarrollo de grandes deformaciones, combinación de pequeñas deformaciones y desplazamientos finitos y pérdida de estabilidad estructural (Madenci & Guven, 2015) . La rigidez del modelo cambia cuando está sujeto a grandes deformaciones, resultando en un problema no lineal. Además, un modelo con predeformación inicial puede sufrir una pérdida de estabilidad por pandeo. Referente a esto, se mide el perfil inicial de cada espécimen y se asume una predeformación con forma simplificada como lo explica (Bjorhovde & Tall, 1971) según la Figura 3.8, ver también anexo A.

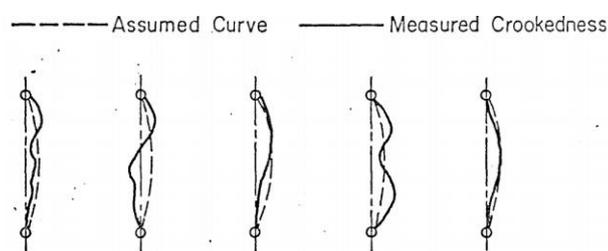


Figura 3.8 Representación de la predeformación de columnas

Fuente: Bjorhovde & Tall, 1971

Comportamiento plástico del Material

El comportamiento no lineal del material se representa con la zona plástica de la curva esfuerzo-deformación resultante de una prueba de tensión simple. En la Figura 3.9 se presenta la zona plástica ($\epsilon_{total} - \epsilon_{yield}$) del acero A36 que se ingresa en forma tabular para que internamente el programa los interpole en el proceso de solución. En este proyecto se emplean 29 puntos para representar la zona plástica del material, y la zona de fluencia se representa con una recta con pequeña pendiente.

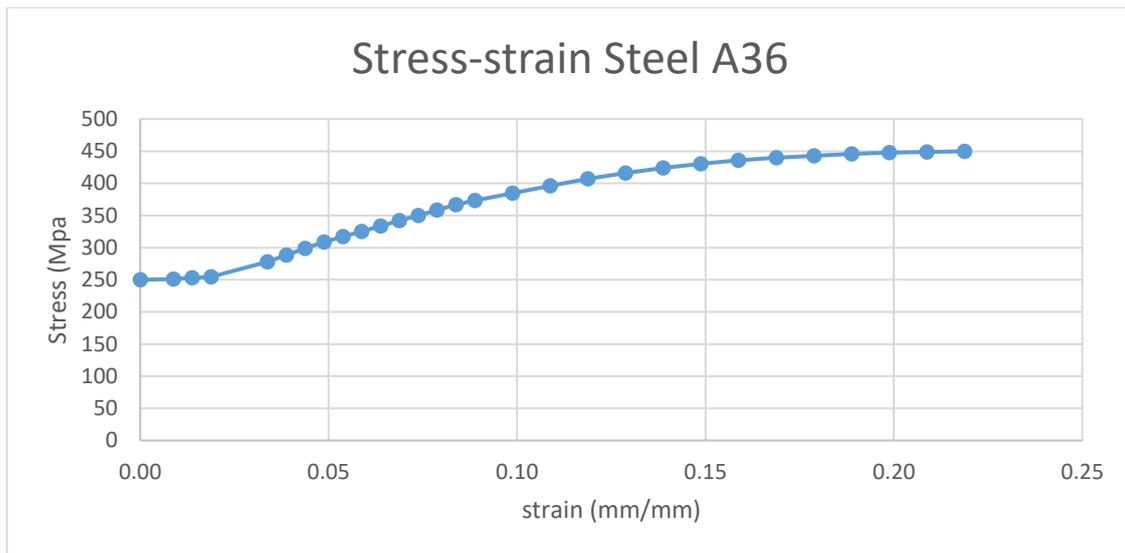


Figura 3.9 Zona Plástica del Acero A36

Fuente: Kang & Kim, 2015

La Figura 3.10 muestra la configuración total para realizar el análisis no lineal de pos-pandeo del panel empleando Ansys Workbench. Con los módulos BB & BC se obtiene la pre-deformación del panel, el cual es alimentado al módulo BD como condición inicial, incluyendo una amplitud a partir de las mediciones de predeformación de cada panel. Además en el modelo BD se ingresa la zona plástica de la curva esfuerzo-deformación del material y se activa la opción (*Large Deformation*) para el cálculo no lineal en Ansys Workbench.

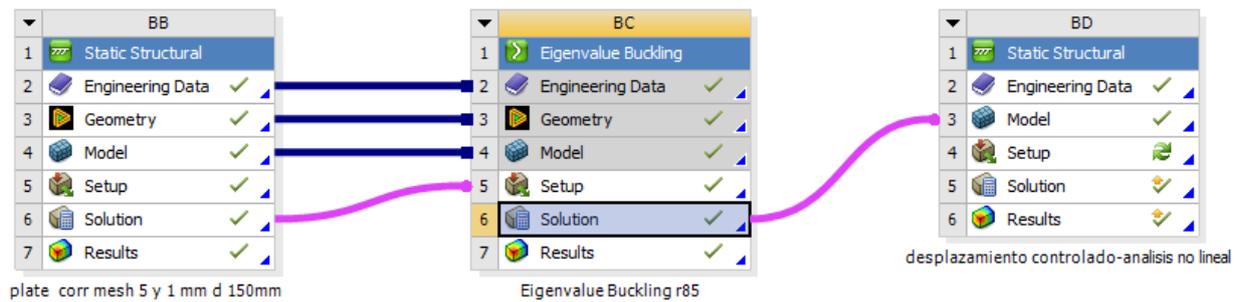


Figura 3.10 Configuración Total-Análisis no lineal

Fuente: Autor

Con las dos no linealidades, del material y geométrica, se procede a configurar el proceso de cálculo de forma similar que en el cálculo lineal, es decir, las condiciones de frontera, carga y tipo de resultados.

3.1.3 Cálculo de carga última

Para desarrollar un análisis de carga última usando Ansys se deben definir algunos parámetros. Para usar el método de desplazamiento controlado en elementos finitos, se debe activar la opción de *Grandes Deformaciones (Large Deflection)* en *Configuración de Análisis (Analysis Settings)*. Además, dado que el proceso es no lineal, se debe seleccionar la cantidad de subpasos para la aplicación del desplazamiento final. El ingreso de la cantidad de subpasos, el cual es proporcional al tiempo de simulación, permite aplicar la carga de manera gradual y evitar problemas de convergencia, en este caso se usa un valor de 100.

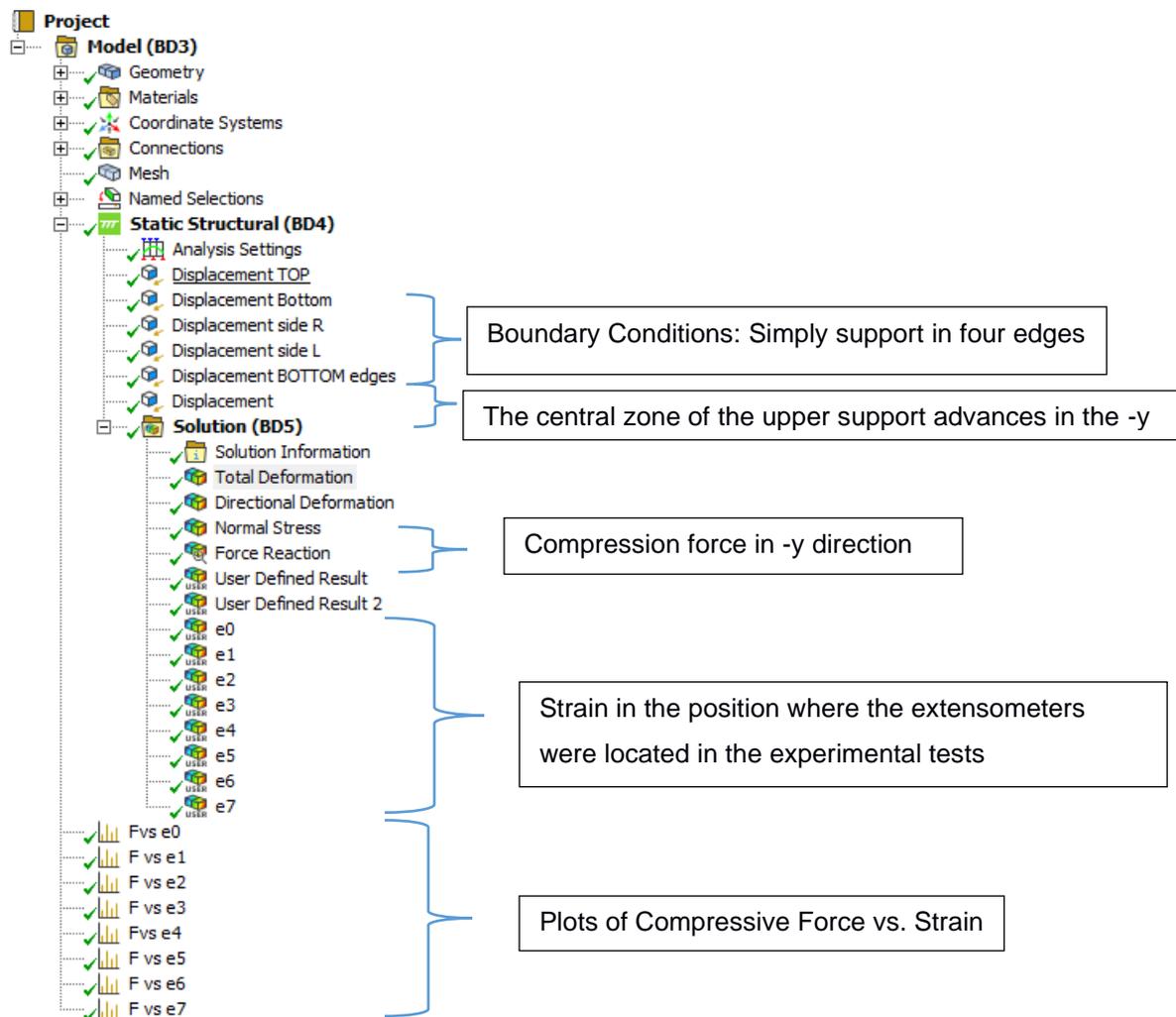


Figura 3.11 Configuración No lineal de Ansys Workbench

Fuente: Autor

La Figura 3.11 muestra la configuración del cálculo de carga última para el panel de plancha. Se incluyen las condiciones de frontera, el tipo de carga (*Static Structural*) y el tipo de resultados para el posterior análisis (*Solution*). Las condiciones de frontera aplicadas hacen que la plancha se comporte como simplemente soportada. La aplicación de carga en este caso es por medio del desplazamiento controlado, es decir, se configura para que la zona central del soporte superior descienda verticalmente una cantidad dada, que permita observar los efectos no lineales. Esto es similar al experimento en el laboratorio.

3.2 Desarrollo Experimental

En este subcapítulo se explica el procedimiento de construcción y configuración de la experimentación de carga última de los paneles.

3.2.1 Construcción del Armazón

Para la construcción del armazón que permita la compresión de paneles simplemente soportados, se usa como referencia la configuración recomendada por *US Bureau of Standards*, (Schuman & Back, 1931) presentada en la Figura 2.9. Para este proyecto se utilizan vigas de acero tipo C para alcanzar mayor resistencia y por facilidad de construcción. En la Figura 3.12 se presenta el esquema del armazón que se emplea en este trabajo.

El proceso para la construcción del armazón se detalla a continuación:

- Se consideran las características principales de la máquina de ensayo universal *Shimadzu* (véase el anexo B) disponible para la prueba. La capacidad máxima de compresión es de 500KN, y el espacio disponible el espécimen es $W \times D = 650 \times 650 \text{ mm}$. Con estas dos características se establecen las dimensiones de los paneles de prueba: $500 \times 500 \times 3 \text{ mm}$. Empleando la formulación de pandeo elástico de una plancha rectangular de acero estándar con razón de aspecto de 1 y bordes simplemente soportados (Singer et al., 2002) se estima que la carga crítica del panel es de 33.3 KN.
- Se grafica el armazón en el espacio usando el programa Rhinoceros. Se emplean vigas tipo C y plancha de acero, como se muestra en la Figura 3.12. El armazón consta de una plancha inferior de $600 \times 200 \text{ mm}$, sobre la cual se suelda una viga C. Luego se instalan las vigas verticales a los costados, de tipo C, que están conectadas a la inferior con pernos de $9/16''$ de diámetro. En la parte superior se tiene en forma independiente un soporte, formado una viga C soldada a una plancha de $496 \times 120 \text{ mm}$. Finalmente, se tiene dos vigas C transversales instaladas a mitad y al tope de la altura del panel que se conectan con pernos de $9/16''$ a las vigas laterales. Las planchas empleadas son de acero estándar y de 8 mm de espesor, y los perfiles tipo C son de acero estándar y con sección de: $80 \times 40 \times 6 \text{ mm}$. A las planchas inferior y superior, y las vigas C

laterales se les maquina ranuras de 2 mm de profundidad para restringir su movimiento en dirección perpendicular a la plancha.

- Adaptación: Como resultado de las primeras pruebas, las planchas al flectarse, se salían de las ranuras de los bordes verticales en la parte superior cuando llegaba a cierta cantidad de movimiento del borde superior. Esto reducía la resistencia y la falla de la estructura era inducida por las condiciones de frontera. Debido a esto, se soldaron platinas verticales en el armazón para evitar que la plancha al empezar su pandeo se salga de las ranuras verticales y conseguir aumento de la fuerza de pandeo localizado por la reducción de espesor.
- Finalmente, se observa del lado derecho de la Figura 3.12, la estructura completamente construida, armada e instalada la máquina de ensayo universal, (véase el anexo C para mayor detalle).

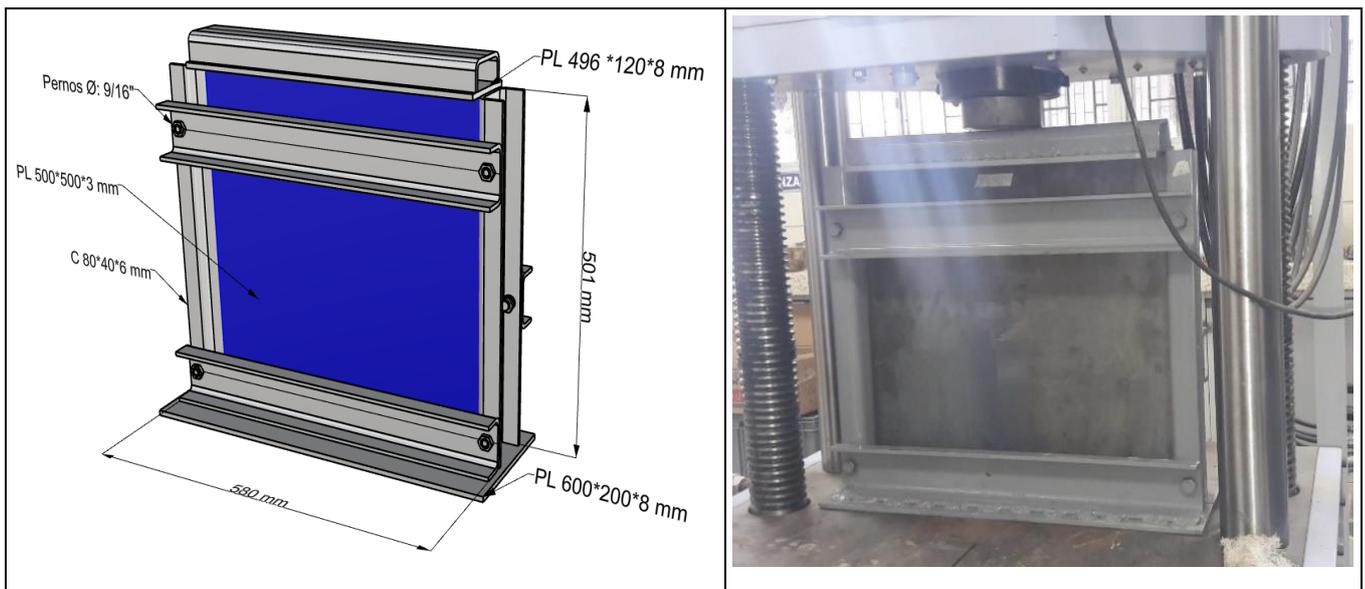


Figura 3.12 Modelado del Armazón para compresión de planchas

Fuente: Autor

3.2.2 Construcción de los especímenes

En este proyecto se va a determinar experimentalmente la resistencia última de paneles sin y con reducción localizada de espesor. En la Tabla 6 se describen los modelos que se prueban en este proyecto. En base al caso de estudio real se plantean cuatro modelos, cuyos especímenes tienen dimensiones 500x500x3mm, de acero estándar. El modelo 0 no tiene reducción de espesor. El modelo 1 tiene una región

circular de 75mm de diámetro y 1mm de reducción de espesor, mientras que modelo 2 tiene 100 mm de diámetro y 1mm de reducción, y el modelo 3, tiene 150 mm de diámetro y 1mm de reducción. En todos ellos se mantuvo la relación t/dt respecto de un panel de una estructura real ($t=20-25\text{mm}$, $dt=7\text{mm}$, $D=30\text{ cm}$ y $L=38.5\text{ cm}$). Los últimos tres modelos se construyeron para comprobar la influencia del tamaño de la reducción de espesor. Para chequear la repetitividad de resultados se construyeron tres especímenes de cada uno de los cuatro modelos.

Tabla 6
Descripción de los especímenes

Panel real		# de Ensayos	Descripción Gráfica
L/D	1.28		
t/dt	2.86-3.57		
Modelo 0 (sin reducción)		3	
L(mm)	500		
t(mm)	3		
Modelo 1 (con reducción)		3	
L(mm)	500		
t(mm)	3		
dt(mm)	1		
D(mm)	75		
L/D	6.67		
t/dt	3		
Modelo 2 (con reducción)		3	
L(mm)	500		
t(mm)	3		
dt(mm)	1		
D(mm)	100		
L/D	5.00		
t/dt	3		
Modelo 3 (con reducción)		3	
L(mm)	500		
t(mm)	3		
dt(mm)	1		
D(mm)	150		
L/D	3.33		
t/dt	3		
Total de Ensayos		12	

Fuente: Autor

La reducción localizada de espesor en cada espécimen se maquina en torno. Se fija el pedazo de plancha en las cuatro muelas de la máquina y la cuchilla que se usa es de

tipo inserto rectangular de material widia. Luego de maquinar los especímenes con baja velocidad, se esmerila suavemente para remover imperfecciones, Figura 3.13 (véase anexo D para mayor detalle).

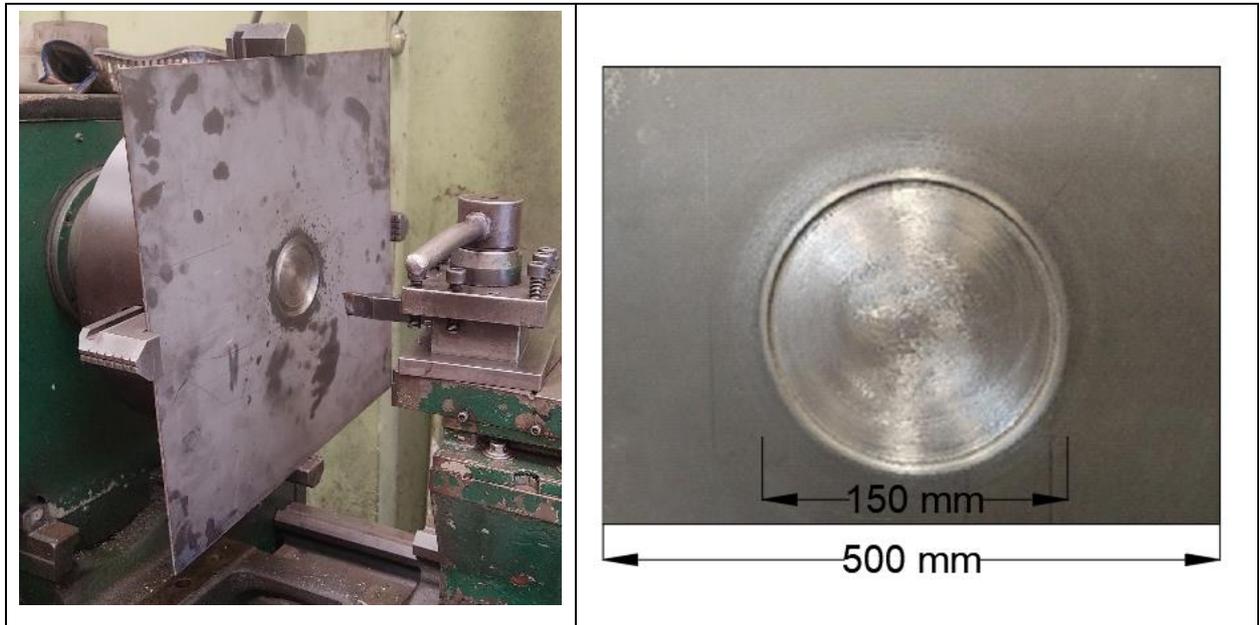


Figura 3.13 Cortado y maquinado de los especímenes

Fuente: Autor

3.2.3 Configuración del experimento

En este subcapítulo, se detalla la preparación de los paneles ya maquinados con reducción localizada de espesor. Se describe la instalación de los extensómetros y se muestra la configuración de los equipos para la adquisición de datos: Fuerza, deformación unitaria y desplazamiento.

Instalación de extensómetros

Se instalan 8 extensómetros (4 por cara) por cada panel, ver anexo E. Tomando como referencia la esquina inferior izquierda del panel, ver Figura 3.14, las posiciones de los extensómetros sobre los modelos se presentan en la Tabla 7. Los extensómetros pares se colocaron en la cara frontal donde se presenta la reducción de espesor y los extensómetros impares se ubicaron en la cara posterior del panel. Las posiciones de instalación de los extensómetros se seleccionaron en base a simulaciones previas.

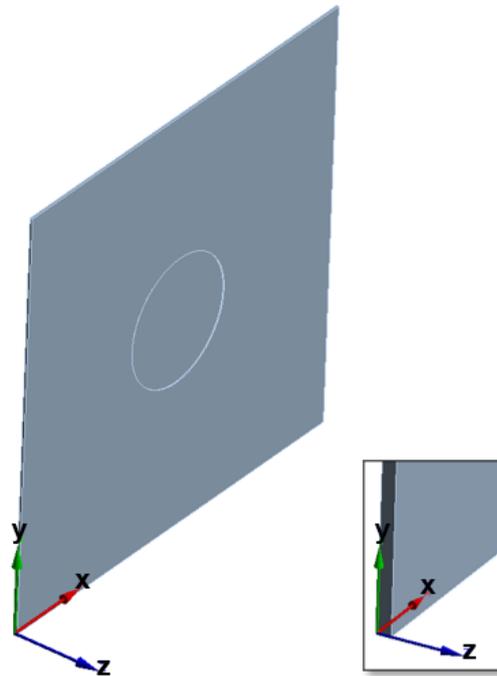


Figura 3.14 Sistema de referencia

Fuente: Autor

Tabla 7

Posición de los extensómetros en mm.

Strain gauges	Model 0			Model 1			Model 2			Model 3		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
e0	250	400	3	250	450	3	250	450	3	250	470	3
e1	250	400	0	250	450	0	250	450	0	250	470	0
e2	460	400	3	250	317.5	3	250	340	3	250	375	3
e3	460	400	0	250	317.5	0	250	340	0	250	375	0
e4	250	250	3	250	250	3	250	250	3	250	250	3
e5	250	250	0	250	250	0	250	250	0	250	250	0
e6	460	250	3	470	250	3	470	250	3	470	250	3
e7	460	250	0	470	250	0	470	250	0	470	250	0

Fuente: Autor

Adquisición de datos

La Figura 3.15, muestra la conexión de equipos (ver anexo F) para la adquisición de datos. Los extensómetros se conectan por medio de sus terminales al equipo de medición de deformación unitaria. A su vez, este equipo es conectado al computador por medio del programa LabView donde se almacena la información. De forma similar se tiene el potenciómetro lineal ubicado en el centro del panel, el cual es conectado a la

tarjeta de adquisición de datos y de forma simultánea se graban los datos (a una razón de 1KHz) de desplazamiento a través del programa LabView en el computador. Además, se coloca el medidor de carátula en sentido opuesto al medidor de desplazamiento, con el fin de medir el avance de la zona central cuando la plancha pandea en esta dirección y se graba en video sus lecturas.

Por otro lado, la máquina de ensayo universal registra la fuerza y el desplazamiento del pistón con una razón de 100 scans/s. Debido a que el desplazamiento del pistón de la máquina de compresión no corresponde al avance real del soporte superior del armazón, solo se considera los datos de la fuerza. La velocidad de compresión de la máquina es de 49KN/min para el modelo 0 y 36.75 KN/min para los modelos 1,2 y 3.

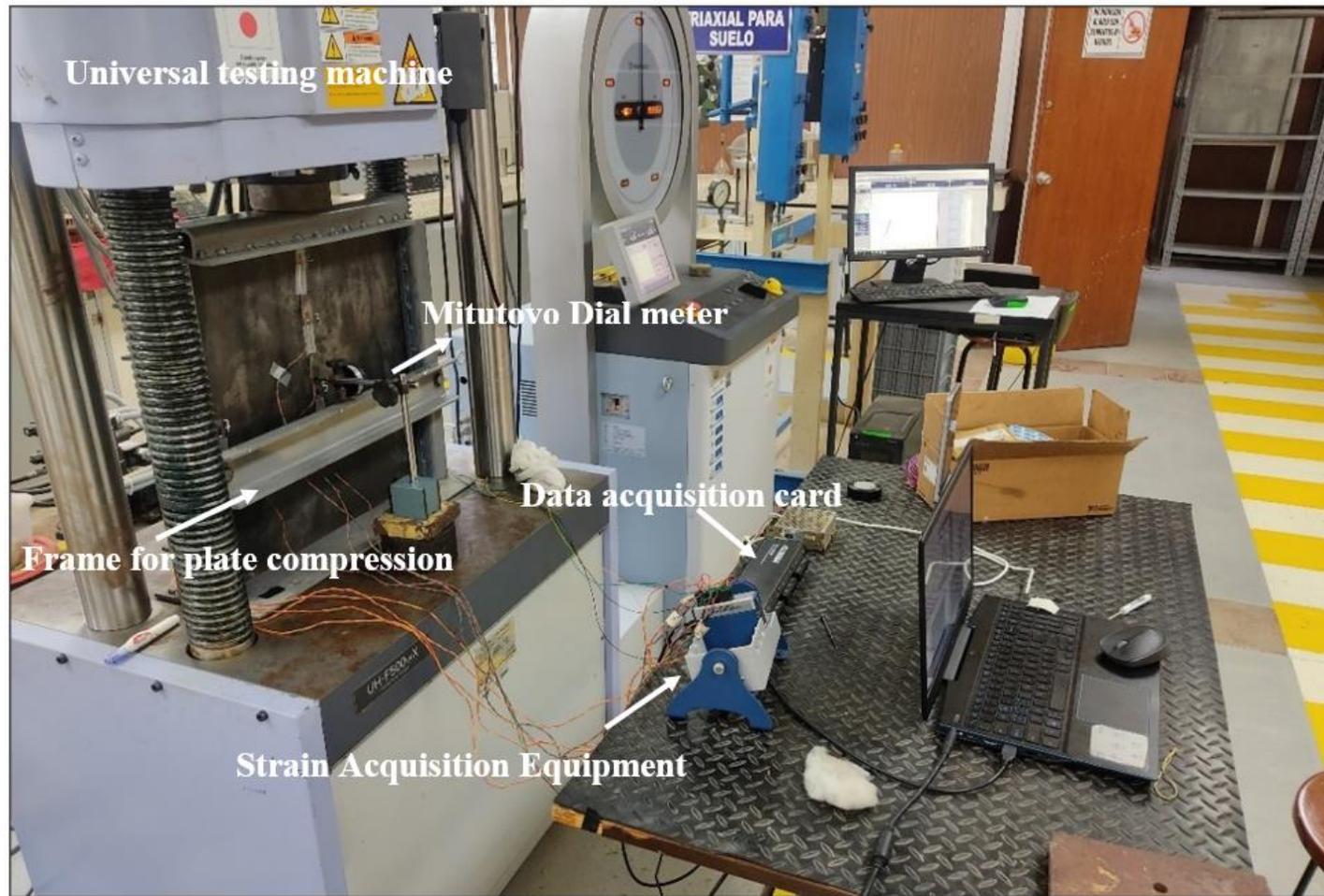


Figura 3.15 Configuración de equipo

Fuente: Autor

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

El presente capítulo consta de dos partes. La primera presenta un resumen y análisis de resultados del pandeo inelástico del modelo simplificado en forma numérica y experimental (los datos completos de los ensayos experimentales se pueden ver en el anexo F). El modelo simplificado incluye cuatro alternativas con plancha plana de acero estructural estándar con dimensiones 500x500x3 mm. El primer modelo no considera reducción de espesor, mientras que los otros tres tienen reducciones de espesor de forma circular de 75, 100 y 150 mm de diámetro, y, reducción localizada de espesor de 1 mm. En la segunda parte del capítulo, se realiza el análisis de resultados numéricos de carga última del panel real, es decir, el panel incluyendo la curvatura y reducción de espesor. A diferencia de la primera en esta parte se usa el acero HY-80 de alta resistencia. Se pretende en este capítulo conocer la carga última de estos paneles y la influencia que tiene la reducción localizada de espesor.

4.1 Carga última del modelo simplificado

Como ya se había mencionado en capítulo anterior, se realizan pruebas experimentales de carga última con los cuatro modelos de plancha plana. Los detalles geométricos de cada caso están descritos en la Tabla 6. De los ensayos de compresión se registraron fuerzas, deformaciones unitarias (de cada extensómetro instalado sobre el panel) y desplazamientos laterales (en el centro de cada plancha). La Tabla 8 describe observaciones más relevantes ocurridas durante la experimentación y correcciones realizadas al armazón de compresión que mejoraron los resultados obtenidos. De forma similar se realiza la simulación numérica en Ansys (ver proceso en 3.1 y anexo A) de los cuatro modelos para comparar estos resultados con los experimentales.

Tabla 8

Observaciones de pruebas experimentales

Real panel		# Test	Observations	Graphic description		
L/D	6.67					
t/dt	2.86-3.57					
Model 0 (without reduction)		3	With the plate bending, the edges would pop out of the vertical guide slots at the top when a certain amount of force was reached. It reduced strength and failure of the structure was induced by edge freedom.			
L(mm)	500					
t(mm)	3					
Model 1 (with reduction)		3				
L(mm)	500					
t(mm)	3					
dt(mm)	1					
D(mm)	75					
L/D	6.67					
t/dt	3					
Model 2 (with reduction)		3		Vertical plates were welded on the frame to increase the depth of the grooves and prevent the plate from coming out of the vertical grooves when it begins to deflect. In this way, it was tried to ensure that the edges of the plate remain simply supported and the load can be increased. With this modification, greater forces were obtained, although in the end there were tears in the upper edges of the specimen.		
L(mm)	500					
t(mm)	3					
dt(mm)	1					
D(mm)	100					
L/D	5.00					
t/dt	3					
Model 3 (with reduction)		3				
L(mm)	500					
t(mm)	3					
dt(mm)	1					
D(mm)	150					
L/D	3.33					
t/dt	3					
Total Test		12				

Fechas de pruebas: Modelo 0: 02/02/2022

Modelo 1: 03/02/2022

Modelo2: 09/02/2022

Modelo3:10/02/2022

Fuente: Autor

4.1.1 Convergencia y calidad de malla del modelo numérico

Antes de analizar resultados de los cálculos con el MEF, se va a comprobar que los modelos estructurales son adecuados. Para cada modelo se probaron tres mallas con diferentes números de nodos. En las figuras 4.1 y 4.2 se muestran los análisis de convergencia a nivel lineal y no lineal de los 4 modelos. Para ello se grafica la fuerza última versus el número de nodos de la malla. Además, se presenta el tiempo total de simulación por modelo.

Para el modelo 0 se usan elementos sólidos hexaedros con nodos intermedios. Las tres discretizaciones tienen elementos con tamaños de 10, 5 y 3 mm, respectivamente. En la figura 4.1 se aprecia que, al disminuir el tamaño del elemento, el tiempo de simulación aumenta cuadráticamente. Los valores de fuerza convergen a 42 y 132.78 KN para la fuerza crítica (cálculo lineal) y fuerza última (cálculo no lineal) respectivamente. El valor teórico de la fuerza crítica de pandeo del panel íntegro con bordes simplemente soportado es de 33.3 KN empleando la formulación de (Singer et al., 2002). La diferencia de la fuerza crítica entre valor numérico y el teórico se debe a que en el método numérico se aplicó la fuerza compresiva, únicamente en la zona central del borde superior del panel.

De forma similar, se prueban 3 diferentes mallas para los otros tres modelos que incluyen reducción localizada de espesor. En estos tres modelos, se discretiza usando elementos sólidos tetraedros con nodos intermedios. Debido a la reducción de espesor, se usa un tamaño de elemento general y un refinamiento que circunscribe la reducción de espesor. El radio del anillo de la zona de refinamiento se seleccionó de 1 cm, desde el radio de la circunferencia de reducción de espesor, puesto que al incrementarse dicha dimensión en un 5%, la fuerza última aumenta únicamente en un 0.03%.

En las figuras 4.1 y 4.2 se muestran las tendencias de la fuerza crítica y fuerza última al aumentar el número de elementos en la discretización de los modelos. El valor de la fuerza crítica aumenta al incrementar el número de nodos, en cambio para la fuerza última disminuye. Los valores de convergencia en el modelo 1 de la fuerza crítica y última son de 40.11 y 138.62 KN, respectivamente. En el modelo 2, la fuerza crítica

converge a 39.22 KN y 139.47 KN para la fuerza última. Finalmente, en el modelo 3, la fuerza crítica converge a 37.23 KN y 138.06 KN para la fuerza última. Es necesario recalcar que la variación de resultados entre una malla y otra es baja (alrededor del 4%) por lo que se selecciona la de mejor calidad, en este caso, la tercera malla en todos modelos, las cuales incluyen las mayores cantidades de elementos.

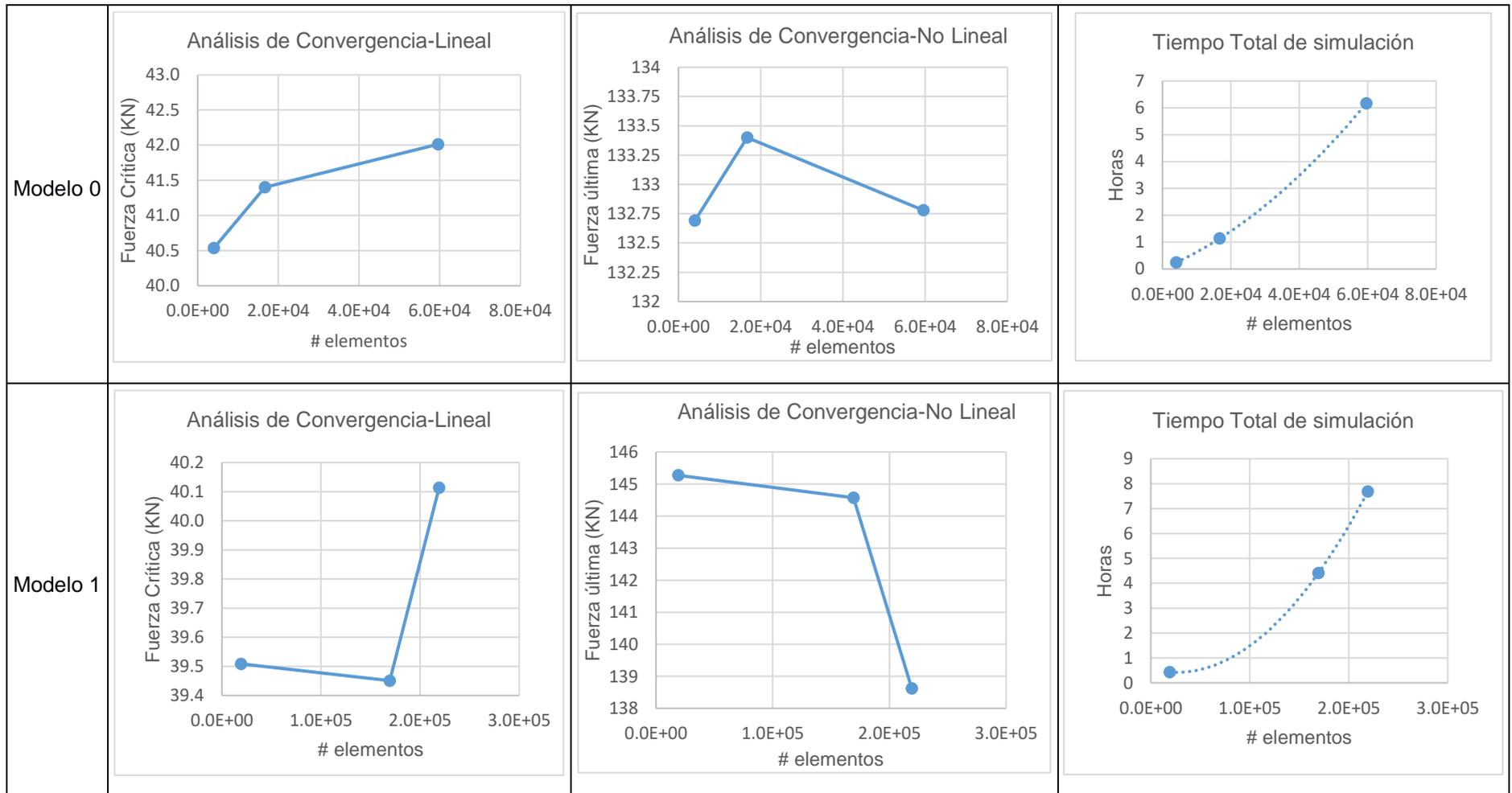


Figura 4.1 Análisis de Convergencia- Modelos 0 y 1

Fuente: Autor

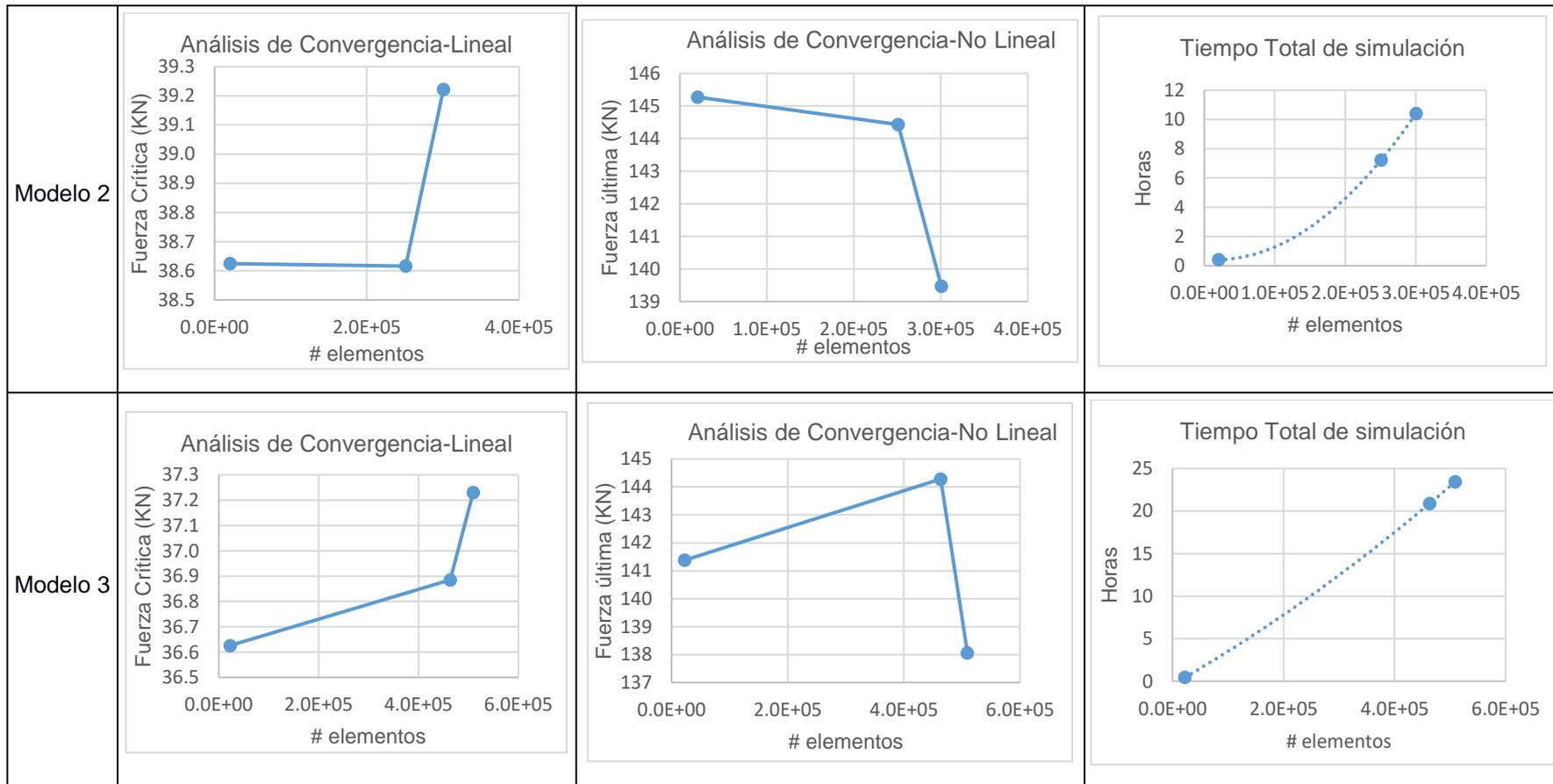


Figura 4.2 Análisis de Convergencia- Modelos 2 y 3

Fuente: Autor

Tabla 9
Calidad de malla de los modelos numéricos

Modelo	Descripción del espécimen	Descripción de Malla	#nodos	#elementos	Tiempo simulación (h)	Aspect Ratio	Jacobian	Element Quality
						Valor ideal	1	1
						Valor aceptable	1 < aspect < 5	> 0.5
						Check	Check	Check
0	Plancha plana de dimensiones 500x500x3mm	Hexaedros con nodos intermedios: Malla general de 3mm	367966	59596	6.17	min: 1.002 max: 3.0174 prom:1.0762	min: 0.66 max:1 prom:0.97	min: 0.56 max: 1 prom:0.99 98.8% elementos > 0.9
1	Plancha plana de 500x500x3mm con reducción de espesor concéntrico de diámetro 75mm y 1 mm de profundidad	Tetraedros con nodos intermedios: Malla general de 5mm con refinamiento de 1mm en un diámetro concéntrico de 95 mm	400168	219204	7.68	min: 1.0526 max: 19.31 prom:1.91 97 % elementos < 5	min: 0.5 max: 1 prom:0.99	min: 0.11 max: 0.99 prom:0.81 76.9 % elementos > 0.75
2	Plancha plana de 500x500x3mm con reducción de espesor concéntrico de diámetro 100mm y 1 mm de profundidad	Tetraedros con nodos intermedios: Malla general de 5mm con refinamiento de 1mm en un diámetro concéntrico de 120 mm	527101	300498	10.42	min: 1.0526 max: 23.45 prom:1.91 96% elementos < 5	min: 0.5 max: 1 prom:0.99	min: 0.09 max: 0.99 prom:0.81 80 % elementos > 0.75
3	Plancha plana de 500x500x3mm con reducción de espesor concéntrico de diámetro 150mm y 1 mm de profundidad	Tetraedros con nodos intermedios: Malla general de 5mm con refinamiento de 1mm en un diámetro concéntrico de 170 mm	853683	509596	23.46	min: 1.0526 max: 32.313 prom:1.9085 98% elementos < 5	min: 0.5 max: 1 prom:0.99	min: 0.062 max: 0.999 prom:0.815 82.8% elementos > 0.75
Especificaciones del computador: CPU E5-2609 v2, #núcleos=4, Frecuencia del procesador 2,50GHz y 2 TB de espacio en disco duro								

Fuente: Autor

Además de la convergencia de resultados se revisa también la calidad de la malla de los modelos con elementos finitos. Para ello se revisa la tercera malla de cada modelo, esto es, la que tiene mayor discretización del dominio. La descripción de la malla, números de nodos y elementos, y tiempo de simulación se presentan en la Tabla 9. Para evaluar la calidad de las mallas se aplican tres criterios, siguiendo lo recomendado por (Madier, 2020): razón de aspecto, Jacobiano y calidad del elemento. Estos tres criterios miden cuán cercanos están los elementos del ideal, y se concluye que la discretización seleccionada es confiable.

4.1.2 Pre-deformación del modelo simplificado

Se espera que la predeformación de los paneles influyan en la carga última, por ello previo a los ensayos experimentales de compresión, se mide en la línea central vertical, la predeformación de los paneles cuando están instalados en el armazón. Luego, dado que las formas de las predeformaciones son complejas, siguiendo la referencia (Bjorhovde & Tall, 1971) se definen formas simplificadas equivalentes. En la Figura 4.3 con línea continua se muestran los perfiles medidos y con línea discontinua, el equivalente. Estos perfiles equivalentes son aplicados en los cálculos numéricos, asumiendo que el perfil equivalente corresponde al primer modo de pandeo elástico, aun cuando en algunos casos tenían rastros del segundo.

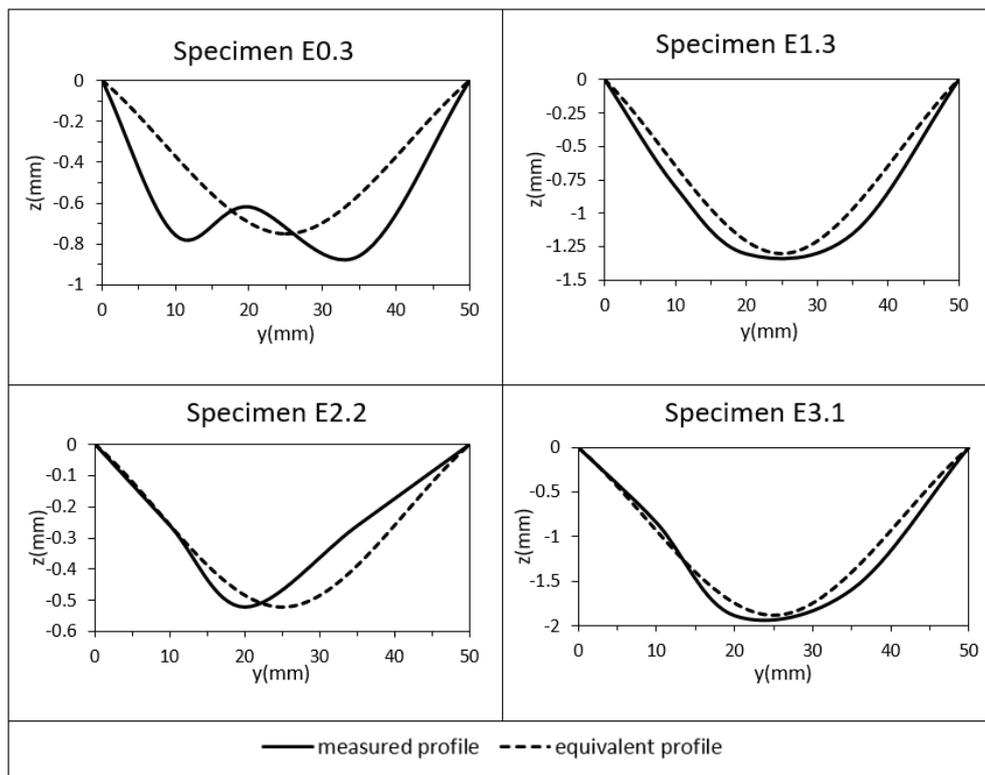


Figura 4.3 Perfiles de predeformación equivalentes de los modelos

Fuente: Autor

4.1.3 Comparación Numérica-Experimental de la Fuerza última

Modelo 0 (Plancha con espesor uniforme)

La Figura 4.4 muestra los resultados que se obtienen en forma numérica con en el modelo 0 (plancha intacta). La parte a) presenta el primer modo de pandeo el cual es simétrico respecto del eje vertical pero no respecto del eje transversal, debido al desplazamiento del borde superior del panel. Con este perfil de pandeo elástico se configura la pre-deformación para el cálculo no lineal, en este caso se usa 0.75 mm de deformación en el centro del panel. Las partes b) y c) de la figura muestran el desplazamiento vertical y total del modelo cuando la zona central del soporte superior ha descendido 1.5 mm. La distribución del desplazamiento vertical no es uniforme debido a la rigidez finita del soporte superior.

Los resultados del experimento con el modelo 0 se presentan en la Figura 4.5. De los tres ensayos experimentales, se toma como referencia el ensayo 0.3, para comparación con los resultados numéricos. De las imágenes mostradas se señala con recuadro en rojo el fallo por pandeo local del panel, Figura 4.5 . El desplazamiento lateral elevado produce que los bordes verticales se salgan de la ranura del armazón, cambiando la condición de simplemente soportado a libre, limitando la resistencia del espécimen.

Las gráficas de fuerza vs deformación unitaria obtenidas de forma numérica y experimental del modelo 0 se muestran en la Figura 4.6. Se observa similitud en la forma de las curvas. Las deformaciones unitarias de los costados (e_2 y e_3 , y e_6 y e_7) y en la parte superior del espécimen (e_0 y e_1) muestran un comportamiento de compresión debido a que estas zonas de la plancha se mantienen rectas por la influencia de los bordes. Por otro lado, en el centro del panel (e_4 y e_5) se observa un cambio de tendencia en la curva, es decir, esta zona pasa de compresión a tensión, lo cual sucede por la flexión de la plancha que induce esfuerzo de tensión en una cara y el opuesto en la otra.

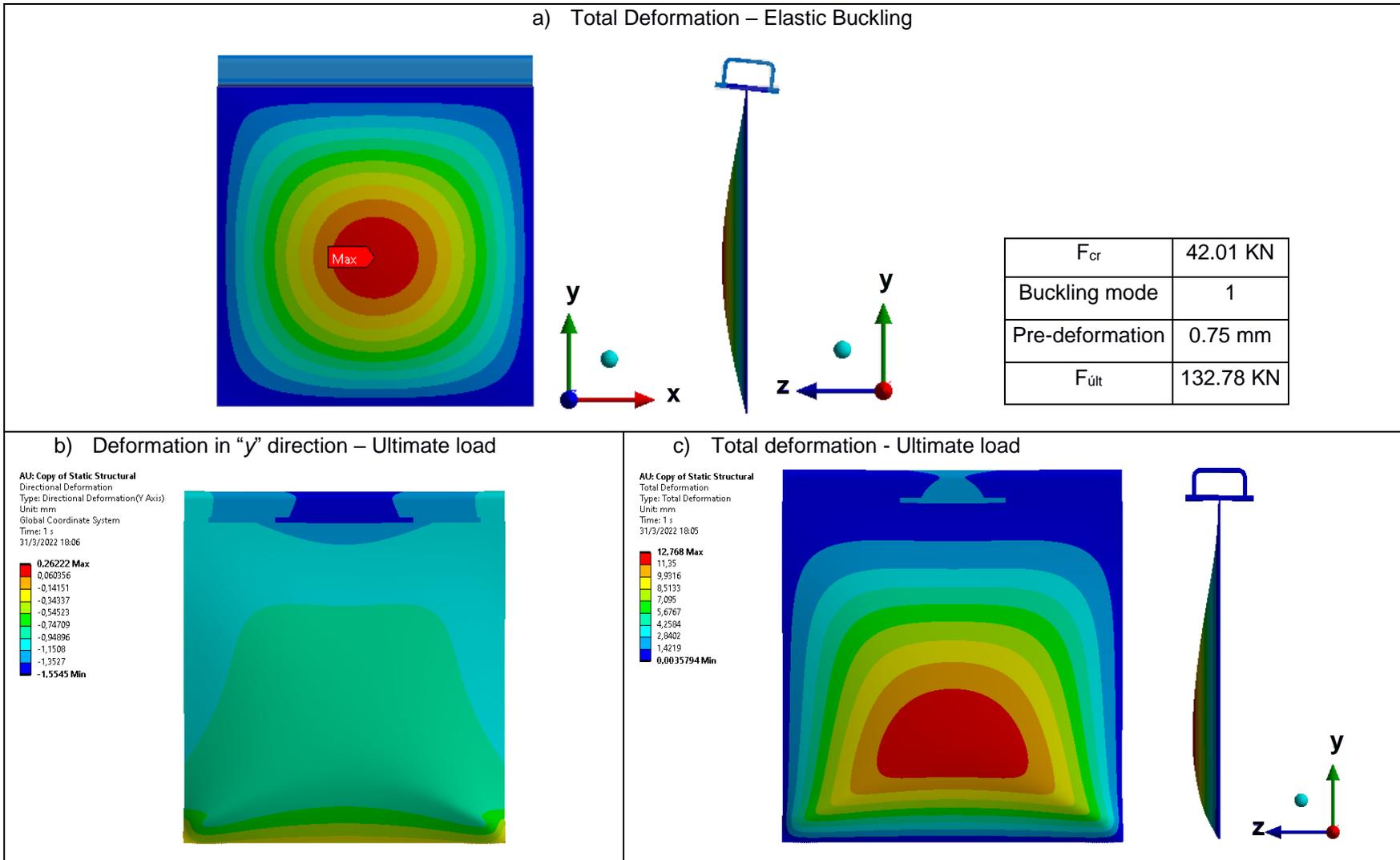


Figura 4.4 Resultados del colapso del modelo 0 usando Ansys

Fuente: Autor

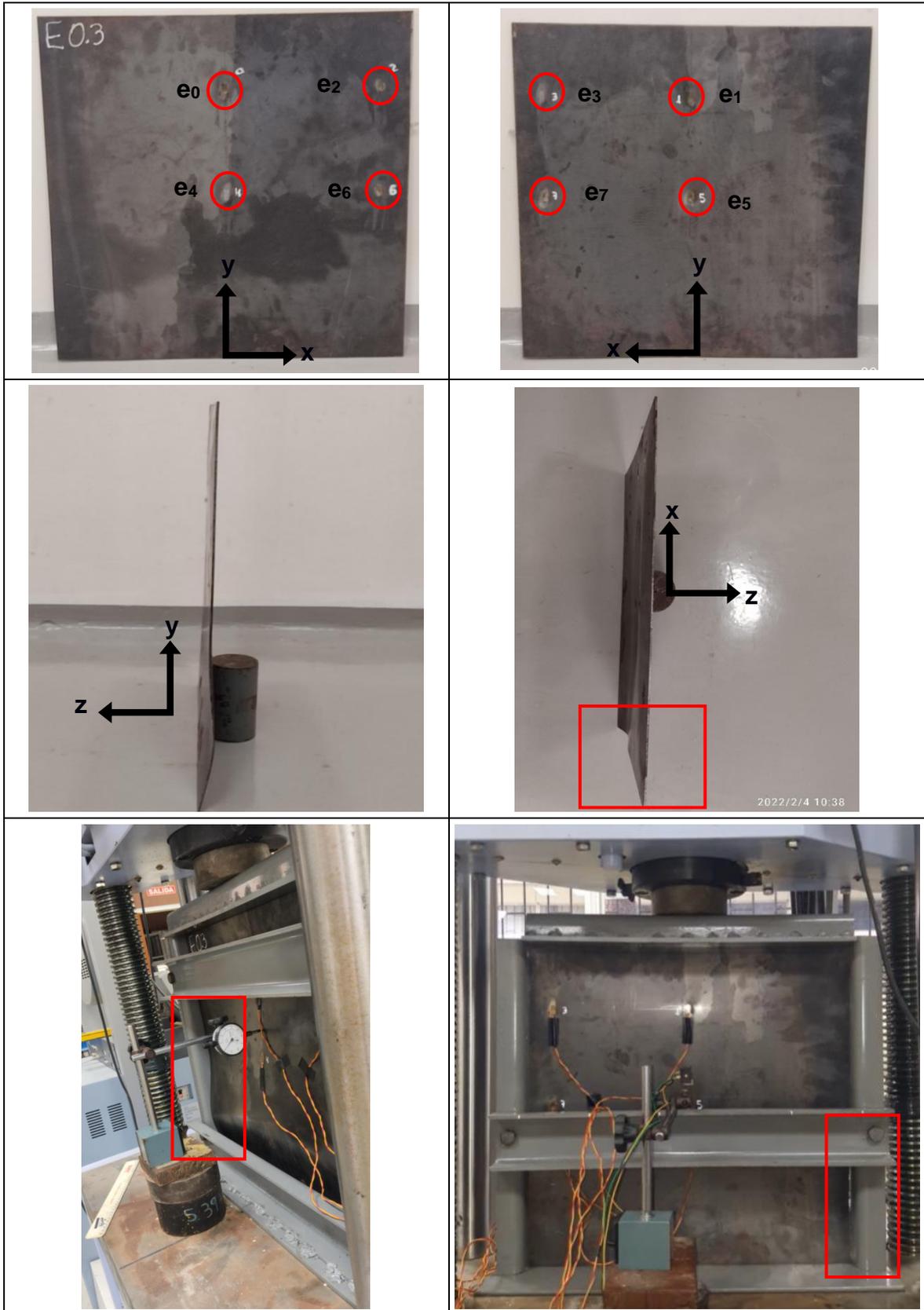


Figura 4.5 Prueba experimental de resistencia última del modelo 0

Fuente: Autor

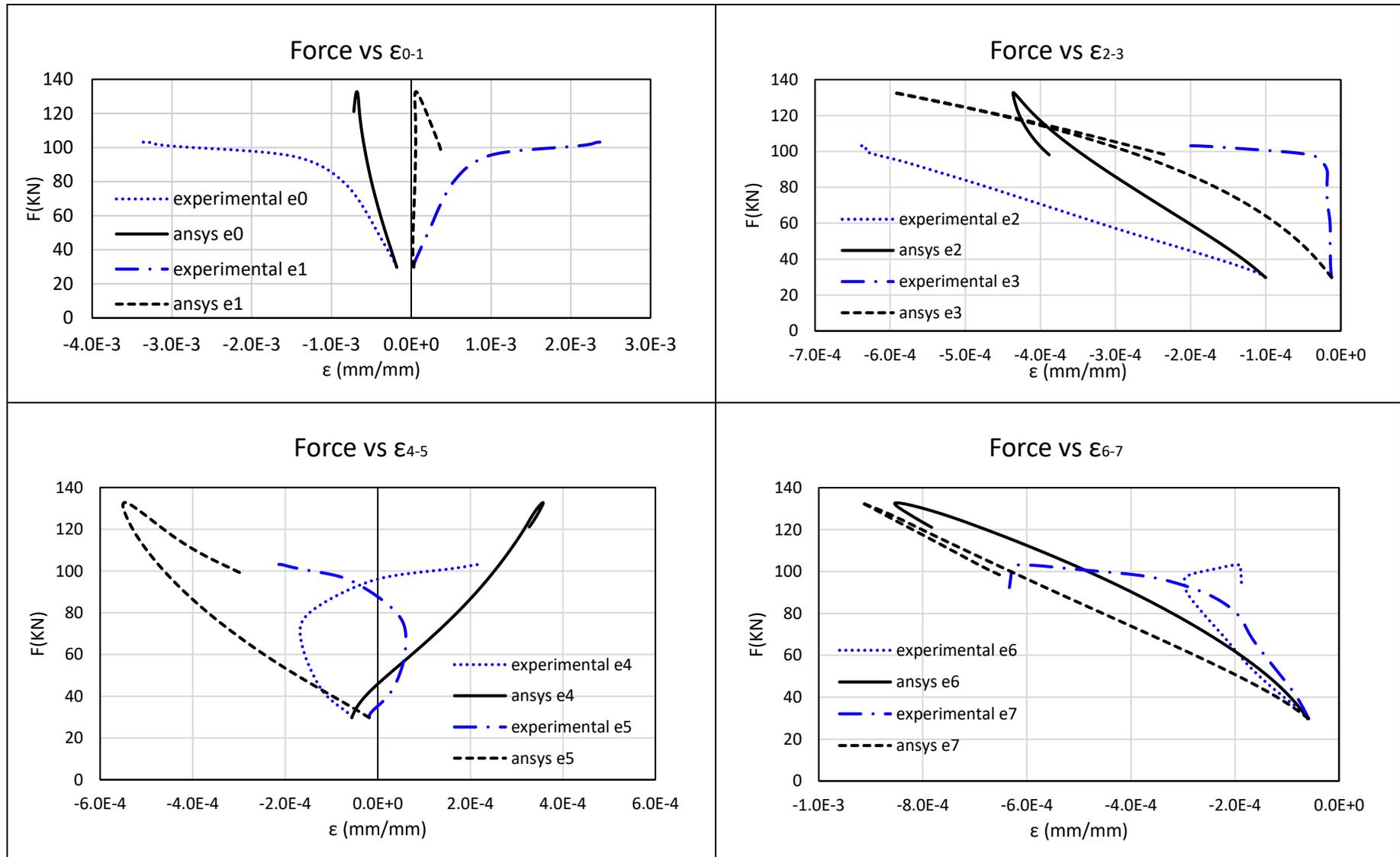


Figura 4.6 Comparación Numérico-Experimental de fuerza vs deformación unitaria del modelo 0

Fuente: Autor

Modelo 1 (reducción de espesor de 75 mm)

Los resultados de las pruebas del modelo 1 se muestran en la Figura 4.7, empleándose una pre-deformación de 1.3 mm de amplitud en el primer modo de pandeo. Se aprecia como cambia la deformación vertical por la reducción de espesor y su tendencia a unirse con la parte inferior de los bordes verticales. A diferencia del primer modelo, en este caso se aprecia el efecto que tiene la reducción de espesor, reduciendo resistencia estructural, incrementando la deflexión lateral en la zona central y magnificando el pandeo local.

El estado del modelo 1 al final del del ensayo experimental se presenta en la Figura 4.8. De los tres ensayos experimentales que se realizaron con este modelo, se toma como referencia el 1.3, para comparación con los resultados numéricos. De las imágenes mostradas se señala con recuadro en rojo el inicio de la falla por pandeo local del panel. De forma similar al primer modelo, el pandeo localizado se produce debido a que parte del borde superior se sale de la ranura del armazón.

Las gráficas de fuerza vs deformación unitaria obtenidas de forma numérica y experimental del modelo 1 se muestran en la Figura 4.9. Se observa similitud entre las curvas experimentales y las numéricas. Los extensómetros ubicados en la zona central (e_0 y e_1 , e_2 y e_3 , y, e_4 y e_5) muestran cambios de tendencia en sus curvas, es decir, por un momento están en compresión y luego pasan a tensión por efecto de la flexión inducida por la reducción localizada de espesor. Por el contrario, las zonas cercanas a los bordes trabajan continuamente en compresión, como muestran los extensómetros 6 y 7, debido a que los bordes permanecen rectos.

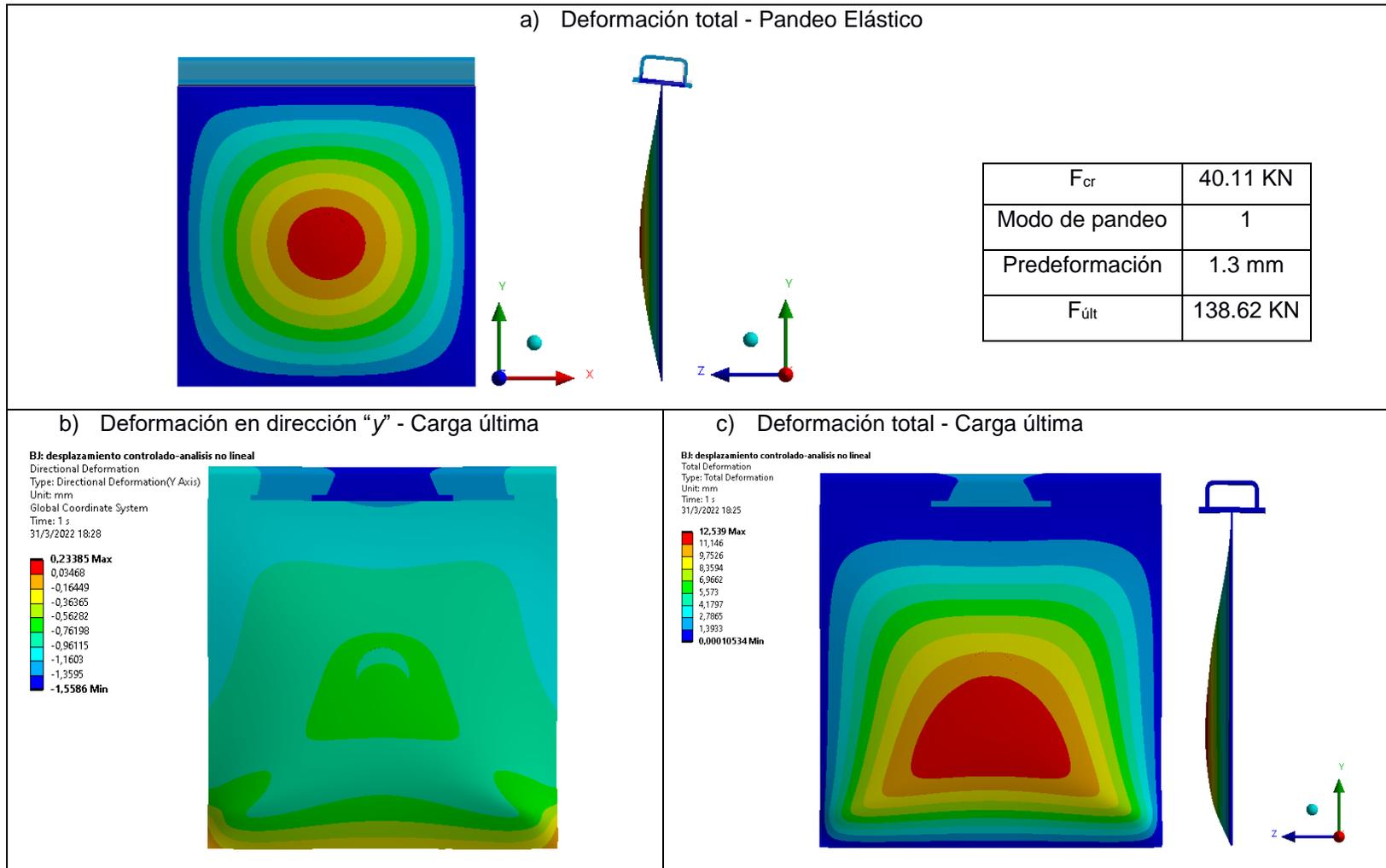


Figura 4.7 Resultados del colapso del modelo 1 usando Ansys

Fuente: Autor

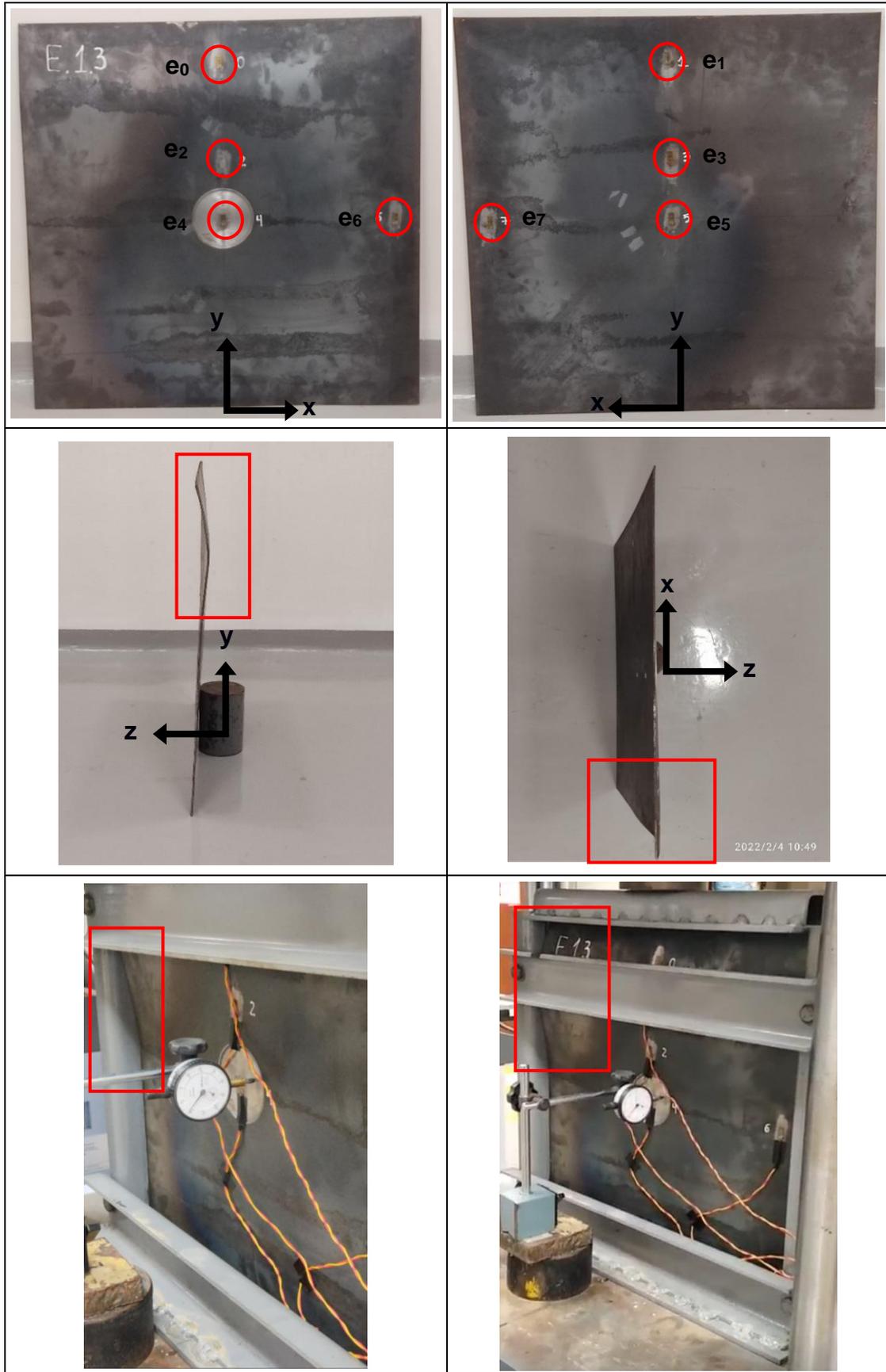


Figura 4.8 Prueba experimental de resistencia última del modelo 1

Fuente: Autor

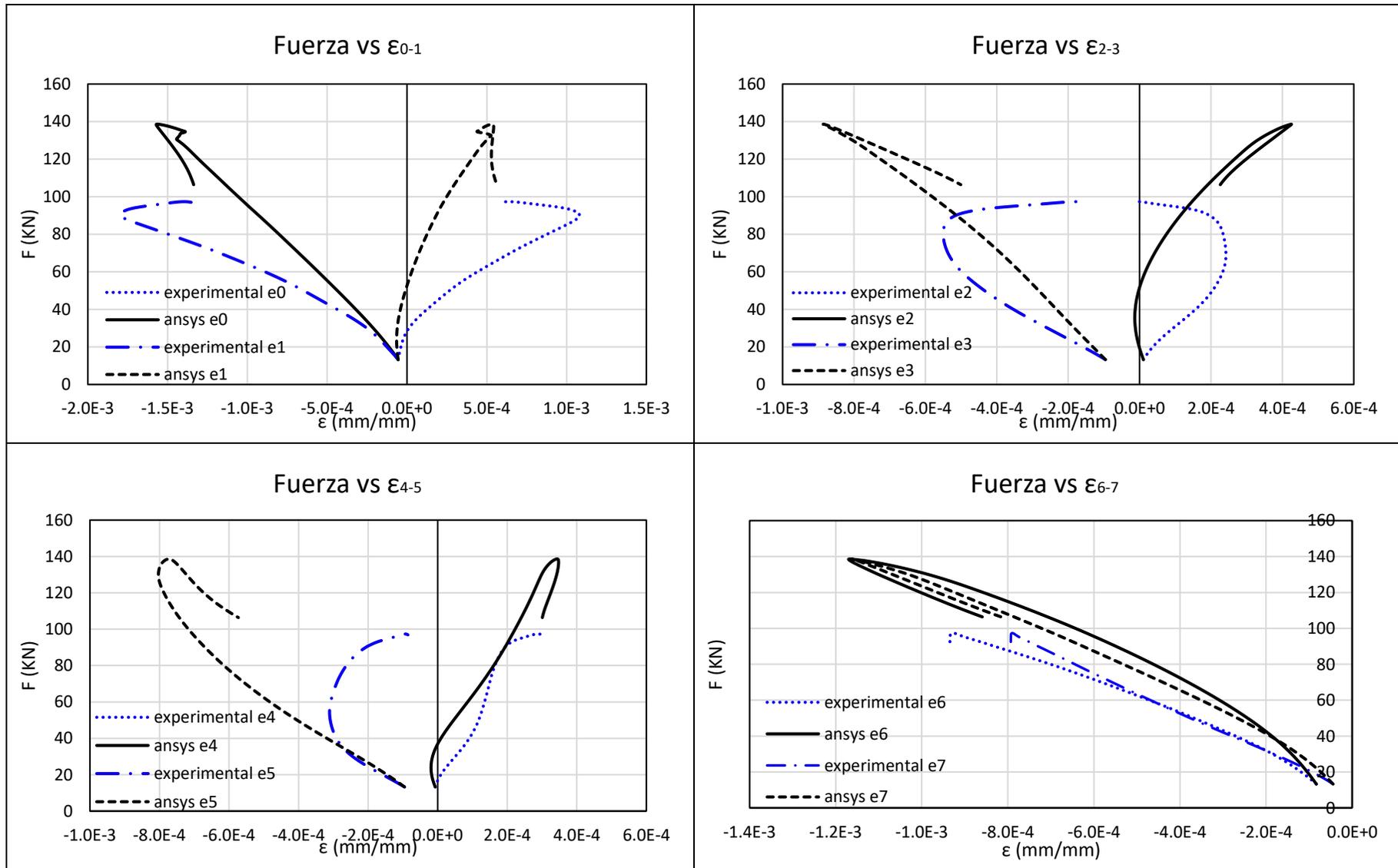


Figura 4.9 Comparación Numérico-Experimental de fuerza vs deformación unitaria del modelo 1

Fuente: Autor

Dado que en los modelos 0 y 1 el pandeo local era ocasionado por la salida de los bordes verticales de las ranuras del armazón, se sueldan platinas verticales en el armazón, de tal manera que aumente la profundidad de la ranura. De esta forma se evita que el borde de la plancha al empezar la flexión por el pandeo se salga de las ranuras verticales y acelere su falla; de esta forma se consigue aumentar la fuerza de colapso de la plancha en las siguientes pruebas.

Modelo 2 (reducción de espesor de 100 mm)

La Figura 4.10 presenta el colapso del modelo 2 empleando MEF. Para este modelo se usa una pre-deformación de 0.52 mm de amplitud del primer modo de pandeo. El estado final del panel es similar que el modelo 1, solo que para este caso se magnifica el pandeo localizado debido a que el diámetro de la reducción de espesor es mayor.

El estado final del espécimen 2.2 en el ensayo experimental se presenta en la Figura 4.11. De los tres ensayos experimentales que se realizan con este modelo, se analiza dicho ensayo, para comparación con los resultados numéricos. De las imágenes mostradas se señala con recuadro en rojo el fallo por pandeo local del panel, que ocurre en la parte inferior, siendo simétrico respecto del eje vertical. Debido a la adaptación que se hizo en las ranuras del armazón se obtiene mayores fuerzas de colapso, pero la falla se presenta por desgarraduras en los bordes superiores y en ciertos casos en los bordes inferiores.

Las gráficas de fuerza vs deformación unitaria obtenidas de forma numérica y experimental del modelo 2 se muestran en la Figura 4.12. Las tendencias de las curvas experimentales son similares a las numéricas. Los extensómetros ubicados en la zona central (e_0 y e_1 , e_2 y e_3 , y, e_4 y e_5) muestran cambios de tendencia, es decir, por un momento están en compresión y luego pasan a tensión por efecto de la flexión local inducida por la reducción localizada de espesor. Por el contrario, las zonas cercanas a los bordes trabajan en compresión, como muestran los extensómetros 6 y 7.

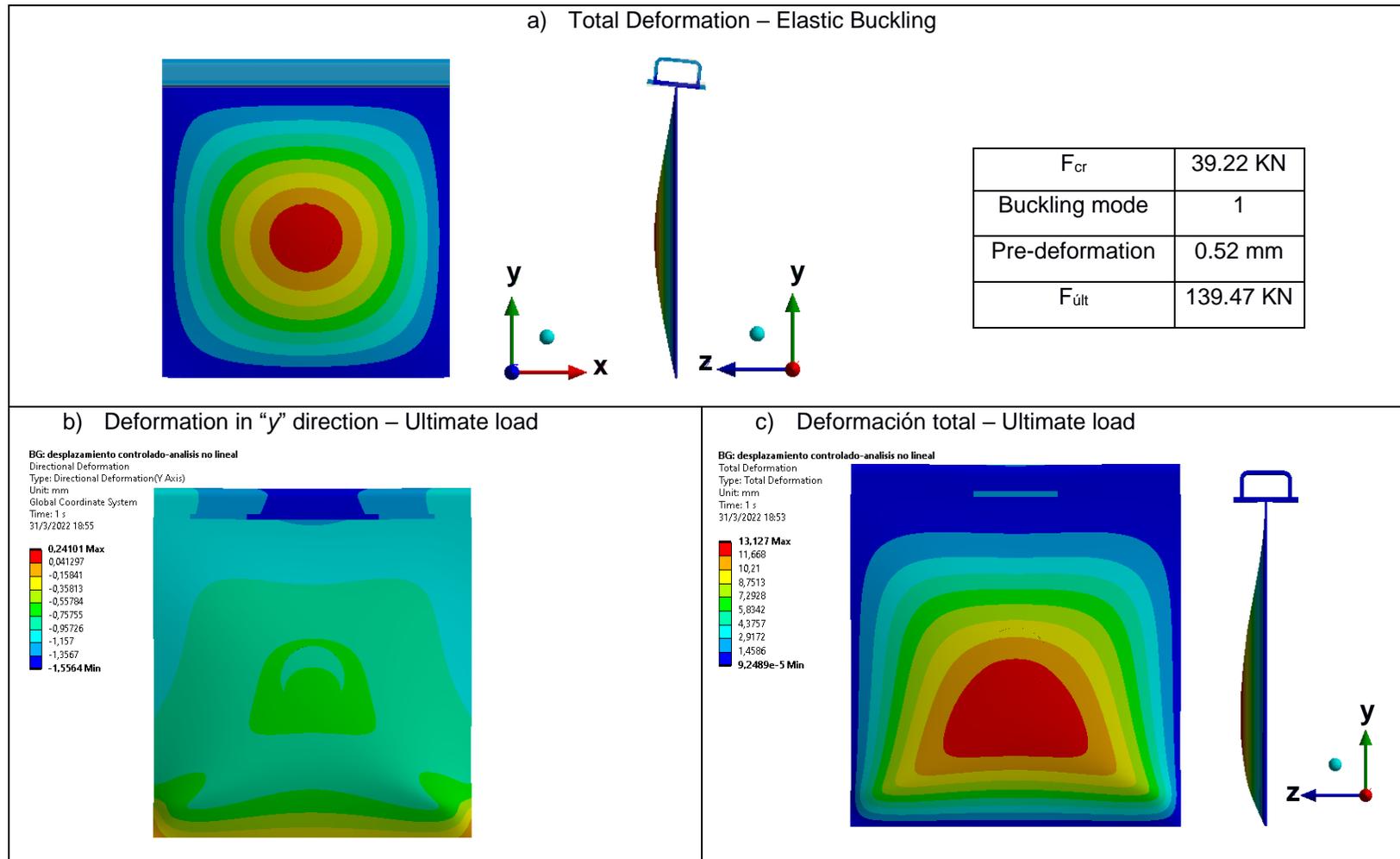


Figura 4.10 Resultados del colapso del modelo 2 usando Ansys

Fuente: Autor

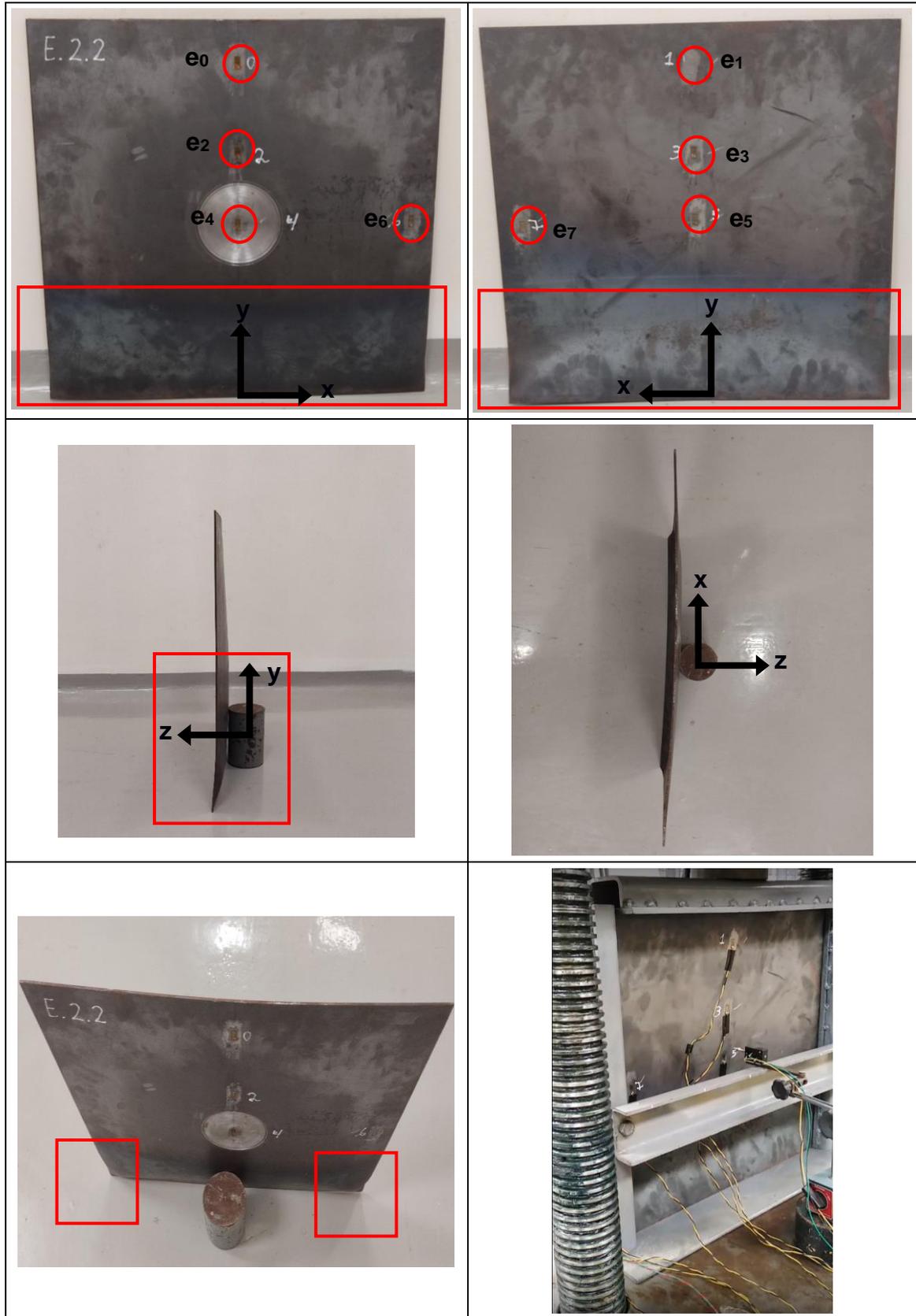


Figura 4.11 Prueba experimental de resistencia última del modelo 2

Fuente: Autor

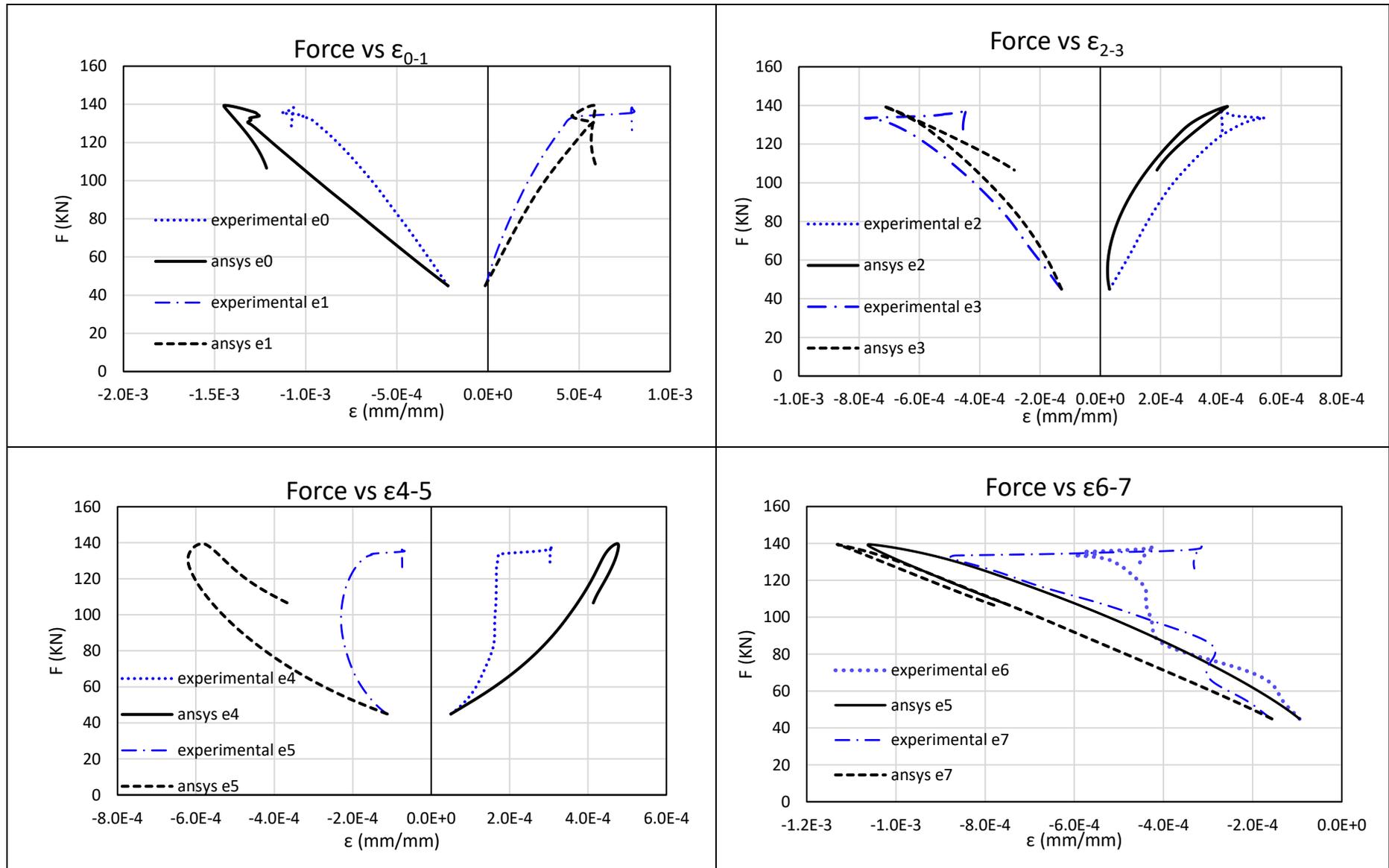


Figura 4.12 Comparación Numérico-Experimental de fuerza vs deformación unitaria del modelo 2

Fuente: Autor

Modelo 3 (reducción de espesor de 150 mm)

La Figura 4.13 presenta el colapso del modelo 3 empleando MEF. En este modelo se usa una pre-deformación con amplitud de 1.88 mm del primer modo de pandeo. En las imágenes se aprecia mayor influencia de la reducción de espesor que en los modelos anteriores. Claramente se distingue la distribución del desplazamiento vertical influenciada por la reducción de espesor y los bordes inferiores del panel.

El estado final del espécimen 3.1 en el ensayo experimental se presenta en la Figura 4.14. De los tres ensayos experimentales que se realizan con este modelo, se analiza dicho ensayo para comparación con los resultados numéricos. De las imágenes mostradas se señala con recuadro en rojo el fallo por pandeo local en la parte superior del panel, teniendo un perfil simétrico respecto del eje vertical y asimétrico respecto del eje horizontal. La fuerza última que se obtiene es menor que en el modelo 2, tal como se esperaba. Además, debido a la adaptación que se hizo en el armazón se alcanzó mayor fuerza de compresión y se presentan desgarraduras en los bordes superiores.

Las gráficas de fuerza vs deformación unitaria obtenidas de forma numérica y experimental del modelo 3 son mostradas en la Figura 4.15. Las tendencias de las curvas experimentales son similares a las curvas numéricas. Dado que la influencia de la reducción localizada de espesor es mayor, los extensómetros ubicados en la zona central (e_0 y e_1 , e_2 y e_3 , y, e_4 y e_5) muestran cambios significativos de tendencia en sus curvas, por pérdida de resistencia y redistribución de esfuerzos. A pesar que se ha aumentado el diámetro de la zona de reducción de espesor, las regiones adjuntas a los bordes siguen estando en compresión por influencia de la condición de frontera, como lo evidencian los resultados de los extensómetros 6 y 7.

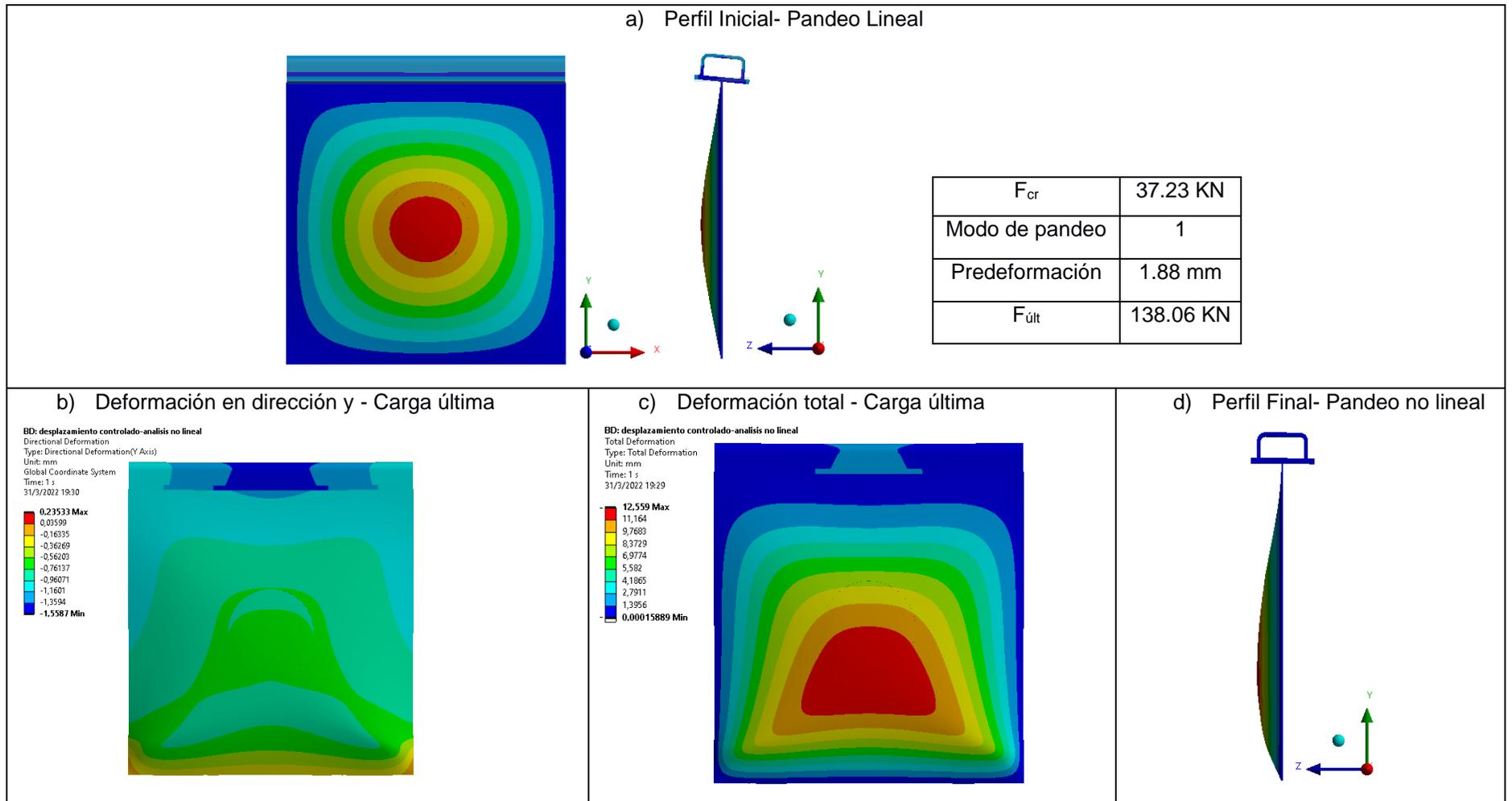


Figura 4.13 Resultados del colapso del modelo 3 usando Ansys

Fuente: Autor

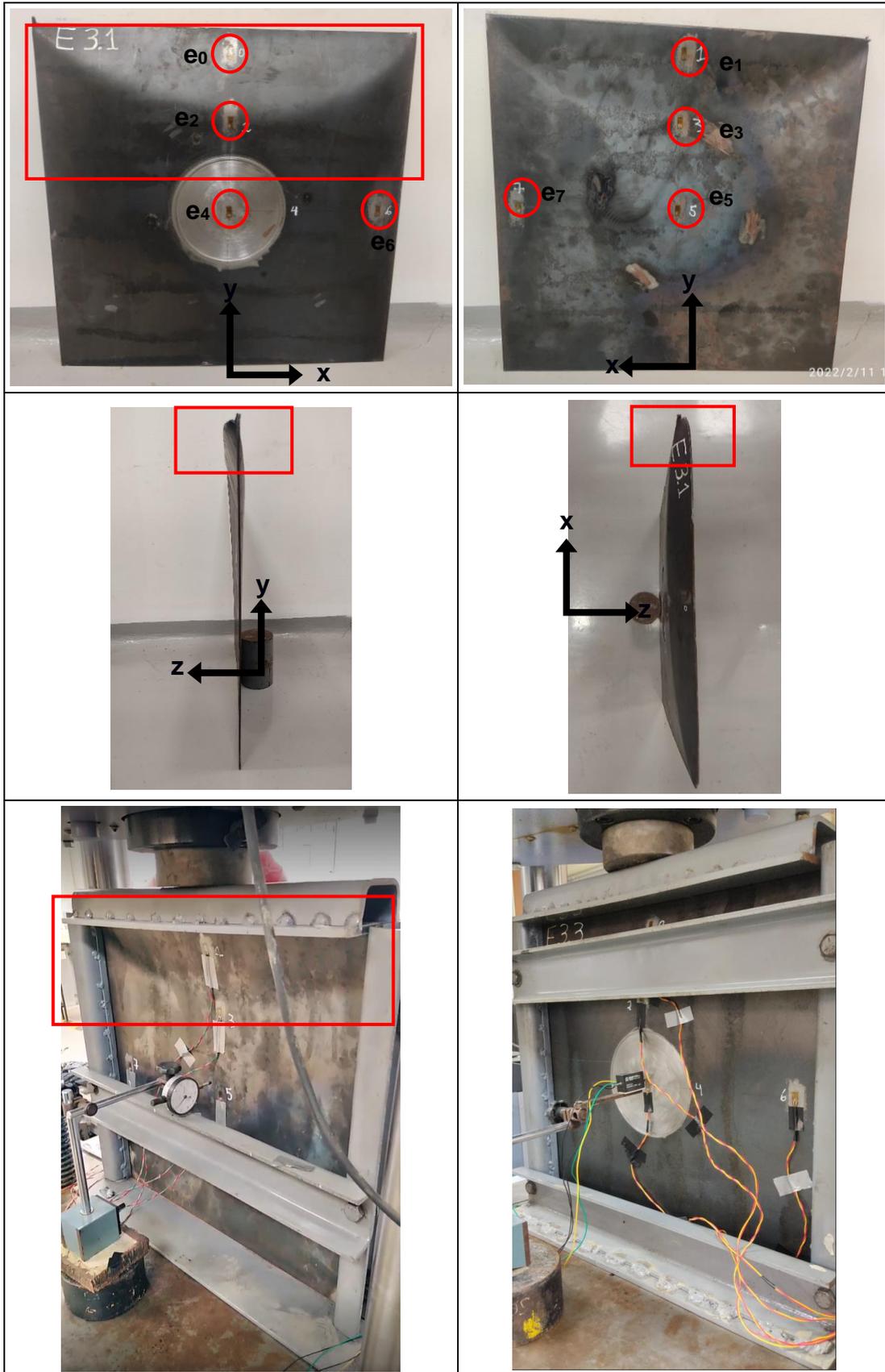


Figura 4.14 Prueba experimental de resistencia última del modelo 3

Fuente: Autor

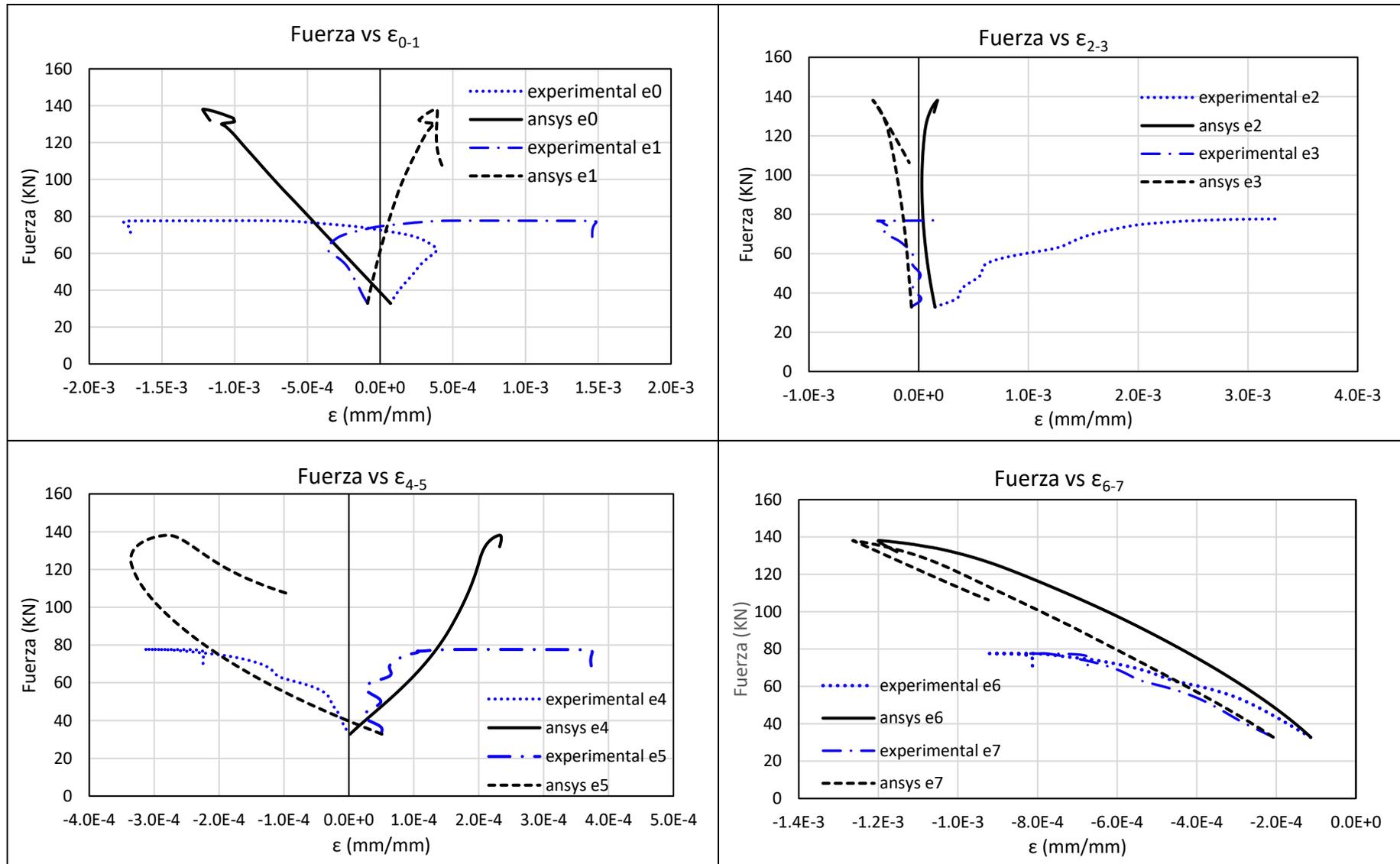


Figura 4.15 Comparación Numérico-Experimental de fuerza vs deformación unitaria del modelo 3

Fuente: Autor

Se procede ahora a comparar la influencia de las áreas de reducción de espesor de la plancha. Se va a separar los resultados numéricos y experimentales de la zona central, Figura 4.16, y aquella cercana a los bordes verticales, Figura 4.17. Se comparan los cuatro modelos con diferente cantidad de reducción de espesor. Cabe recalcar que estas dos zonas de interés se deben a que todos los extensómetros tienen la misma posición en todos modelos, ver Tabla 7.

Las curvas experimentales y numéricas de Fuerza aplicada vs deformación unitaria de los extensómetros 4 y 5 (zona de reducción de espesor localizado en el centro del panel) de todos los modelos se muestran en la Figura 4.16. Debido a la razón de aspecto del modelo ($a/b=1$), en la zona central, la falla ocurre por pandeo y no por fluencia. Claramente en las figuras 4.16 y 4.17, se aprecia el cambio de pendiente cuando al aplicarse la carga sobrepasa la fuerza crítica de pandeo elástico, de manera que, la estructura avanza más rápido hasta alcanzar la carga última. Los resultados que se destacan en esta zona son: El modelo que alcanza mayor Fuerza última tanto experimental como numérico es el modelo 2 debido a la poca pre-deformación del panel. Por el contrario, el modelo 3 presenta la menor Fuerza última, tal como se esperaba. Por tanto, la reducción de espesor del material y la pre-deformación del panel reducen la resistencia estructural del mismo.

Las curvas experimentales y numéricas de fuerza aplicada vs deformación unitaria de los extensómetros 6 y 7 (zona cercana a los bordes verticales) de todos los modelos se muestran en la Figura 4.17. El comportamiento de las curvas adopta la forma de compresión pura de planchas en su mayoría debido a que los bordes verticales se mantienen rectos. Basándose en esto, la zona cercana a los bordes verticales tiene mayor resistencia que la zona central de los paneles. Los resultados que se destacan en esta zona son del modelo 3, que alcanza la fluencia del material un poco antes de alcanzar la carga última, debido a que este modelo presenta mayor reducción de espesor que los otros.

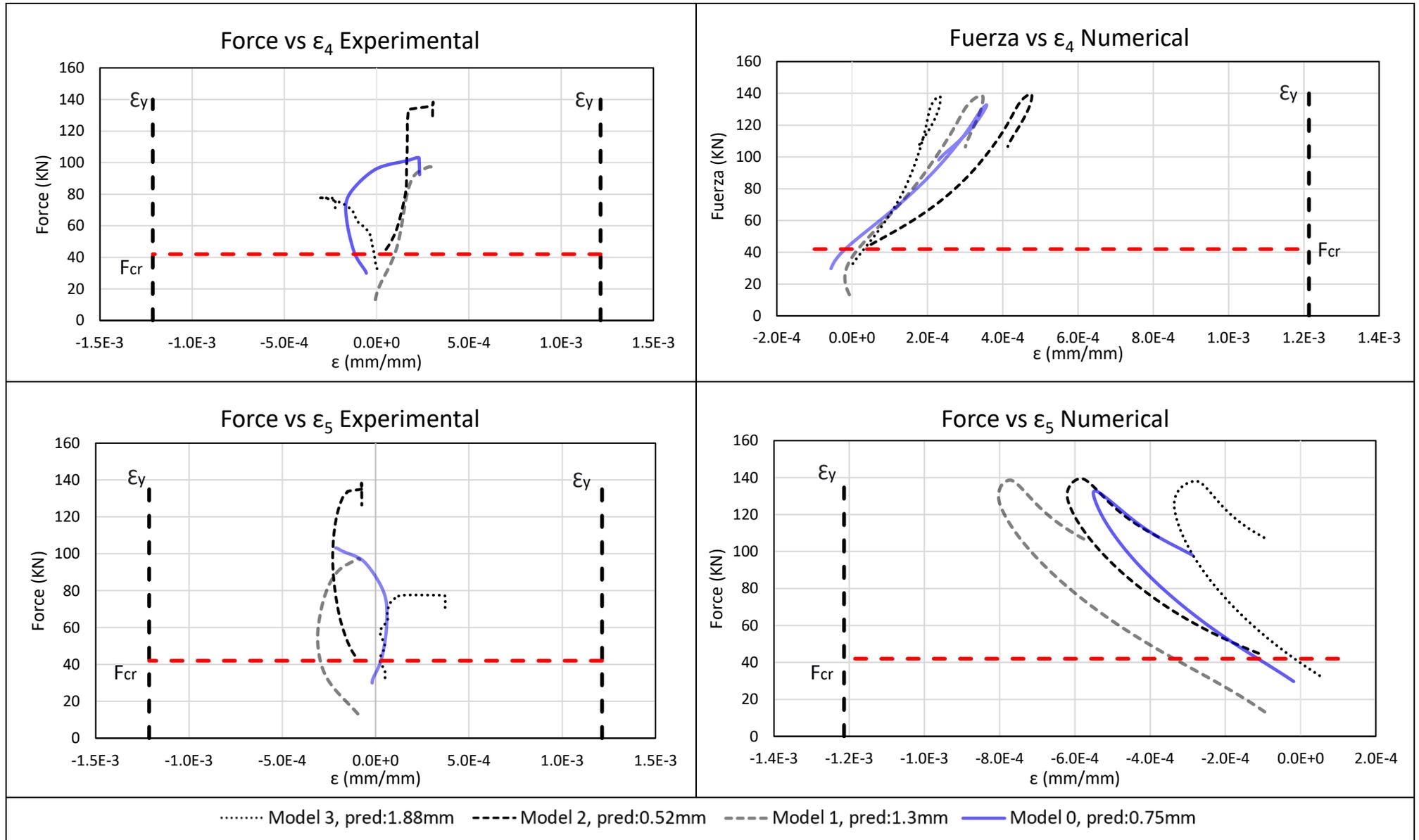


Figura 4.16 Fuerza vs deformación unitaria en la franja central de la zona de reducción de espesor

Fuente: Autor

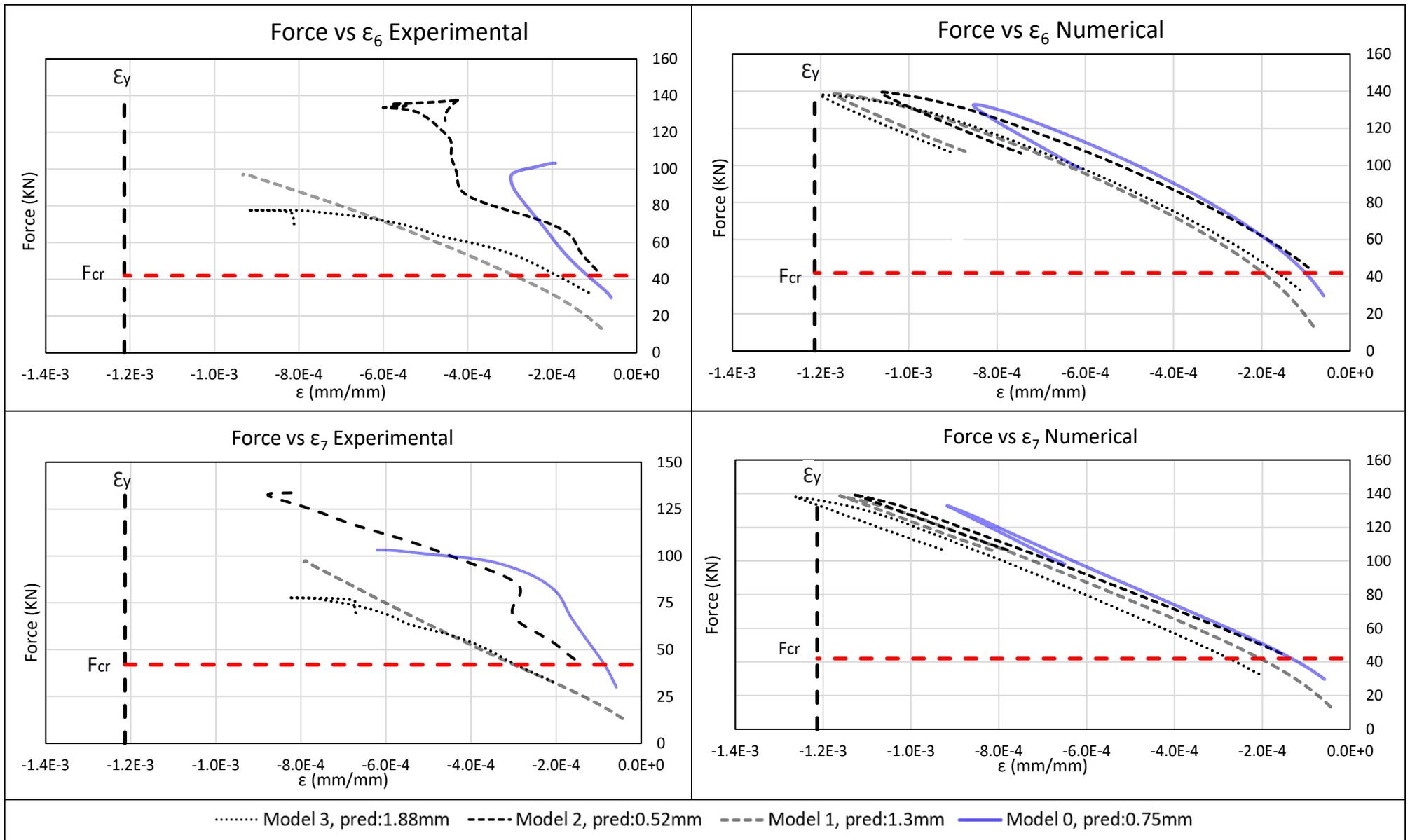


Figura 4.17 Fuerza vs deformación unitaria en franjas cercanas a los bordes verticales

Fuente: Autor

Resumen

A continuación, se muestra un resumen de los resultados obtenidos de forma experimental y numérica. En la Figura 4.18 y las Tablas 10 y 11, se presentan la carga crítica, desplazamientos laterales (en el centro del panel) y las fuerzas últimas de cada modelo respectivamente.

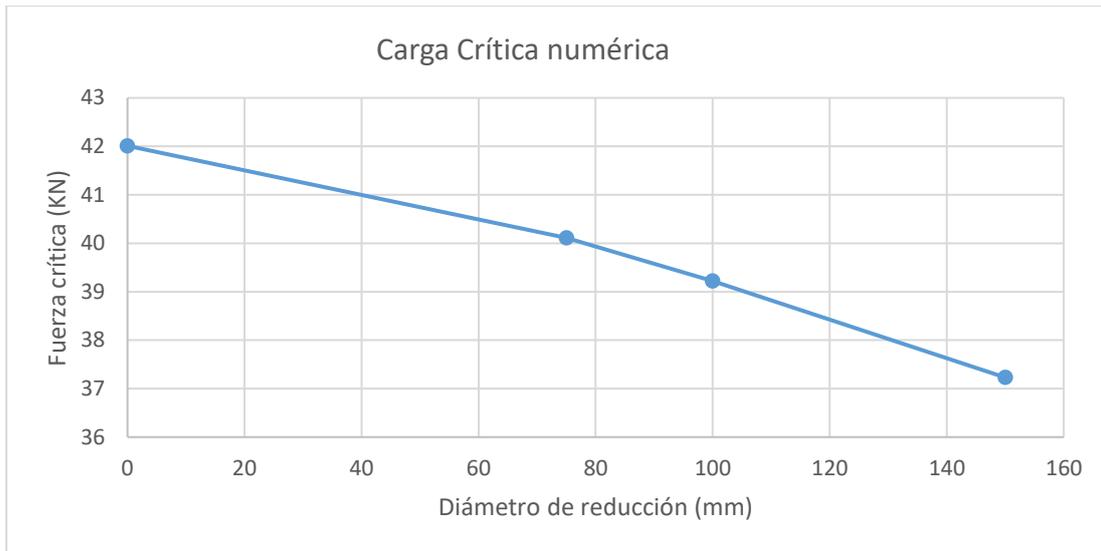


Figura 4.18 Pandeo Elástico de los modelos

Fuente: Autor

La influencia de la reducción de espesor en la carga crítica de los modelos se ve reflejada en la Figura 4.18. Claramente se aprecia una tendencia decreciente de la carga crítica al aumentar el diámetro de reducción de espesor en los modelos y manteniendo la profundidad del daño en 1 mm. Tomando como referencia la fuerza crítica del modelo 0 (sin reducción de espesor) que es 42 KN, se tiene una reducción del 5% de carga crítica para el modelo 1, 7% para el modelo 2 y 11% para el modelo 3. De manera que, dependiendo del tamaño de afectación del panel, la carga crítica disminuye y por ende mayor facilidad de avance hacia el colapso.

De la Tabla 10, se aprecia que, en los ensayos experimentales, los resultados del modelo 0, fuerza última y desplazamiento lateral final presentan mayor dispersión. Probablemente se deba a la flexión que causa movimiento de los bordes en el plano del panel, lo que hace que se salgan de las ranuras del armazón. Esto reduce la reacción en el soporte y se produce el colapso súbito con gran estruendo. Por otra parte, se destaca que tanto experimental como numérico la deformación lateral va

aumentando progresivamente hasta el modelo 2 y luego disminuye ligeramente para el 3. La máxima diferencia entre resultados experimentales y numéricos que se obtuvo fue del 32%, en el modelo 0, debido al problema mencionado previamente.

Tabla 10

Comparación Numérico-Experimental del máximo desplazamiento lateral

Modelo	Experimental			Prom. (mm)	Ansys	Diferencia %
	Equipo de Medición	Uz (mm)	Amplit. pre-deform. (mm)		Uz (mm)	
0.1	Potenciómetro	3	0.37	6.61	8.75	32%
0.2	Medidor de carátula	6	0.44			
0.3	Potenciómetro	10.82	0.75			
1.1	Medidor de carátula	10	1.58	10.43	9.44	10%
1.2	Medidor de carátula	11	2.44			
1.3	Medidor de carátula	10.3	1.3			
Con modificación de las ranuras verticales						
2.1	Potenciómetro	13.5	0.48	12.27	10.16	17%
2.2	Medidor de carátula	11.5	0.52			
2.3	Medidor de carátula	11.8	1.04			
3.1	Medidor de carátula	11.5	1.88	12.00	9.46	21%
3.2	Medidor de carátula	11	0.8			
3.3	Medidor de carátula	13.5	0.94			

Fuente: Autor

Tabla 11

Comparación Numérico-Experimental de la fuerza última

Modelo	Experimental			Prom. (KN)	Ansys	Diferencia %
	Amplit. pre-deform. (mm)	Fúltima (KN)	Fúltima (KN)			
0.1	0.37	125.48	107.43	-----	-----	
0.2	0.44	93.64		-----	-----	
0.3	0.75	103.17		132.78	29%	
1.1	1.58	108.77	102.69	-----	-----	
1.2	2.44	101.96		-----	-----	
1.3	1.3	97.35		138.62	42%	
Con modificación de las ranuras verticales						
2.1	0.48	123.76	127.28	-----	-----	
2.2	0.52	138		139.47	1%	
2.3	1.04	120.08		-----	-----	
3.1	1.88	77.68	94.99	138.06	78%	
3.2	0.8	95.07		-----	-----	
3.3	0.94	112.23		-----	23%	

Fuente: Autor

En la Tabla 11, se aprecia poca uniformidad de los resultados experimentales a medida que la reducción de espesor se incrementa. Esto se debe probablemente a que el pandeo local en los dos primeros modelos es provocado por la forma de la predeformación de la plancha y por la salida de los bordes del panel de las ranuras del armazón. Después de la adaptación realizada en las vigas verticales del armazón, se logra incrementar la fuerza máxima en el modelo 2. Además, dado que la reducción de espesor es mayor en el modelo 3, la fuerza última decrece. De forma similar se aprecia en el modelo numérico donde la fuerza última es mayor en el modelo 2 debido a la baja amplitud de predeformación. En síntesis, no existe un patrón de la fuerza última entre los modelos debido a que la resistencia estructural depende de la reducción de espesor, imperfecciones y predeformaciones del panel. La máxima diferencia que se obtiene es del 78%, en el modelo 3, debido a lo antes mencionado.

Para conocer la influencia de la predeformación en el resultado numérico se realiza otro cálculo con las mismas condiciones, pero duplicando la amplitud de la predeformación en cada modelo. Los resultados se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12
Influencia de la pre-deformación en la $F_{\text{última}}$ numérica

Model	Fcr (KN)	Predef, mm	Fúlt (KN)	$\Delta F_{\text{últ}}$ (KN)	$\Delta F_{\text{últ}}$ %
0	42.01	0.75	132.78	0.86	0.65%
0		1.5	131.92		
1	40.11	1.3	138.62	1.31	0.95%
1		2.6	137.31		
2	39.22	0.52	139.47	0.42	0.30%
2		1.04	139.05		
3	37.23	1.88	138.06	1.45	1.05%
3		3.76	136.61		

Fuente: Autor

Como se observa en la Tabla 12, al duplicar la amplitud de predeformación con forma del primer modo de pandeo la resistencia última de todos los paneles, disminuye ligeramente. En la tabla anterior se muestra la variación en fuerza última y el porcentaje de disminución. El modelo 3 presenta la mayor disminución de resistencia de alrededor del 1%, pero debe considerarse que es el modelo que tiene la mayor pre-deformación.

De manera que, la disminución en resistencia estructural por predeformación del panel es mucho menor que por la reducción del espesor del espécimen.

En esta primera parte es muy importante la participación de los refuerzos que linderan el panel. Los refuerzos son modelados como soportes simples en los bordes del panel. Del análisis realizado en esta sección, se ha observado el modo de falla de los paneles con reducción de espesor hasta el colapso. Primero se aplica carga hasta que se alcance la carga crítica del panel, por esto, se pierde resistencia estructural y se tiene grandes deformaciones laterales debido a la flexión local. Luego, la zona central no contribuye más con resistencia estructural y transmite la carga hacia los costados que se mantienen rectos por efecto de los soportes, hasta que se alcance el esfuerzo de fluencia y posterior el esfuerzo último. De esta manera se obtiene la carga última del panel, por tanto, es de suma importancia que los bordes estén completamente íntegros estructuralmente para que contribuya con resistencia en el problema tratado.

4.2 Carga última de un cilindro con espesor constante y considerando reducción local de espesor.

En el subcapítulo anterior, se logró validar el método numérico con experimentación para poder aplicarlo al problema real del colapso de un anillo reforzado de la estructura de un submarino. El problema a analizar ahora es de un cilindro de material HY80 con 6.2 metros de diámetro y 23 milímetros de espesor, el cual presenta una reducción de espesor entre cuadernas de 300 mm de diámetro y 7 mm de profundidad, tal como se muestra en la Figura 4.19. Se ha modelado tres anillos con dos cuadernas intermedias de tal manera que las condiciones de fronteras impuestas en los bordes no afecten al análisis de pandeo del anillo central, en el cual se enfocará este trabajo. En forma conservativa no se van a considerar elementos estructurales longitudinales. Modelar una parte del cilindro ayuda a reducir costo computacional y mejorar la discretización en la zona de interés.

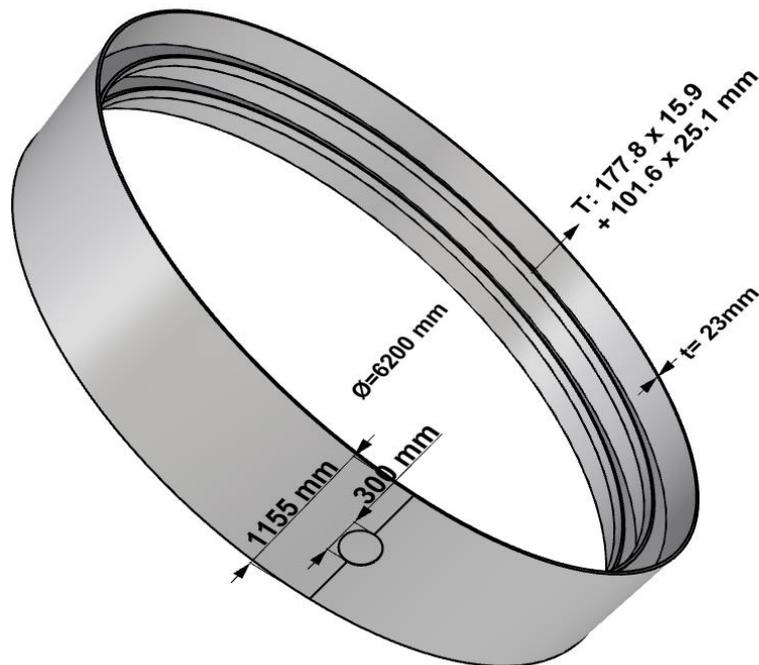


Figura 4.19 Geometría del problema real

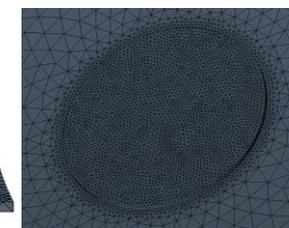
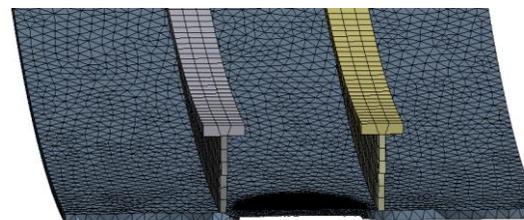
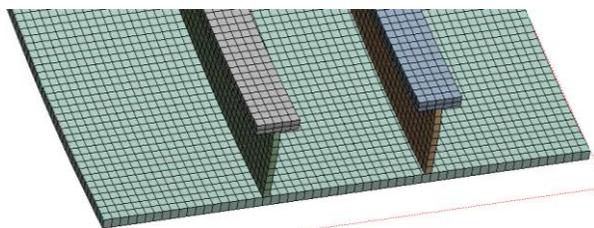
Fuente: Autor

4.2.1 Calidad de malla

Para poder confiar en los resultados numéricos se realiza una validación de la malla de los modelos con espesor constante y con reducción local de espesor respectivamente, denominados modelos 4 y 5 como se muestra en la Tabla 13. Ambos modelos usan elementos sólidos para la discretización. El modelo 4 usa elementos hexaedros de 20 mm de tamaño debido a la simplicidad de la geometría. El modelo 5 en cambio usa una combinación de elementos, tetraedros para el cilindro (debido a la reducción de espesor) y hexaedros para las cuadernas. Para el modelo 5, se usa un refinamiento de malla en la zona de reducción de espesor para captar con mejor precisión los resultados en esta zona de cambio de geometría. Como se muestra en la tabla, los criterios de validación de malla de razón de aspecto, jacobiano y calidad del elemento, se concluye que la discretización seleccionada es confiable.

Tabla 13
Calidad de malla del cilindro con espesor constante y con reducción local de espesor

Modelo	Descripción del Modelo	Descripción de Malla	#nodos	#elementos	Tiempo simulación (h)	Aspect Ratio	Jacobian	Quality mesh
						Valor ideal 1	1	1
						Valor aceptable 1 < aspect < 5	> 0.5	
Check	Check	Check						
4	Cilindro de diámetro 6.2 metros, longitud de 1.15 m, espesor de 23 mm y 2 cuadernas intermedias. No presenta reducción de espesor	Hexaedros con nodos intermedios: Malla general de 20 mm	645693	92497	9.70	min: 1.1 max: 3.6 prom:1.4	min: 0.3 max:1 prom:0.98 91% elementos > 0.5	min: 0.61 max: 0.99 prom:0.88 72.2% elementos > 0.75
5	Cilindro de diámetro 6.2 metros, longitud de 1.15 m, espesor de 23 mm y 2 cuadernas intermedias. Presenta reducción de espesor en la plancha entre cuadernas, diámetro de 300 mm y profundidad de 7 mm.	Tetraedros para el cilindro y hexaedros para las cuadernas: Malla general de 30 mm con refinamiento en la reducción de espesor de 5mm en un diámetro concéntrico de 300 mm	558225	264554	6.29	min: 1.1 max: 23 prom:1.84 94 % elementos < 5	min: 0.3 max: 1 prom:0.99 95% elementos > 0.5	min: 0.1 max: 0.99 prom:0.83 84 % elementos > 0.75



Fuente: Autor

4.2.2 Aplicación de la carga

Para conocer la fuerza de compresión y presión crítica de pandeo de la estructura, se realiza el cálculo del pandeo elástico de los modelos con espesor constante y con reducción de espesor en el programa Ansys. El material asignado a los modelos corresponde al acero HY80, el cual presenta las siguientes propiedades mecánicas, (Bogdan & Radosław, 2021): $E=206\text{Gpa}$, $\nu=0.3$, $\sigma_y = 605\text{ Mpa}$, y, $\sigma_u = 713\text{ Mpa}$. Las condiciones de frontera impuestas en los modelos se detallan en la Figura 4.20. En el extremo izquierdo se tiene soporte fijo, es decir restricción de movimiento en los tres ejes. En el extremo derecho se restringe el movimiento en “y” & “z”, y se les permite moverse axialmente. Estas condiciones de borde permiten el análisis de pandeo en la zona de interés, que es el anillo central. Además, para simular la carga hidrostática externa a la que el cilindro está sujeto, se aplican presión normal sobre el cilindro y carga axial (proporcional a la presión) sobre el extremo derecho.

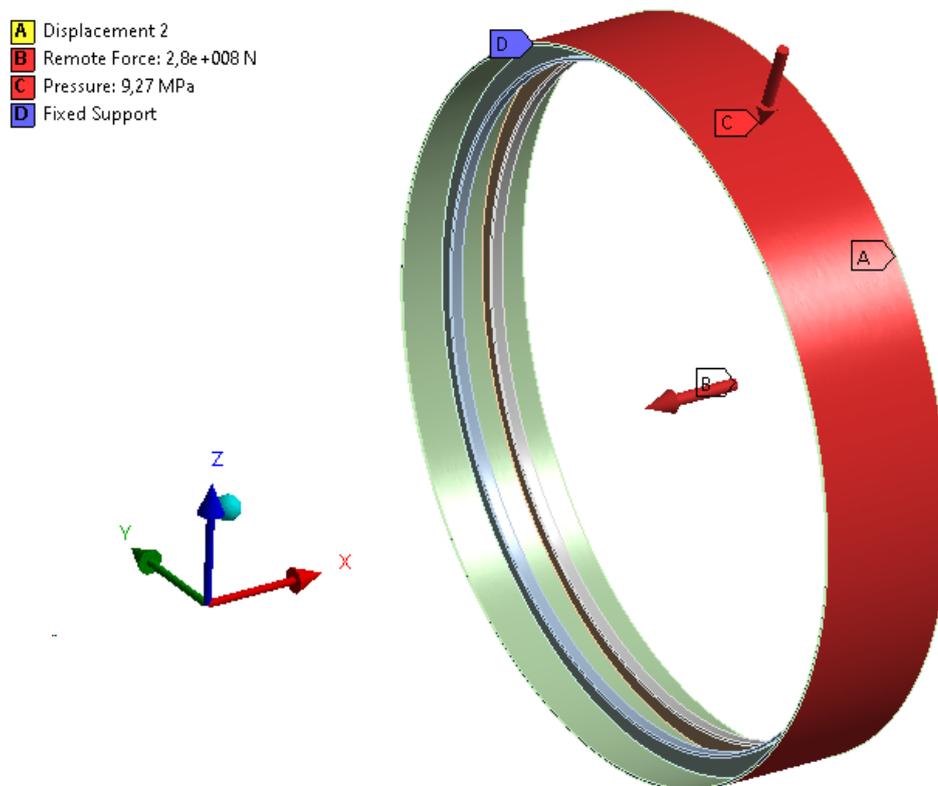


Figura 4.20 Condiciones de frontera y cargas

Fuente: Autor

4.2.3 Pandeo

El primer modo de pandeo en los dos modelos del cilindro se muestra en la Figura 4.21 junto con estimaciones de la carga crítica. En el modelo 4 se observan 8 lóbulos alrededor de la circunferencia del cilindro, característica típica de pandeo local (Cho et al., 2018). La presión crítica obtenida de forma numérica es muy cercana al valor obtenido por la formulación de “David Taylor Model Basin (DTMB)” ecn. (2.7), la cual fue presentada en el cap. 2. Para el modelo 5, la presión crítica de pandeo disminuye en un 5% debido a la reducción de espesor. El modelo 5 no presenta lóbulos, puesto que el pandeo se centra en la zona de afectación. Debido a las dimensiones de la estructura del submarino, se tiene pandeo elástico dado que el esfuerzo crítico es mucho menor al esfuerzo de fluencia. También es razonable porque la estructura es similar a la cubierta en compresión de un buque con cuadernaje transversal.

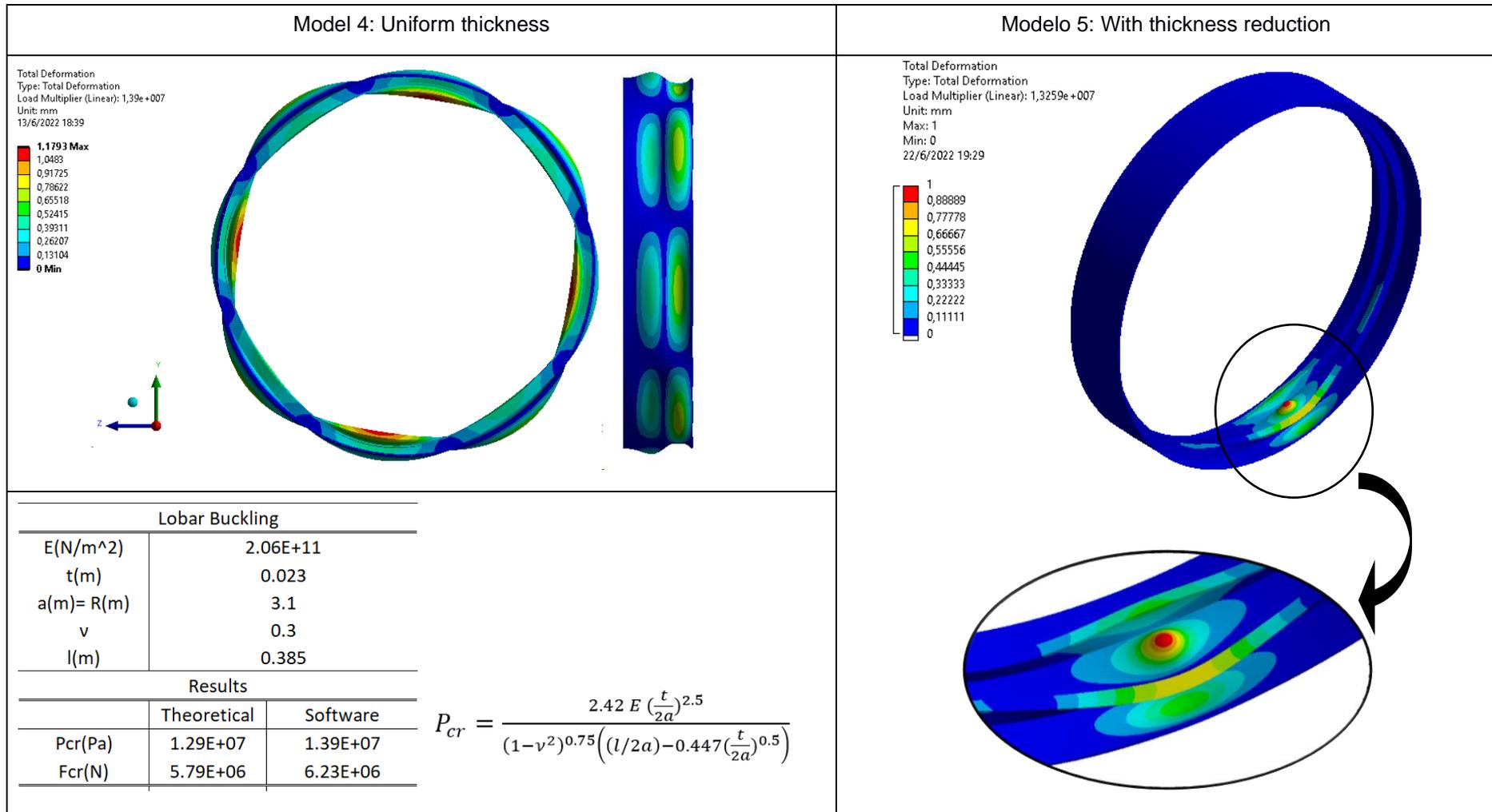


Figura 4.21 Pandeo Elástico de los modelos 4 y 5.

Fuente: Autor

4.2.4 Carga última

En el subcapítulo anterior se obtuvo que la disminución de la carga última por predeformación no era significativa. Dicho esto, en el presente cálculo se considera una predeformación del 0.01 mm como amplitud del primer modo de pandeo, solo para iniciar el cálculo no lineal. Además, se ingresa la curva plástica (6 puntos definen la curva) del acero HY80 como parte de la no linealidad del análisis, Figura 4.21.

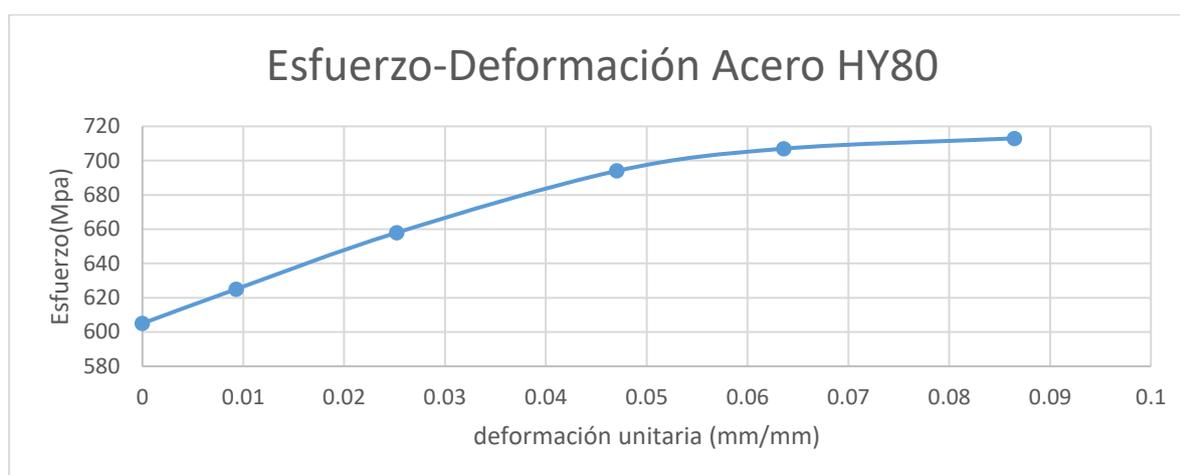


Figura 4.22 Plasticidad del acero HY80

Fuente: Bogdan & Radosław, 2021

El método numérico aplicado para resolver este problema no lineal es el de Newton-Raphson con estabilización no lineal. Para cada simulación se activa la estabilización no lineal constante que mantiene un factor de amortiguamiento durante cada subpaso del paso de carga total (ANSYS, 2009). Esta fuerza de estabilización ayuda a la convergencia en cada iteración del programa. La desventaja de este método es que no detecta pendientes negativas en la curva Fuerza vs desplazamiento. Por ello, los siguientes resultados se presentan hasta la carga última de cada modelo.

La Figura 4.24 muestra la deformación total de los modelos 4 y 5, cuando se aplica simultáneamente carga lateral y axial. El modo de falla que se observa es por pandeo elástico, debido a la razón de aspecto de la estructura. Esto ocasiona pérdida de resistencia estructural, lo cual se aprecia en el cambio de pendiente (en la gráfica fuerza vs desplazamiento) cuando la fuerza aplicada sobrepasa dicha fuerza. Luego, la carga avanza más rápido hasta el colapso. A pesar que la estructura falla por pandeo

elástico, se puede extraer más resistencia estructural debido a la influencia de la curvatura y la combinación de plancha más refuerzos.

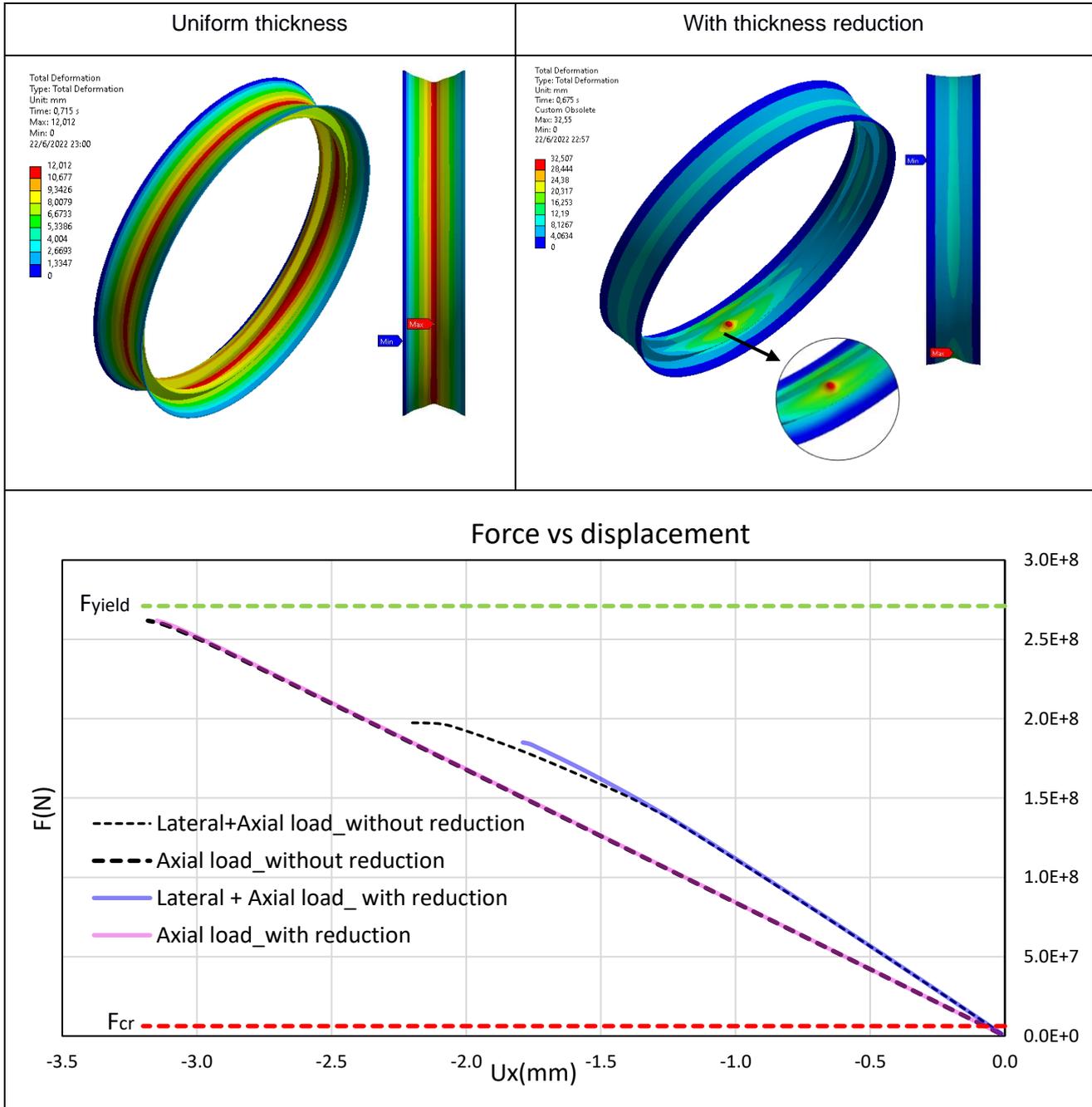


Figura 4.23 Post Pandeo de los modelos 4 y 5

Fuente: Autor

Para observar la influencia de la carga lateral sobre la estructura, se realizan varias simulaciones con los modelos 4 y 5 con carga axial y luego combinando la carga axial más la carga lateral. La fuerza última registrada del cilindro con espesor constante y sujeto a carga axial es de $2.63e8$ N, y considerando la reducción de espesor, este valor

disminuye en un 0.5%. Para el caso de carga axial más carga lateral se obtiene la fuerza máxima de $1.97e8N$, y con la influencia de la reducción de espesor disminuye en un 6%. Si se analiza la influencia de la carga lateral, se obtiene un 25% de disminución de la carga última en caso de espesor constante y una disminución del 29% para el caso de la reducción de espesor. Por tanto, se tiene una mayor influencia sobre la carga última de la carga lateral que la reducción de espesor.

Para explicar el comportamiento de la estructura sometida a carga axial y lateral hasta llegar a la carga máxima, se ha graficado el esfuerzo equivalente y en dirección axial en el tope (superficie interna del cilindro) y fondo (superficie externa del cilindro) de la plancha en tres pasos de carga (33%, 66% y 100% de la carga última). La Figura 4.24 muestra las distribuciones de esfuerzo equivalente y esfuerzo normal "x" en el cilindro con espesor constante. Analizando el panel entre cuadernas, se observa que el esfuerzo equivalente aumenta más rápido en el fondo que en el tope de la plancha. Esto se debe a que en el fondo de la plancha se tiene la combinación de del esfuerzo de flexión y compresivo. Por tanto, al ir aumentando la carga externa hasta alcanzar la carga última de la estructura, la plancha alcanza la cedencia del material desde el fondo prolongándose hasta el tope. Además, se tiene la distribución de esfuerzo normal en la plancha cuando se ha alcanzado la carga última, que muestran que el espacio entre cuaderna está en compresión, siendo mayor en el fondo que en el tope.

De forma similar en la Figura 4.25 se muestran la distribución del esfuerzo equivalente y del esfuerzo normal "x" en el cilindro con reducción de espesor localizado. Del mismo modo que el caso anterior el esfuerzo equivalente aumenta más rápido en el fondo que en el tope de la plancha, pero ahora existen fluctuaciones en el espacio entre cuadernas debido a la reducción de espesor. Además, cuando se alcanza la carga última se observa que el esfuerzo equivalente sobrepasa el esfuerzo de cedencia a diferencia del caso anterior. Por otro lado, se tiene cambios de la distribución de esfuerzo normal en el tope y fondo de la plancha cuando se ha alcanzado la carga última de la estructura. Los cambios consisten en que zonas cercanas a la reducción de espesor están en compresión y otras en tensión, como resultado de la redistribución de esfuerzos y flexión local de la plancha.

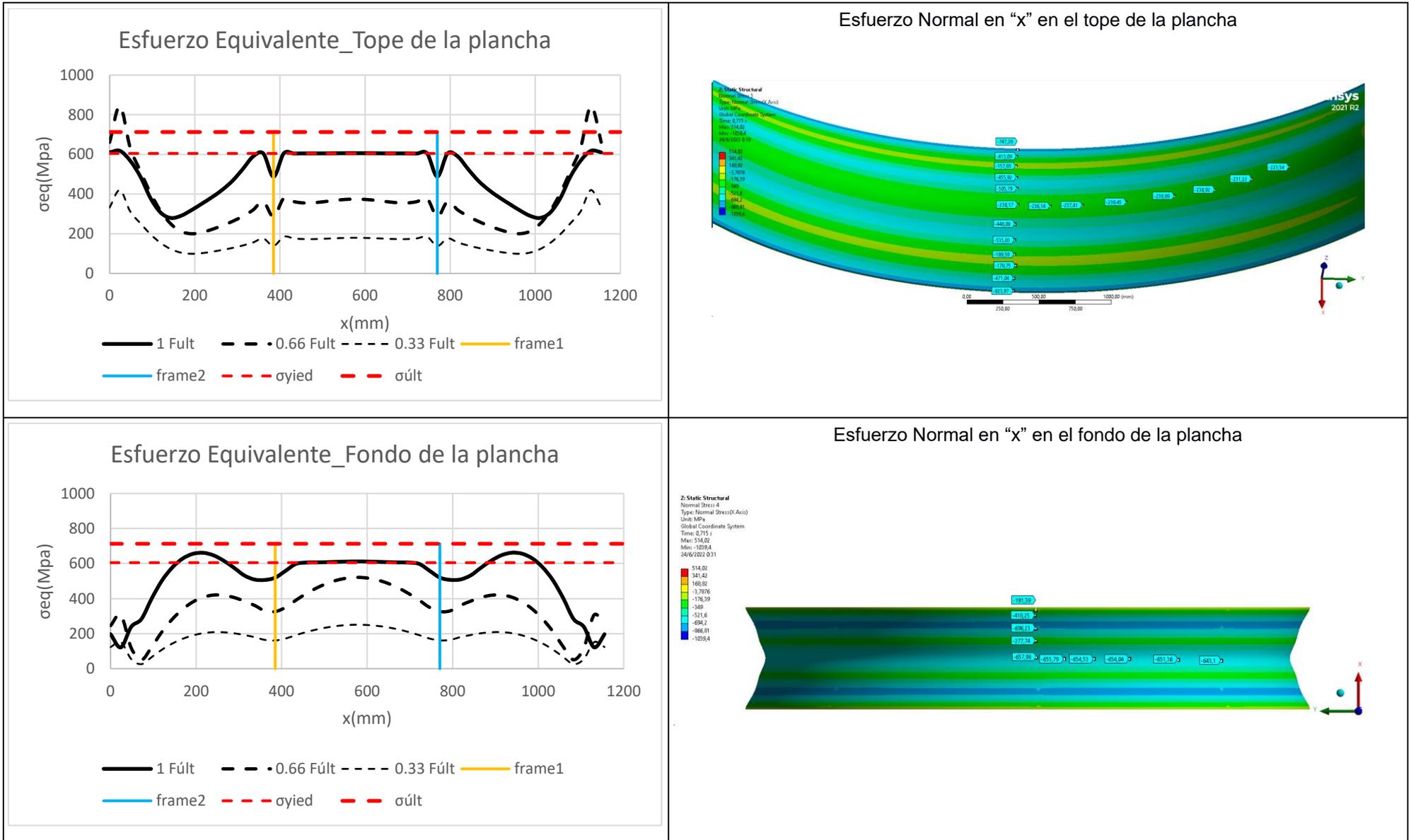


Figura 4.24 Distribución de Esfuerzo Equivalente y Esfuerzo Normal en el modelo 4

Fuente: Autor

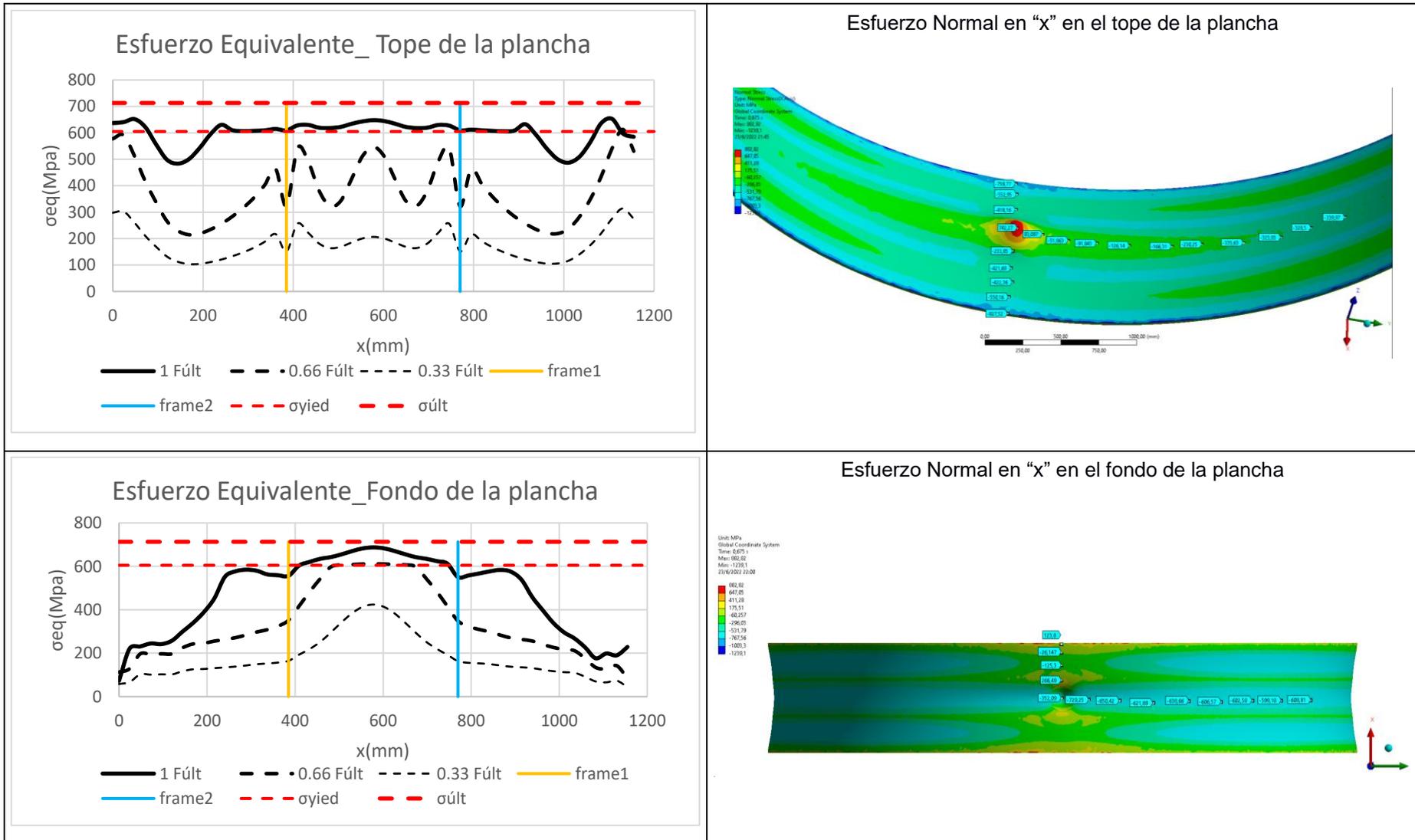


Figura 4.25 Distribución de Esfuerzo Equivalente y Esfuerzo Normal en el modelo 5

Fuente: Autor

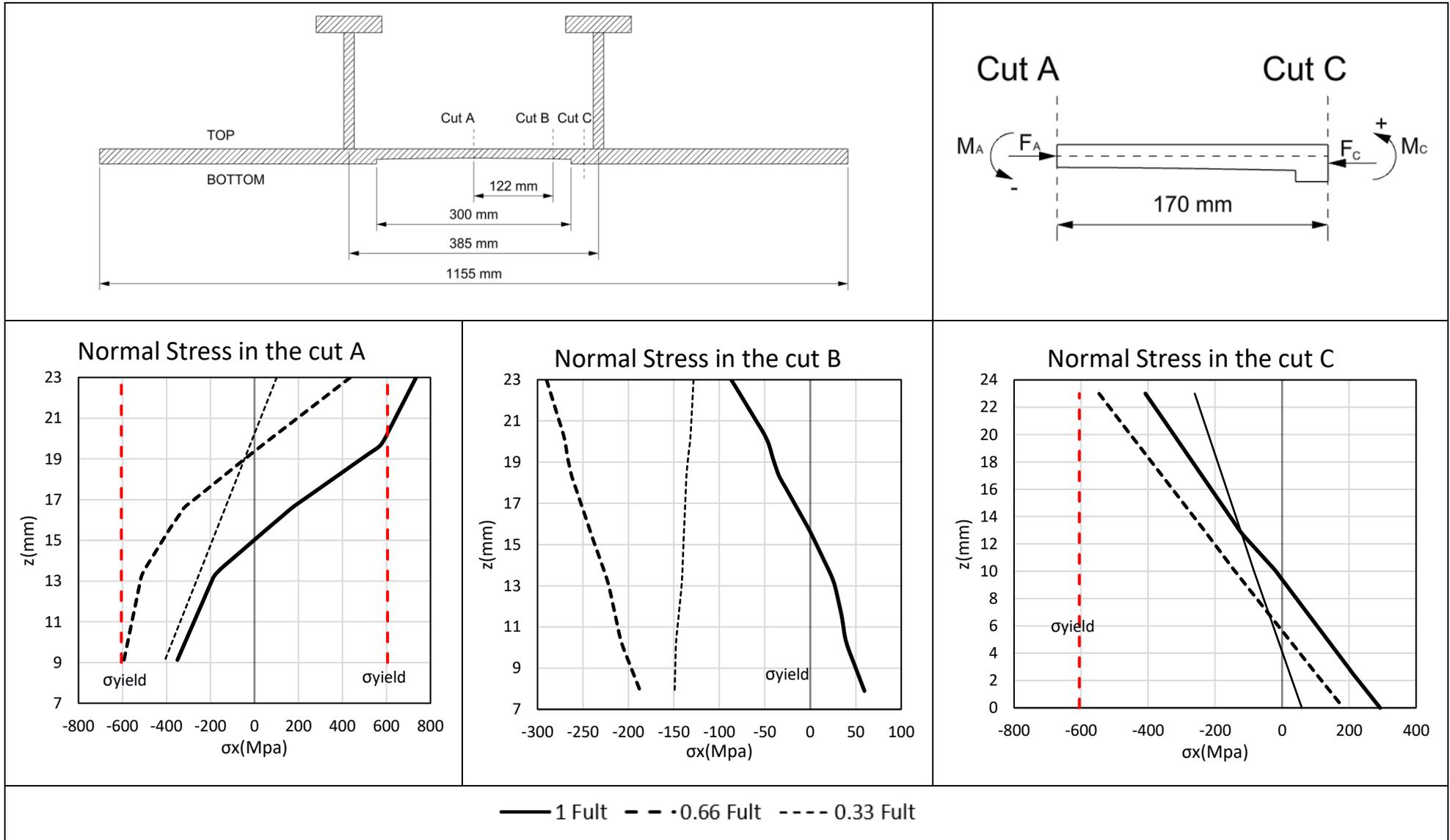


Figura 4.26 Distribución de Esfuerzo axial en dirección del espesor en los modelos 4 y 5

Fuente: Autor

Para entender la influencia de la reducción de espesor sobre la estructura, se ha graficado el esfuerzo normal en “x” a lo largo del espesor en tres cortes diferentes. La Figura 4.26 muestra el detalle de los cortes y la flexión local en el espacio entre cuadernas. Los tres cortes muestran el esfuerzo normal en “x” en los tres pasos de carga, 33, 66 y 100% respecto de la carga última. En el corte A, gran parte del fondo la plancha está en compresión en los primeros dos pasos de carga, caso contrario sucede cuando se alcanza el 100% de la carga debido a la pérdida de resistencia en la zona. De forma similar, se observa en el corte C que la parte del tope de la plancha está en compresión en los tres pasos de carga. Un diagrama de fuerzas y momentos del corte A y C en la Figura 4.26, ayuda a comprender las distribuciones de esfuerzo normal mencionadas. La flexión local ocurre debido a la excentricidad de fuerzas, lo cual produce un momento negativo en el corte A y momento positivo en el corte C, generando así un cambio de curvatura en estas dos regiones. Como en el corte A, la parte del fondo está en compresión y en el corte C está en compresión la parte del tope de la plancha, significa que en medio de este tramo debe notarse el cambio de curvatura, es decir una distribución relativamente uniforme de compresión en todo el espesor, lo cual se evidencia en corte B.

4.2.5 Influencia de la reducción de espesor y curvatura

Para analizar la influencia de la reducción localizada de espesor y curvatura en el cilindro, se desarrollaron otros modelos numéricos (modelos 6 y 7) con mayor reducción de espesor y sin curvatura respectivamente, Figura 4.27. De forma general, la deformación total en el espacio entre cuadernas aumenta a medida que aumenta la reducción de espesor y si se desprecia la curvatura de la estructura. La Figura 4.28 muestra la diferencia de carga última de los modelos 4, 5, 6 y 7. Tomando como referencia la carga última del modelo con espesor de constante, $F_{últ} = 1.97e8N$, se tiene una reducción de carga máxima del 6.09% en el modelo 5, 6.90% en el modelo 6 y 90.1% para el modelo 7. El modelo 7 tiene una reducción drástica en resistencia debido a que, por efecto de la ausencia de curvatura, la estructura pandea elásticamente avanzando rápidamente al colapso. En conclusión, se tiene que la reducción de espesor reduce la capacidad de soportar carga externa en el cilindro y definitivamente la curvatura del modelo influye altamente en la resistencia estructural última.

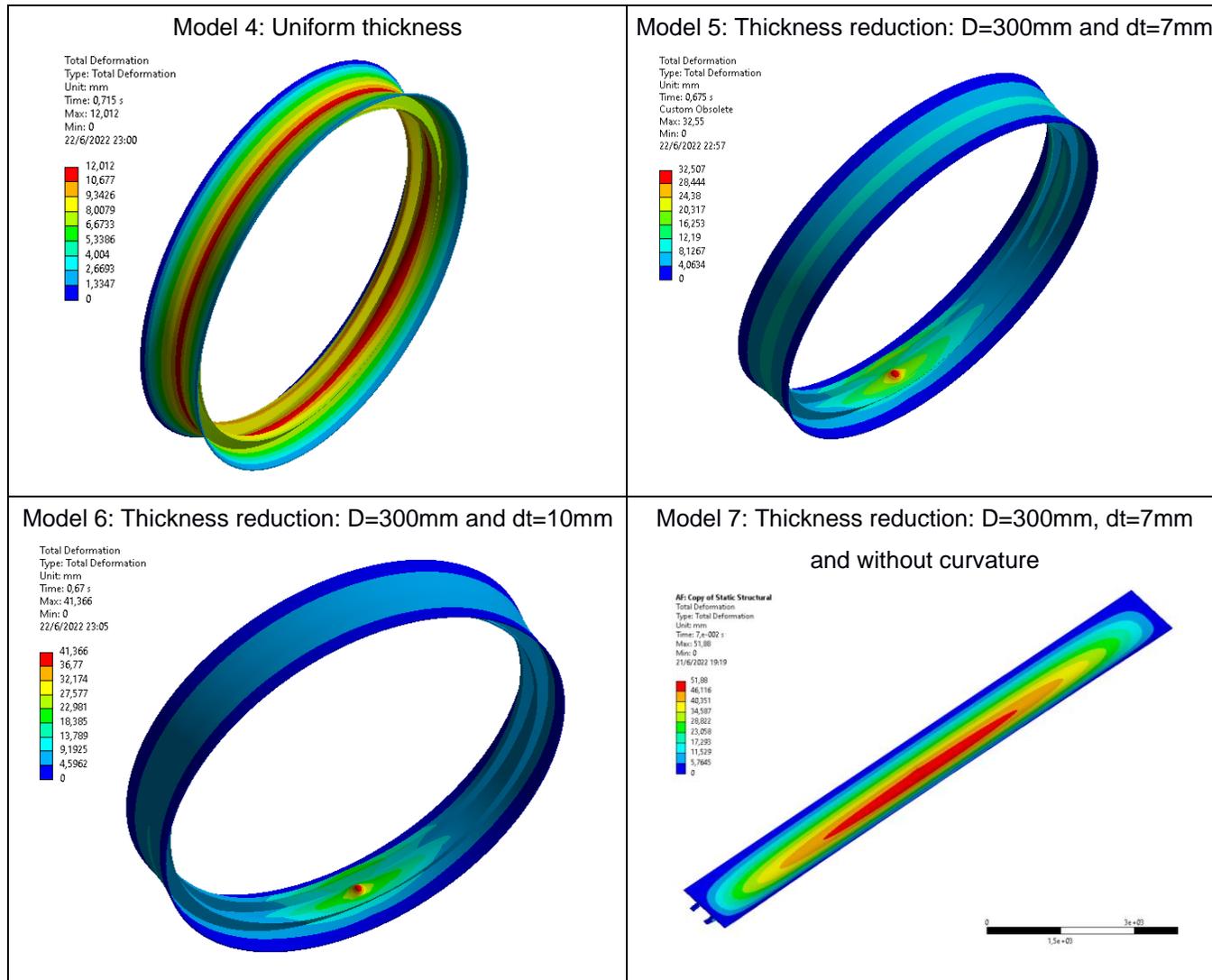


Figura 4.27 Modelos Numéricos_ Influencia de reducción espesor y curvatura

Fuente: Autor

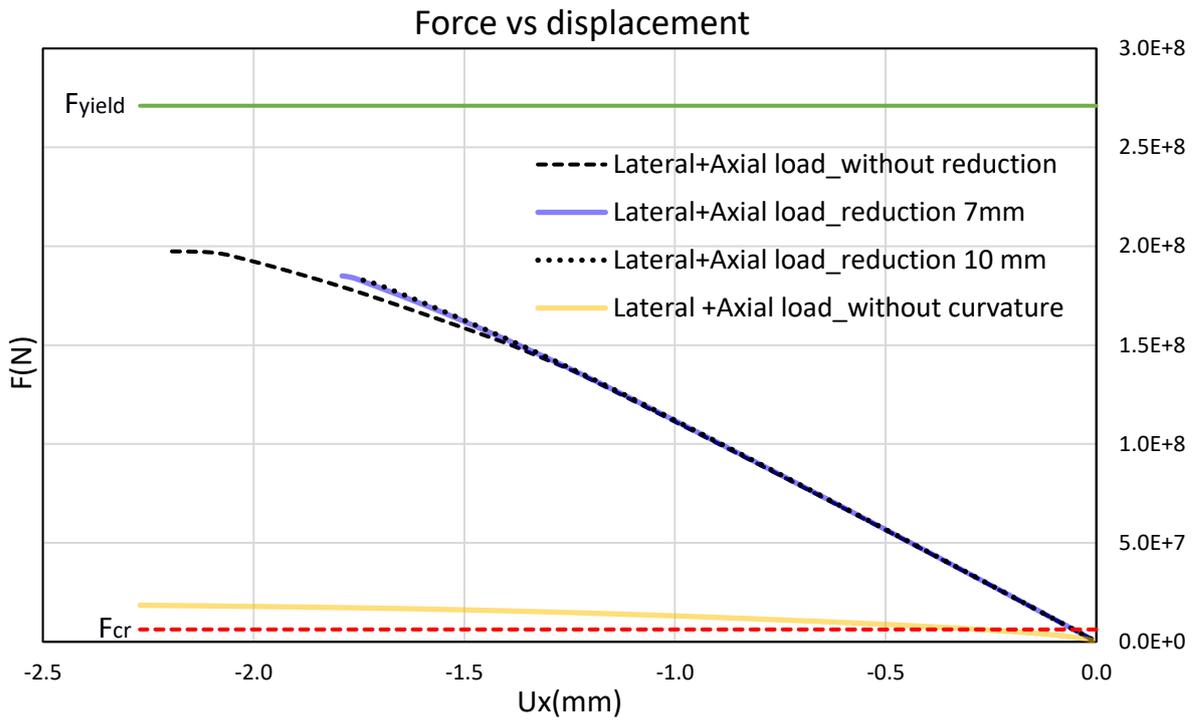


Figura 4.28 Influencia de la reducción y curvatura sobre la carga última
Fuente: Autor

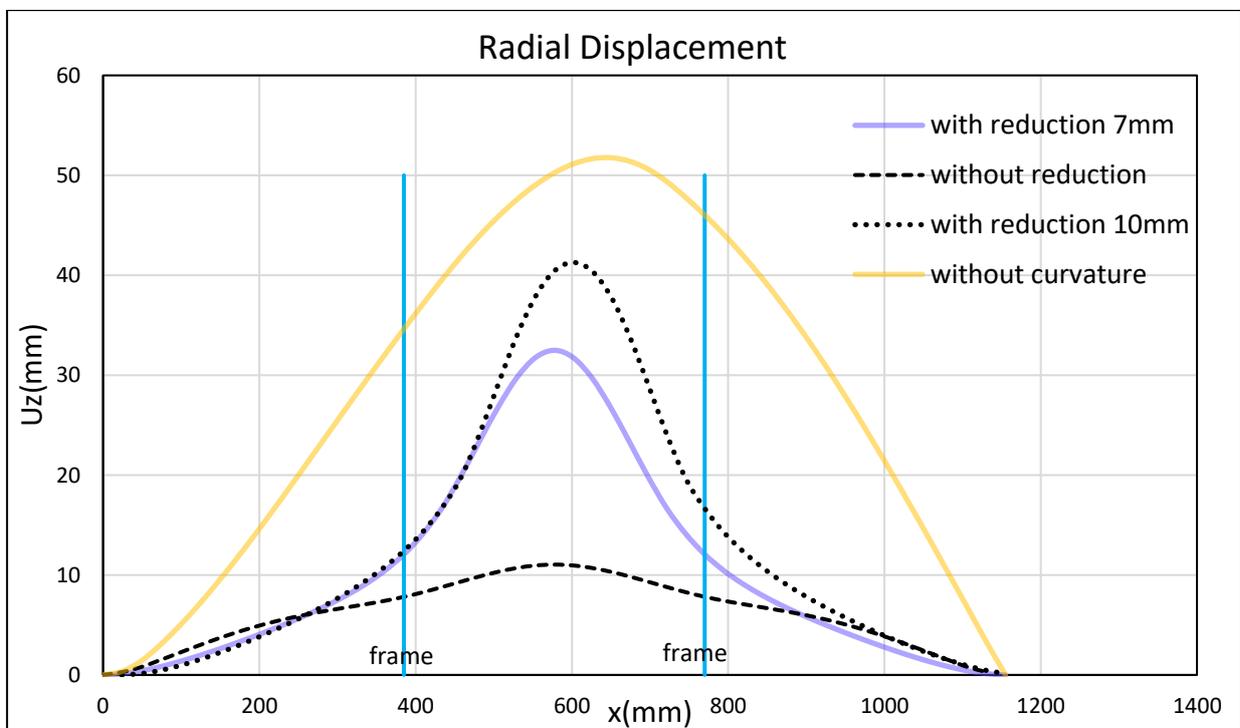


Figura 4.29 Desplazamiento lateral de los modelos
Fuente: Autor

La Figura 4.29 presenta el desplazamiento lateral de los modelos 4, 5, 6 y 7 cuando la estructura ha alcanzado su carga última. Para los modelos con curvatura (4, 5 y 6) se distingue la contribución de los refuerzos en rigidez de la estructura. Además, debido a la reducción de espesor en el espacio entre cuadernas, se tiene un cambio de curvatura ocasionado por la flexión local discutida con anterioridad. El modelo 7, presenta una gran reducción de rigidez debido a que el modelo no presenta curvatura, obteniendo así mayor deformación lateral que los otros modelos. En definitiva, debido a la influencia de reducción de espesor y la influencia de la curvatura, la deformación lateral aumenta significativamente.

La Figura 4.30 muestra la profundidad límite de operación de diferentes condiciones de fallas en los modelos 4, 5, 6 y 7. Dado que la estructura falla por pandeo elástico se tiene bajos valores de profundidad comparado con la fluencia y colapso de los modelos. Tomado como referencia la profundidad de operación para que falle elásticamente el modelo con espesor constante, 21m, se tiene una reducción de la profundidad de operación del 5% para el modelo 5, 15% en el modelo 6 y 84% en el modelo 7. Como se ha mencionado con anterioridad, la reducción de espesor y la curvatura en la estructura influyen en la resistencia estructural y por ende limita la profundidad de operación.

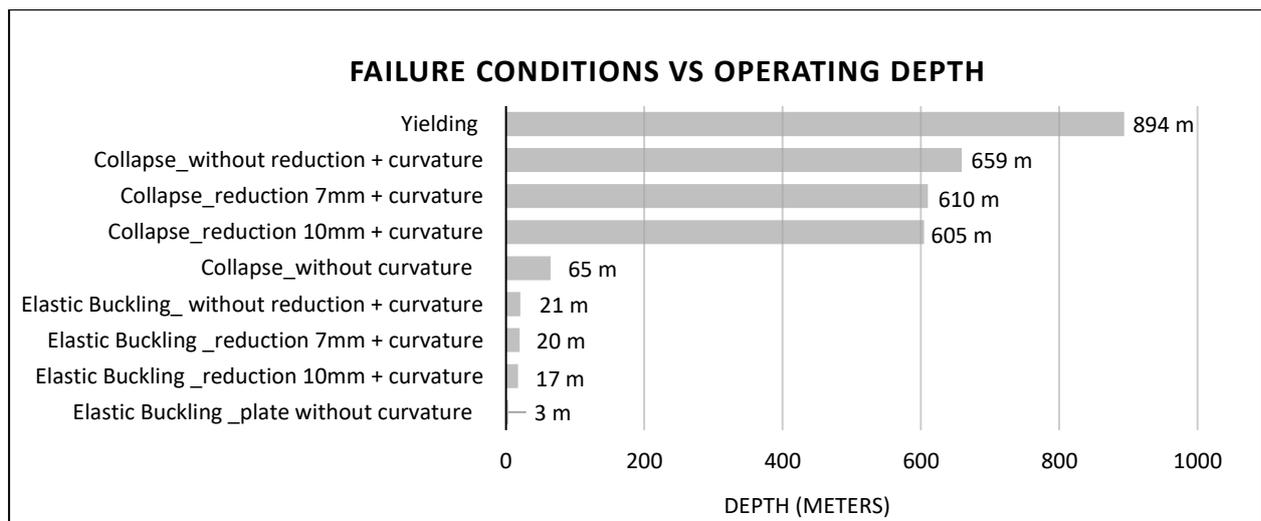


Figura 4.30 Profundidad de operación de diferentes condiciones de falla

Fuente: Autor

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se ha analizado la carga que sobrepasando el pandeo lleva al colapso a un cilindro, considerando la influencia de reducción localizada de espesor. Se emplea métodos numéricos (MEF) y experimentales. Para alcanzar esta meta, se dividió el trabajo en dos etapas. Primero, se analizó la respuesta última de un modelo simplificado, una plancha plana integra y considerando reducción local de espesor mediante métodos experimentales y numéricos. Esta primera etapa permitió validar los resultados del método numérico, el cual fue aplicado luego en la segunda etapa. A continuación, se analiza de forma numérica la respuesta última del cilindro integro y con reducción localizada de espesor, se consideraron grandes deformaciones y el comportamiento plástico del material. Luego de haber completado estas dos etapas, se puede concluir que:

5.1 Conclusiones

1. En la primera parte del trabajo, se observó la falla de los paneles con y sin reducción de espesor hasta el colapso por carga compresiva. Debido a la razón de aspecto de la estructura, se alcanza el pandeo en el rango elástico del material, esto es, el esfuerzo crítico es bastante inferior al de fluencia. Se observa que las variaciones de fuerza y deformación unitaria obtenidas de forma numérica y experimental muestran similitud en su comportamiento. Las zonas cercanas a los costados de las planchas muestran principalmente un comportamiento en compresión debido a que estas zonas se mantienen rectas desarrollando poca flexión por la influencia de los bordes. Por otro lado, se observa que las zonas centrales que incluyen la reducción de espesor presentan un cambio de tendencia en la curva pasando de compresión a tensión. Esto sucede por la flexión de la plancha que induce esfuerzo de tensión en una cara y el opuesto en la otra. De esta manera la zona central no contribuye más con resistencia estructural y se redistribuye la carga hacia los costados hasta que se alcance el esfuerzo de fluencia y finalmente, el esfuerzo último. De manera que el afectar el espesor de la zona central donde se produce la deflexión no influye mayormente en la resistencia última del panel. También, se observa

2. numéricamente que al duplicar la amplitud de predeformación con forma del primer modo de pandeo, la resistencia última disminuye solo ligeramente. Por lo antes mencionado, se concluye que el modelo estructural numérico es adecuado para aplicarlo en la segunda parte del trabajo.

3. En la segunda etapa, se analizó en forma numérica el problema del colapso de un cilindro construido con acero de alta resistencia sometido a presión lateral y compresión axial simultáneas. La reducción de espesor considerando un diámetro del 78% del espacio entre cuadernas y 30% de profundidad fue aplicada al modelo numérico. Se empleó el método de elementos finitos considerando grandes deformaciones y el comportamiento plástico del material, el cual fue validado en la primera etapa del trabajo. Debido a la razón de aspecto de la estructura, los modelos probados fallan por pandeo elástico, avanzando rápidamente al colapso. Esta razón se puede visualizar entre la longitud circular del cilindro dividida para la separación entre cuadernas. Se observa que, debido al pandeo el modelo numérico con espesor uniforme presenta lóbulos alrededor de la circunferencia del cilindro, mientras que, en el modelo con reducción de espesor, el pandeo se centra en la zona de afectación. Para analizar la influencia de la reducción de espesor y curvatura se calculó primero la carga crítica en pandeo y luego la carga última de los modelos cilíndricos y rectangulares. Tomando como referencia el modelo cilíndrico íntegro se tiene una reducción de carga crítica del 5% por influencia de la reducción de espesor y del 85% para un panel de plancha plana expandido rectangular con la misma reducción de espesor del anterior. En conclusión, se tiene que la reducción de espesor disminuye la capacidad de soportar carga externa en el cilindro y definitivamente la curvatura del modelo influye altamente en la resistencia estructural y por ende limita la profundidad de operación.

5.2 Recomendaciones

1. En este trabajo se emplearon métodos numéricos y experimentales. Sería recomendable aplicar métodos analíticos para su respectiva comparación.
2. El modo de falla analizado en este trabajo fue de pandeo local. Se recomienda el análisis del modo de falla de pandeo global de un submarino considerando varias formas de reducción de espesor (lineal o cuadrática en dirección longitudinal y circunferencial) mediante métodos numéricos.
3. La geometría de la reducción localizada de espesor, causa elevadas concentraciones de esfuerzos. Se recomienda el análisis de posibilidad de falla en la estructura de un submarino considerando las inmersiones durante su vida útil.

BIBLIOGRAFÍA

- Allmendinger, E. (Ed.). (1990). *Submersible vehicle system design*. SNAME.
- Ansys. (2021). *Theory Reference Ansys*.
- ANSYS. (2009). Structural Analysis Guide Release 12.0. ANSYS, Inc., 724–746.
- ANSYS. (2021). Mechanical User ' s Guide. In *Ansys* (Vol. 15317).
- Bjorhovde, R., & Tall, L. (1971). Maximum column strength and the multiple column curve concept. *Fritz Engineering Laboratory, 1971*(October).
- Bogdan, S., & Radosław, K. (2021). Material properties of hy 80 steel after 55 years of operation for FEM applications. *Materials, 14*(15). <https://doi.org/10.3390/ma14154213>
- Cho, S. R., Muttaqie, T., Do, Q. T., Kim, S., Kim, S. M., & Han, D. H. (2018). Experimental investigations on the failure modes of ring-stiffened cylinders under external hydrostatic pressure. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 10*(6), 711–729. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2017.12.002>
- Fricke, W., & Bronsart, R. (2012). Committee V.5 Naval Vessels/ Submarine Pressure Hull Structural Design. In *Proceedings of the 18th International Ship and Offshore Structures Congress: Vol. two* (pp. 201–239). <http://139.30.101.246/ISSC2012/images/stories/Proceedings/issc2012-vol1.pdf>
- Gusic, G., Combescure, A., & Jullien, J. F. (2000). The Influence of Circumferential Thickness Variations on the Buckling of Cylindrical Shells Under External Pressure. *Computers and Structures, 74*(4), 461–477. [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(99\)00053-X](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(99)00053-X)
- Hassan Ahmed Hassan, A., & Kurgan, N. (2019). Modeling and Buckling Analysis of Rectangular Plates in ANSYS. *International Journal Of Engineering & Applied Sciences, 11*(1), 310–329. <https://doi.org/10.24107/ijeas.531011>
- Kang, H., & Kim, J. (2015). Progressive Collapse of Steel Moment Frames Subjected to Vehicle Impact. *Journal of Performance of Constructed Facilities, 29*(6), 04014172. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cf.1943-5509.0000665](https://doi.org/10.1061/(asce)cf.1943-5509.0000665)
- Koiter, W. T., Elishakoff, I., & Starnes, J. H. (1994). Buckling of an Axially Compressed Cylindrical Shell of Variable Thickness. *Int. J. Solid Structures, 31*(6), 797–805.
- Lunchick, M. E. (1963). *Plastic General- Instability Pressure of Ring- Stiffened Cylindrical Shells*.
- Madenci, E., & Guven, I. (2015). *The Finite Element Method and Applications in*

- Engineering Using ANSYS* (Second ed). Springer.
- Madier, D. (2020). *Practical Finite element analysis for mechanical engineers* (First Edit). FEA Academy.
- Nguyen, H. L. T., Elishakoff, I., & Nguyen, V. T. (2009). Buckling under the external pressure of cylindrical shells with variable thickness. *International Journal of Solids and Structures*, 46(24), 4163–4168. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2009.07.025>
- Ross, C. (2011). *Pressure Vessels* (Second ed). Elsevier.
- Salerno, V., & Pulos, J. (1951). *Stress Distribution in a Circular Cylindrical Shell Under Hydrostatic Pressure Supported by Equally Spaced Circular Ring Frames - Part 1 Theory*.
- Schuman, L., & Back, G. (1931). Strength of Rectangular Flat Plates Under Edge Compression. In *NACA Technical Report No. 356* (Vol. 211, Issue 1). [https://doi.org/10.1016/s0016-0032\(31\)90371-2](https://doi.org/10.1016/s0016-0032(31)90371-2)
- Singer, J., Arbocz, J., & Weller, T. (2002). Buckling Experiments: Experimental Methods in Buckling of Thin-Walled Structures. In *Buckling Experiments: Experimental Methods in Buckling of Thin-Walled Structures* (Vol. 1). <https://doi.org/10.1002/9780470172995>
- Timoshenko, S. P., & Gere, J. M. (1963). *Theory of elastic stability* (Second ed). McGraw-Hill.
- Trilling, C. (1935). *The Influence of Stiffening Rings on The Strength of Thin Cylindrical Shells Under External Pressure*.
- Ugural, A. C., & Fenster, S. K. (2016). Advanced Mechanics of Materials and Applied Elasticity. In *Advanced Mechanics of Materials and Applied Elasticity* (Fifth Edit). <https://doi.org/10.1201/9781420057775>
- Von Mises, R. (1933). *Experimental Model Basin: The Critical External Pressure of Cylindrical Tubes Under Uniform Radial and Axial Load*.

ANEXOS

ANEXO A

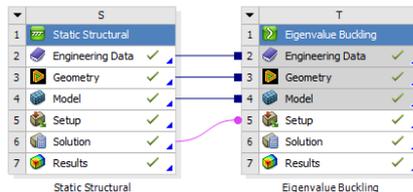
Configuración para Análisis No lineal en Ansys Workbench

Existen dos tipos de no linealidades en una estructura, imperfecciones geométricas y comportamiento no lineal del material. A continuación, se presenta una guía de cómo representar estos dos tipos de no linealidades usando *Ansys workbench*.

1. Predeformación de los especímenes

Para especificar la predeformación de geometría se deben realizar los siguientes pasos.

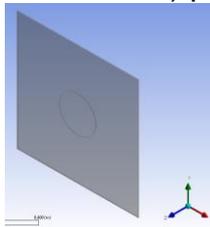
- Conectar el módulo de *Static Structural* a un módulo de *Eigenvalue Buckling*



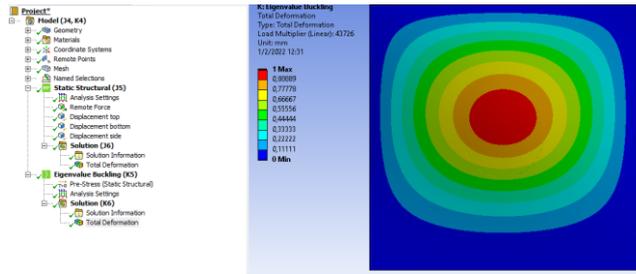
- Usar *Engineering Data* para ingresar las propiedades lineales mecánicas del material (E , $\nu=0.3$, y , σ_y)

	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	7850	kg m ⁻³
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
6	Isotropic Elasticity		
7	Derive from	Young's ...	
8	Young's Modulus	210	GPa
9	Poisson's Ratio	0.3	
10	Bulk Modulus	1.79E+11	Pa
11	Shear Modulus	8.0769E+10	Pa
12	Strain-Life Parameters		
20	S-N Curve	Tabular	
24	Tensile Yield Strength	315.42	MPa
25	Compressive Yield Strength	315.42	MPa
26	Tensile Ultimate Strength	422.22	MPa
27	Compressive Ultimate Strength	422.22	MPa

- Usar el módulo *Geometry* (*software* o similar) para crear la geometría.

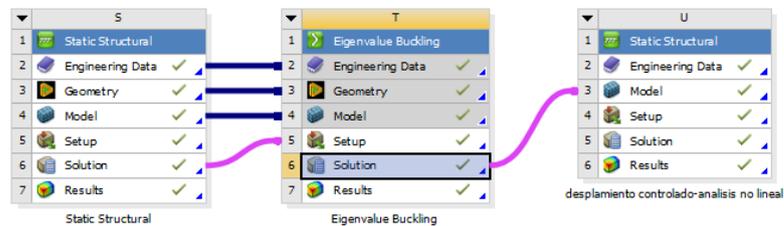


- Usar el módulo *Model* para realizar el mallado de la estructura, definir las condiciones de fronteras y colocar las cargas actuando en el sistema. Luego seleccionar el tipo de solución que desea tener (en este caso *Total Deformation*).



La carga crítica obtenida en el análisis lineal es de 43.7 KN.

- Añadir un nuevo módulo de *Static Structural* y conectarlo a la solución obtenida en *Eigenvalue Buckling*. Con la opción *Solution* seleccionada, configurar la predeformación usando la escala y modo correspondiente.

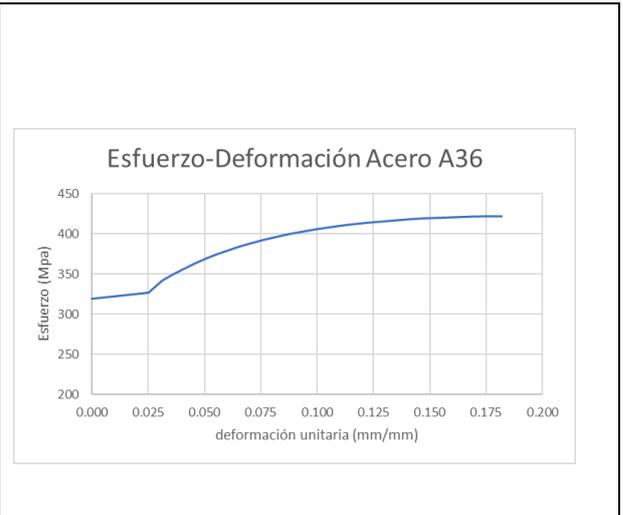
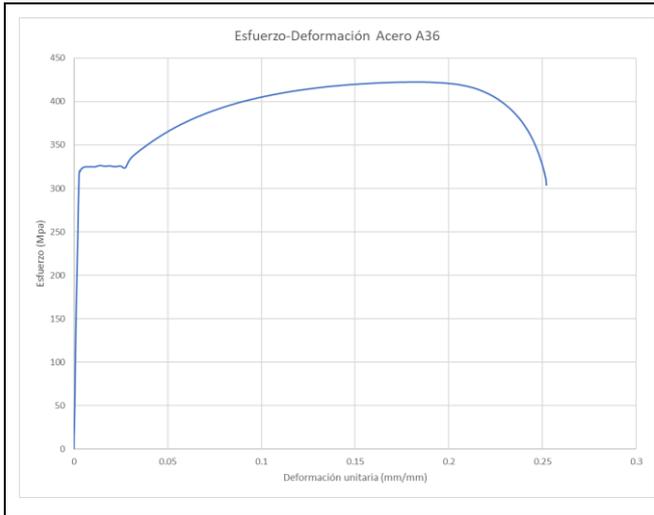


Update Settings for desplazamiento controlado-analisis no lineal	
Process Nodal Components	<input checked="" type="checkbox"/>
Nodal Component Key	
Process Element Components	<input checked="" type="checkbox"/>
Element Component Key	
Scale Factor	0,25
Mode	1

En este caso se tiene una predeformación del modo 1 con amplitud de 0.25 mm.

2. Comportamiento plástico del material

Se debe ingresar la curva esfuerzo-deformación unitaria del material. Anteriormente se había ingresado la parte lineal de esta curva, ahora se ingresa la parte plástica hasta la ruptura.

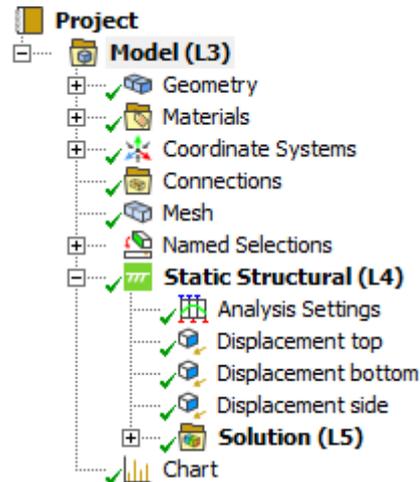


- Ingresar en *Engineering Data* del último módulo de *Static Structural* guardado y agregar al material la parte plástica de la curva de esfuerzo-deformación. Arrastre la opción *Multilinear Isotropic Hardening* y colocarlo sobre el material a usar (en este caso acero). Luego copiar y pegar los valores del archivo Excel al proyecto en Ansys.

Temperature (C)	Plastic Strain (m m ⁻¹)	Stress (MPa)
1	0	319,42
2	0	327,15
3	0,025438	327,15
4	0,025617	327,98
5	0,031196	341,64
6	0,031246	341,67
7	0,031524	342,33
8	0,031703	342,65
9	0,032956	344,72
10	0,033125	345,04
11	0,033214	345,31
12	0,036536	350,42
13	0,036715	350,67
14	0,036894	350,96
15	0,046023	363,76
16	0,046202	363,96
17	0,049961	368,6
18	0,05014	368,8

Property	Value	Unit
Material Field Variables	Table	
Density	7850	kg m ⁻³
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
Isotropic Elasticity		
Derive from	Young's Modulus ...	
Young's Modulus	210	GPa
Poisson's Ratio	0,3	
Bulk Modulus	1,79E+11	Pa
Shear Modulus	8,0769E+10	Pa
Multilinear Isotropic Hardening	Tabular	
Strain Rate Parameters		
S-N Curve	Tabular	
Tensile Yield Strength	319,42	MPa
Compressive Yield Strength	319,42	MPa
Tensile Ultimate Strength	422,22	MPa
Compressive Ultimate Strength	422,22	MPa

- Ingresar al módulo *Model* y definir nuevamente las condiciones de frontera.



- Ansys usa dos tipos métodos para resolver el problema no lineal: desplazamiento controlado y fuerza controlada.

El desplazamiento controlado usa el método de Newton-Raphson que aplica un proceso iterativo para converger a la solución. Para activar esta opción debe dirigirse a *Analysis Settings* y colocar *On* en la opción *Large Deflection*. Para mejorar la convergencia de la solución puede incrementar el valor de *Number of Substeps*, aunque esto requerirá mayor recurso computacional.

Details of "Analysis Settings"	
Step Controls	
Number Of Steps	1,
Current Step Number	1,
Step End Time	1, s
Auto Time Stepping	Off
Define By	Substeps
Number Of Substeps	100,
Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Off
Solver Pivot Checking	Program Controlled
Large Deflection	On
Inertia Relief	Off
Quasi-Static Solution	Off

Posterior a esto, configurar en *Solution* para obtener las diferentes soluciones para el análisis.

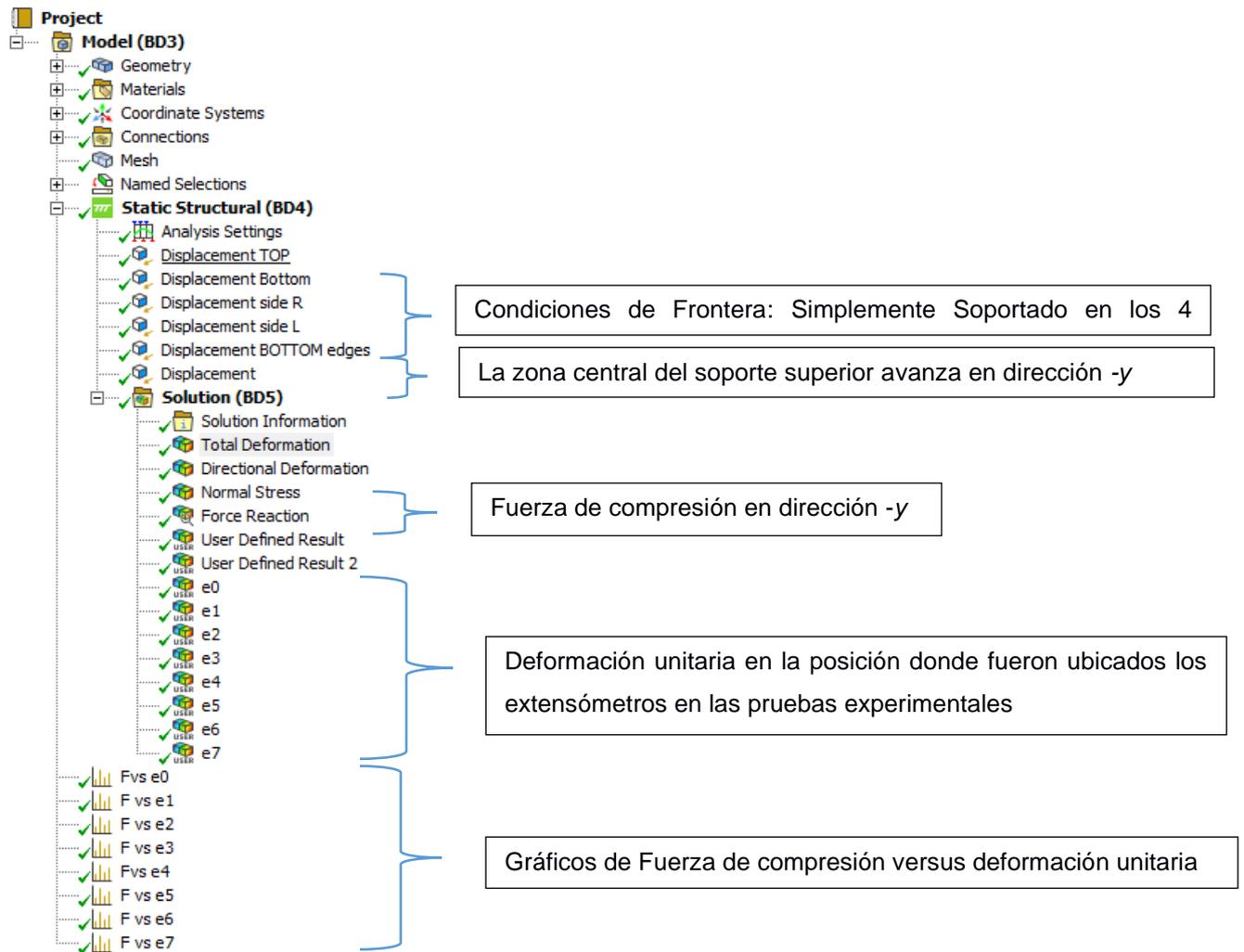


Figura 0.1 Configuración No lineal

La Figura 0.1 muestra la configuración del cálculo de carga última para el panel de plancha. Se incluyen las condiciones de frontera, el tipo de carga (*Static Structural*) y el tipo de resultados para el posterior análisis (*Solution*). Las condiciones de frontera aplicadas hacen que la plancha se comporte como simplemente soportada. La aplicación de carga en este caso es por medio del desplazamiento controlado, es decir, se configura para que la zona central del soporte superior descienda verticalmente una cantidad dada, que permita observar los efectos no lineales.

La Figura 0.2 muestra algunos resultados post-pandeo cuando la zona central del soporte superior desciende 1.5mm. Las partes a) y b) de la figura anterior

muestran cómo se deforma totalmente el panel cuando se aplica el desplazamiento controlado. La parte c) muestra la distribución de la deformación unidireccional vertical del panel. En la parte d) se tiene la curva Fuerza aplicada versus deformación unitaria total (sobre un nodo cuya posición e6 se detalla en 3.2.3). Para poder obtener la deformación unitaria total sobre un nodo, arista, cara o cuerpo se debe insertar *User Defined Result* en *Solution* y colocar los comandos *EPELY* (deformación unitaria elástica) + *EPPY* (deformación unitaria plástica) tal como se muestra en la Figura 0.3.

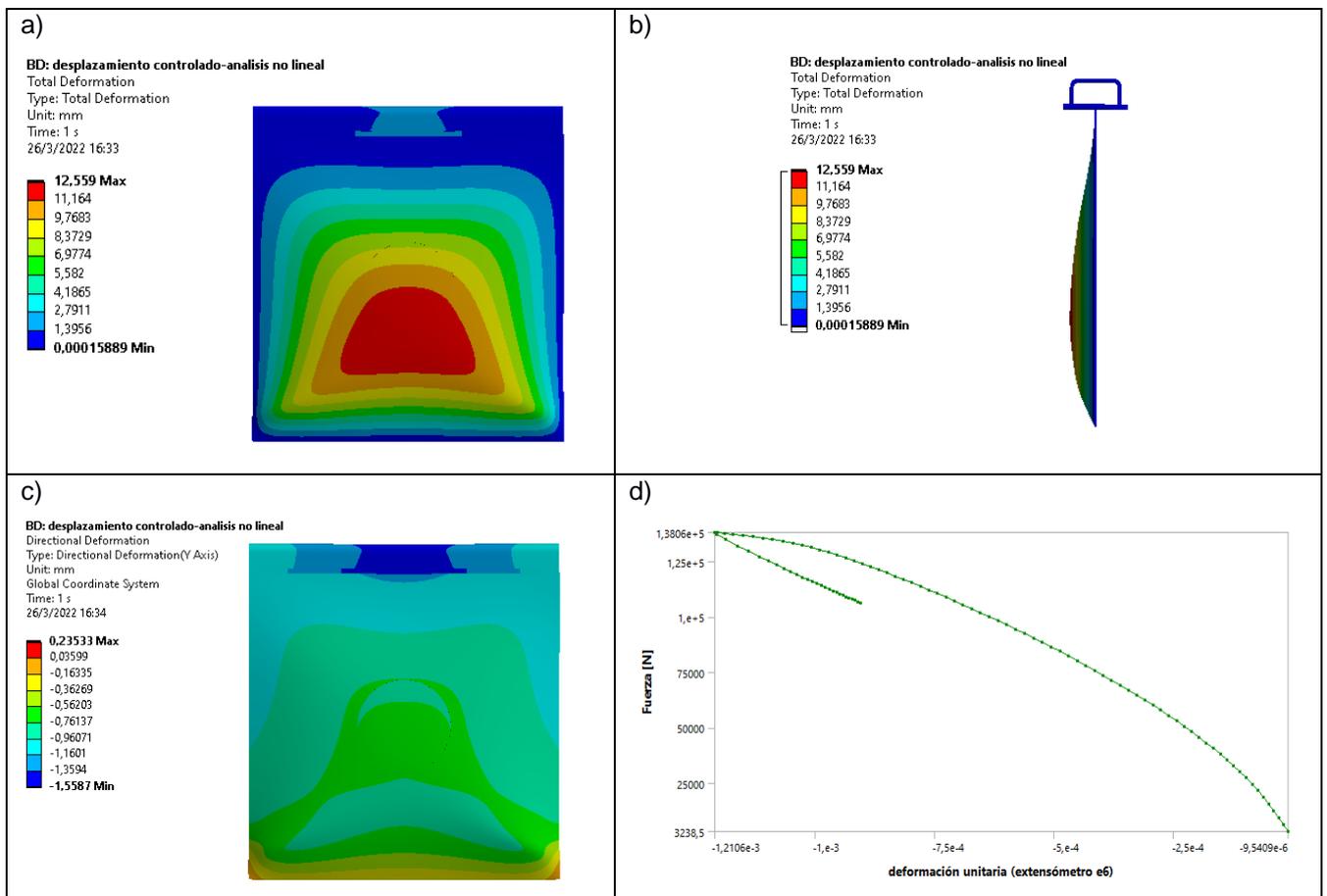


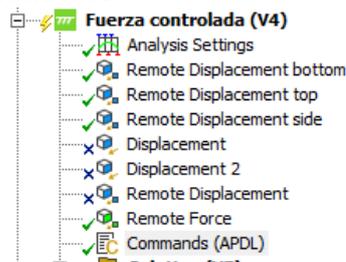
Figura 0.2 Ejemplos de resultados no lineales

Details of "e6"	
<input type="checkbox"/> Scope	
Scoping Method	Named Selection
Named Selection	e6
<input type="checkbox"/> Definition	
Type	User Defined Result
Expression	= EPELY+EPPLY
Input Unit System	Metric (mm, kg, N, s, mV, mA)
Output Unit	

Figura 0.3 Configuración deformación unitaria total

Estos comandos son usados en la interface de Ansys APDL (ANSYS, 2021), los cuales son llamados por Ansys Workbench para ejecutar el proceso y mostrar los resultados deseados.

- Para resolver el problema no lineal con un enfoque de fuerza controlada se debe usar el método de Riks o método de longitud de arco. Para activarlo se debe ingresar los siguientes comandos:



```

NSUBST, 200 !numero de subpasos
ARCLN, ON !Activar el metodo de Riks
ARCTRM, U, 2, Nodocarga, UY !límite de parada

```

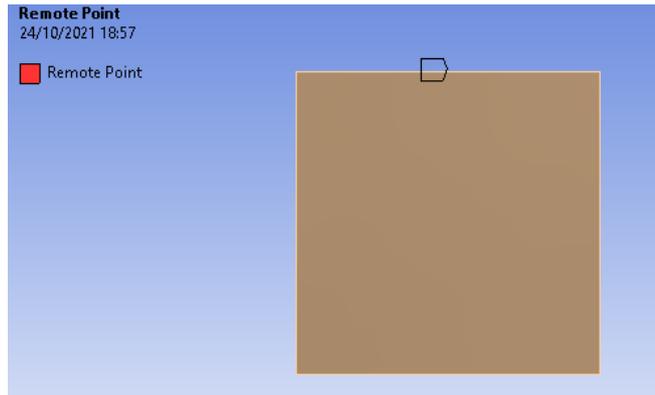
NSUBST: corresponde al # número de subpasos.

ARCLN: Activa el método de Riks

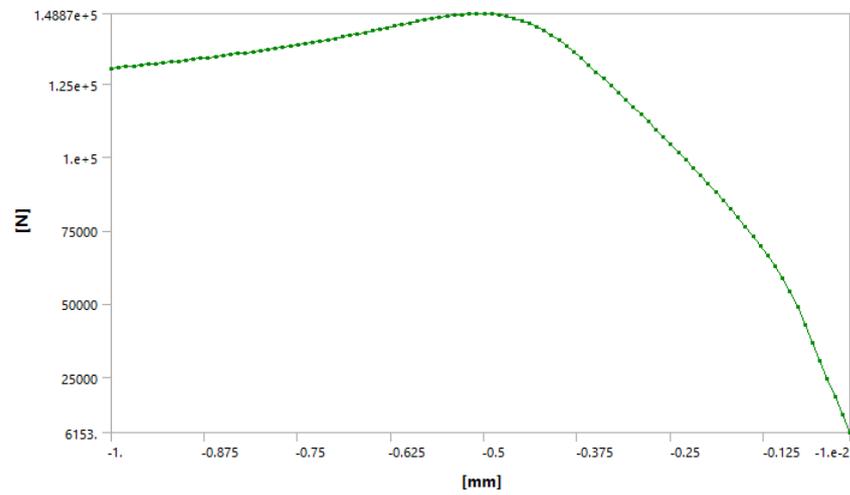
ARCTRM: Limita el resultado cuando el Nodocarga avanza 2mm en dirección "y".

Para el programa reconozca el nodo se le asigna el nombre *Nodocarga* en *Pilot Node APDL Name*. En este caso Nodocarga es un punto remoto (punto maestro) que tiene por esclavo a los nodos de la cara del tope de la plancha.





Definition	
Suppressed	No
Behavior	Deformable
Pinball Region	All
DOF Selection	Program Controlled
Pilot Node APDL Name	Nodocarga



Se puede apreciar que la gráfica de Fuerza vs desplazamiento, obtenida por el método de desplazamiento controlado es similar a la gráfica obtenida por el método de fuerza controlada.

ANEXO B

Características principales de Máquina de ensayo universal

UH-X and UH-FX Series – Loading Unit Standard Specifications

			Standard Series			
Model						
Servo valve	Type	UH-200kNX	UH-300kNX	UH-F300kNX	UH-500kNX	UH-F500kNX
Hybrid	 Type	UH-200kNXh	UH-300kNXh	UH-F300kNXh	UH-500kNXh	UH-F500kNXh
Capacity						
Max. capacity		200 kN	300 kN		500 kN	
Force range		Rangeless	Rangeless		Rangeless	
Analog indicator (option)		200/100/40/20/10/4 kN	300/150/60/30/15/6 kN		500/250/100/50/25/10 kN	
Specifications						
1. Tensile test	Max. grip span (mm)	800	800	800	900	
	Grip face for rod specimens (mm)	ø8 to 40, 1 type With liner	ø8 to 40, 1 type With liner	ø8 to 25 ø25 to 40 (option)	ø12 to 50, 1 type With liner	ø12 to 30 ø30 to 50 (option)
	Grip face for flat plate specimens (option) *3	0 to 35, 1 type (50 in width)	0 to 35, 1 type (50 in width)	0 to 20 20 to 40 (50 in width)	0 to 45, 1 type (60 in width)	0 to 30 30 to 50 (60 in width)
2. Compression test	Max. compression plate span (mm)	720	720	720	800	800
	Compression plate size (mm)	ø100	ø100	ø100	ø120	ø120
3. Transverse/bending test (option) *4	Max. support span (mm)	500	500	500	600	600
	Support diameter x width (mm)	30 x 130	30 x 130	30 x 130	50 x 160	50 x 160
	Punch tip radius (mm)	15	15	15	25	25
	Punch width (mm)	130	130	130	160	160
4. Loading speed (50/60 Hz)(mm/min) *1	Servo valve	80/100 max.	80/100 max.	80/100 max.	65/80 max.	65/80 max.
	Hybrid 	100 max.	100 max.	100 max.	100 max.	100 max.
	Drive motor					
	Servo valve	1.5 kW	1.5 kW	1.5 kW	1.5 kW	1.5 kW
	Hybrid 	2.0 kW	2.0 kW	2.0 kW	2.0 kW	2.0 kW
5. Ram stroke (mm)		200	200	200	250	250
6. Crosshead elevation speed (50/60 Hz) (Approx.)						
	Drive motor	315/380 400 W	315/380 400 W	380/450 Hydraulic motor	375/450 750 W	210/250 Hydraulic motor
7. Column span (mm)		500	500	500	650	650
8. Effective table dimensions (W x D) (mm)		500 x 500	500 x 500	500 x 500	650 x 650	650 x 650
9. Power supply capacity (Approx.) (3-phase, 200 V, 50 Hz/200 to 220 V, 60 Hz)	Servo valve	4 kVA	4 kVA	5.5 kVA	4.5 kVA	5.5 kVA
	Hybrid 	6.5 kVA	6.5 kVA	8 kVA	7 kVA	8 kVA
10. Recommended breaker capacity (3-phase, 200 V, 50 Hz/200 to 220 V, 60 Hz)	Servo valve	30 A	30 A	30 A	30 A	40 A
	Hybrid 	40 A	40 A	50 A	40 A	50 A
11. Testing machine size (W x D x H) (mm)		780 x 500 x 2000	780 x 500 x 2000	870 x 520 x 2300	960 x 650 x 2400	1060 x 700 x 2900
	Measurement controller (mm)	740 x 800 x 1800	740 x 800 x 1800	740 x 800 x 1800	740 x 800 x 1800	740 x 800 x 1800
12. Testing machine weight						
	Testing machine (kg)	900	900	1500	1700	2600
	Measurement controller (kg)	110	110	110	110	110

ANEXO C

Construcción del armazón

a) Elementos del armazón ranurados



b) Soldadura del soporte superior



c) Esmerilando impurezas



d) Soldadura de la viga transversal con la plancha base



e) Orificios para pernos 9/16"



f) Protección con pintura anticorrosiva



g) soporte superior



h) base del armazón



i) vigas horizontales



j) Pernos 9/16"



k) vigas verticales y adaptación de platinas



l) Armazón con plancha



ANEXO D

Maquinado de los paneles

La reducción localizada de espesor en cada espécimen se maquina en torno. Se fija el panel en las cuatro muelas de la máquina y la cuchilla que se usa es de tipo inserto rectangular de material widia. Luego de maquinar los especímenes con baja velocidad, se esmerila suavemente para remover imperfecciones, Figura 0.4.

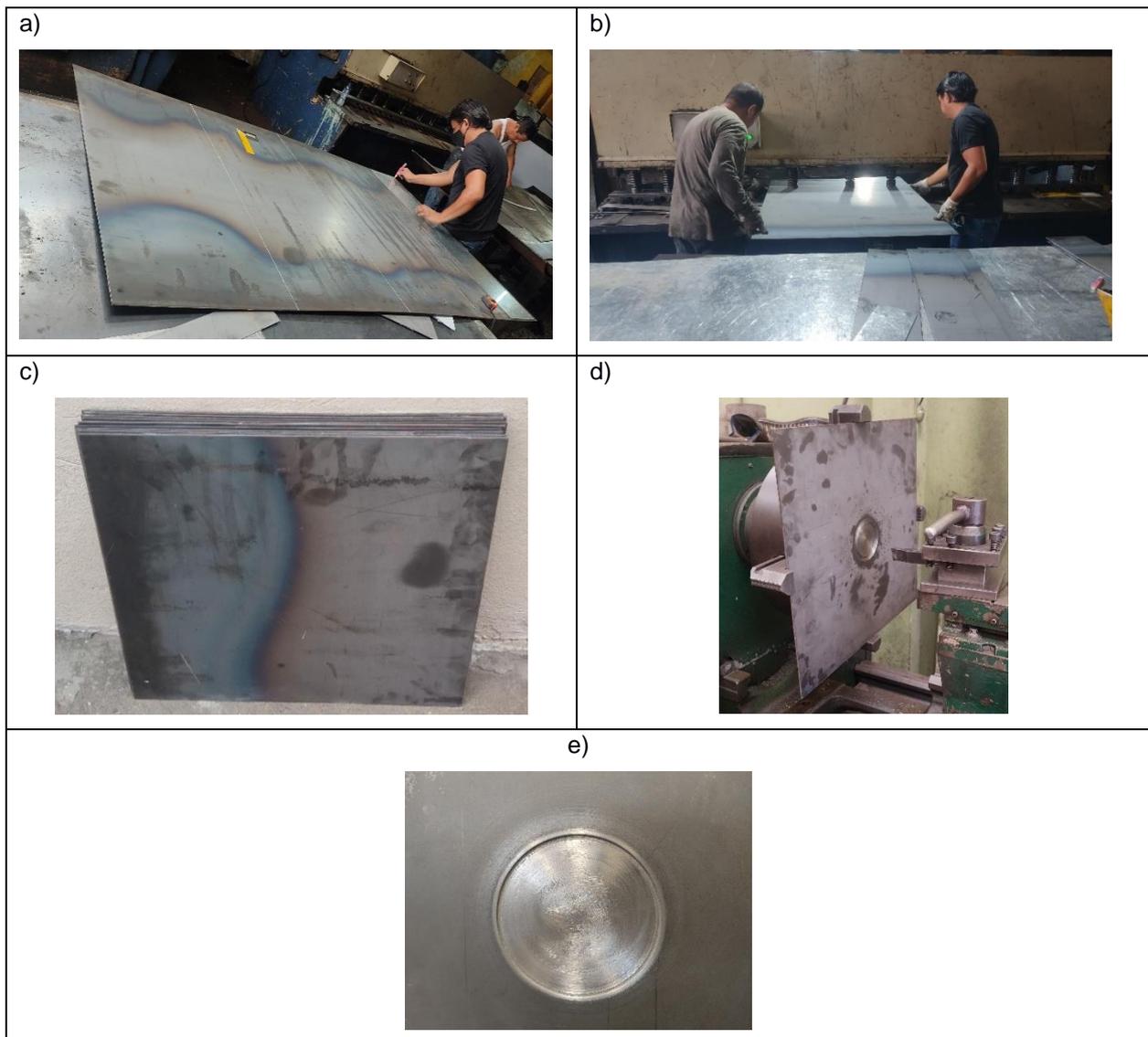


Figura 0.4 Cortado y maquinado de los especímenes

ANEXO E

Instalación de extensómetros

La Figura 0. presenta una descripción gráfica de la preparación de superficies de los especímenes y la instalación de los extensómetros.

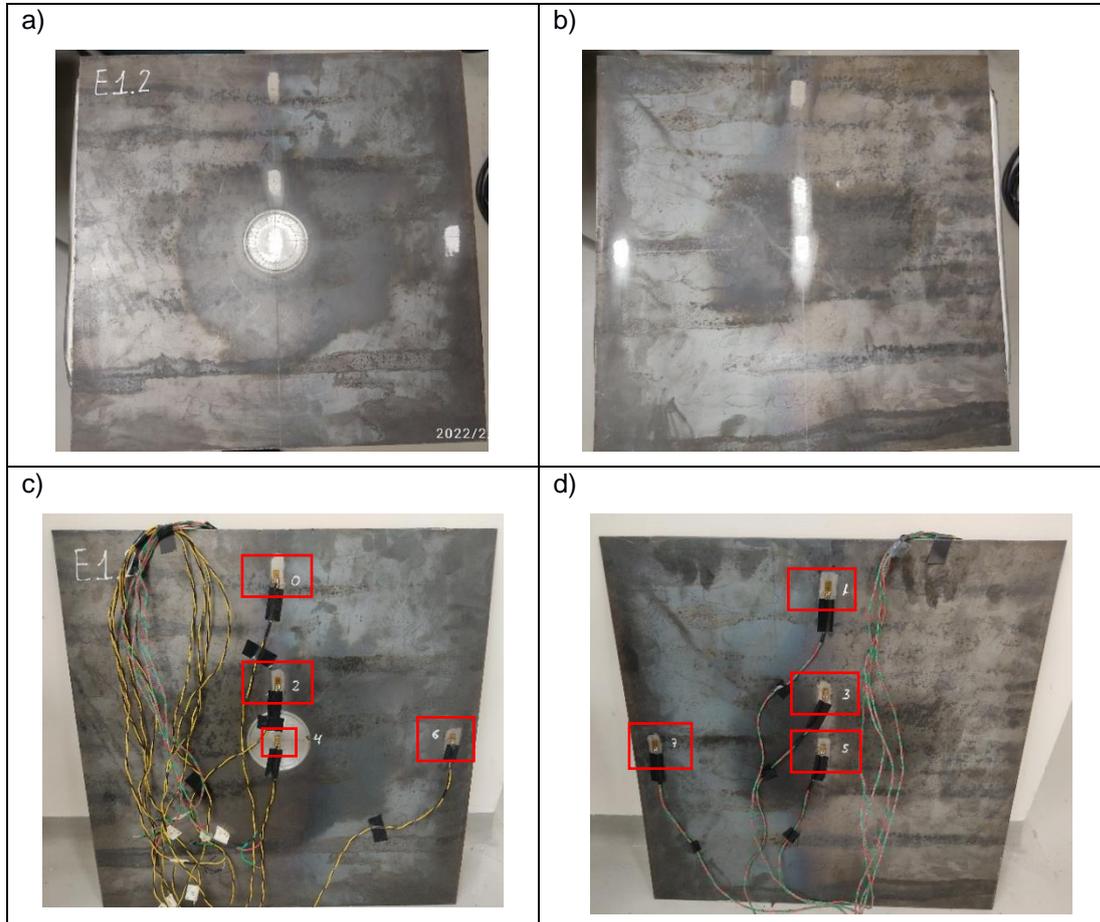


Figura 0.5 Preparación de superficie y fijación de extensómetros

Para una correcta instalación de los extensómetros se debe seguir los siguientes pasos:

- Preparación de superficie: Se remueve toda impureza de la superficie (óxidos, grasas, etc.) utilizando una lija gruesa para el inicio y una lija fina para el acabado. Posteriormente, se limpia con huaípe y alcohol, donde se instalarán los extensómetros, véase Figura 0. a), b).
- Fijación de los extensómetros: Se toma la cara del extensómetro (donde se encuentra los serpentines) con un pedazo de cinta scotch. Luego, se coloca una gota de goma brujita en la cara posterior y se lo esparce con cuidado sobre toda

la cara del extensómetro. Después, se ubica la cinta con el extensómetro en posición y dirección donde sea deseado medir la deformación unitaria (en este caso en dirección vertical). Una vez que se seque la brujita, se remueve suavemente la cinta del extensómetro, quedando fijo el extensómetro sobre la superficie.

- Instalación de cables en los extensómetros: Se soldó con cautín y estaño dos cables (finos de cobre) por cada extensómetro sobre su extremo inferior.

ANEXO F

Descripción de equipos empleados

Equipo	Descripción	Imagen
Máquina de ensayo universal	Marca Shimadzu, Hidráulica, capacidad 500KN	
Medidor de desplazamiento	Potenciómetro de movimiento lineal hasta 15mm. Adaptable a una tarjeta de adquisición de datos.	
Medidor de carátula	Medidor de desplazamiento manual con capacidad de medir hasta 1". Con cada vuelta que da la aguja, el vástago avanza 1mm.	
Tarjeta de adquisición de datos Omega	La tarjeta de adquisición de datos se utiliza para obtener una variable física, en este caso voltaje, tomando la señal de un sensor que se adecúa para transformarla en un dato que pueda ser reconocido y registrado en el tiempo por un sistema digital.	
Equipo de medición de deformaciones unitarias	Marca National Instrument. Mide deformaciones unitarias con capacidad de 8 canales.	
Extensómetros	Marca Vishay, 120 ohmios, para material de acero.	
Fuente 12v	Fuente que alimenta el medidor de desplazamiento.	

ANEXO G

Adquisición de datos empleando el programa LabVIEW

El programa Labview tiene dos interfaces, una para el programador y la otra para el usuario. La Figura 0.5 muestra la programación en bloque que se realizó para registrar información de la tarjeta *Omega* y la tarjeta *National Instrument* de forma simultánea. Este código grafica las señales y guarda los datos en archivos tipo texto txt.

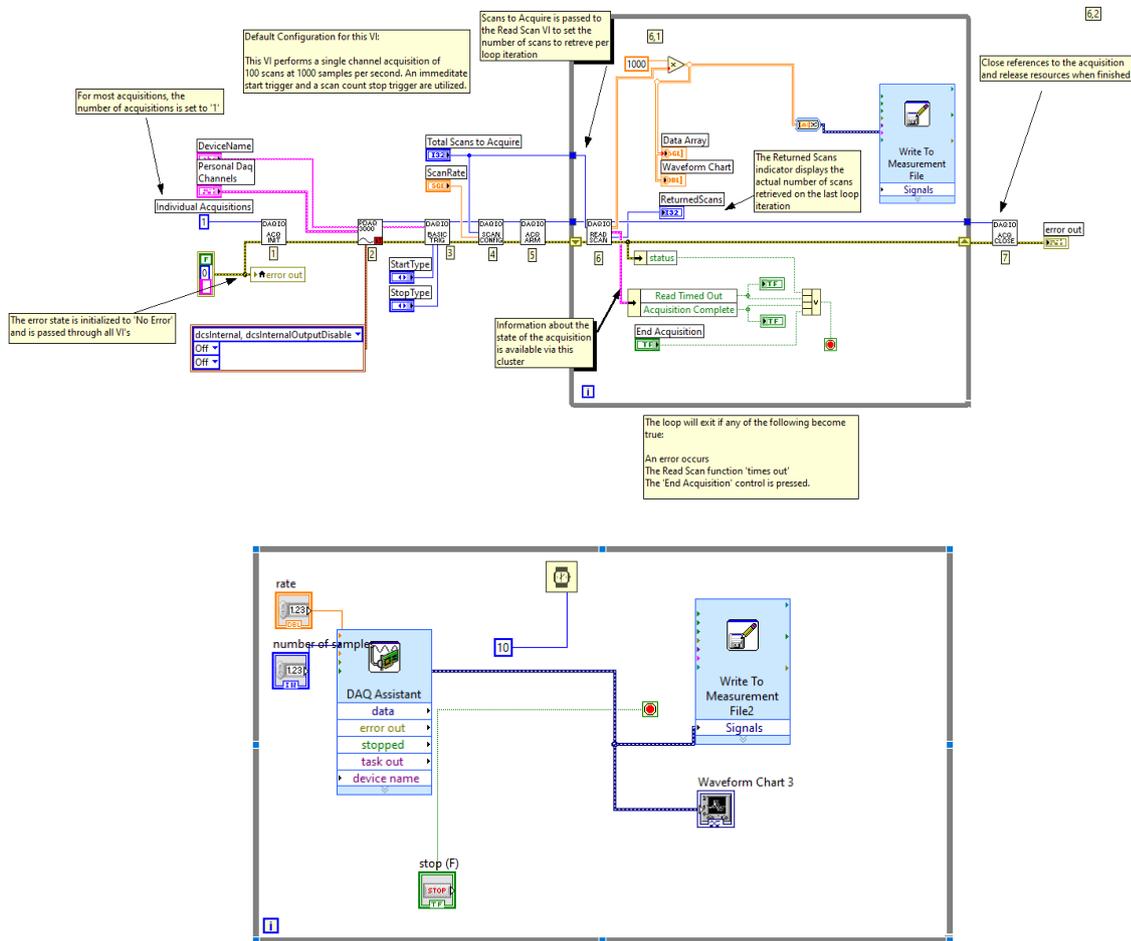


Figura 0.5 Programación en bloque LabVIEW- Interface del programador

DeviceName
 PersonalDaq3000

ScanRate
 1000,00

StartType
 sttImmediate

Total Scans to Acquire
 100

StopType
 sptManual

Personal Daq Channels

Analog Input Channels	Chan Min V	Chan Max V	Analog Input Channel Names In	Channel Mode
Channel 0	-10	10		Single Ended
Channel 1	-10	10		Single Ended
Channel 2	-10	10		Single Ended
Channel 3	-10	10		Single Ended
Channel 4	-10	10		Single Ended
Channel 5	-10	10		Single Ended
Channel 6	-10	10		Single Ended
Channel 7	-10	10		Single Ended
Channel 8	-10	10		Single Ended
Channel 9	-10	10		Single Ended
Channel 10	-10	10		Single Ended
Channel 11	-10	10		Single Ended
Channel 12	-10	10		Single Ended
Channel 13	-10	10		Single Ended
Channel 14	-10	10		Single Ended
Channel 15	-10	10		Single Ended

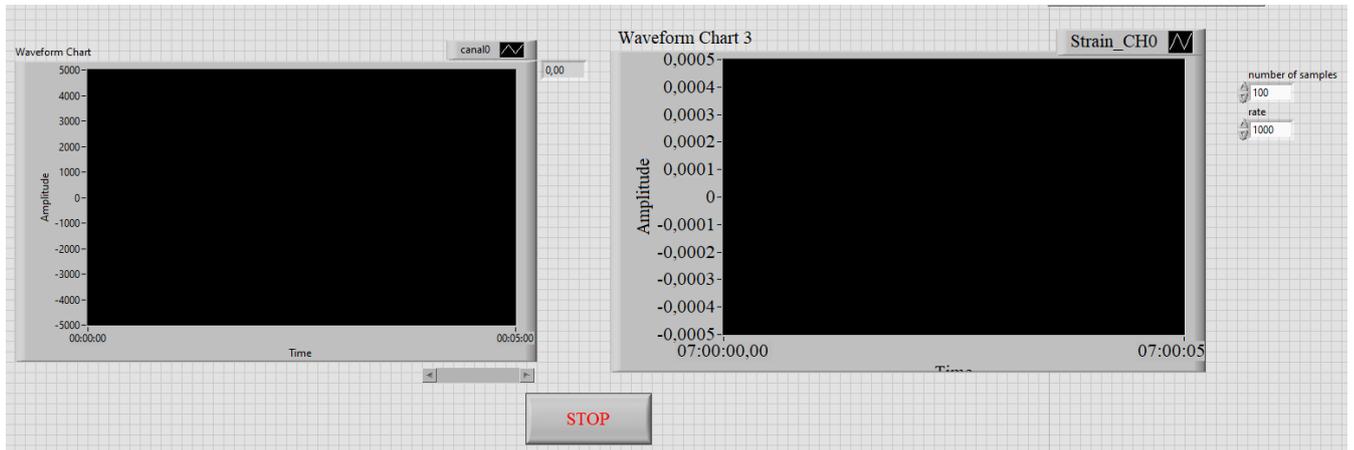
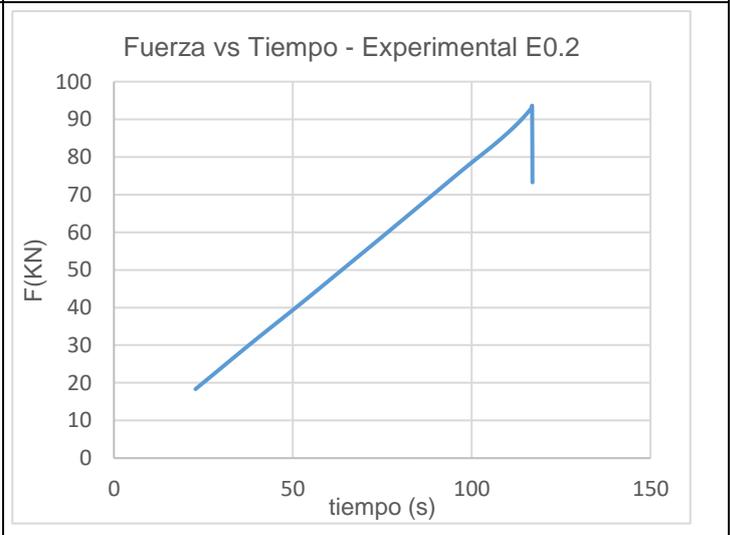
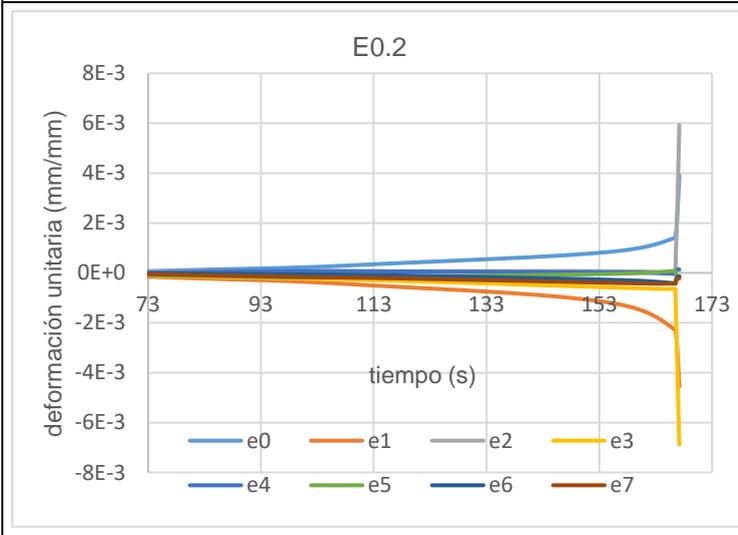
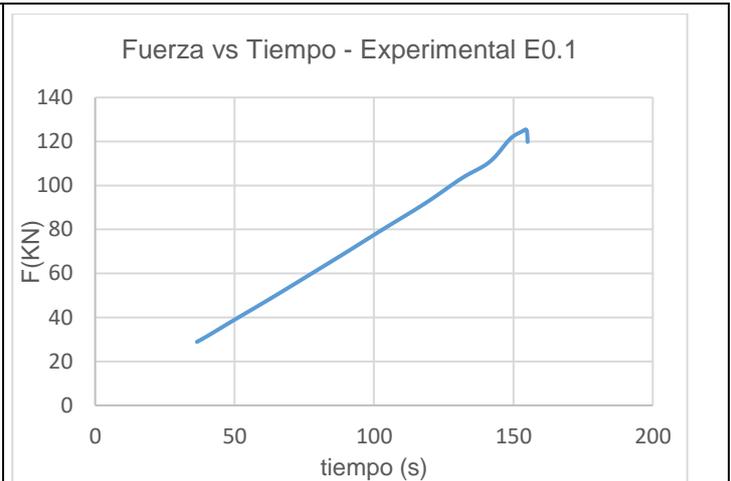
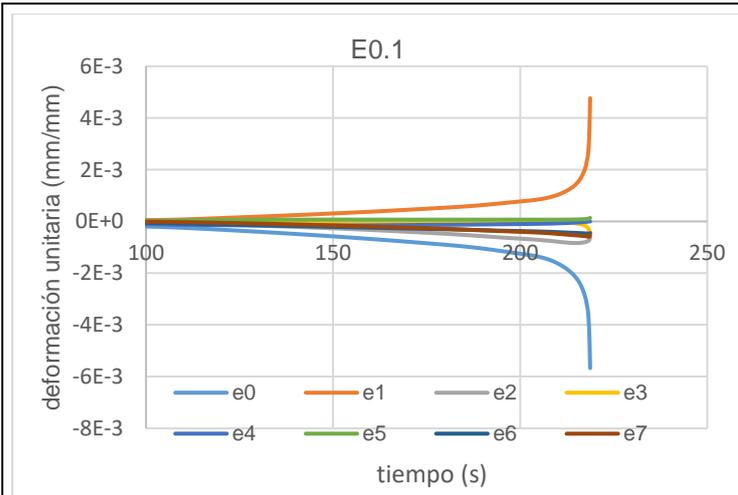
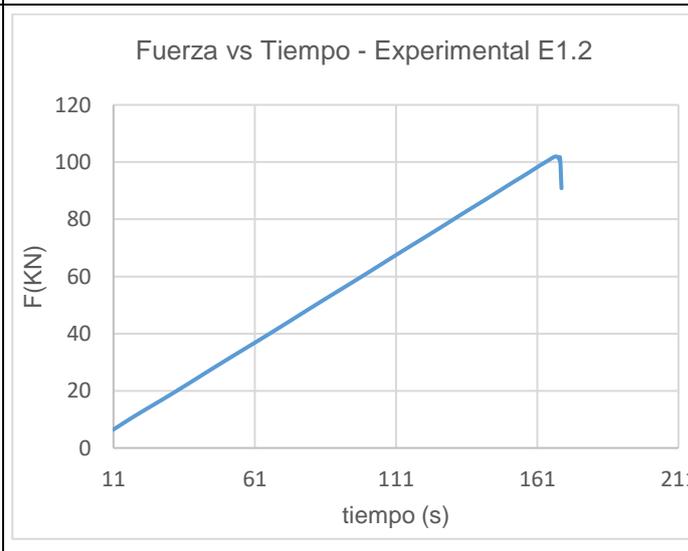
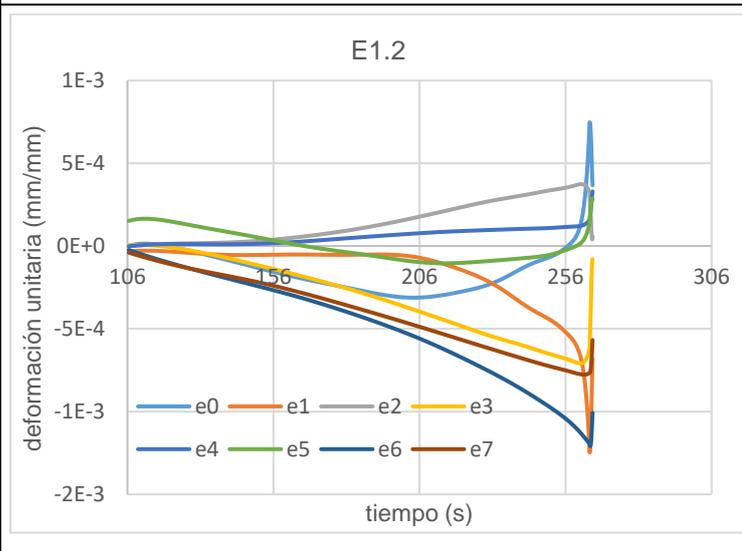
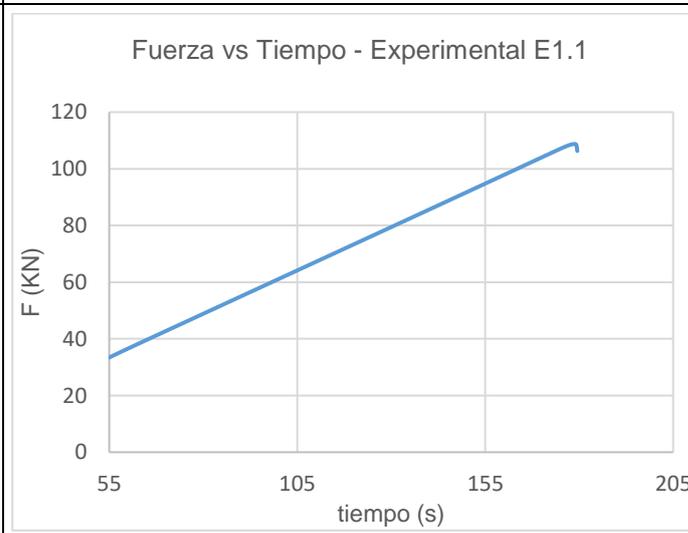
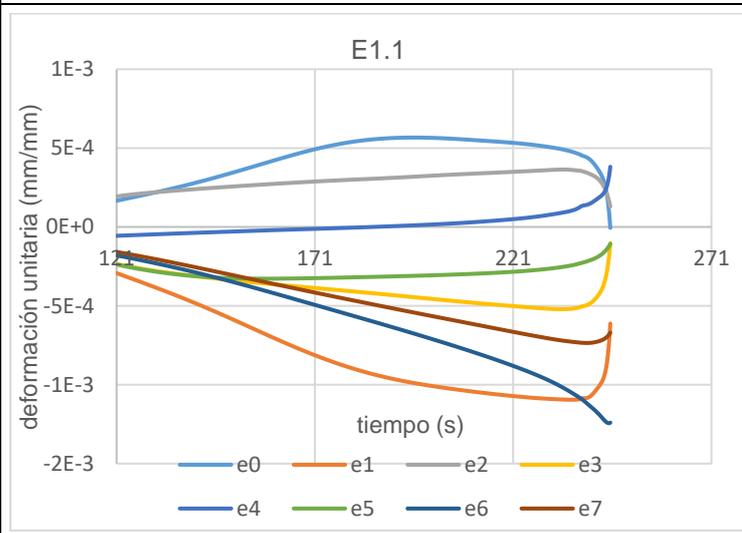
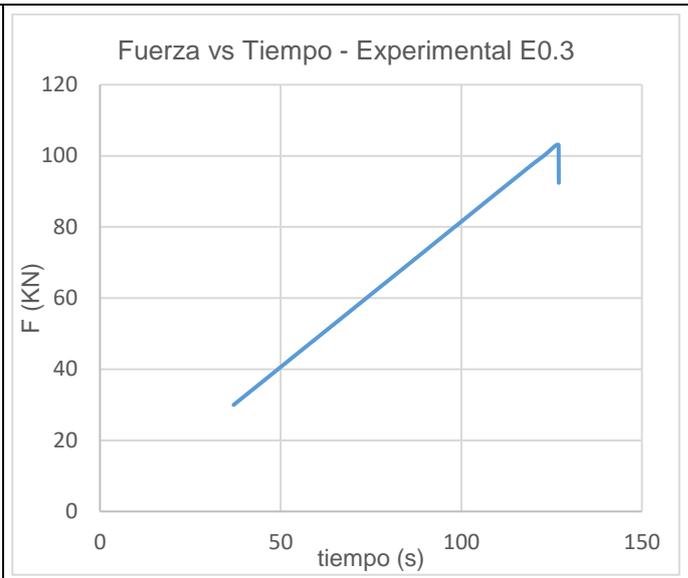
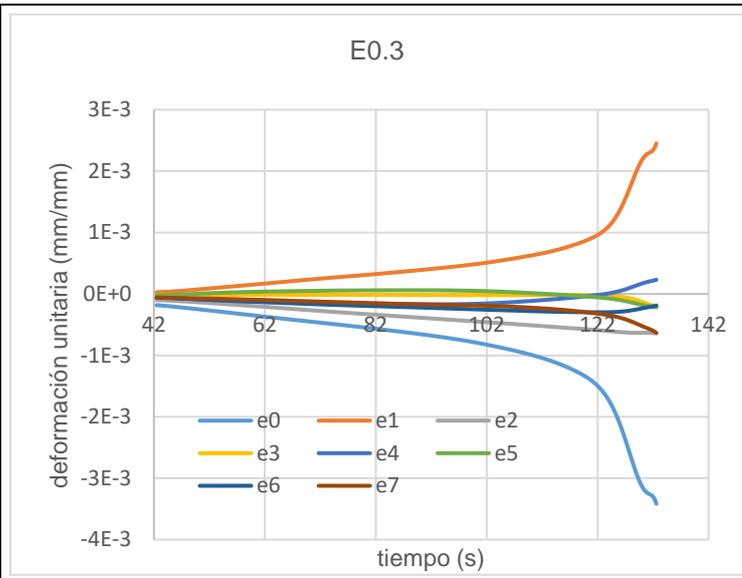


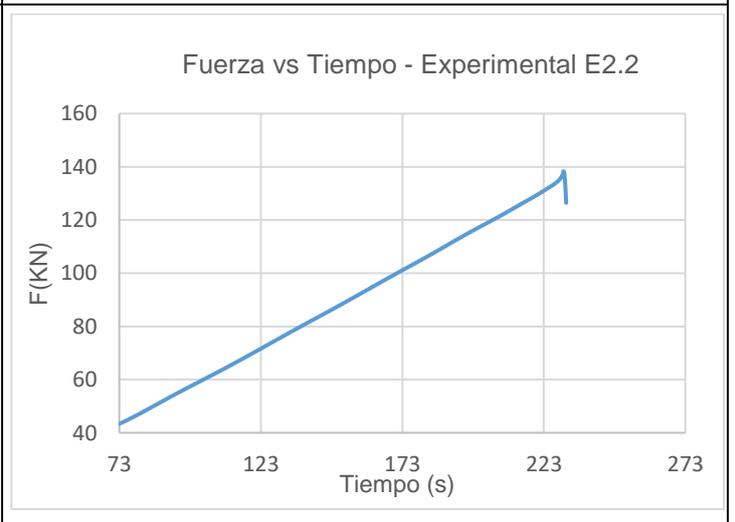
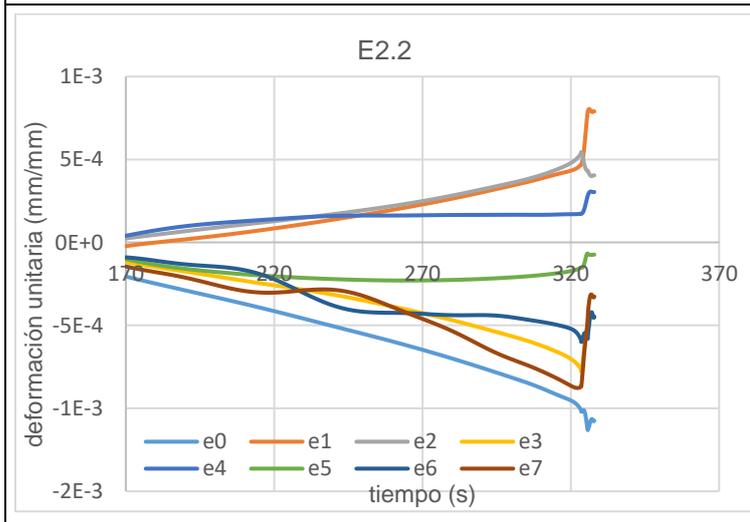
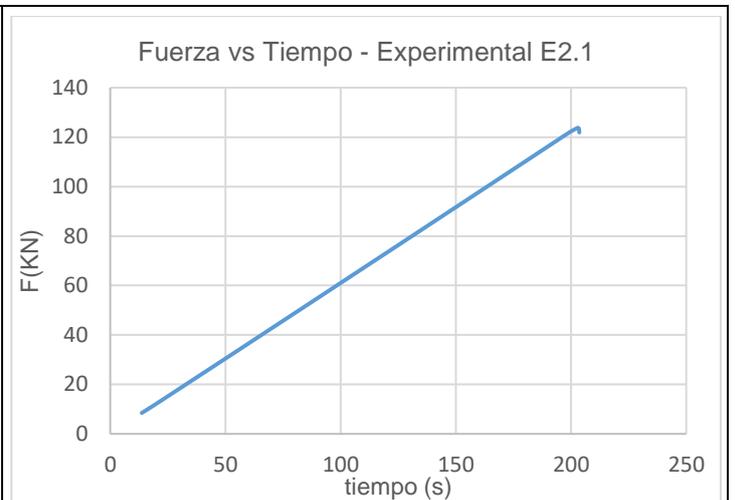
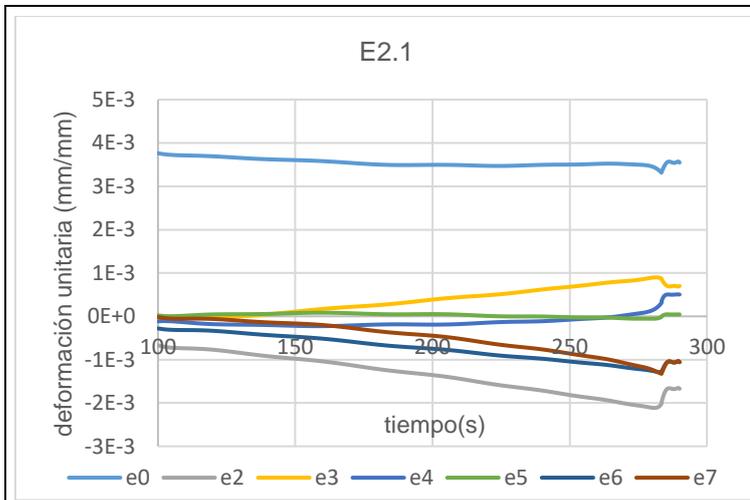
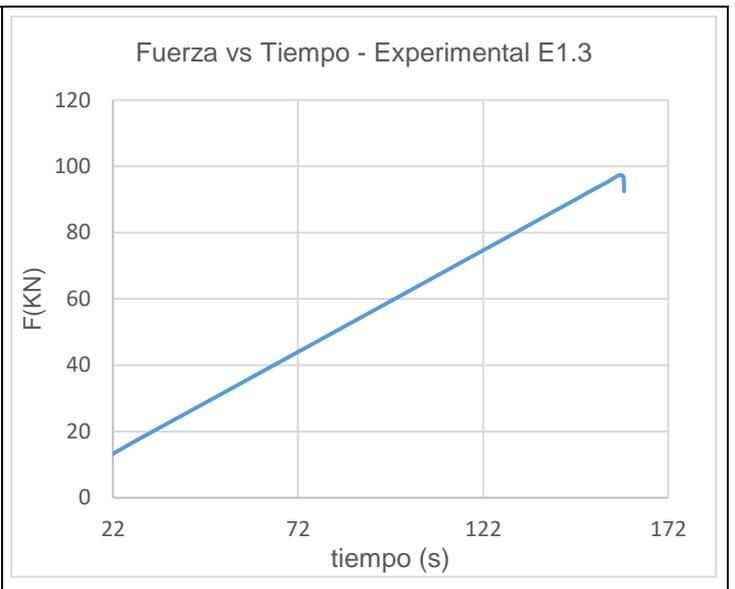
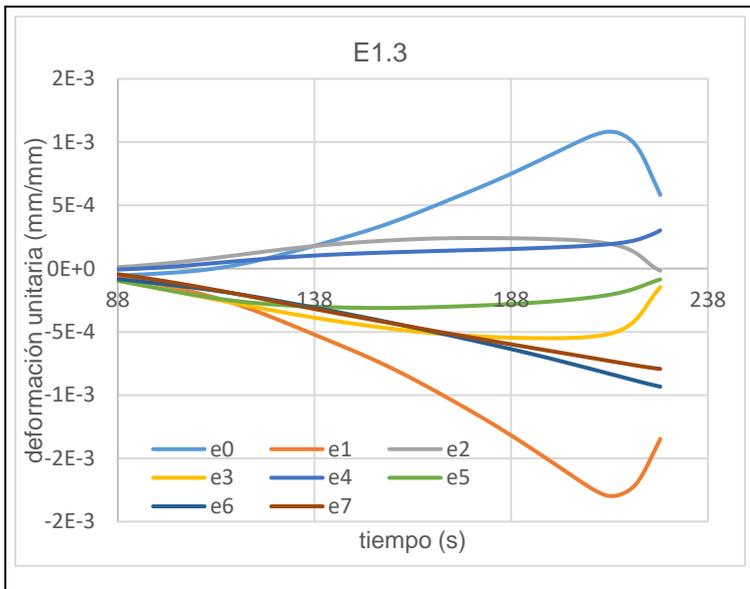
Figura 0.6 Interface para el usuario

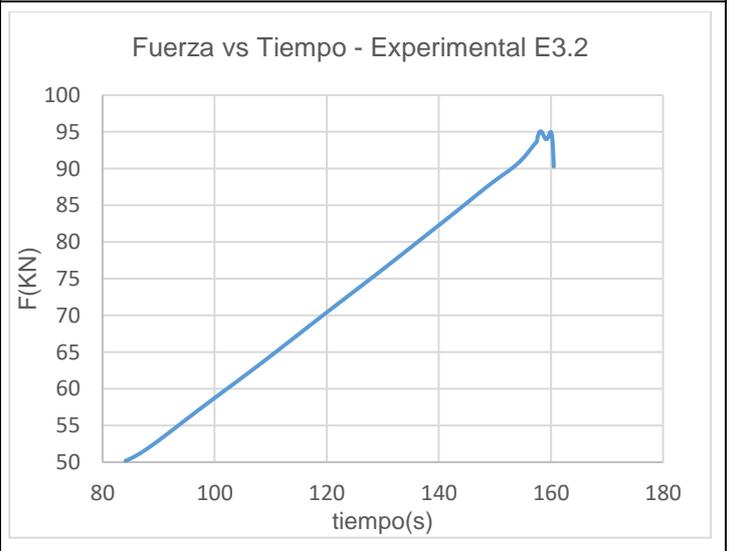
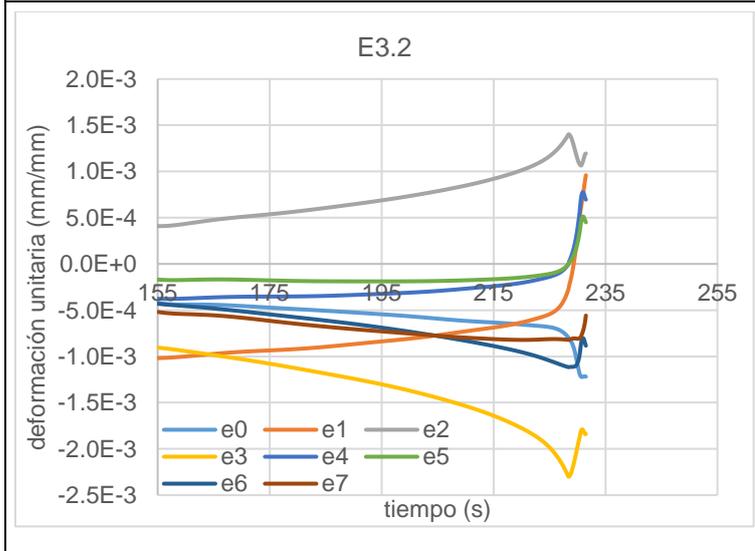
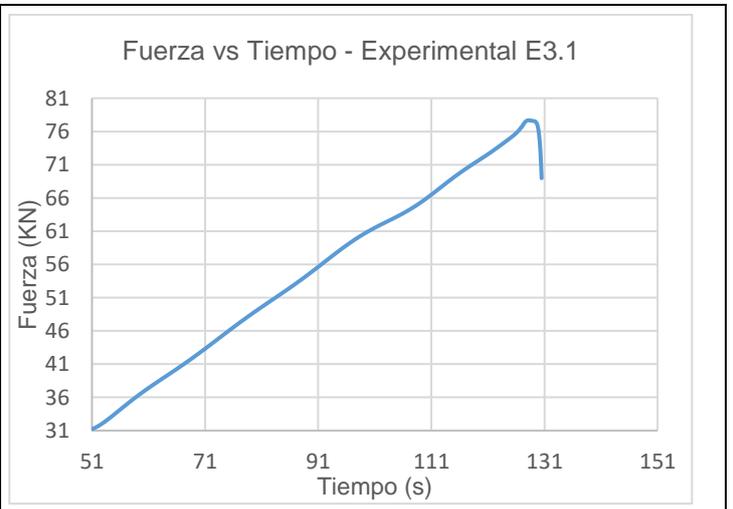
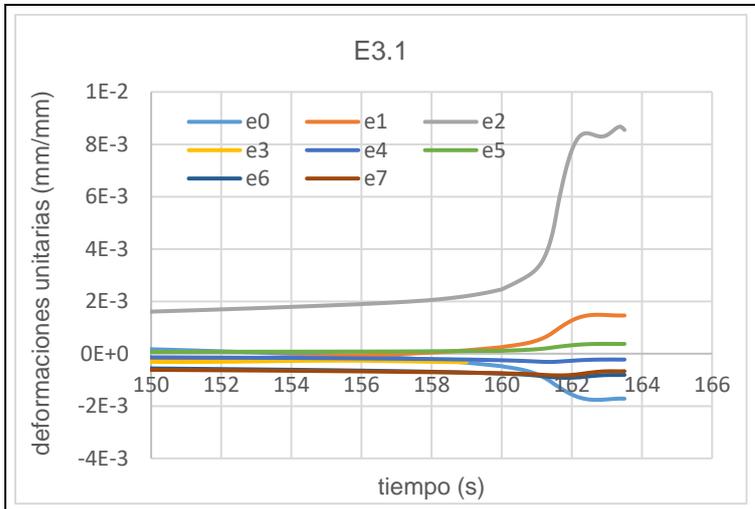
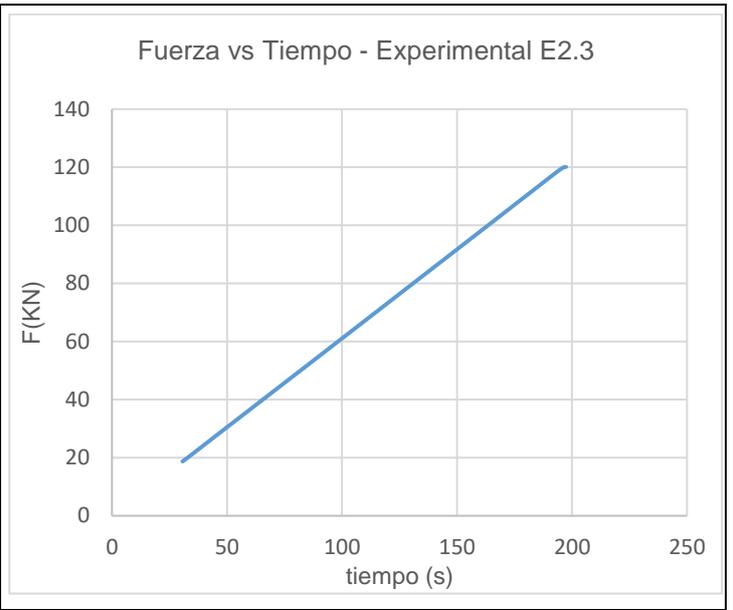
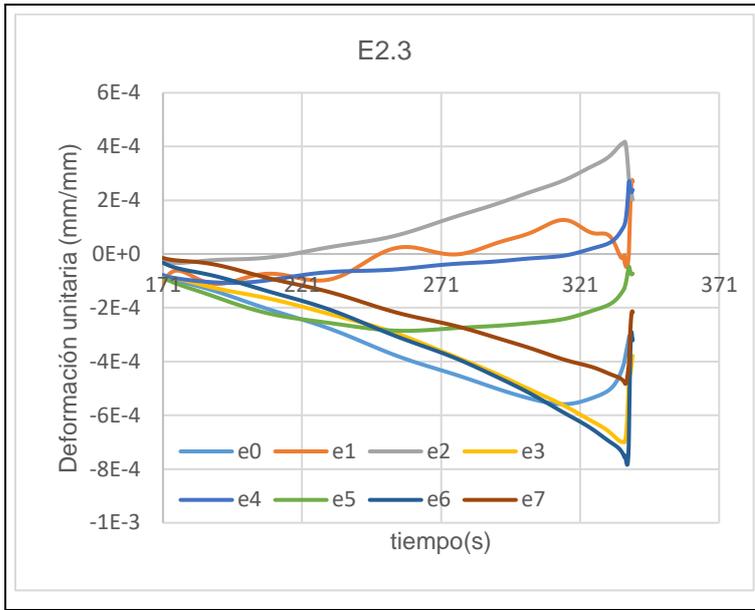
ANEXO H

Registro de datos experimentales

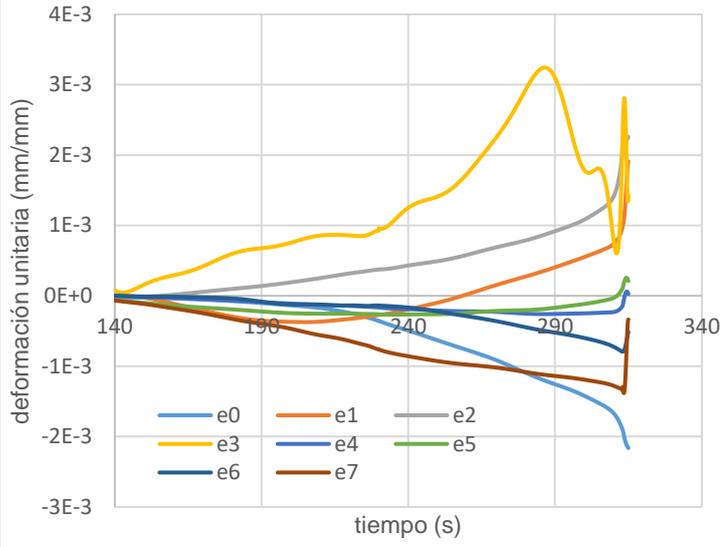








E3.3



Fuerza vs Tiempo - Experimental E3.3

