

Trabajo Fin de Máster
Máster Universitario en Diseño Avanzado en
Ingeniería Mecánica

Evaluación Estructural de un Contenedor Marítimo
Modificado mediante Análisis por Elementos Finitos
según Normativas para Transporte.

Autor: Javier Cabrera López

Tutor: José Manuel Galán Fernández

Dpto. de Ingeniería de la construcción y
Proyectos de Ingeniería
Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Sevilla, 2024



Trabajo Fin de Máster
Máster Universitario en Diseño Avanzado en Ingeniería Mecánica

Evaluación Estructural de un Contenedor Marítimo Modificado mediante Análisis por Elementos Finitos según Normativas para Transporte.

Autor:

Javier Cabrera López

Tutor:

José Manuel Galán Fernández

Profesor titular

Dpto. de Ingeniería de la Construcción y

Proyectos de Ingeniería

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024

Trabajo Fin de Máster: Evaluación Estructural de un Contenedor Marítimo Modificado mediante Análisis por Elementos Finitos según Normativas para Transporte.

Autor: Javier Cabrera López

Tutor: José Manuel Galán Fernández

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2024

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas y entidades que hicieron posible la realización de este trabajo. En primer lugar, a mi tutor de tesis, José Manuel Galán Fernández, por su guía, paciencia y su inestimable experiencia, que me han ayudado a dar forma al desarrollo del presente trabajo y enriquecer mi visión académica; siempre se tomó el tiempo que fuese necesario para ayudar con las inquietudes y piedras del camino. A mi jefe de la empresa Proinsener Energía, gracias por la valiosa información aportada y el apoyo a lo largo del trayecto.

También quiero reconocer el respaldo de mi familia y mi pareja, que han sido mi motor durante todo este proceso. Su aliento, comprensión y fe en mí han sido esenciales para culminar esta etapa. A todos, gracias por acompañarme en este viaje; este trabajo es, en parte, el reflejo de su generosidad y apoyo.

Javier Cabrera López

Sevilla, 2024

Resumen

En el presente Trabajo de Fin de Máster, Evaluación Estructural de un Contenedor Marítimo Modificado mediante Análisis por Elementos Finitos según Normativas para Transporte, se simulan, mediante el análisis estático lineal, las pruebas dictaminadas en las normas internacionales de transportación marítima sobre el modelo de un contenedor marítimo de 40 pies modificado, cuyo proyecto pertenece a la empresa Proinsener Energía. En el primer capítulo se detallan los objetivos de la investigación y se aporta una descripción generalizada sobre los contenedores marítimos, así como del proyecto de la estructura objeto de estudio, con especificaciones de su fabricación y una argumentación referida a las normativas que deben cumplirse antes de ser destinado a su transportación naviera o ferroviaria. En el segundo capítulo se expone la metodología seguida para el desarrollo del trabajo, con una caracterización del método de los elementos finitos en que son basadas las simulaciones y la herramienta computacional utilizada; se ilustran a su vez el modelo del contenedor modificado y los diversos componentes integrados, culminando con una tabla resumen de las cargas a las que será sometido en las diferentes pruebas. El tercer capítulo del trabajo recoge el tratamiento de las simulaciones y el análisis de los resultados; se argumenta el razonamiento seguido para simular las pruebas físicas a los contenedores con suma fidelidad a la realidad. Finalmente, se exponen las conclusiones referidas a los ensayos y desarrollo del trabajo.

Abstract

In this Master's Thesis, Structural Evaluation of a Modified Shipping Container through Finite Element Analysis according to Transport Regulations, the prescribed tests of international maritime transportation standards are simulated, through linear static analysis, on the model of a modified 40-foot shipping container, which is part of a project leaded by Proinsener Energy. The first chapter details the research objectives and provides a generalized overview of shipping containers, as well as the project of the structure under study, including manufacturing specifications and an argumentation regarding the regulations required before it can be assigned for marine or rail transportation. The second chapter presents the methodology followed for the development of the work, characterizing the finite element method on which the simulations are based and the computational tool used; it also illustrates the modified container model and its various integrated components, concluding with a summary table of the loads applied in the different tests. The third chapter of the work addresses the treatment of the simulations and the analysis of the results, with reasoning for the approach taken to simulate physical tests on containers as accurately as possible. Finally, conclusions are presented regarding the testing and development of the work.

Índice

Agradecimientos.....	vii
Resumen	ix
Abstract	xi
Índice.....	xii
Índice de Tablas.....	xiv
Índice de Figuras	xv
Notación	xviii
1 Introducción.....	1
1.1 Contenedores de transporte de carga.....	1
1.1.1 Tipos de contenedores de transporte de carga.....	1
1.1.2 Transportación de contenedores de transporte de carga.....	3
1.2. Proinsener Energía. Soluciones modulares en contenedores.....	3
1.2.1. Proyecto M.....	4
1.2.2. Descripción de componentes eléctricos.....	4
1.3. Especificación técnica para contenedor de acero de carga seca tipo ISO 40' x 8' x 9'6 TITAN.....	4
1.3.1. Materiales de fabricación.....	5
1.4. Norma ISO 1496/1.....	7
1.5. Consecuencias legales.....	11
1.6. Justificación.....	11
1.7. Objetivos.....	12
2 Metodología.....	13
2.1. El método de los elementos finitos.....	13
1.1.3 Fases del MEF.....	13
2.2. Herramienta software utilizada.....	14
2.3. Modelo.....	15
2.3.1. Simplificación de la estructura y componentes.....	16
2.3.2. Elementos para mallado.....	16
2.3.3. Mallado, convergencia y singularidades.....	17
2.4. Cargas. Combinaciones en transportación utilizadas en las pruebas.....	18
3 3 Simulaciones y resultados.....	20
3.1. Prueba No.1.....	20
1.1.4 Preprocesado.....	20
1.1.5 Análisis de resultados obtenidos. Tensiones.....	21
3.1.3. Análisis de resultados obtenidos. Desplazamientos.....	29
3.1.4. Prueba No. 1. Resumen de conclusiones parciales.....	32
3.2. Prueba No. 2. Izaje desde los cuatro isocorners superiores.....	32
3.2.1. Preprocesado.....	32
3.2.2. Análisis de resultados obtenidos. Tensiones y desplazamientos.....	33

3.2.3.	Prueba No. 2. Resumen de conclusiones parciales.	34
3.3.	Prueba No. 3. Izaje desde los cuatro isocorners inferiores.	35
3.3.1.	Preprocesado.	35
3.3.2.	Análisis de resultados obtenidos. Tensiones y desplazamientos.	36
3.3.3.	Prueba No. 3. Resumen de conclusiones parciales.	37
3.4.	Prueba No. 4. Restricción longitudinal.	38
3.4.1.	Preprocesado.	38
3.4.2.	Análisis de resultados obtenidos. Tensiones y desplazamientos.	38
3.4.3.	Prueba No. 4. Resumen de conclusiones parciales.	40
3.5.	Prueba No. 5. Resistencia de paredes finales.	41
3.5.1.	Prueba No. 5. Parte 1: resistencia de pared trasera. Preprocesado.	41
3.5.2.	Prueba No. 5. Parte 2: resistencia de pared frontal. Preprocesado.	42
3.5.3.	Análisis de resultados obtenidos. Tensiones y desplazamientos. Parte 1 y 2.	42
3.5.4.	Prueba No. 5. Resumen de conclusiones parciales.	46
3.6.	Prueba No. 6. Resistencia de paredes laterales.	46
3.6.1.	Preprocesado.	46
3.6.2.	Análisis de resultados obtenidos.	47
3.6.3.	Prueba No. 6. Resumen de conclusiones parciales.	48
3.7.	Prueba No. 7. Resistencia del techo.	49
3.7.1.	Preprocesado.	49
3.7.2.	Análisis de resultados obtenidos.	49
3.7.3.	Prueba No. 7. Resumen de conclusiones parciales.	50
3.8.	Prueba No. 9. Rigidez transversal.	51
3.8.1.	Preprocesado.	51
3.8.2.	Prueba No. 9. Parte 1: fuerzas aplicadas hacia el contenedor. Análisis de resultados.	51
3.8.3.	Prueba No. 9. Parte 2: fuerzas aplicadas desde el contenedor. Análisis de resultados.	54
3.8.4.	Prueba No. 9. Resumen de conclusiones parciales.	57
3.9.	Prueba No. 10. Rigidez longitudinal.	57
3.9.1.	Preprocesado.	57
3.9.2.	Análisis de resultados.	57
3.9.3.	Prueba No. 10. Resumen de conclusiones parciales.	59
4	Conclusiones	61
	Bibliografía	62
	Anexos	63
	Anexo A: Designaciones de contenedores de carga seca.	63
	Anexo B: Diagnóstico de zona activa de tensión. Prueba No. 1.	64
	Anexo C: Diagnóstico de zona activa de tensión. Prueba No. 5. Parte 2.	65
	Anexo D: Prueba No. 10. Rigidez longitudinal. Variaciones de aplicación de la carga.	66
D.1.	Prueba No. 10. Fuerza aplicada en cara frontal desde el contenedor.	66
D.2.	Prueba No. 10. Fuerza aplicada en cara posterior hacia el contenedor.	67
D.3.	Prueba No. 10. Fuerza aplicada en cara posterior desde el contenedor.	68

Índice de Tablas

Tabla 1.1. Masa por unidad de componente eléctrico integrado al contenedor y sus cantidades.....	4
Tabla 1.2. Dimensiones generales del contenedor TITAN-40HC [5].....	5
Tabla 1.3. Materiales principales de fabricación de TITAN-40HC [5-8].....	5
Tabla 1.4. Materiales y componentes principales de fabricación de TITAN-40HC [5].....	6
Tabla 1.5. Procedimientos para desarrollo de las pruebas en contenedores 1 AAA [10].....	8
Tabla 2.1. Combinaciones de carga por simulación realizada.....	18
Tabla 3.1. Análisis de convergencia de tensiones de von Mises.....	23
Tabla 3.2. Resultados finales de tensión equivalente de von Mises con error inferior al 10%.....	26
Tabla 3.3. Comparación de resultados finales de tensión equivalente de Von Mises, con error inferior al 10%, entre lecturas de sensores en el modelo de contenedor modificado y el original.....	28
Tabla 3.4. Análisis de convergencia de desplazamientos resultantes.....	31
Tabla 3.5. Análisis de convergencia de desplazamientos resultantes. Prueba No. 2.....	33
Tabla 3.6. Análisis de convergencia de desplazamientos resultantes. Prueba No. 3.....	36
Tabla 3.7. Análisis de convergencia de tensiones equivalentes de von Mises. Prueba No. 4. Parte 1.....	39
Tabla 3.8. Análisis de convergencia de tensiones equivalentes de von Mises y desplazamientos resultantes. Prueba No. 5. Parte 1.....	42
Tabla 3.9. Análisis de convergencia de tensiones equivalentes de von Mises y desplazamientos resultantes. Prueba No. 5. Parte 2.....	44
Tabla 3.10. Análisis de convergencia de desplazamientos resultantes. Prueba No. 6.....	47
Tabla 3.11. Análisis de convergencia de tensiones equivalentes de von Mises y desplazamientos resultantes. Prueba No. 7.....	49
Tabla 3.12. Análisis de convergencia de desplazamientos resultantes. Prueba No. 9. Primera parte.....	52
Tabla 3.13. Comparación de longitudes de diagonales principales tras la deformación. Prueba No. 9. Parte 1.....	54
Tabla 3.14. Comparación de longitudes de diagonales principales tras la deformación. Prueba No. 9. Parte 2.....	56
Tabla 3.15. Análisis de convergencia de desplazamientos resultantes. Prueba No. 10. Pared lateral derecha. Fuerza aplicada hacia el contenedor en cara frontal.....	58
Tabla 3.16. Comparación de longitudes de diagonales principales tras la deformación. Prueba No. 10.....	59

Índice de Figuras

Fig. 1.1. Anatomía de un contenedor de carga general, serie 1, 40 pies. Nombres con los que serán referenciadas sus partes en el trabajo.....	3
Fig. 2.1. Tipos de elementos finitos y sus geometrías.....	14
Fig. 2.2. Contenedor modificado. Vista isométrica. En figura: 1- puerta peatonal, 2- filtros, 3- panel de explosión - salida de gases.....	15
Fig. 2.3. Contenedor modificado. Vista lateral (interior, pared de contenedor no visible). En figura: 1- capacitor (alto), 2- transformador, 3- capacitor (pequeño), 4- seccionador de puesta a tierra, 5- interruptor, 6- cuadro eléctrico, 7- extractores, 8- pararrayo, 9- aislador.....	15
Fig. 2.4. Contenedor modificado. Vista superior (interior, techo de contenedor no visible). En figura: 1- capacitor (alto), 2- transformador, 3- capacitor (bajo), 4- pararrayo, 5- extractor, 6- seccionador de puesta a tierra, 7- cuadro eléctrico, 8- caja de seccionador de puesta a tierra, 9- interruptor, 10- aislador.....	15
Fig. 3.1. Aplicación de cargas y condiciones de contorno sobre contenedor modificado. Vista isométrica. 1- Prensa rígida. Color verde: empotramiento de caras inferiores de los isocorners del suelo; color morado: cargas de masa remota (puntos) y fuerzas normales a las superficies en que son aplicadas (flechas); color rojo: acción de la gravedad.....	21
Fig. 3.2. Aplicación de cargas y condiciones de contorno sobre contenedor modificado. Vista lateral interna (pared no visible). 1- Prensa rígida. Color verde: empotramiento de caras inferiores de los isocorners del suelo; color morado: cargas de masa remota (puntos) y fuerzas normales a las superficies en que son aplicadas (flechas); color rojo: acción de la gravedad.....	21
Fig. 3.3. Resultados de simulación. Análisis estático lineal. Representaciones de tensiones de von Mises. Tamaño mínimo de elemento global: 300 mm. Tamaño máximo de elemento global: 900 mm.....	22
Fig. 3.4. Resultados de simulación. Análisis estático lineal con mallado inicial. Representaciones de tensiones de von Mises. Valor máximo de tensión calculada: $8.012 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$	22
Fig. 3.5. Puntos/sensores de lectura de tensiones de von Mises (P1-7). Prueba No.1. Último nivel de refinamiento de malla. Escala de colores de 0 a $4.8 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ (480 MPa).....	24
Fig. 3.6. Puntos/sensores de lectura de tensiones de von Mises (P8-11). Prueba No.1. Último nivel de refinamiento de malla. Escala de colores de 0 a $4.8 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ (480 MPa).....	25
Fig. 3.7. Análisis de convergencia de resultados. Contenedor modificado. Gráfica de evolución de la convergencia para cada punto estudiado según el nivel de refinamiento.....	25
Fig. 3.8. Análisis de convergencia de resultados. Contenedor original. Gráfica de evolución de la convergencia para cada punto estudiado según el nivel de refinamiento.....	27
Fig. 3.9. Análisis de tensiones resultantes en contenedores. Isocorner de muestra: trasero superior izquierdo. En figuras: a) tensiones resultantes en isocorner con nivel de refinamiento N4; b) tensiones resultantes con mallado más fino (5 mm como menor tamaño de elemento); c) diagnóstico de zona activa de tensión (zona afectada por singularidades en color gris), nivel de refinamiento N4.....	29
Fig. 3.10. Análisis de desplazamientos. Prueba No. 1. Simulación con mallado inicial. Tamaño máximo de elemento: 900 mm; tamaño mínimo de elemento: 300 mm. Escala de colores de 0 a valor máximo resultante registrado (4,831 mm). Posición indeformada translúcida. En figura: a), b) y c) parte frontal del contenedor desde diferentes ángulos; d) vista posterior.....	30
Fig. 3.11. Geometrías y posicionamiento de pilares delanteros, traseros y soporte frontal del techo del contenedor. En figura: a) vista superior del contenedor con isocorner y techo en transparencia/geometría de pilar delantero señalada en azul; b) vista superior del contenedor con isocorner en transparencia/geometría de pilar trasero, perfil de viga de soporte y apoyo del travesaño superior trasero señalados en azul (conjunto más rígido); c) vista lateral del contenedor con isocorner y pilar delantero en transparencia/geometría del soporte del techo y chapa de pared frontal señalados en azul, con flechas indicativas de plegado analizado y giro.....	31
Fig. 3.12. Representación de tensiones equivalentes de von Mises. Prueba No. 2. Último nivel de refinamiento.	

Escala de colores de 0 a $3.43 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ (343 MPa).....	34
Fig. 3.13. Representación de desplazamientos resultantes. Prueba No. 2. Simulación con nivel de refinamiento final. Escala de colores de 0 a valor máximo resultante registrado (2,170 mm).....	34
Fig. 3.14. Gancho de izaje modelado para simulación. En las figuras: a) ensamble de gancho de izaje en uno de los isocorners con inclinación de 30° con respecto a la horizontal y con condiciones de empotramiento en su extremo superior; b) modelo del gancho; c) ejemplo de izaje y gancho (en color azul).....	35
Fig. 3.15. Representación de tensiones equivalentes de Von Mises. Prueba No. 3. Último nivel de refinamiento. Escala de colores de 0 a $3.43 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ (343 MPa).....	37
Fig. 3.16. Representación de desplazamientos resultantes. Prueba No. 3. Simulación con nivel de refinamiento final. Escala de colores de 0 a valor máximo resultante registrado (3.120 mm).....	37
Fig. 3.17. Elemento de anclaje para isocorners de contenedor marítimo. En figura: a) vista superior; b) vista lateral; c) modelo de isocorner trasero en simulación con apoyo simple en su base y empotramiento en cara de contacto con el anclaje (en oposición al sentido de aplicación de la fuerza).....	38
Fig. 3.18. Representación de tensiones equivalentes de von Mises. Prueba No. 4, parte 1: fuerza ejercida hacia el contenedor. Último nivel de refinamiento. Escala de colores de 0 a $3.43 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ (343 MPa). En figura: a) vista isométrica del contenedor; b) acercamiento a isocorner trasero inferior derecho.....	39
Fig. 3.19. Representación de tensiones equivalentes de von Mises. Prueba No. 4, parte 2: fuerza ejercida desde el contenedor. Último nivel de refinamiento. Escala de colores de 0 a $3.43 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ (343 MPa). En figura: a) vista isométrica del contenedor; b) acercamiento a isocorner trasero inferior derecho.....	40
Fig. 3.20. Representación de desplazamientos resultantes. Prueba No. 4. Simulación con nivel de refinamiento final. En figura: a) Parte 1/escala de colores de 0 a valor máximo resultante registrado (1,693 mm); b) Parte 2/escala de colores de 0 a valor máximo resultante registrado (2,411 mm).....	40
Fig. 3.21. Modificaciones a portones del contenedor. En figura: a) vista general de ensamble de marcos soldados; b) vista en isométrico del marco para filtros.....	41
Fig. 3.22. Representación de tensiones equivalentes de von Mises. Prueba No. 5. Parte 1. Último nivel de refinamiento. Escala de colores de 0 a $2.75 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ (275 MPa). En figura: a) vista frontal simétrica de la pared trasera; b) acercamiento a la zona más peligrosa y exposición de puntos de lectura.....	43
Fig. 3.23. Representación de desplazamientos resultantes. Prueba No. 5. Parte 1. Último nivel de refinamiento. Escala de colores de 0 a valor máximo resultante registrado (10.28 mm). En figura: a) vista frontal de pared trasera con mallado simétrico; b) acercamiento a zona de mayor desplazamiento resultante.....	43
Fig. 3.24. Representación de tensiones equivalentes de von Mises. Prueba No. 5. Parte 2. Último nivel de refinamiento. Escala de colores de 0 a $1.72 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ (172 MPa). En figura: a) vista frontal a simetría de la pared frontal; b) acercamiento a zona de interés y ubicación de puntos de lectura.....	45
Fig. 3.25. Representación de desplazamientos resultantes. Prueba No. 5. Parte 2. Último nivel de refinamiento. Escala de colores de 0 a valor máximo resultante registrado (10.38 mm). En figura: a) vista frontal de pared frontal a simetría; b) deformada.....	45
Fig. 3.26. Representación de tensiones equivalentes de von Mises. Prueba No. 6. Último nivel de refinamiento. Escala de colores de $2.213 \cdot 10^2 \text{ N/m}^2$ a $2.75 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ (275 MPa). Escala de deformación 1:1.....	48
Fig. 3.27. Representación de desplazamientos resultantes. Prueba No. 6. Último nivel de refinamiento. Escala de colores de 0 a valor máximo resultante registrado (2,077 mm). Escala de deformación 100:1.....	48
Fig. 3.28. Representación de tensiones equivalentes de von Mises. Prueba No. 7. Último nivel de refinamiento. Escala de colores de $1.659 \cdot 10^2 \text{ N/m}^2$ a $3.43 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ (343 MPa). Escala de deformación 1:1.....	50
Fig. 3.29. Representación de desplazamientos resultantes. Prueba No. 7. Último nivel de refinamiento. Escala de colores de 0 a valor máximo resultante registrado ($1.938\text{e}+01$ mm). Escala de deformación 20:1.....	50
Fig. 3.30. Representación de tensiones equivalentes de von Mises. Prueba No. 9. Parte 1. Último nivel de refinamiento. Escala de colores de $2.246 \cdot 10^2 \text{ N/m}^2$ a $3.43 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ (343 MPa). En figura: a) vista frontal; b) vista trasera. Escala de deformación 1:1.....	53
Fig. 3.31. Representación de desplazamientos resultantes. Prueba No. 9. Parte 1. Último nivel de refinamiento.	

Escala de colores de 0 a valor máximo resultante registrado (7.919 mm). Ubicación de puntos de lectura. En figura: a) vista frontal (deformación en escala 1:1); b) vista posterior (deformación en escala 1:1); c) deformada, vista frontal (deformación en escala 50:1).....	53
Fig. 3.32. Medición de las diagonales principales tras deformada. Prueba No.9. Parte 1. Último nivel de refinamiento. Escala de colores de 0 a valor máximo resultante registrado (7.919 mm). En figura: a), b) diagonales principales de pared frontal; c), d) diagonales principales de pared trasera.....	54
Fig. 3.33. Representación de tensiones equivalentes de von Mises. Prueba No. 9. Parte 2. Último nivel de refinamiento. Escala de colores de $2.746 \cdot 10^2 \text{ N/m}^2$ a $3,43 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ (343 MPa). En figura: a) vista frontal; b) vista posterior. Escala de deformación 1:1.....	55
Fig. 3.34. Representación de desplazamientos resultantes. Prueba No. 9. Parte 2. Último nivel de refinamiento. Escala de colores de 0 a valor máximo resultante registrado (5.505 mm). Ubicación de puntos de lectura. En figura: a) vista frontal (deformación en escala 1:1); b) vista posterior (deformación en escala 1:1); c) deformada, vista frontal (deformación en escala 50:1).....	55
Fig. 3.35. Medición de las diagonales principales tras deformada. Prueba No.9. Parte 2. Último nivel de refinamiento. Escala de colores de 0 a valor máximo resultante registrado (5.505 mm). En figura: a), b) diagonales principales de pared frontal; c), d) diagonales principales de pared trasera.....	56
Fig. 3.36. Representación de tensiones equivalentes de von Mises y deformada del contenedor. Prueba No. 10. Fuerza aplicada hacia el contenedor en cara frontal. Último nivel de refinamiento. Escala de colores de $2.746 \cdot 10^2 \text{ N/m}^2$ a $3,43 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ (343 MPa). Escala de deformación 100:1.....	58
Fig. 3.37. Representación de desplazamientos resultantes. Prueba No. 10. Fuerza aplicada hacia el contenedor en cara frontal. Último nivel de refinamiento. Escala de colores de 0 a valor máximo resultante registrado (2.874 mm). Ubicación de puntos de lectura. Escala de deformación 1:1.....	59

Notación

E	Módulo de Young del material.
ρ	Densidad del material.
ν	Número de Poisson del material.
σ_e	Límite elástico del material.
σ_{lim}	Límite de rotura del material.
g	Aceleración de la gravedad.
R	Ratio o masa máxima permitida del contenedor original.
Rg	Peso de R o R multiplicado por g.
T	Tara de fabricación del contenedor original.
P	Masa máxima permitida de la carga de transporte ($R - T$) en contenedor original.
Pg	Peso de P o P multiplicado por g.
I	Fuerza aplicada por isocorner.
S	Masa impuesta sobre el suelo del contenedor.
F	Factor de incremento de carga.
L	Masa de carga de transporte en contenedor modificado.
Lg	Peso de L o L multiplicado por g.
W	Carga aplicada sobre pared.
C	Carga aplicada sobre techo.

1 Introducción

El transporte marítimo es quizás el más internacional de todos los grandes sectores comerciales del mundo y uno de los más peligrosos. La creciente tendencia de reutilizar contenedores marítimos para diferentes propósitos, como viviendas, oficinas y estructuras temporales, ha generado la necesidad de realizar evaluaciones estructurales detalladas que aseguren su integridad y seguridad. Los contenedores, diseñados originalmente para soportar cargas específicas en entornos de transporte marítimo y terrestre, pueden ver comprometida su resistencia estructural cuando son modificados para nuevos usos o ubicaciones. Por ello, es fundamental aplicar métodos avanzados, como el análisis por elementos finitos, para evaluar su comportamiento bajo nuevas condiciones de carga y medioambientales.

Este trabajo se centra en la evaluación estructural de contenedores marítimos modificados, empleando el Método de los Elementos Finitos (MEF) para analizar su respuesta frente a diferentes escenarios de carga, según las normativas internacionales de transportación. Los contenedores que se estudian forman parte de un proyecto de solución energética modular de la empresa española Proinsener Energía, con destino en Australia. Mediante el enfoque del análisis, es posible determinar la necesidad de refuerzos, optimizar el diseño estructural y garantizar el cumplimiento normativo, asegurando así la seguridad y funcionalidad de los contenedores en su nuevo contexto de uso.

1.1 Contenedores de transporte de carga.

Los contenedores de transporte de carga son recipientes de carácter permanente, de fácil llenado y vaciado, capaz de asegurar un uso repetido, sin ruptura de la carga en caso de trasbordo entre diferentes vehículos de transporte. En esta versatilidad se ha fundamentado el crecimiento exponencial de los volúmenes de carga en el comercio internacional [1].

Estas estructuras constituyen la unidad de transporte de carga que permite efectuar la mayor parte de los tráficós mundiales de mercancías. Existen modelos para cada necesidad del transporte, todos ellos apilables y provistos de dispositivos que permiten su manipulación horizontal o vertical, y su sujeción al vehículo de transporte o a otros contenedores.

La unidad de medida estandarizada de los contenedores es el TEU (Twenty-foot Equivalent Units), referida a los contenedores de 20 pies. Las capacidades globales de los buques, las terminales de contenedores o los movimientos portuarios de mercancías se miden mediante el TEU [1].

1.1.1 Tipos de contenedores de transporte de carga.

Los contenedores de transporte de carga tienen un primer nivel de clasificación que está referido al origen y destino del viaje:

Serie 1: se utilizan para transporte intercontinental.

Serie 2: utilizados para el transporte dentro de un mismo continente [2].

Dentro de estas clasificaciones se ramifican los siguientes tipos de contenedores:

Contenedor frigorífico (reefer container):

Contenedor térmico capaz de mantener la mercancía a una temperatura de hasta -30°C . Cuenta con un dispositivo frigorífico para mantener la temperatura deseada de manera autosuficiente, al mismo tiempo que puede conectarse al buque, al vehículo de transporte o a la terminal para obtener el suministro de energía que permite su funcionamiento. Algunos contenedores frigoríficos también controlan el grado de humedad de su interior. Son idóneos para transportar mercancías perecederas: carne, fruta, etc. Se fabrica en aluminio o combinación de aluminio y acero inoxidable [1].

Contenedor sin techo (open top container):

Contenedor que no dispone de techo rígido, lo que permite cargarlo mediante grúas y cubrirlo con una cubierta flexible y móvil, como una lona de plástico reforzado o una chapa rígida desmontable, por ejemplo. Puede tener puertas en los paneles frontales o laterales, y resulta especialmente útil para grandes cargas, como cristales, mármoles, material de construcción, madera o maquinaria de gran volumen. Se fabrica en acero [1].

Contenedor plataforma (flat rack container):

Contenedor formado por una plataforma, sin ninguna otra superestructura. Se utiliza cuando las características de los elementos que hay que transportar no encajan con las de ningún otro tipo de contenedor. Es especialmente adecuado para elementos pesados y de gran volumen, como maquinaria, cables, bidones, bobinas y láminas de acero, vehículos pesados o productos forestales. Se fabrica en acero [1].

Contenedor de costado abierto (open side container):

Cuando la mercancía que hay que cargar, debido a su longitud, resulta de difícil manejo a través del testero, se utiliza un contenedor abierto por uno o los dos costados para facilitar la operación. Es especialmente apto para la carga y descarga en las estaciones de ferrocarril. Está construido en acero [1].

Contenedor tanque (ISO tank):

Se emplea para transportar graneles líquidos (aceite, plásticos, resinas, látex, leche, cerveza, vino, agua mineral, etc.) y algunas sustancias peligrosas, como líquidos tóxicos, corrosivos y altamente inflamables. Se compone de una cisterna de aluminio o acero inoxidable anclada en un bastidor o estructura de soporte con los accesorios necesarios para su trincaje en los anclajes de buques, vehículos y vagones, o bien para apilarlo sobre otro contenedor [1].

Contenedores de transporte aéreo:

Se trata de contenedores para el transporte aéreo de carga, de formas ajustables al fuselaje de las aeronaves. Se fabrican en aluminio.

Estos contenedores son diseñados específicamente para cumplir con los requisitos de seguridad y tamaño de las bodegas de carga de los aviones y se adaptan a los estándares de la industria aeronáutica [1].

Contenedor de carga general (dry container):

Es el contenedor de uso más frecuente para cargar mercancía general seca y paletizada: cajas, barriles, etc. Es estanco y cerrado, con suelo, techo y paredes laterales y de los extremos rígidos. Está dotado de puertas en el testero y se carga a través de ellas con ayuda de carretillas o montacargas. Se fabrica en acero [1].

En este tipo de contenedor se basa el desarrollo del presente trabajo.

Los contenedores de carga de serie 1 tienen un ancho uniforme de 2438 mm (8 pies) [3]. Estos tienen diferentes designaciones que dependen de su largo y altura nominales (ver ANEXO A para más detalles sobre las distintas designaciones).

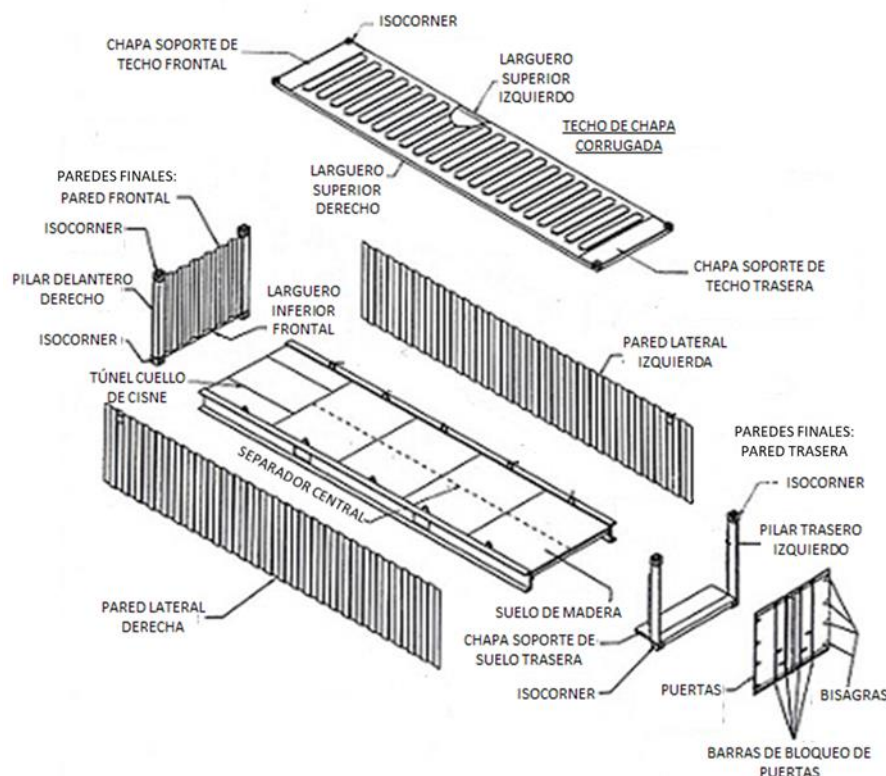


Fig. 1.1. Anatomía de un contenedor de carga general, serie 1, 40 pies. Nombres con los que serán referenciadas sus partes en el trabajo.

1.1.2 Transportación de contenedores de transporte de carga.

Los contenedores de transporte de carga pueden ser transportados mediante vía terrestre, aérea o marítima. En el caso de esta última, se requiere que los contenedores lleven una placa que indique el cumplimiento de los criterios del Convenio sobre la Seguridad de los Contenedores (CSC), a la cual se le conoce como “placa CSC”.

El convenio CSC, adoptado por la Organización Marítima Internacional (OMI), establece estándares internacionales para la seguridad en la construcción, inspección y prueba de contenedores marítimos, cumpliendo con dos objetivos: mantener un elevado nivel de seguridad de la vida humana en el transporte y la manipulación de contenedores, al establecer procedimientos de prueba generalmente aceptables y prescripciones conexas de resistencia; y facilitar el transporte internacional de contenedores proporcionando reglas de seguridad internacionales uniformes, aplicables igualmente a todos los modos de transporte de superficie [4].

El CSC está basado en lo establecido en las normas ISO 668 e ISO 1496/1, también de imperativo cumplimiento. La norma ISO 668 define las dimensiones exteriores y la clasificación de los contenedores; asegura que todos los contenedores tengan tamaños estandarizados, lo que es crucial para la compatibilidad con grúas, camiones, trenes y otros equipos de manipulación en todo el mundo. Por su parte, la norma ISO 1496/1 especifica los requisitos y métodos de prueba para la resistencia estructural y la durabilidad de los contenedores de carga general y de propósitos generales en la transportación marítima y ferroviaria, lo que incluye pruebas de carga, resistencia a impactos y estanquidad (para contenedores cerrados).

1.2. Proinsener Energía. Soluciones modulares en contenedores.

Proinsener Energía es una empresa fabricante e integradora de soluciones energéticas modulares de llave en mano. Sus soluciones en contenedor metálico, edificio prefabricado de hormigón, skid metálico y cuadros eléctricos están presentes en plantas solares, parques eólicos, estaciones de bombeo, minería, etc. por todo el mundo, con asistencia en más de 20 países.

En Proinsener se transforman mecánicamente contenedores de 10, 20 y 40 pies y se adaptan según las

especificaciones de cada proyecto, para cualquier tipo de aplicación, ya sea en el sector de las energías renovables, como en otros sectores industriales que requieran una solución contenerizada. Una vez modificados, muchos de estos contenedores deben ser transportados por vía marítima o ferroviaria a sus lugares de destino, por lo que deben cumplir con las normas y convenio argumentados en el apartado anterior.

1.2.1. Proyecto M.

El Proyecto M, denominado de esta manera en el presente trabajo por protección de los datos e intereses de la empresa y el cliente, consiste en un total de 8 contenedores marítimos de 40 pies de cubo alto (del inglés High Cube, HC) modificados para funcionar como bancos de capacitores, conectados a subestaciones energéticas en Australia. Todos los contenedores son iguales, y están integrados por: interruptores, capacitores, transformadores, pararrayos, aisladores, cuadro de control eléctrico y seccionador de puesta a tierra. Dadas las condiciones del medio de transportación, que será realizada por barco y tren, el diseño deberá ser validado bajo las condiciones de seguridad especificadas por la OMI.

1.2.2. Descripción de componentes eléctricos.

La siguiente tabla recoge la relación de masa por componente eléctrico integrado en los contenedores:

Tabla 1.1. Masa por unidad de componente eléctrico integrado al contenedor y sus cantidades.

Componente	Masa (kg)	Cantidad	Total (kg)
Seccionador de puesta a tierra	51	1	51
Aislador	0.64	29	18.56
Capacitor (alto)	100	36	3600
Capacitor (pequeño)	32	21	672
Interruptor	212	1	212
Chasis de Interruptor	27	1	27
Pararrayo	0.75	3	2.25
Transformador	36	7	252
Cuadro eléctrico	96.2	1	96.2

No aparecen incluidos en esta tabla elementos de masa significativamente menor, como lo son el cableado, sensores y luminarias. Asimismo, no se reflejan las masas de elementos estructurales como bancadas, soportes y marcos.

1.3. Especificación técnica para contenedor de acero de carga seca tipo ISO 40' x 8' x 9'6 TITAN.

Para el desarrollo del proyecto M, fue tomado como base para las modificaciones un contenedor de cubo alto ISO 40' x 8' x 9'6, del fabricante TITAN, con denominación TITAN-40HC.

El contenedor TITAN-40HC fue diseñado y construido para transportación de carga general por mar y tierra alrededor del mundo, y está adecuado para soportar las condiciones ambientales impuestas por ambos modos de transporte. Todos los materiales empleados en su construcción le permiten resistir un rango de temperaturas extremas de -40 a 70°C sin que sea afectada su resistencia y estanqueidad [5].

En cuanto a su transportación por barco, el contenedor está preparado para resistir, sin tipo alguno de deformación permanente o defecto, el peso de hasta 7 contenedores apilados encima, cada uno con una masa bruta máxima de 30480 kg, en las celdas guía del barco; y en cubierta, hasta 4 contenedores apilados encima y asegurados con un adecuado amarre vertical y diagonal con cables [5].

En la siguiente tabla se exponen las dimensiones generales (externas e internas) del contenedor en cuestión:

Tabla 1.2. Dimensiones generales del contenedor TITAN-40HC [5].

Dimensiones	Externas (mm)	Internas (mm)
Largo	12192 ($^0_{-10}$)	12032 ($^0_{-10}$)
Ancho	2438 ($^0_{-5}$)	2352 ($^0_{-5}$)
Altura	2896 ($^0_{-5}$)	2698 ($^0_{-5}$)

Dicho lo anterior, el contenedor completamente cargado podrá tener una masa bruta máxima de hasta 30480 kg, siendo la tara de 3700 kg ($\pm 2\%$) [5].

El diseño y ensayos de resistencia de los contenedores TITAN-40HC han sido basados en la norma ISO 1496, además de ser probados 1 de cada 200 contenedores (acorde a las indicaciones de la misma norma) bajos los ensayos de: apilamiento, elevación por los isocorners superiores, elevación por los isocorners inferiores y estado del suelo, verificándose el estado dimensional y estanquidad según las regulaciones tras cada prueba, por lo que el contenedor tratado, previo a su modificación, contaba con toda la garantía del fabricante.

1.3.1. Materiales de fabricación.

Los principales materiales empleados en la fabricación de TITAN-40HC y sus correspondientes características mecánicas se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 1.3. Materiales principales de fabricación de TITAN-40HC [5-8].

Material	E (GPa)	ρ (kg/m ³)	ν	σ_e (MPa)	σ_{lim} (MPa)
SCW49	210	7800	0.28	274.68	480.69
CORTEN A	200	7850	0.28	343.35	480.69
SS41	206	7850	0.3	245.25	402.21
SS50	206	7850	0.3	284.49	490.50
S20C	200	7870	0.28	245.25	412.02
STK41	210	7850	0.28	265	390
Bambú	16	965	0.3	159	159

Se destaca que el bambú es un material anisótropo, sin embargo, para el caso que se presenta, puede ser tratado como isótropo [9].

La siguiente tabla expone la relación entre los materiales listados y los diferentes componentes del contenedor:

Tabla 1.4. Materiales y componentes principales de fabricación de TITAN-40HC [5].

Componentes	Material
Isocorners	SCW49
Pilares delanteros	CORTEN A
Pilares traseros	
Umbral delantero	
Cabecero delantero	
Cabecero trasero	
Portones	
Carriles laterales inferiores	
Túnel cuello de cisne	
Travesaños	
Estabilizadores	
Carril central del suelo	
Panel frontal	
Paneles laterales	

Cartela de refuerzo	SS41
Pilares traseros interiores	SS50
Cojinetes de sujeción de barra de bloqueo	S20C
Bisagras	
Barras de bloqueo	STK41
Suelo	Bambú

1.4. Norma ISO 1496/1.

La parte 1 de la norma ISO 1496 expone las especificaciones básicas y los requisitos de ensayo para los contenedores de carga ISO de serie 1 de los tipos de uso general, totalmente cerrados, y ciertos tipos de uso específico que son adecuados para el intercambio internacional y transporte por carretera, ferrocarril y mar, incluido el intercambio entre estos medios de transporte [10].

Dentro de esta norma, y para los propósitos del presente trabajo, resultan de particular interés las especificaciones referidas a los ensayos a ser realizados sobre los contenedores y la validación de los resultados basada en los requerimientos dimensionales.

Los ensayos consisten en 13 pruebas [10]:

- Prueba 1. Apilamiento: se lleva a cabo para probar la capacidad de un contenedor completamente cargado (carga de diseño) para soportar una masa superpuesta de contenedores, teniendo en cuenta las condiciones en el barco y las excentricidades relativas entre los contenedores superpuestos.
- Prueba 2. Izaje desde los cuatro isocorners superiores: se lleva a cabo para probar la capacidad de un contenedor, distinto de los tipos 1D y 1DX (ver ANEXO A), para soportar el ser elevado, por un conjunto apropiado de cuatro isocorners superiores, con las fuerzas de elevación aplicadas de forma vertical, y a 60° desde la horizontal para los 1D y 1DX, siendo estos los únicos métodos apropiados de elevación de estos contenedores por los isocorners. También es propósito en este ensayo el probar la capacidad del suelo de soportar el peso de la carga total en condiciones de elevación.
- Prueba 3. Izaje desde los cuatro isocorners inferiores: se lleva a cabo para probar la capacidad de un contenedor para soportar el ser elevado, desde sus cuatro isocorners inferiores, mediante dispositivos de elevación sujetos únicamente a estos cuatro isocorners y vinculados a una sola viga separadora central dispuesta sobre el contenedor.
- Prueba 4. Restricción longitudinal: se lleva a cabo para probar la capacidad de un contenedor para soportar las cargas dinámicas, longitudinales y externas, dadas por las condiciones de operación ferroviarias, implicando una aceleración de 2 g.
- Prueba 5. Resistencia de paredes finales: se lleva a cabo para probar la capacidad de un contenedor de soportar las fuerzas dadas bajo las mismas condiciones dinámicas de la prueba de restricción longitudinal.
- Prueba 6. Resistencia de paredes laterales: se lleva a cabo para probar la capacidad de un contenedor de soportar las fuerzas resultantes de movimientos del barco.

- Prueba 7. Resistencia del techo (cuando aplica): se lleva a cabo para probar la capacidad del techo rígido de un contenedor, ensamblado, de soportar las cargas impuestas por personas trabajando sobre el mismo.
- Prueba 8. Resistencia del suelo: se lleva a cabo para probar la capacidad del suelo de un contenedor de soportar las cargas dinámicas concentradas, impuestas durante las operaciones de carga que incluyen montacargas industriales motorizados o máquinas similares.
- Prueba 9. Rigidez transversal: se lleva a cabo para probar la capacidad de un contenedor, distinto de los clasificados 1 D o 1 DX, para soportar las fuerzas de trasiego transversales resultantes de los movimientos del barco.
- Prueba 10. Rigidez longitudinal: se lleva a cabo para probar la capacidad de un contenedor, distinto de las clasificaciones 1 D o 1 DX, para soportar las fuerzas de trasiego longitudinales resultantes de los movimientos del barco.
- Prueba 11. Izaje por aperturas para elevación por montacargas (cuando aplica): se lleva a cabo sobre contenedores 1 CC, 1 C, 1 CX, 1 D o 1 DX equipados con aperturas para izaje por montacargas.
- Prueba 12. Ranuras de apuntalamiento (cuando aplica): se lleva a cabo para probar la capacidad de las ranuras de apuntalamiento de un contenedor para soportar fuerzas resultantes del desplazamiento longitudinal de la carga, producto del movimiento del barco, y prevenir daños sobre las puertas.
- Prueba 13. Impermeabilidad: tras la finalización de las pruebas, no debe penetrar agua en el contenedor.

Los procedimientos para la realización de cada una de las pruebas anteriores, sobre contenedores de clasificación 1 AAA, se recogen en la siguiente tabla:

Tabla 1.5. Procedimientos para desarrollo de las pruebas en contenedores 1 AAA [10].

No. de prueba	Procedimiento
1	El contenedor debe: • Ser colocado sobre cuatro calzas de nivelación, ubicadas centradas bajo cada isocorner inferior y siendo de las mismas dimensiones de estos en el plano de nivel. • Tener una masa uniformemente distribuida sobre el suelo de forma tal que la masa de prueba combinada con la del contenedor sea igual a 1.8 R. • Ser sometido a fuerzas verticales de 942 kN, aplicadas sobre cada uno de los isocorners superiores.
2	El contenedor debe: • Tener una masa uniformemente distribuida sobre el suelo de forma tal que la masa de prueba combinada con la del contenedor sea igual a 2 R. • Ser elevado cuidadosamente por sus cuatro isocorners superiores de forma tal que no sean aplicadas fuerzas de aceleración o desaceleración significativas. Las fuerzas de izaje deben ser aplicadas verticalmente. • Una vez elevado, ser suspendido por 5 min y para después ser bajado hasta el suelo.
3	El contenedor debe: • Tener una masa uniformemente distribuida sobre el suelo de forma tal que la masa de prueba combinada con la del contenedor sea igual a 2 R. • Ser elevado cuidadosamente por sus cuatro isocorners inferiores de forma tal que no sean aplicadas fuerzas de aceleración o desaceleración significativas. Las fuerzas de izaje deben ser aplicadas a 30° con respecto a la horizontal. La línea de acción de dichas fuerzas

	debe estar a no más de 38 mm de la cara exterior de los isocorners donde están dispuestas. • Una vez elevado, ser suspendido por 5 min y para después ser bajado hasta el suelo.
4	El contenedor debe: • Tener una masa uniformemente distribuida sobre el suelo de forma tal que la masa de prueba combinada con la del contenedor sea igual a R. • Ser asegurado longitudinalmente a un anclaje rígido, dispuesto a través de las aperturas de los isocorners inferiores, en sus caras trasera o frontal (solo un lado será asegurado). • Ser sometido a una fuerza horizontal de 2 Rg, aplicada a través de las aperturas de los isocorners inferiores opuestos al anclaje, primero con sentido hacia los anclajes y después con sentido opuesto.
5	El contenedor debe ser sometido a una carga interna de 0.4 Pg. Dicha carga debe ser uniformemente distribuida sobre la pared final ensayada y debe permitirse la deflexión libre de la misma. Si el contenedor no es simétrico, la prueba se realizará en cada pared final.
6	• Cada pared lateral del contenedor debe ser ensayada. En caso de construcción simétrica, solo una necesita ser examinada. • Cada pared lateral debe ser sometida a una carga interna, uniformemente distribuida, de 0.6 Pg, siendo esta aplicada a cada pared por separado. Debe permitirse en el ensayo la deflexión libre de estos elementos, así como de sus miembros longitudinales.
7	Una masa de 300 kg debe ser uniformemente distribuida sobre un área de 600 x 300 mm, localizada en la zona más vulnerable del techo del contenedor.
8	• El contenedor debe ser colocado sobre cuatro calzas de nivelación, ubicadas, centradas, bajo cada isocorner inferior y siendo de las mismas dimensiones de estos en el plano de nivel. • El ensayo se lleva a cabo mediante el uso de un vehículo de ruedas neumáticas, con una masa de 3630 kg por eje de rueda (7260 kg totales). • El área de contacto de cada rueda con el suelo debe ser de no más de 185 mm (en dirección paralela a los ejes) por 100 mm, siendo la misma de no más de 142 cm². El ancho de ruedas debe ser nominalmente de 180 mm y su diámetro de 760 mm. • El vehículo de prueba debe ser maniobrado sobre toda el área del suelo del contenedor.
9	• El contenedor con únicamente su masa de tara debe ser colocado sobre cuatro calzas de nivelación, ubicadas centradas bajo cada isocorner inferior y siendo de las mismas dimensiones de estos en el plano de nivel. • Debe restringirse el movimiento lateral y vertical por medio de dispositivos de anclaje que actúen a través de las aperturas de los isocorners inferiores. La restricción lateral debe ser provista solo en un isocorner diagonalmente opuesto al isocorner superior de aplicación de la fuerza y en el mismo marco final. • Fuerzas de 150 kN deben ser aplicadas por separado, o de manera simultánea, a cada isocorner superior de un lado del contenedor, en líneas paralelas a la base del contenedor y a la pared final. Se aplicarán primero hacia el contenedor y luego en sentido opuesto. • Si el contenedor no posee paredes finales idénticas, ambas deben ser ensayadas.
10	• El contenedor con únicamente su masa de tara debe ser colocado sobre cuatro calzas de nivelación, ubicadas centradas bajo cada isocorner inferior y siendo de las mismas

	dimensiones de estos en el plano de nivel. • Debe restringirse el movimiento longitudinal y vertical por medio de dispositivos de anclaje que actúen a través de las aperturas de los isocorners inferiores. La restricción longitudinal debe ser provista solo en un isocorner diagonalmente opuesto al isocorner superior de aplicación de la fuerza y en el mismo marco lateral. • Fuerzas de 75 kN deben ser aplicadas por separado, o de manera simultánea, a cada isocorner superior de un lado final del contenedor, en líneas paralelas a la base del contenedor y a las paredes laterales. Se aplicarán primero hacia el contenedor y luego en sentido opuesto. • Si el contenedor no posee paredes laterales idénticas, ambas deben ser ensayadas.
11	No aplica a contenedores de clasificación 1 AAA.
12	• Una barra rígida de metal de 50 mm de ancho debe ser insertada en cada par de ranuras de soporte de apuntalamiento, de manera que las barras atraviesen transversalmente el contenedor. • Una carga igual a 0.6 P debe ser distribuida sobre los 915 mm centrales de la barra, de manera que dicha magnitud sea aplicada horizontalmente hacia las puertas del contenedor. • Las puertas deben estar completamente abiertas durante este ensayo. • La carga debe ser mantenida sobre la barra durante 2 min.
13	• Una corriente de agua debe ser aplicada, en todas las juntas exteriores y costuras del contenedor, por una tobera de 12.5 mm de diámetro interior y a una presión de alrededor de 100 kPa. • La tobera debe ser sostenida a una distancia de 1.5 m del contenedor, y la corriente debe tener una velocidad de 100 mm/s

Tras la culminación de cada una de estas pruebas, el contenedor no debe mostrar deformación permanente ni algún tipo de anomalía que lo haga inadecuado para su uso. Además, los requerimientos dimensionales referidos a su manipulación, seguridad e intercambio deben ser satisfechos. Estos últimos son [10]:

- Las caras superiores de los isocorners del techo deben sobresalir sobre la cima del mismo por un mínimo de 6 mm.
- Aparte de las caras inferiores de los isocorners del suelo y los propios largueros laterales, ninguna cara de los elementos del suelo debe proyectarse por debajo del plano descrito por las caras inferiores de estos isocorners.
- Bajo condiciones dinámicas, o cargas estáticas equivalentes, con el contenedor teniendo una carga uniformemente distribuida de forma tal que la masa combinada del contenedor y la carga de prueba sea igual a 1.8 R, ninguna parte del contenedor debe flexar más de 6 mm por debajo del plano de la base (descrito por las caras inferiores de los isocorners).
- En la cara frontal y trasera del contenedor, la deformación o desplazamiento hacia los lados de la parte superior con respecto a la parte inferior, bajo las condiciones de prueba de rigidez transversal, no puede causar que la suma de los cambios de longitud de las dos diagonales exceda los 60 mm.
- En las caras laterales, la deformación o desplazamiento longitudinal de la parte superior del contenedor con respecto a la de la parte inferior, bajo las condiciones de prueba de rigidez totalmente longitudinal, no puede causar que la suma de los cambios de longitud de las dos diagonales exceda los 25 mm.
- La capacidad de las puertas para abrirse no debe verse deteriorada en las pruebas 5 y 6.

De entre los ensayos descritos en el presente epígrafe, no son simulados en el presente trabajo el 8, 11, 12 y 13. Las modificaciones al contenedor son realizadas en la fábrica de Proinsener Energía, donde también son integrados los componentes eléctricos internos, bancadas, marcos y demás estructuras, comprendiendo estos la única carga que transportará el contenedor durante su vida útil como solución eléctrica modular, por lo que pierde sentido el que se realice la prueba de resistencia del suelo ante el peso impuesto por una máquina montacargas. La prueba 11 no aplica al caso tratado, dado que el contenedor es de clasificación 1AAA y no cuenta con aperturas de elevación por montacargas. En cuanto a la prueba 12, se señala que los elementos integrados van soldados o atornillados a la estructura del contenedor y no se emplean los apuntalamientos designados para la sujeción de la carga, razón por la cual no se efectúa esta prueba. Por último, en cuanto al ensayo de impermeabilidad, Proinsener Energía emite una certificación basada en un ensayo por líquidos penetrantes que asegura la no penetración de agua al interior del contenedor y que es aceptada por la OMI, haciendo que no sea necesaria la ejecución de esta prueba bajo las especificaciones mencionadas.

1.5. Consecuencias legales.

El no cumplimiento de las normativas aplicables en la fabricación de estas soluciones modulares mediante la modificación estructural de contenedores marítimos puede traer graves y variadas consecuencias legales:

- Los contenedores que no cumplan con el CSC son considerados inseguros para el transporte marítimo, lo que lleva a la prohibición de su uso para transporte internacional.
- De la mano de lo anterior, las autoridades competentes pueden imponer sanciones económicas significativas por la fabricación y distribución por mar de contenedores que no cumplan con el CSC.
- Si un contenedor no conforme causa un accidente o daño (por ejemplo, debido a un colapso estructural), el fabricante sería responsable legalmente por los daños y perjuicios resultantes. Esto incluye daños a la carga, a la embarcación, a otras propiedades o a personas.
- Los clientes, dueños de los contenedores, podrían hacer demandas por incumplimiento de contrato, alegando que los productos entregados no cumplen con las especificaciones acordadas basadas en las normas internacionales.
- Si el incumplimiento genera una disputa comercial, la empresa podría verse involucrada en procedimientos de arbitraje o litigios internacionales, que son costosos y largos.
- La reputación de la empresa se vería gravemente afectada si se descubren problemas de cumplimiento con las normas, resultando en una posible pérdida de clientes y de confianza en el mercado.

1.6. Justificación.

En los apartados anteriores se ha comentado sobre las normas internacionales referidas a la fabricación y transportación de contenedores marítimos y las consecuencias que conllevarían el no cumplimiento de los establecido en estas. Si bien aquellos contenedores que mantengan su estructura original ya han sido probados por el fabricante y cuentan con las características que les otorgan una validación bajo dichas directrices, en el momento en que son modificados deben ser sometidos nuevamente a una examinación, lo que justifica la necesidad de un nuevo análisis estructural.

Dado que no se trata de un gran número de contenedores en el proyecto, no se dispone de los medios y no se justifica económicamente, la realización de los ensayos de manera física sobre un contenedor de prueba no es realizada. En cambio, se desarrolla la simulación de las diferentes pruebas mediante el método de los elementos finitos, con apoyo en el software comercial Solid Works, que es el programa base del diseño original de los contenedores.

1.7. Objetivos.

Los objetivos del presente trabajo son:

1. Adaptación de los contenedores modificados a un modelo simplificado para su análisis por el método de los elementos finitos.
2. Simulación de las pruebas estructurales fijadas en el convenio CSC y norma ISO 1491/1 referidas al transporte marítimo de los contenedores.
3. Evaluación de la capacidad resistiva de la estructura a partir de los resultados de las simulaciones y verificación dimensional de las deformaciones descritas bajo la acción de las cargas, con base en los desplazamientos máximos permitidos, descritos en las normas.

2 Metodología

En este capítulo se desarrolla una descripción de los métodos y herramientas empleados para la ejecución del análisis estructural de los contenedores modificados.

2.1. El método de los elementos finitos.

El método de elementos finitos (MEF) es un método de aproximación de problemas continuos de forma que [11]:

- Se aproxima la geometría (discretización física). El medio continuo se divide en un número finito de partes, o elementos, cuyo comportamiento se define mediante un número finito de parámetros asociados a ciertos puntos característicos, denominados nodos. Los nodos son los puntos de unión entre elementos adyacentes.
- La solución del sistema completo sigue las reglas de los problemas discretos. El conjunto se forma por el ensamblaje de los elementos.
- Las incógnitas del problema dejan de ser funciones matemáticas y se aproximan por el valor de la función en los nodos (discretización matemática).
- El comportamiento dentro de cada elemento queda definido a partir del comportamiento de los nodos mediante las llamadas funciones de forma (o de interpolación).

1.1.3 Fases del MEF.

Tras la descripción anterior, pueden definirse las siguientes fases del MEF [12]:

1. División en elementos finitos:

En esta fase (como comentado) se divide la estructura continua en elementos finitos interconectados entre sí mediante nodos, que están situados generalmente en los bordes de los elementos. De esta forma, los infinitos grados de libertad de una estructura continua se convierten en un número finito de grados de libertad de la estructura discreta, representado por el número total de parámetros nodales, que comprenden los desplazamientos de los nodos y en muchos casos también sus derivadas. Cuanto mayor sea el número de elementos en que se divide una estructura, habrá más similitud entre la estructura discretizada y la estructura continua y, en consecuencia, será mayor el grado de aproximación de los resultados que se obtengan.

2. Vector de desplazamientos del elemento:

En esta fase se determina el vector de desplazamientos de cada elemento, que permitirá conocer de forma aproximada los desplazamientos en cualquier punto de los mismos.

3. Matriz de rigidez del elemento:

En esta etapa se desarrolla la matriz de rigidez de cada elemento de manera individual, que permite calcular los parámetros nodales de un elemento en función de las fuerzas nodales que actúan sobre él.

4. Matriz completa de rigidez de la estructura:

La matriz completa o global de rigidez de la estructura consiste en el acoplamiento de las matrices individuales de cada elemento.

5. Respuesta de la estructura:

En este punto del MEF se determina el comportamiento de la estructura teniendo en cuenta las condiciones de contorno y de carga. La resolución de un sistema de ecuaciones permite calcular los

parámetros nodales desconocidos y, seguidamente, las fuerzas nodales desconocidas, que son las reacciones en los enlaces externos. A partir de los parámetros nodales se obtiene la respuesta de los elementos al ser determinadas las deformaciones y esfuerzos en cualquiera de sus puntos. De esta forma queda descrita la respuesta de la estructura a las condiciones de contorno y de carga.

2.2. Herramienta software utilizada.

Las simulaciones fueron realizadas con apoyo en el software comercial Solidworks. Esta es la herramienta usada por excelencia en la empresa Proinsener Energía para desarrollar sus diseños, lo cual incluye al proyecto M y todos los elementos que lo componen.

Las simulaciones en Solidworks se realizan con el complemento Solidworks Simulation, el cual es un programa de Análisis por Elementos Finitos (del inglés Finite Element Analysis, FEA) creado dentro de la interfaz Solidworks CAD (siglas en inglés para Diseño Asistido por Ordenador). El software utiliza solucionadores FEA validados por la Agencia Nacional para el Método de los Elementos Finitos y Normas (del inglés National Agency for Finite Element Methods and Standards, NAFEMS) para ofrecer resultados precisos y confiables en un amplio rango de tipos de estudio, desde un análisis básico estático lineal hasta problemas no lineales y dinámicos [13].

El desarrollo de una simulación consta de tres fases fundamentales:

1. Preprocesamiento: se determina el tipo de análisis (estático, térmico, de frecuencia, etc.), las propiedades del material, las cargas y condiciones de contorno; además, se efectúa el mallado de la pieza mediante una discretización en elementos finitos.
2. Ejecución: se procesa la información.
3. Postprocesamiento: se analizan los resultados y se configura la visualización de los datos.

En un mallado convencional, los elementos finitos pueden presentar geometrías 1D, 2D y 3D, como las mostradas en la siguiente figura (no se muestran los elementos 1D, consistiendo estos en segmentos de línea):

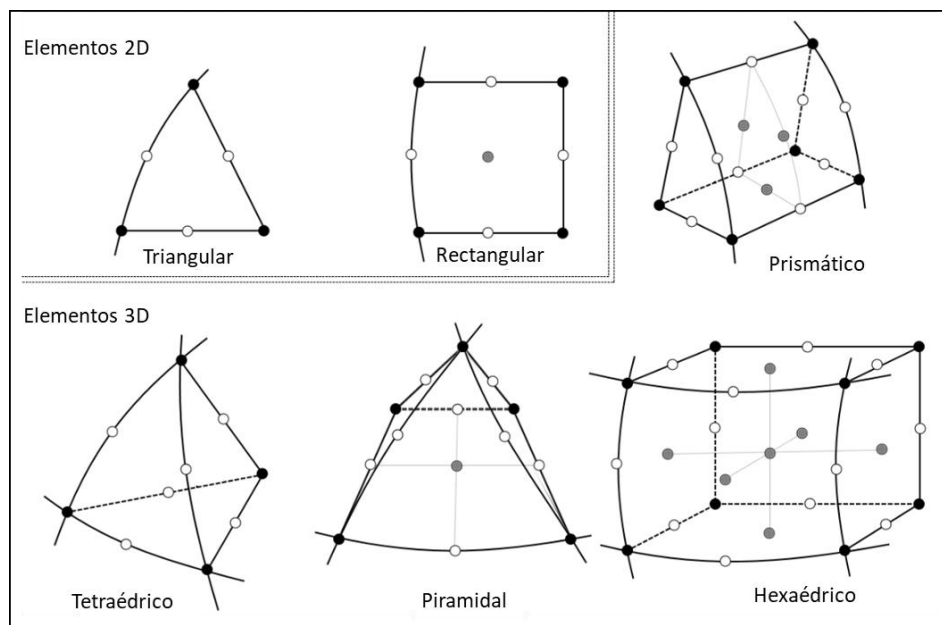


Fig. 2.1. Tipos de elementos finitos y sus geometrías.

Además de los elementos 1D (elementos viga), de entre los elementos 2D y 3D mostrados en la figura anterior Solidworks utiliza solamente los tetraédricos para mallado de sólidos y triangulares para superficies. El motivo de ser empleados exclusivamente estos dos tipos para mallado es porque con ellos se obtiene la mejor calidad de malla utilizando siempre el mismo tipo de elemento [14].

2.3. Modelo.

En las siguientes imágenes se pueden apreciar las modificaciones estructurales realizadas sobre el contenedor:

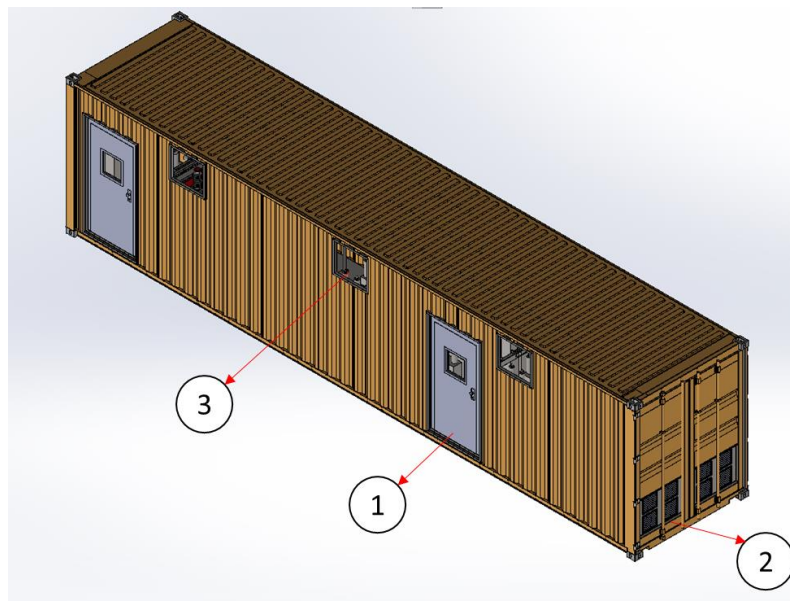


Fig. 2.2. Contenedor modificado. Vista isométrica. En figura: 1- puerta peatonal, 2- filtros, 3- panel de explosión - salida de gases.

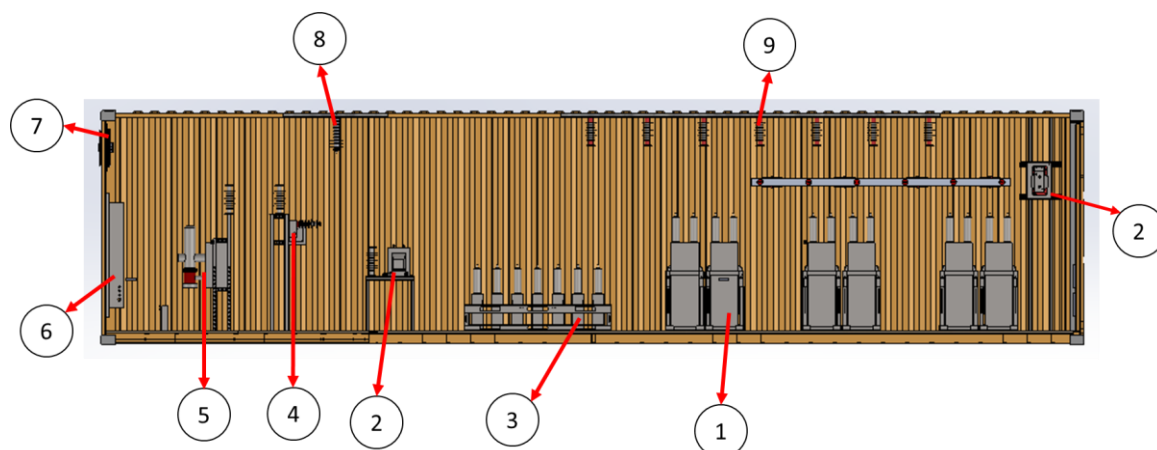


Fig. 2.3. Contenedor modificado. Vista lateral (interior, pared de contenedor no visible). En figura: 1- capacitor (alto), 2- transformador, 3- capacitor (pequeño), 4- seccionador de puesta a tierra, 5- interruptor, 6- cuadro eléctrico, 7- extractores, 8- pararrayo, 9- aislador.

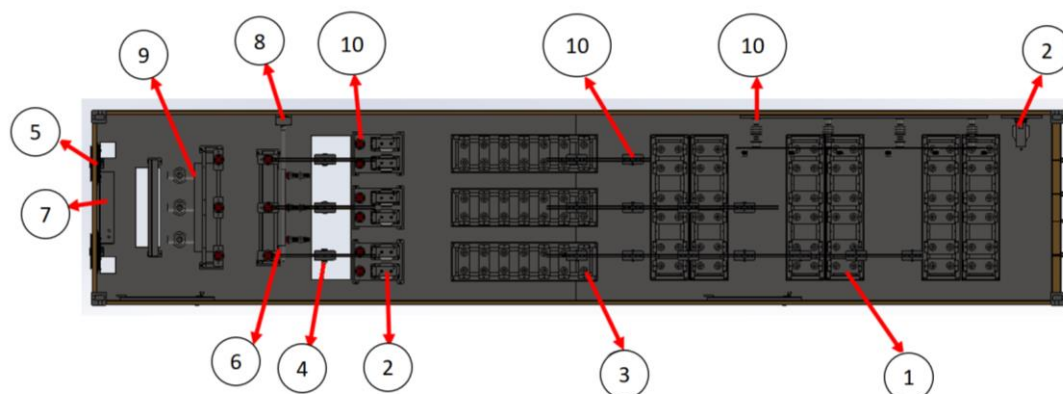


Fig. 2.4. Contenedor modificado. Vista superior (interior, techo de contenedor no visible). En figura: 1- capacitor

(alto), 2- transformador, 3- capacitor (bajo), 4- pararrayo, 5- extractor, 6- seccionador de puesta a tierra, 7- cuadro eléctrico, 8- caja de seccionador de puesta a tierra, 9- interruptor, 10- aislador.

El contenedor modificado ha sido diseñado con una distribución casi uniforme del peso de los componentes que lo integran, dispuestos de forma simétrica en su interior, con respecto al eje longitudinal (ver figura 2.4) y sobre un suelo de acero de 6 mm de espesor soldado sobre el suelo original, lo que contribuye a una transferencia más igualitaria de las cargas. Si bien la masa de estos componentes supone una cantidad muy inferior a la máxima soportada por el contenedor original, las paredes y suelo han sufrido cortes importantes que podrían comprometer la resistencia y rigidez de la estructura (ver cortes en paredes en figura 2.3 y cortes en suelo en figura 2.4).

2.3.1. Simplificación de la estructura y componentes.

Una vez fabricado el contenedor, para su transportación, todos los espacios cortados de las paredes son cubiertos con chapas de acero inoxidable atornilladas. Estas chapas solo tendrán influencia significativa en la estructura para ciertas pruebas en las que las cargas sean aplicadas en dirección normal a las paredes en las que se encuentran, no siendo así en los casos de cargas dispuestas en el mismo plano de las paredes; para estos últimos, estos elementos son simplificados.

Otra simplificación importante se efectúa con respecto a los componentes eléctricos y bancadas acoplados al contenedor. Estos elementos se encuentran atornillados a la chapa del suelo o soldados a las paredes y techo. La empresa emite un certificado referido a los pares de apriete de las uniones atornilladas, por lo que un análisis a mayor profundidad de estas no será necesario. Teniéndose esto en cuenta, para el modelo todas las bancadas y perfilera (soportantes de los componentes eléctricos) serán tratadas como uniones soldadas al suelo, paredes y techo del contenedor. Dicho lo anterior, el contenedor modificado, para mayor simplicidad y reducción de la cantidad de elementos de mallado, es modelado vacío con los elementos ya mencionados tratados como cargas remotas, con sus masas en sus respectivos centros de gravedad; o como fuerzas de peso, normales al suelo del contenedor y aplicadas sobre las áreas de contacto descritas por las bases de las bancadas que sustituyen. Esto se argumenta con mayor detalle en cada caso de simulación.

2.3.2. Elementos para mallado.

Habiéndose creado el modelo dentro del entorno de Solidworks, al emplearse el complemento de simulación el propio programa reconoce los diferentes componentes y los interpreta, ofreciendo una recomendación de cómo deberían ser estos modelados: los perfiles alargados los sugiere como elementos tipo viga, los componentes de chapa como elementos tipo shell (elementos de superficie que incluyen lámina o placa), y el resto como sólidos (elementos 3D). Si bien las simplificaciones a elementos viga y shell para muchos casos son las más óptimas, dado que aportan buenos resultados con una reducción significativa del número de elementos, y con estos, los grados de libertad a analizar (aminorándose así la capacidad requerida por el ordenador que ejecuta los cálculos); específicamente con el algoritmo de trabajo de Solidworks esto pierde significación según es mayor la cantidad de elementos de estos tipos que comprenden un ensamblaje. Al inicio de cada ejecución del solucionador, el programa convierte todos los componentes de chapa a elementos de mallado shell, con sus respectivos espesores, y procede del mismo modo con los elementos viga. A lo anterior se le suma el tiempo necesario para establecer las ecuaciones de relación, no siendo hasta después de esto que comienza realmente a ejecutarse el solucionador. Con elementos tipo sólido lo anteriormente descrito no sucede, ejecutándose el análisis de forma directa. Si además se tiene en cuenta que, debido a la forma en que se transfieren las cargas no todas las sugerencias de tipo de elemento dadas por el software son correctas, se debería usar una mayor cantidad de tiempo para el discernimiento de las sugerencias correctas y la conversión a otro tipo de elemento de las que no lo son. Con lo anterior, el empleo de elementos viga y shell se hace menos atractivo para específicamente el caso del contenedor tratado. Debido a los argumentos plasmados, para la simulación de las pruebas se decide desarrollar mallados de la estructura con elementos tipo sólido.

Con las características del ordenador disponible para la ejecución de los cálculos, las simulaciones con elementos tipo sólido, en lo referido al estudio del contenedor, tardan un tiempo inferior a los 5 minutos.

El uso de elementos viga y shell reducen significativamente la capacidad requerida del ordenador que procesa la simulación, sin embargo, en este caso, el procesamiento previo de estos elementos extiende en demasía el

proceso de análisis, en comparación con el uso de elementos sólidos.

2.3.3. Mallado, convergencia y singularidades.

Selección del mallador:

Como comentado en el subepígrafe previo, para los casos tratados el modelo del contenedor es mallado con elementos de tipo sólido. El tipo de mallador empleado es especificado en cada caso estudiado, siendo las opciones:

- Mallador estándar:

Activa el esquema de mallado de Delaunay-Voronoi para efectuar operaciones de mallado subsiguientes [15]. Con este método, se trata de maximizar el menor valor de ángulo de todos los triángulos mientras la geometría es dividida en elementos triangulares o tetraédricos (ver apartado 2.2).

En esencia, el mallado estándar tiende a evitar los triángulos delgados y contribuye a reducir el número de elementos distorsionados, los cuales pueden afectar la precisión de los resultados [16]. Con este, el software siempre intenta llenar cada cara con triángulos equiláteros, para después entretejerlas y crear volúmenes, formándose así mallas muy uniformes.

- Mallador basado en la curvatura:

El mallador crea más elementos en zonas de mayor curvatura automáticamente (sin necesidad de aplicar un control de malla) [15]. Esto lo hace preferente para el mallado de piezas o ensamblajes complejos.

Con el mallado basado en la curvatura, el tamaño de elemento es determinado matemáticamente por el mínimo número de estos que quepan en un círculo hipotético, teniéndose en cuenta los tamaños mínimo y máximo de elementos especificados [16]. El tamaño de dicho círculo es también definido por el usuario, mediante el establecimiento del número de elementos que se desea quepan en este.

La posibilidad de definir los tamaños de elemento mínimo y máximo dan paso a un mallado más robusto que se adapta a la geometría, al emplearse elementos más pequeños donde la curvatura es mayor [16]. Lo anterior, da lugar a que se requieran menos controles de mallado y refinamientos para alcanzar la convergencia de los resultados, en comparación con el mallado estándar.

- Malla basada en curvatura de combinado:

Este mallador adapta automáticamente el tamaño del elemento a la curvatura local de la geometría para crear una matriz de malla suave [15]. Este se recomienda sea empleado en casos en los que los mallados estándar y basado en curvatura fallan.

El mallador basado en curvatura de combinado no admite un mallado continuo (nodos comunes entre contornos en contacto) para conjuntos de unión rígida. Los controles de malla no son transferibles entre los límites en contacto de los sólidos que se mallan de forma independiente y que están unidos (algo que sí es posible con el mallador basado en la curvatura). Por ejemplo, puede que se necesite aplicar controles de malla por separado a las aristas en contacto de dos sólidos que están unidos [15].

La gran cantidad de elementos del contenedor y su diversidad de tamaños y formas dificultan en gran medida la obtención de un mallado compatible entre los diferentes componentes. Con lo anterior, y considerándose la compleja geometría de las piezas, para las simulaciones se desarrolla por preferencia un mallado basado en la curvatura, aplicándose el basado en la curvatura de combinado en aquellos casos en los que el primero falla. La malla es incompatible entre componentes distintos para todos los casos.

Análisis de convergencia:

Con respecto a la convergencia, se afirma que esta es tratada de manera local y no global. Para cada caso de estudio, se ejecuta una primera simulación con un tamaño de malla grueso, el cual arroja unos resultados que, si bien son imprecisos, sirven como indicio de las zonas más afectadas por las cargas aplicadas. Luego, en simulaciones posteriores, se ejecuta un refinamiento sucesivo de la malla únicamente en las zonas de interés, manteniéndose el resto de la estructura con un mallado grueso. Con la primera simulación se establecen también sensores en varios puntos de interés, los cuales ofrecen una medición consecuente de las respectivas tensiones y desplazamientos. En cada preprocesado de una nueva simulación, la malla es refinada localmente a la mitad del

tamaño de elementos del mallado previo, hasta que la convergencia es alcanzada.

Tratamiento de las singularidades:

Aun cuando el procedimiento para alcanzar un mallado convergente es el adecuado, el gran número de elementos ensamblados facilita la aparición de las singularidades.

Las singularidades son puntos o zonas en las que los valores de tensión divergen hasta el infinito (teóricamente) según se refina el mallado; comprendiendo este el caso opuesto de los concentradores de tensiones, que alcanzan la convergencia según el mallado se hace más fino [15].

Las singularidades aparecen cuando las cargas son aplicadas o transferidas sobre aristas o puntos en vez de áreas. Las tensiones se calculan como la fuerza sobre el área en que es aplicada, si esta área es 0, el valor de tensión será, teóricamente, infinito.

Las singularidades de la tensión pueden contaminar las distribuciones de la tensión solo localmente[15]. Ante la posibilidad de singularidades que no puedan ser evitadas, el software proporciona la herramienta “Zona activa de tensión”, la cual detecta (dentro de un rango de estudio) las regiones del modelo donde los gradientes de tensión entre elementos adyacentes son irregulares. Con un diagnóstico de estas zonas activas el programa ejecuta refinamientos sucesivos en las aristas afectadas, permitiendo discernir entre aquellos resultados correspondientes a singularidades y aquellos referidos a concentradores de tensión. Esta herramienta es empleada en el presente trabajo como apoyo a los resultados obtenidos.

La herramienta de diagnóstico de la zona activa de tensión detecta gradientes de tensión irregulares en los siguientes casos [15]:

- Cerca de aristas geométricas nítidas y en esquinas de sólidos y sólidos de vaciado.
- En regiones donde las condiciones de contorno aplicadas restringen la libre expansión (o contracción) del sólido bajo el entorno de carga. En el mundo real no hay sujeciones ni soportes "infinitamente rígidos".
- En aristas geométricas de los sólidos donde se aplican cargas/sujeciones o donde se producen transiciones bruscas de las condiciones de contorno (de muy rígidas a flexibles).
- Alrededor de los vértices donde se aplican cargas de puntos y sujeciones de puntos (en sólidos o vaciados).

2.4. Cargas. Combinaciones en transportación utilizadas en las pruebas.

La siguiente tabla recoge las diferentes combinaciones de carga por simulación realizada:

Tabla 2.1. Combinaciones de carga por simulación realizada.

Cargas	Isocorners (I, unitaria, kN)	Suelo (S, distribuida, total, kg)	Gravedad (g, m/s ²)	Factor de incremento de carga (F)	Pared (W, N)	Techo (C, N)
Prueba No. 1	942	51164	9.81	1.8	-	-
Prueba No. 2	-	57260	9.81	2	-	-
Prueba No. 3	-	57260	9.81	2	-	-
Prueba No. 4	114.997	-	9.81	2	-	-

Prueba No. 5	-	-	9.81	0.4	31480	-
Prueba No. 6	-	-	9.81	0.6	47220	-
Prueba No. 7	-	-	9.81	-	-	2943
Prueba No. 9	150	-	9.81	-	-	-
Prueba No. 10	75	-	9.81	-	-	-

Se destaca que en la tabla anterior todos los elementos están referidos a las condiciones de prueba descritas en la norma ISO 1496 y ajustadas, en algunos aspectos, al diseño del contenedor modificado. Esto es argumentado en mayor detalle en los apartados correspondientes a cada simulación.

3 Simulaciones y resultados

En este capítulo se exploran los resultados obtenidos a partir de las simulaciones realizadas para cada prueba referida en la ISO 1496, presentando tanto los datos generados como un análisis detallado de su comportamiento, así como el razonamiento desarrollado para establecer las bases evaluativas. Al final de cada epígrafe, se formulan conclusiones parciales clave que permiten interpretar mejor los resultados y resumen el comportamiento de la estructura al pasar la prueba.

3.1. Prueba No.1.

En el presente apartado es expuesto el razonamiento llevado a cabo en el preprocesado de la simulación de la prueba número 1, seguido de un análisis de los resultados obtenidos.

1.1.4 Preprocesado.

Para el desarrollo de esta simulación se intentó recrear las mismas condiciones a las que estaría sometido un contenedor durante el desarrollo de un ensayo real.

En esta prueba, el contenedor debe ser colocado sobre cuatro isocorners de apoyo que se encuentren en un mismo plano y que sean coincidentes con los propios esquineros base de la estructura, la cual es presionada por los isocorners superiores por una prensa que transmite cuatro veces la carga I (véase tabla 2.1), también, a través de cuatro esquineros coplanares y coincidentes con los isocorners superiores del contenedor. Cada isocorner recibe una fuerza de valor I.

Teniéndose en cuenta lo descrito en el texto anterior, se entiende que el peso total del contenedor, sumado con la carga ejercida por la prensa, generan una fuerza normal a los isocorners de apoyo tal, que la fricción producida entre estos y los esquineros inferiores del contenedor da lugar a que el contacto pueda ser tratado como una conexión empotrada.

Con respecto a la carga I, impuesta a cada isocorner del techo, no basta con que esta sea ejercida en dirección normal a las caras superiores, pues establecer las cargas de este modo permitiría la rotación de las caras según estos elementos son desplazados hacia abajo. Siendo la fuerza ejercida por una prensa rígida, que simula la masa de 8 contenedores de 26673 kg cada uno, con una aceleración de 1.8 veces la de la gravedad, se entiende que la rotación de las caras superiores de los isocorners del techo es minimizada (también especificado en la norma ISO 1496). Por ello, para la simulación, fue modelada la prensa como 4 isocorners unidos por un plano, sobre cada uno de los cuales son aplicados los 942 kN de fuerza. Al mismo tiempo, este nuevo elemento es tratado como un sólido rígido, lo que garantiza que bajo la acción de las cargas el plano descrito por las caras superiores de los isocorners en cuestión se desplace hacia abajo sin producir giros.

Finalmente, se puede argumentar que para la ejecución de esta simulación sobre el contenedor modificado, referida a la Prueba No.1 de la norma ISO 1496, no fue aplicada la carga distribuida S sobre el suelo. La carga S está afectada por el factor F (ver tabla 2.1), y está destinada a ser probada sobre el modelo del contenedor original, diseñado para soportar un cargamento de hasta 26780 kg (R-T). El factor F supone un aumento de las cargas que tiene en cuenta los incrementos puntuales de las mismas que puedan darse durante la transportación por barco de los contenedores, debidos a efectos dinámicos producidos principalmente por el oleaje. El contenedor modificado no ha sido diseñado para soportar 26780 kg de cargamento, sino específicamente la masa aportada por los componentes eléctricos y bancadas ya comentados; por lo cual, para la simulación, en sustitución de S, se ha tenido en cuenta las masas de cada uno de los mencionados elementos, dispuestas en sus centros de gravedad como masas remotas o aplicadas como fuerzas de peso, siendo sus valores afectados en todos los casos por el factor F. Todo lo comentado puede apreciarse mejor en la siguiente imagen:

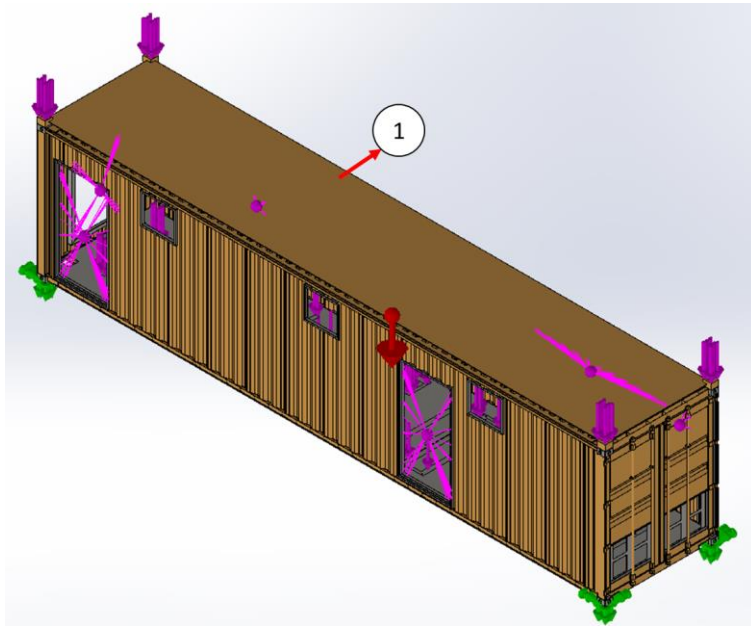


Fig. 3.1. Aplicación de cargas y condiciones de contorno sobre contenedor modificado. Vista isométrica. 1- Prensa rígida. Color verde: empotramiento de caras inferiores de los isocorners del suelo; color morado: cargas de masa remota (puntos) y fuerzas normales a las superficies en que son aplicadas (flechas); color rojo: acción de la gravedad.

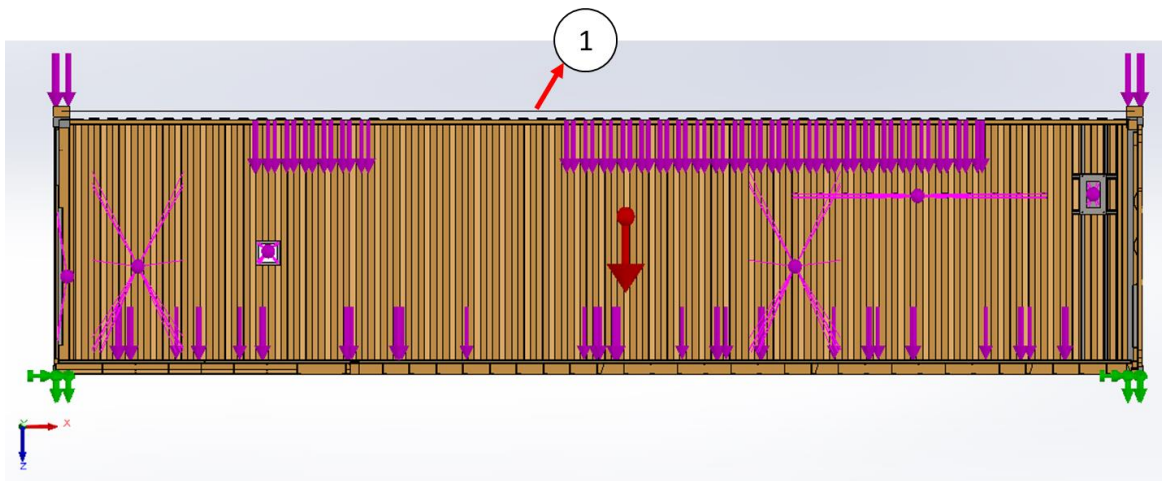


Fig. 3.2. Aplicación de cargas y condiciones de contorno sobre contenedor modificado. Vista lateral interna (pared no visible). 1- Prensa rígida. Color verde: empotramiento de caras inferiores de los isocorners del suelo; color morado: cargas de masa remota (puntos) y fuerzas normales a las superficies en que son aplicadas (flechas); color rojo: acción de la gravedad.

1.1.5 Análisis de resultados obtenidos. Tensiones.

Al tratarse este apartado de la primera simulación, se realizará una argumentación más detallada sobre el procedimiento de análisis.

La siguiente imagen ofrece los resultados de la simulación estática lineal con el mallado inicial. En este, fue empleado un mallado basado en curvatura de combinado, con malla independiente, y con tamaños de elemento globales que oscilan entre 300 y 900 mm:

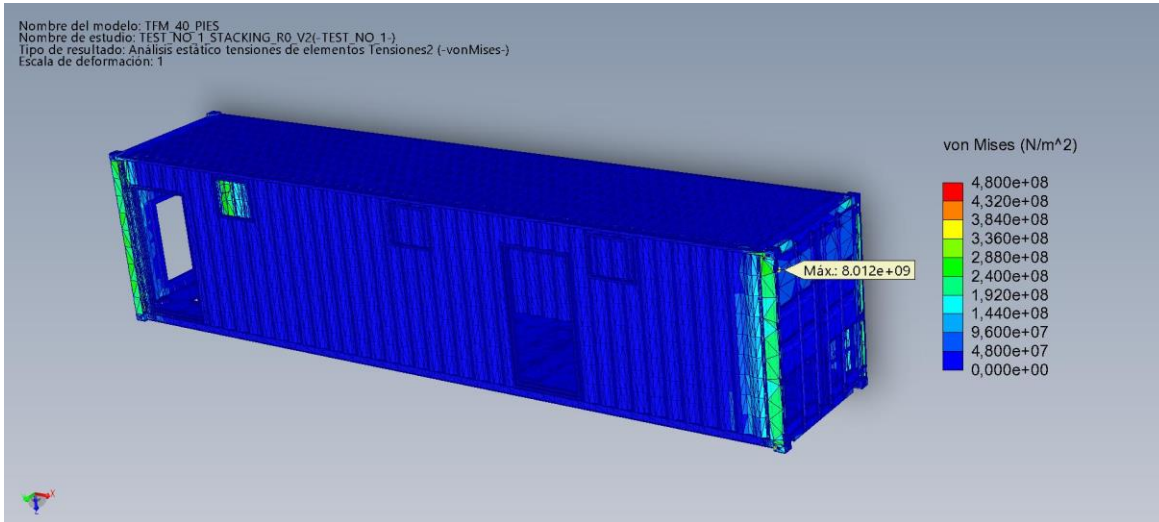


Fig. 3.3. Resultados de simulación. Análisis estático lineal. Representaciones de tensiones de von Mises. Tamaño mínimo de elemento global: 300 mm. Tamaño máximo de elemento global: 900 mm.

Tal como esperado, al ser esta la prueba de apilamiento, las zonas de mayores tensiones se concentran en los pilares del esqueleto del contenedor. El peso de los componentes internos parece tener un efecto significativamente menor en comparación con la carga aplicada sobre los isocorners. Dicho esto, los isocorners, pilares y travesaños superiores de las caras frontal y trasera del contenedor son los componentes de mayor interés en este análisis y, por ende, aquellos cuyas mallas son refinadas en simulaciones posteriores.

En la figura 3.3 se aprecia la escala de colores que alcanza hasta los $4.8 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ (480 MPa). Esto aparece de tal manera para facilitar una mejor interpretación visual de los resultados. El material más común, ocupando más del 80% del volumen del contenedor, es el COR-TEN A, con límite de rotura de 480.69 MPa. Si bien se trata de un análisis lineal, se elige este valor como límite de la escala debido a la aparición de pequeñas zonas de plastificación. Como comentado en el apartado 2.3.3, en estas simulaciones aparecen varios puntos de singularidades que afectan los resultados en los elementos adyacentes y que desproporcionarían la escala de colores de ser tenidas en cuenta; por ello se ha limitado la misma hasta el máximo valor de interés. En la figura 3.3 se aprecia el máximo valor de tensión de $8.012 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$ (8012 MPa) correspondiente a una posible singularidad. Esta puede observarse con mayor detalle en la siguiente imagen:

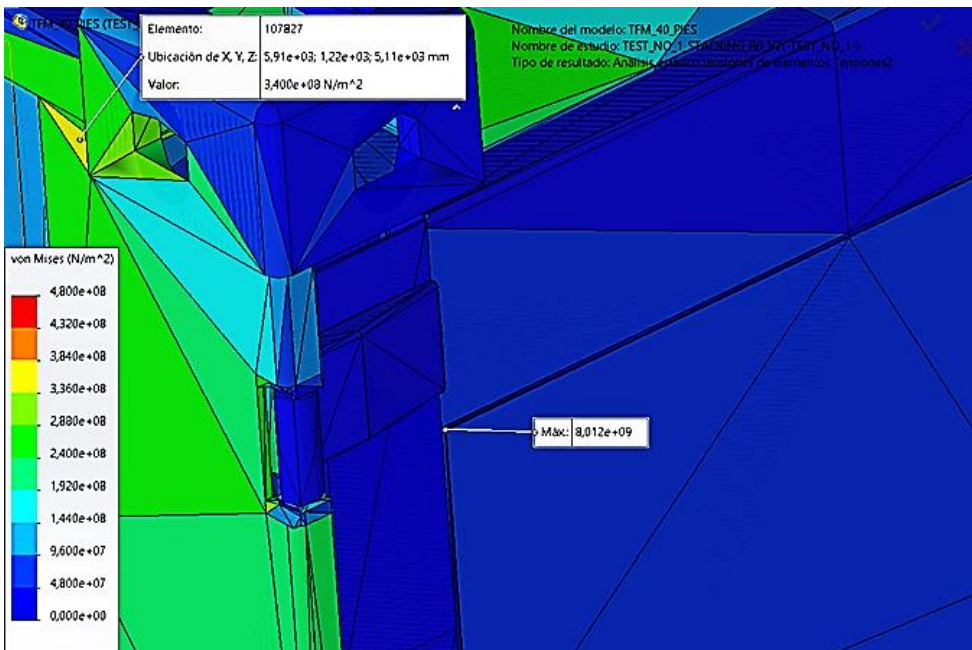


Fig. 3.4. Resultados de simulación. Análisis estático lineal con mallado inicial. Representaciones de tensiones de von Mises. Valor máximo de tensión calculada: $8.012 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$.

Se muestra en la figura 3.4 cómo este valor máximo corresponde a una esquina en la unión de 3 elementos de la puerta trasera del contenedor (perfiles vertical y horizontal de la puerta y chapa de cuerpo central de la misma). Por su ubicación y exagerado valor, hasta este punto del análisis, se puede plantear la existencia de una posible singularidad. Esto es comprobado más adelante con un diagnóstico de zona activa de tensión.

Con esta primera simulación son dispuestos además varios puntos de lectura de tensiones que funcionan como sensores en los resultados de los posteriores refinamientos de malla (11 sensores en total). Estos puntos son seleccionados en las zonas de mayor peligrosidad, no muy cercanos, sin embargo, a los bordes y esquinas a causa de la posible existencia de singularidades que afecte sus lecturas. Con estos sensores se establece la base del análisis de convergencia. La siguiente tabla recoge las lecturas registradas por estos en cada refinamiento hasta el mallado final:

Tabla 3.1. Análisis de convergencia de tensiones de von Mises.

Convergencia de tensiones de von Mises					
Nivel de refinamiento	N0	N1	N2	N3	N4
Tamaño de elemento mínimo (mm)	300	150	75	37.5	18.75
Tamaño de elemento máximo (mm)	900	450	225	112.5	56.25
Número de elementos	204261	207514	214125	249555	285208
Reducción de tamaño	1	1/2	1/4	1/8	1/16
Tiempo de solución (min:seg)	2:58	3:15	3:24	3:50	4:43
Puntos de lectura	Tensión (N/m ²)				
P1	3.29E+08	3.73E+08	3.91E+08	4.03E+08	4.18E+08
P2	3.55E+08	4.03E+08	4.16E+08	4.73E+08	4.12E+08
P3	2.94E+08	3.55E+08	4.36E+08	4.65E+08	5.45E+08
P4	2.64E+08	3.09E+08	3.78E+08	4.21E+08	4.48E+08
P5	3.22E+08	3.58E+08	3.69E+08	4.17E+08	3.96E+08
P6	3.99E+08	3.99E+08	3.96E+08	4.84E+08	4.73E+08
P7	4.44E+08	4.43E+08	4.61E+08	5.03E+08	5.80E+08
P8	3.88E+08	3.87E+08	3.98E+08	4.85E+08	4.97E+08
P9	4.41E+08	4.38E+08	4.82E+08	5.15E+08	6.08E+08
P10	2.35E+08	3.16E+08	3.88E+08	3.68E+08	3.58E+08
P11	3.56E+08	3.65E+08	3.87E+08	4.27E+08	3.91E+08
Puntos de lectura	Diferencia relativa (%)				
P1	-	13.37	4.83	3.07	3.72

P2	-	13.52	3.23	13.70	-12.90
P3	-	20.75	22.82	6.65	17.20
P4	-	17.05	22.33	11.38	6.41
P5	-	11.18	3.07	13.01	-5.04
P6	-	0.00	-0.75	22.22	-2.27
P7	-	-0.23	4.06	9.11	15.31
P8	-	-0.26	2.84	21.86	2.47
P9	-	-0.68	10.05	6.85	18.06
P10	-	34.47	22.78	-5.15	-2.72
P11	-	2.53	6.03	10.34	-8.43

Con una estructura tan grande y con tal cantidad de elementos, se busca una convergencia con al menos un 10% de error en los resultados; es por ello que se desarrollan 4 niveles de refinamiento, siendo el nivel 0 el mallado inicial. A lo largo de la tabla, bajo las diferencias relativas porcentuales, se aprecia que para algunos niveles de refinamiento en ciertos puntos de lectura se alcanza, aparentemente, la precisión requerida, para luego superar nuevamente el límite de 10% de error en el siguiente refinamiento. Si bien es normal que se produzcan pequeños altibajos según se busca la convergencia en un punto determinado, cuando el salto se produce de manera exagerada se debe, probablemente, a que la lectura está siendo afectada por alguna singularidad cercana; tal es el caso de los puntos: P2, P3, P5, P6, P7 (diverge según se refina), P8 y P9. Sin embargo, lo anterior no significa que todas estas lecturas sean inválidas. Las siguientes imágenes y gráficas permiten hacer un mejor discernimiento al respecto, así como estudiar cómo influyen las singularidades en este tipo de análisis. Se muestra además la ubicación de los mencionados sensores:

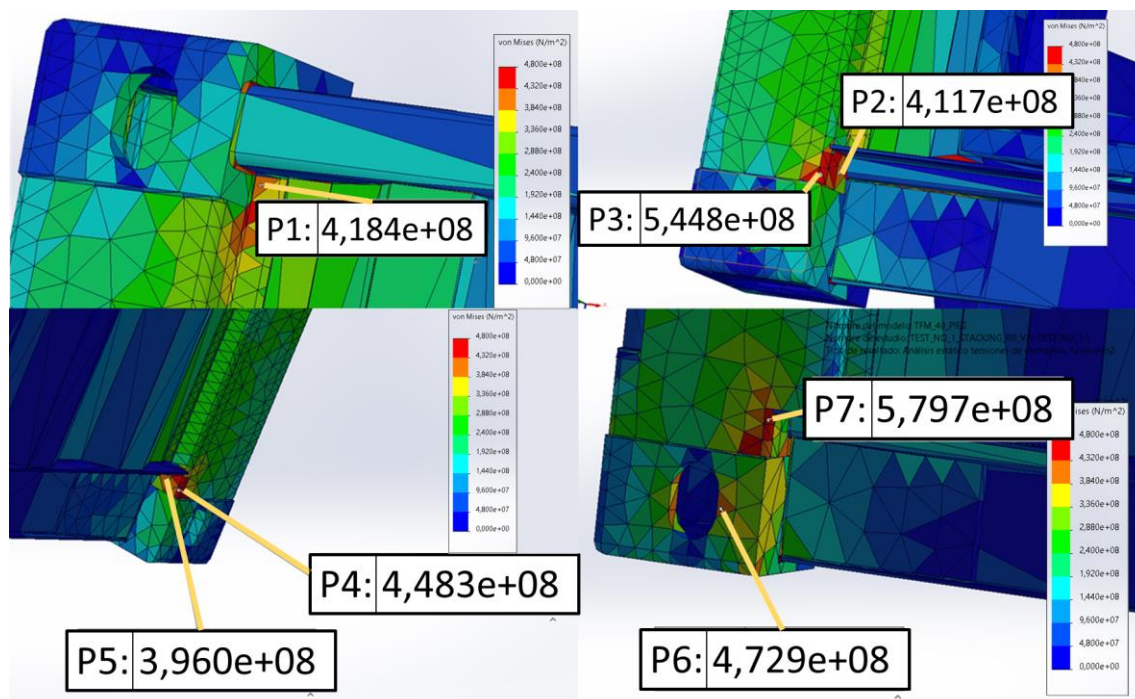


Fig. 3.5. Puntos/sensores de lectura de tensiones de von Mises (P1-7). Prueba No.1. Último nivel de refinamiento de malla. Escala de colores de 0 a $4.8 \cdot 10^8$ N/m² (480 MPa).

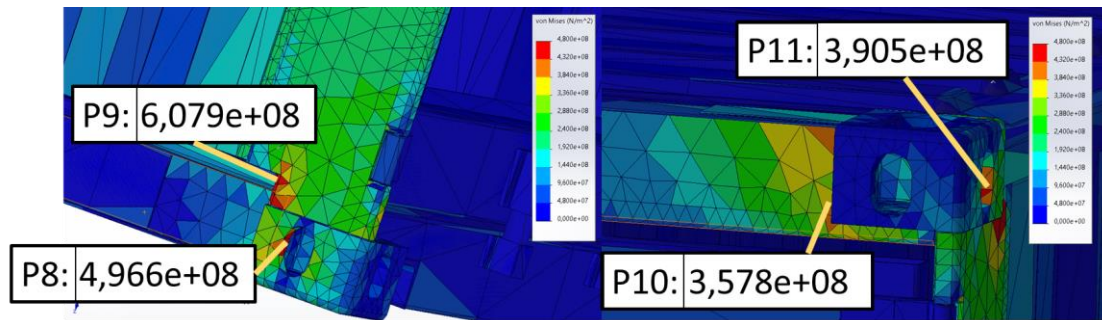


Fig. 3.6. Puntos/sensores de lectura de tensiones de von Mises (P8-11). Prueba No.1. Último nivel de refinamiento de malla. Escala de colores de 0 a $4.8 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ (480 MPa).

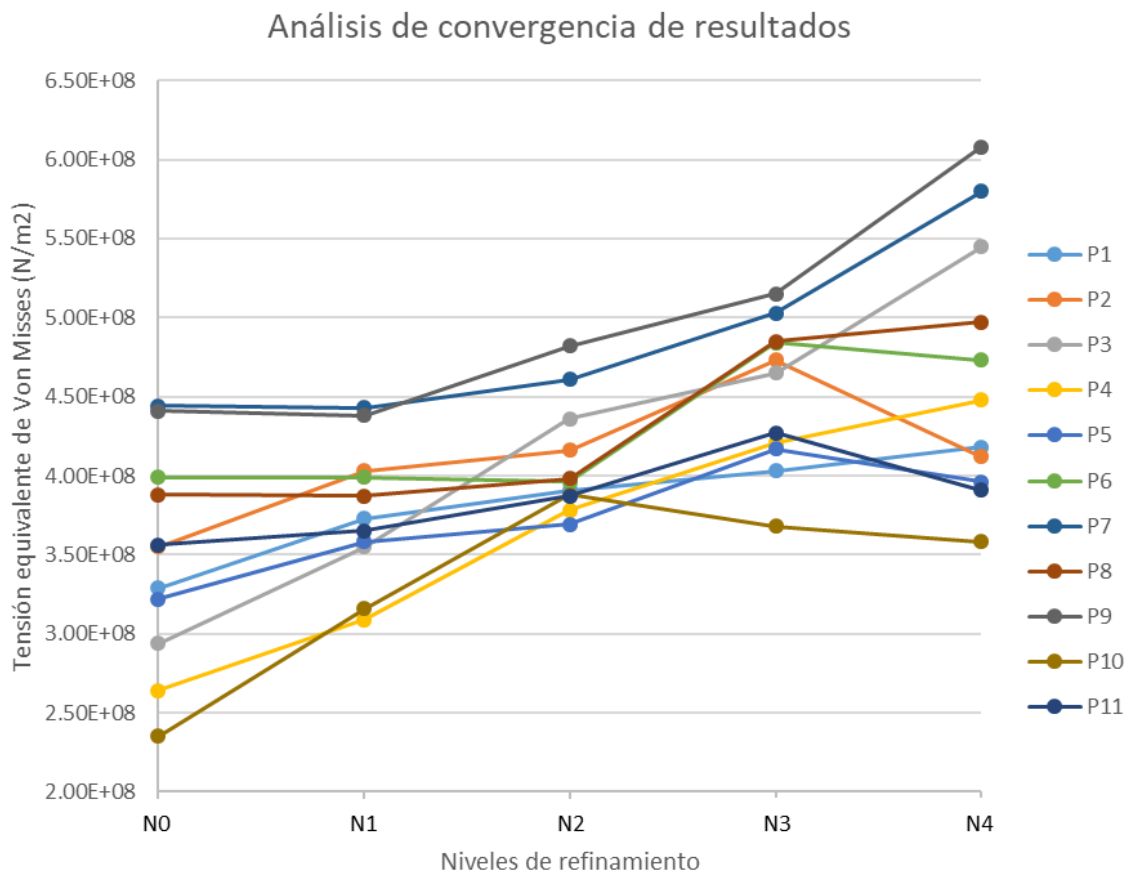


Fig. 3.7. Análisis de convergencia de resultados. Contenedor modificado. Gráfica de evolución de la convergencia para cada punto estudiado según el nivel de refinamiento.

Si se hace un análisis más detallado de la evolución de la convergencia de los puntos, con apoyo en la gráfica anterior, se puede deducir que:

- El punto 2 sufre un gran salto en el nivel de refinamiento 3, lo que significa que en esa simulación, con la redistribución de tamaños de elementos, vio afectada su lectura por una singularidad cercana; sin embargo, en el nivel 4 baja su valor casi en la misma medida en que subió en el nivel anterior. En este nivel fue calculada una diferencia porcentual con respecto al nivel 3 de -12.9%, en cambio, si el resultado alcanzado en N4 fuese comparado con N2, se obtendría un -0.96% de error. Lo anterior demuestra la influencia de las singularidades en los resultados según son redistribuidos los elementos con el cambio de tamaño y se hace más fina la malla. La convergencia del punto 2 ya había sido alcanzada en N2.
- El punto 3 denota una clara singularidad (o más bien, se encuentra demasiado cerca de una), al divergir su valor medido con cada refinamiento de la malla. Estos resultados no son fiables.

- Con el punto 5 sucede algo similar a la trayectoria del punto 2. En el nivel 3 de refinamiento se sufre una afectación por una singularidad cercana, ocurriendo un notado salto en la lectura de tensión, para luego bajar nuevamente hasta dentro del rango de error buscado en el nivel 4, con una lectura próxima a la alcanzada en el nivel 2. Si se comparan los resultados del punto 5 en N4 y N2, se tiene una diferencia del 7.32%. Nuevamente, la convergencia ya había sido alcanzada en N2.
- El punto 6 es otro ejemplo de cómo afectan las singularidades a los resultados. En este sensor se alcanza la convergencia en el primer nivel de refinamiento, manteniéndose igual en N2, sin embargo, se aprecia cómo en N3 los resultados son afectados por una singularidad cercana, produciéndose un repentino salto en la lectura de tensión. Si se comparan N4 con N2, se tendría una diferencia de 19.44%, lo que indica que, aun cuando la diferencia entre los resultados de N4 y N3 es muy pequeña, es decir, que supuestamente en N4 hay una convergencia, lo que se está leyendo es realmente parte de los efectos derivados de una singularidad próxima a la ubicación del sensor.
- El punto 7 denota una clara divergencia a partir de N3 según se refina. Esto ejemplifica nuevamente los efectos de las singularidades en los resultados. La convergencia fue alcanzada en N1.
- En el punto 8 sucede lo mismo que en el 6. Si se comparan los resultados de N4 con N2, esto da una diferencia del 24.87%, siendo el valor de N4 una lectura falsa y habiéndose alcanzado la convergencia deseada en N1.
- Por último, en el sensor 9 sucede lo mismo que en 7. La convergencia fue alcanzada en N1, para luego comenzar a divergir a partir de N2.

Para verse en mayor detalle la influencia de las singularidades y sus ubicaciones, puede verse el Diagnóstico de zona activa de tensión en Anexo B.

Tras el análisis realizado se puede concluir que los valores reales de tensión equivalente de von Mises en cada sensor son:

Tabla 3.2. Resultados finales de tensión equivalente de von Mises con error inferior al 10%.

Sensores	Tensión equivalente de von Mises (N/m ²)
P1	4.18E+08
P2	4.12E+08
P3	-
P4	4.48E+08
P5	3.96E+08
P6	3.99E+08
P7	4.43E+08
P8	3.87E+08
P9	4.38E+08
P10	3.58E+08
P11	3.91E+08

Como comentado en los inicios del desarrollo de esta Prueba No. 1, estos puntos de lectura fueron dispuestos en zonas de mayor peligro, teniéndose en cuenta la forma, tipos de cargas aplicadas y resultados de la simulación

inicial. Todos los valores mostrados en la tabla 3.2 superan el límite elástico del COR-TEN A ($3.4335 \cdot 10^8 \text{N/m}^2$), sin embargo, se encuentran entre el rango marcado por este y el límite de rotura ($4.8069 \cdot 10^8 \text{N/m}^2$). Según la norma ISO 1496, es permitido que el contenedor plastifique en algunas zonas, siempre que esto no afecte la manipulación del mismo, a contenedores adyacentes o la apertura de sus puertas. Para conocerse con mayor certeza lo que sucede en las zonas de plastificación lo más recomendable es que se ejecute un análisis no lineal, sin embargo, hasta ese punto no alcanza la licencia de Solidworks disponible y es interés de la empresa dueña del proyecto el que se pueda alcanzar una respuesta válida con los medios dados. No obstante, tratándose de zonas tan pequeñas y ante la necesidad de que se continúe usando Solidworks, para la validación del ensayo se decide establecer una comparación de los resultados con los obtenidos en la misma prueba para el modelo del contenedor original, empleándose los mismos puntos de lectura. En un principio, lo que se desea demostrar es que el contenedor, aun con las modificaciones sufridas, mantiene la misma capacidad de resistir las cargas de prueba que el contenedor original; lo anterior, puesto que el original cuenta con un certificado CSC que garantiza que el modelo ya ha pasado por estos ensayos.

En lo adelante, el criterio para validar o no la capacidad resistiva de la estructura modificada consistirá en la comentada comparación:

Si la deformada del contenedor modificado es igual o similar (en cuyo caso se examinarán las diferencias) a la de la versión original, y si las tensiones equivalentes registradas en el contenedor modificado son aproximadamente iguales (diferencia inferior al 5%) o inferiores a las de la versión original en los mismos puntos y nivel de refinamiento de malla, se entenderá que las modificaciones realizadas no afectan significativamente los mecanismos de la estructura para resistir las cargas aplicadas. Si, por el contrario, las tensiones equivalentes registradas por la versión modificada superan en más de un 5% a las evidenciadas en el modelo original, se entenderá que las modificaciones realizadas afectan significativamente la capacidad resistiva de la estructura y se valorará la implementación de refuerzos o cambios en el diseño según el caso.

La siguiente gráfica muestra el trazado de convergencia para los puntos estudiados en el modelo original del contenedor:

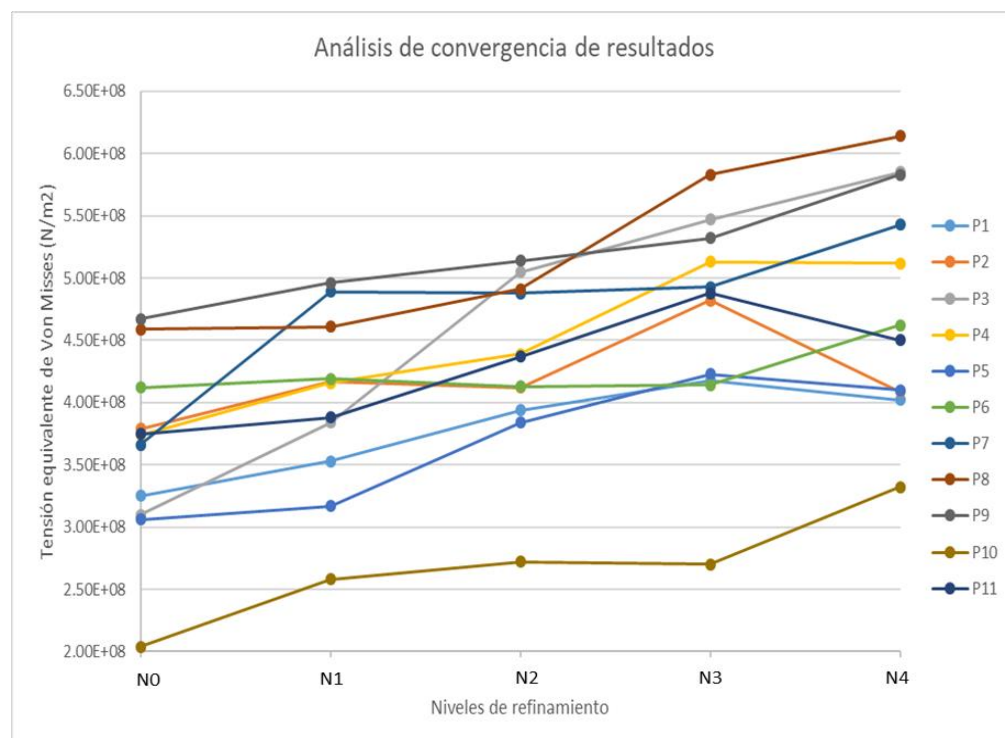


Fig. 3.8. Análisis de convergencia de resultados. Contenedor original. Gráfica de evolución de la convergencia para cada punto estudiado según el nivel de refinamiento.

Tabla 3.3. Comparación de resultados finales de tensión equivalente de von Mises, con error inferior al 10%, entre lecturas de sensores en el modelo de contenedor modificado y el original.

Sensores	Contenedor modificado (N/m ²)	Contenedor original (N/m ²)	Diferencia (%)
P1	4.18E+08	4.02E+08	-3.83
P2	4.12E+08	4.09E+08	-0.73
P3	-	-	-
P4	4.48E+08	5.12E+08	14.29
P5	3.96E+08	4.10E+08	3.54
P6	3.99E+08	4.14E+08	3.76
P7	4.43E+08	4.88E+08	10.16
P8	3.87E+08	4.61E+08	19.12
P9	4.38E+08	5.32E+08	21.46
P10	3.58E+08	2.70E+08	-24.58
P11	3.91E+08	4.50E+08	15.09

En la tabla anterior, los resultados finales para el contenedor original fueron determinados siguiéndose el mismo proceder ya argumentado con la versión modificada. Con esta comparación, se observa que en 10 de los sensores el contenedor modificado presenta tensiones equivalentes prácticamente iguales o inferiores, con hasta 21.46% de diferencia, con respecto a las lecturas de la versión original. El punto 10, en cambio, resulta en un valor muy superior en la versión modificada. Este punto se ubica en el travesaño superior trasero del contenedor (los componentes de mayor significación o importancia en esta prueba son los pilares e isocorners) y la tensión registrada en la versión modificada se encuentra alrededor del 4% por encima del límite elástico del material COR-TEN A. Si además se tiene en cuenta que la pieza consiste en una chapa de 3.5 mm de espesor, con ancho y largo significativamente mayores, es válido alegar que en la plastificación ocurrirá una redistribución de tensiones, deformándose el material, sin llegar este a la rotura. En dicho caso, queda pendiente el que sean analizados los desplazamientos máximos resultantes en la zona, así como la forma de la deformada, para así poder determinarse si la deformación sufrida podría afectar la apertura de las puertas. Esto último es visto en detalle en el siguiente apartado.

Para dar fin a la presente sección de la prueba, referida al estudio de tensiones, se decide realizar un análisis más profundo de los isocorners del contenedor modificado, dada la gran importancia de estos elementos. En el Diagnóstico de zona activa de tensión, mostrado en el Anexo B, se puede apreciar las zonas con mayor aparición de singularidades, abarcando estas gran parte de los isocorners, lo que significa que, con el nivel de refinamiento alcanzado hasta ahora, no se podría llegar a una conclusión fiable con respecto al comportamiento de los mismos bajo las cargas aplicas. Puede verse en las figuras 3.5 y 3.6 la aparición de elementos con alto registro de tensión en estos componentes, para el refinamiento alcanzado. La siguiente imagen muestra lo que sucede en los isocorners con una malla mucho más fina:

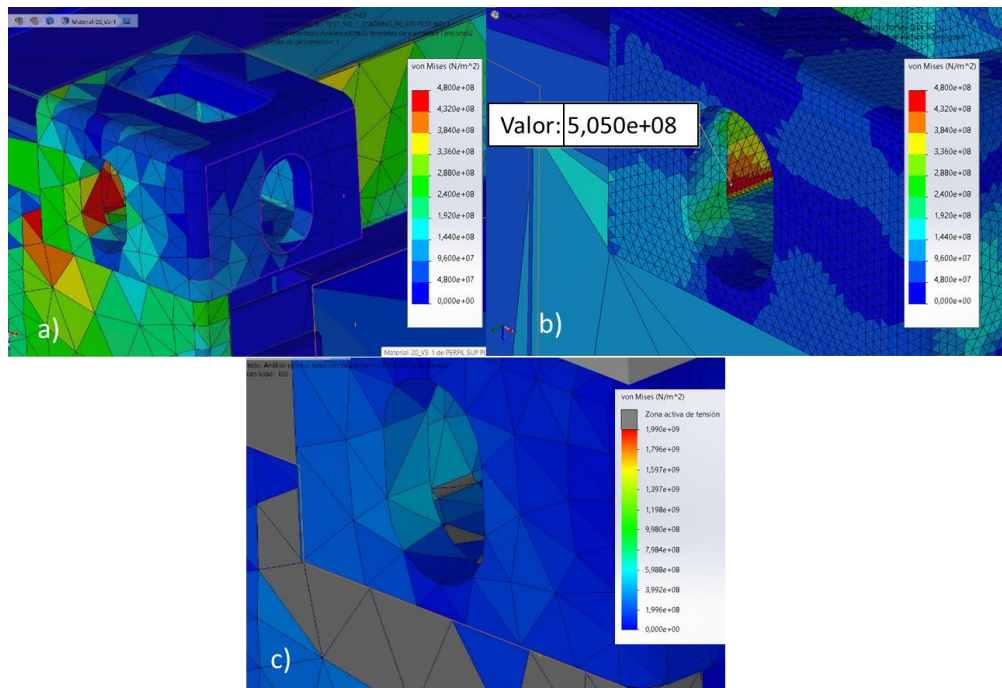


Fig. 3.9. Análisis de tensiones resultantes en contenedores. Isocorner de muestra: trasero superior izquierdo. En figuras: a) tensiones resultantes en isocorner con nivel de refinamiento N4; b) tensiones resultantes con mallado más fino (5 mm como menor tamaño de elemento); c) diagnóstico de zona activa de tensión (zona afectada por singularidades en color gris), nivel de refinamiento N4.

En la imagen anterior se muestra una comparación entre la distribución de tensiones resultantes obtenidas con el nivel de refinamiento mayor alcanzado en el presente estudio, y los resultados dados por una malla mucho más fina. En el caso a) se exponen unas supuestas zonas de alta tensión señaladas en rojo, las cuales se aminoran en b), concentrándose alrededor de un punto en el interior del isocorner. Luego, en la imagen c) se muestra la información aportada por el diagnóstico de zona activa de tensión, el cual señala que precisamente el punto en que se concentran las tensiones en la malla más fina (caso b)) se encuentra afectado por una singularidad (elementos marcados en color gris). Esto sucede del mismo modo con el resto de los isocorners.

3.1.3. Análisis de resultados obtenidos. Desplazamientos.

En este subepígrafe se analizan los desplazamientos alcanzados por componentes del contenedor bajo la acción de las cargas de la prueba número 1 y se comparan con los límites especificados en la norma ISO 1496 (expuestos en el epígrafe 1.4 del presente trabajo).

La siguiente figura muestra la deformada del contenedor dada en la simulación inicial bajo la aplicación de las cargas descritas en epígrafes anteriores, y expone los desplazamientos totales de los componentes de la estructura:

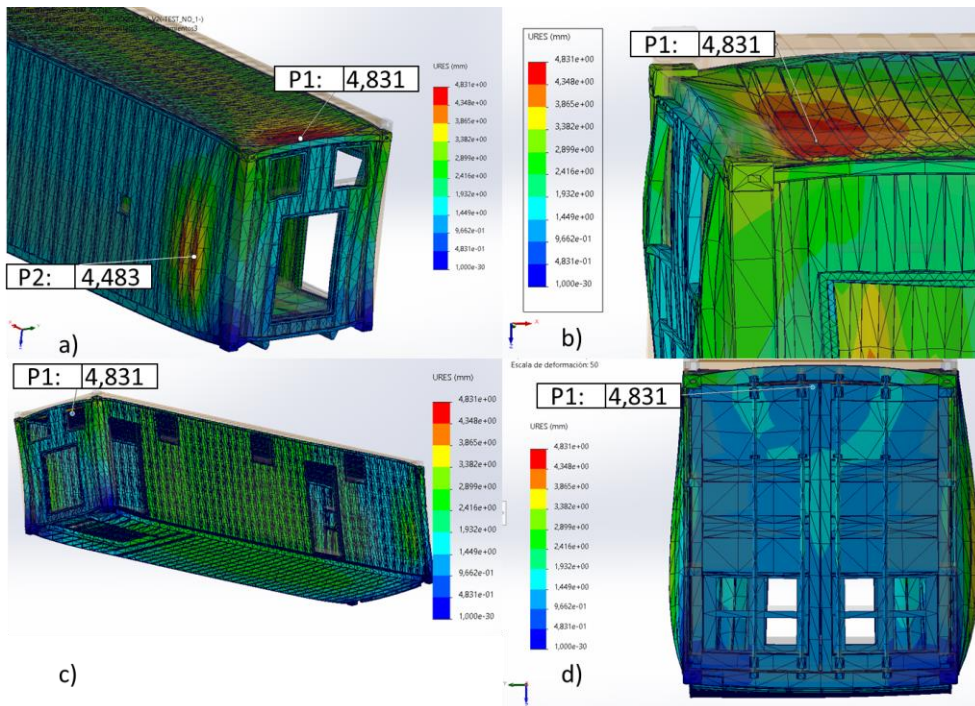


Fig. 3.10. Análisis de desplazamientos. Prueba No. 1. Simulación con mallado inicial. Tamaño máximo de elemento: 900 mm; tamaño mínimo de elemento: 300 mm. Escala de colores de 0 a valor máximo resultante registrado (4,831 mm). Posición indeformada translúcida. En figura: a), b) y c) parte frontal del contenedor desde diferentes ángulos; d) vista posterior.

En la figura anterior se aprecian varias vistas de la deformada del contenedor. Se nota que los mayores desplazamientos se concentran en la zona central delantera del techo (valor máximo, tomado como sensor P1 para la convergencia) y en el área delantera del lateral izquierdo de la estructura (segundo punto de interés para convergencia, tomado como sensor P2). Las cargas que afectan al suelo no producen en este un desplazamiento significativo.

En la figura 3.10. d), se evidencia la deformación descrita por el travesaño superior trasero del contenedor (punto de observación pendiente del análisis de tensiones). Siendo afectado este componente por la rigidez de las barras de cierre de las puertas traseras (vistas en imagen como 4 barras en disposición vertical), describe el elemento una flecha en su centro hacia arriba cuando los isocorners son desplazados hacia abajo (entre 2 y 3 mm) por la acción de las cargas aplicadas. Viéndose este comportamiento, se entiende que la zona de peligrosidad en la que se encuentra ubicado el punto 10, analizado al final del subepígrafe anterior, no llegará a afectar al mecanismo de apertura de los portones, produciéndose, en el peor de los casos, una rótula plástica en la esquina soldada al isocorner.

Analizándose a mayor detalle la deformada (figura 3.10), se puede argumentar que al ser presionados los 4 isocorners superiores, desplazándose los mismos hacia abajo, sin giros en el plano de aplicación de las cargas, los pilares delanteros son los más afectados. Los pilares delanteros del contenedor comprenden una chapa de 6 mm soldada a, aproximadamente, medio perímetro descrito por su correspondiente isocorner (ver figura 3.11. a)), lo que permite cierta inclinación del pilar hacia su lado abierto. Por otra parte, el soporte delantero del techo, en su pliegue que lo apoya sobre la pared frontal, presenta una línea de plegado desplazada hacia atrás con respecto al plano descrito por la cara interna de dicha pared, lo que también permite un giro hacia dentro cuando el techo es desplazado hacia abajo (ver figura 3.11. c)). En resumen, se puede afirmar que con la acción del peso de los contenedores superpuestos, los isocorners delanteros se desplazan hacia abajo y con estos, el soporte delantero soldado del techo del contenedor, apoyado sobre la pared frontal (la cual resiste cargas verticales), se ve forzado a girar hacia el interior de la estructura. Lo anterior da lugar al desplazamiento máximo registrado en la zona delantera central del techo. Por otro lado, se puede decir que, derivado del desplazamiento de los isocorners, los pilares delanteros flectan un poco hacia su lado abierto de la geometría, y este movimiento es transmitido a la pared frontal y paredes laterales. Las paredes laterales, en principio, deberían flectar iguales dado el diseño original simétrico del contenedor, sin embargo, en la versión modificada la pared derecha se ve

rigidizada por la acción de los marcos soldados, y es por ello que, en este caso, se aprecia una diferencia del desplazamiento con respecto al lado izquierdo, donde prácticamente no fueron realizadas modificaciones. Esta distribución asimétrica de los desplazamientos descritos por las paredes laterales no constituye un efecto negativo siempre que no sean superados los límites descritos en la norma. Esto es analizado con mayor profundidad tras la convergencia de los resultados.

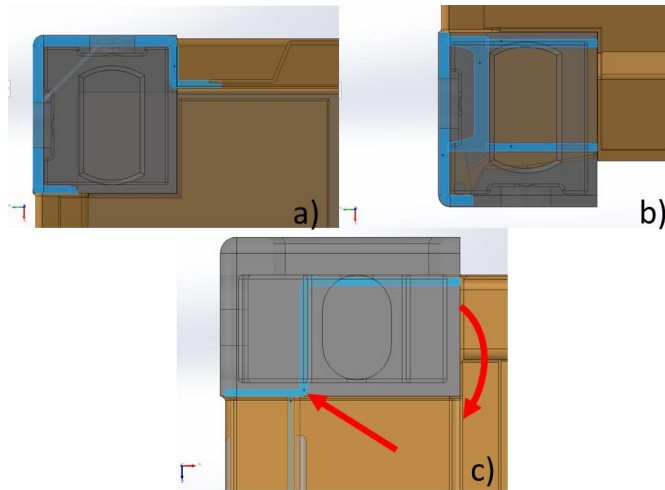


Fig. 3.11. Geometrías y posicionamiento de pilares delanteros, traseros y soporte frontal del techo del contenedor. En figura: a) vista superior del contenedor con isocorner y techo en transparencia/geometría de pilar delantero señalada en azul; b) vista superior del contenedor con isocorner en transparencia/geometría de pilar trasero, perfil de viga de soporte y apoyo del travesaño superior trasero señalados en azul (conjunto más rígido); c) vista lateral del contenedor con isocorner y pilar delantero en transparencia/geometría del soporte del techo y chapa de pared frontal señalados en azul, con flechas indicativas de plegado analizado y giro.

Como la mayoría de los componentes analizados son de chapa, y dadas sus grandes dimensiones, se admite un error en la convergencia de menos de un 10%. Este estudio es resumido en la siguiente tabla. En este caso, los componentes con mallas refinadas en cada simulación son el techo del contenedor y la pared lateral izquierda:

Tabla 3.4. Análisis de convergencia de desplazamientos resultantes.

Convergencia de desplazamientos resultantes		
Nivel de refinamiento	N0	N1
Tamaño de elemento mínimo (mm)	300	150
Tamaño de elemento máximo (mm)	900	450
Número de elementos	204261	384574
Reducción de tamaño	1	1/2
Tiempo de solución (min:seg)	2:58	5:23
Puntos de lectura	Desplazamientos (mm)	
P1	4.831	4.953
P2	4.483	4.753

Puntos de lectura	Diferencia relativa (%)	
P1	-	2.53
P2	-	6.02

Con los desplazamientos registrados en la simulación puede decirse que el contenedor, bajo las condiciones de carga de la prueba 1, cumple con todos los requerimientos dimensionales expuestos en el apartado 1.4. Se destaca además que la deformación máxima de la pared lateral izquierda no sobrepasa la distancia inicial de esta a la cara exterior de los isocorners (7 mm), manteniéndose dentro de los límites del contenedor. Asimismo, puede decirse que, estando el techo fabricado con chapa de 2 mm de espesor, con largo y ancho considerablemente mayores a este valor, el desplazamiento máximo registrado (aproximadamente 5 mm) no resulta significativo.

3.1.4. Prueba No. 1. Resumen de conclusiones parciales.

Tras la simulación de la primera prueba con las indicaciones de la norma ISO 1496, puede concluirse que:

- Las modificaciones realizadas al contenedor, para esta prueba, no alteran significativamente la deformada del contenedor.
- Las tensiones resultantes en las zonas de mayor peligrosidad en el contenedor modificado son iguales o inferiores a las dadas en su versión original con condiciones de carga máxima, a excepción de la registrada en el punto de estudio P10, las cuales producirán una plastificación sin rotura que no afecta el funcionamiento de las puertas traseras.
- El contenedor modificado podrá resistir el peso de 8 contenedores superpuestos, de hasta 26670 kg de masa bruta máxima cada uno, o 7 contenedores de hasta 30480 kg, en las celdas guías de barco; no obstante, se recomienda que no le sea impuesta la carga máxima.
- A pesar de los agujeros cortados en el suelo en la versión modificada, con los refuerzos soldados y su carga de diseño mucho menor a la máxima soportada por el contenedor, no se producen tensiones significativas que pongan en peligro la integridad del mismo.
- Con las condiciones de carga establecidas, los desplazamientos registrados de la estructura cumplen con los requerimientos dimensionales mencionados en la norma ISO 1496.

3.2. Prueba No. 2. Izaje desde los cuatro isocorners superiores.

En este apartado se expone el desarrollo de la prueba de izaje, llevada a cabo para comprobar el comportamiento del contenedor al ser transportado por una grúa anclada a sus cuatro isocorners superiores.

3.2.1. Preprocesado.

En esta prueba, el contenedor, con una carga uniformemente distribuida en su suelo de forma tal que la masa combinada del contenedor y la carga sea igual a 2R, debe ser izado cuidadosamente por sus cuatro isocorners superiores (de manera que no sean aplicadas fuerzas significativas de aceleración o desaceleración) y ser mantenido en esa posición durante 5 minutos, para que puedan apreciarse los efectos que esto produce. Tratándose de un contenedor tipo 1AAA, las fuerzas de elevación aplicadas sobre los isocorners deben ser verticales (ver tabla 1.5). Con apoyo en lo anterior, y teniéndose en cuenta las condiciones de diseño del contenedor modificado, se simula el mismo con un empotramiento en las caras superiores de los isocorners del techo. Las masas de sus componentes eléctricos integrados y bancadas se disponen del mismo modo que en la prueba 1, afectadas esta vez por el factor F descrito para este ensayo en la tabla 2.1. El mencionado factor tiene en cuenta, en este caso, los efectos dinámicos que puedan darse durante la transportación en grúa aun cuando se intentan evitar, como lo son las fuerzas significativas de aceleración y desaceleración debidas a una mala operación.

3.2.2. Análisis de resultados obtenidos. Tensiones y desplazamientos.

Al igual que en la prueba anterior, el mallado se realiza con elementos tipo sólido tetraédricos, con malla independiente basada en la curvatura de combinado.

Al estar sometido el contenedor en esta simulación a cargas dadas por su propio peso, a diferencia de la prueba anterior, las tensiones resultantes son muy inferiores a los límites elásticos de los materiales. Por esta razón, y dado que el interés del ensayo no es conocer con precisión los valores máximos de tensión, sino saber si la estructura resiste y cumple con los requerimientos dimensionales, para esta simulación el análisis de convergencia es realizado solamente con base en los desplazamientos resultantes. El refinamiento de la malla es realizado en el techo del contenedor y en las vigas centrales del suelo del mismo.

El estudio realizado se refleja en las siguientes tabla e imágenes:

Tabla 3.5. Análisis de convergencia de desplazamientos resultantes. Prueba No. 2.

Convergencia de desplazamientos resultantes		
Nivel de refinamiento	N0	N1
Tamaño de elemento mínimo (mm)	300	150
Tamaño de elemento máximo (mm)	900	450
Número de elementos	204261	230048
Reducción de tamaño	1	1/2
Tiempo de solución (min:seg)	5:02	5:23
Puntos de lectura	Desplazamientos (mm)	
P1	2.091	2.170
P2	1.760	1.772
Puntos de lectura	Diferencia relativa (%)	
P1	-	3.78
P2	-	0.68

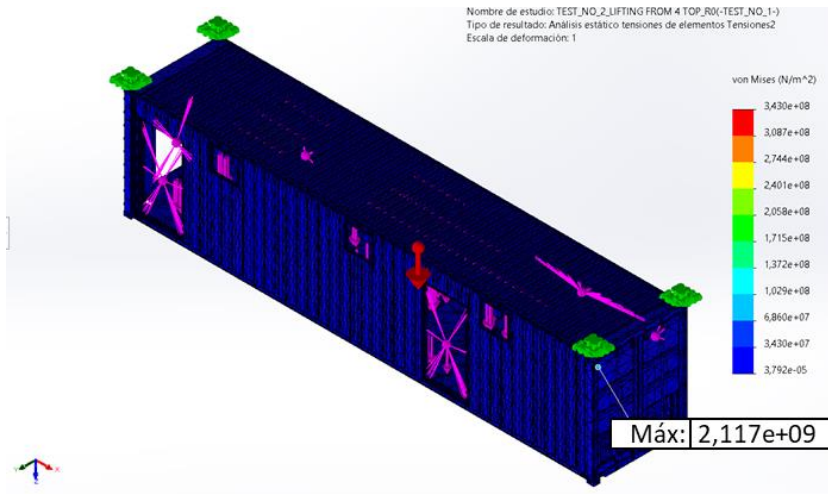


Fig. 3.12. Representación de tensiones equivalentes de von Mises. Prueba No. 2. Último nivel de refinamiento. Escala de colores de 0 a $3.43 \cdot 10^8$ N/m² (343 MPa).

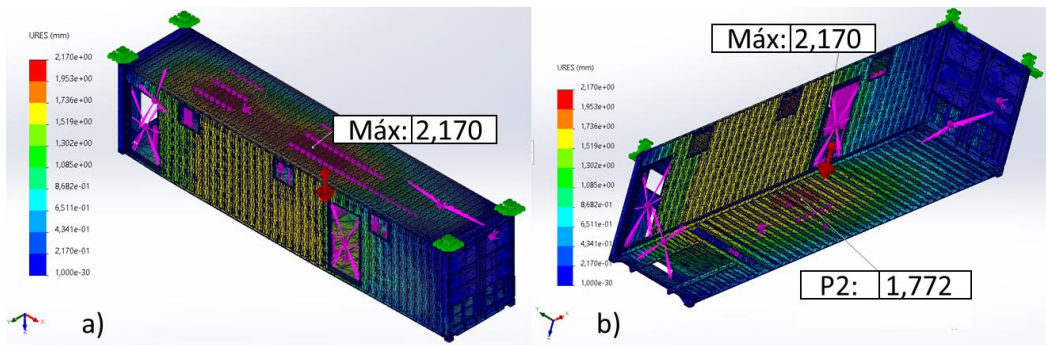


Fig. 3.13. Representación de desplazamientos resultantes. Prueba No. 2. Simulación con nivel de refinamiento final. Escala de colores de 0 a valor máximo resultante registrado (2,170 mm).

Como comentado, en la figura 3.12 se aprecian unos valores de tensiones muy por debajo del límite elástico (en este caso, $3.43 \cdot 10^8$ N/m² del acero COR-TEN A, tomado como referencia). El punto máximo señalado ($2.117 \cdot 10^9$ N/m²) corresponde a una singularidad dada en la esquina de unión de la chapa de las puertas traseras con los perfiles del marco. Se trata de la misma singularidad señalada anteriormente, con referencia en la figura 3.4 (para más detalles ver Diagnóstico de zona activa de tensión en Anexo B).

En la figura 3.13 se pueden observar los mayores desplazamientos de los componentes del contenedor y sus localizaciones. Con respecto a estas últimas, se nota una ligera desviación de las mismas hacia el lado derecho del contenedor. Esto se debe, en la zona del techo (figura 3.13. a)), a la distribución irregular de los aisladores, estando estos en mayor cantidad hacia el lado derecho de la estructura; y en la parte del suelo (figura 3.13. a)), a causa de la cantidad de marcos con perfiles de acero y puertas peatonales dispuestos en la pared derecha del contenedor, los cuales incrementan el peso del conjunto.

Para los resultados de esta simulación se destaca que, dados los valores tan bajos de tensiones mostrados, no es necesario el establecimiento de una comparación con el modelo original del contenedor.

3.2.3. Prueba No. 2. Resumen de conclusiones parciales.

Expuesto lo anterior, se puede llegar a las siguientes conclusiones parciales:

- La estructura modificada resiste las condiciones de carga dadas en la prueba de izaje por los isocorners superiores.
- Dada la distribución de elementos internos y las modificaciones, al ser elevado el contenedor sufrirá una ligera inclinación hacia su lado derecho, sin embargo, al ser los desplazamientos máximos en estas zonas de alrededor de 2 mm, esta diferencia no resulta significativa o perjudicial.

- El suelo del contenedor no sufrirá deformaciones significativas durante el izaje (desplazamiento máximo en simulación de aproximadamente 2 mm).
- El contenedor modificado cumple con los requerimientos dimensionales expuestos en el apartado 1.4.

3.3. Prueba No. 3. Izaje desde los cuatro isocorners inferiores.

En el presente epígrafe se presenta una argumentación referida al proceso de simulación del contenedor modificado al pasar por la prueba de izaje por los cuatro isocorners inferiores. Esta se lleva a cabo para comprobar el comportamiento del contenedor al ser transportado de esta manera.

3.3.1. Preprocesado.

Al igual que en la prueba anterior, el ensayo de izaje por los cuatro isocorners inferiores debe ser realizado con una carga uniformemente distribuida en su suelo de forma tal que la masa combinada del contenedor y la carga sea igual a 2R. Además, tratándose de un contenedor de clasificación 1AAA, debe ser izado cuidadosamente por sus cuatro isocorners inferiores, de manera que no sean aplicadas fuerzas significativas de aceleración o desaceleración, y ser mantenido en esa posición durante 5 minutos, de forma que puedan apreciarse los efectos que esto produce. Las fuerzas de izaje en los isocorners deben ser aplicadas con un ángulo de 30° con respecto a la horizontal, y la línea de acción de las mismas no debe distar más de 38 mm de la cara exterior de los isocorners en los que son aplicadas (ver apartado 1.4).

El tipo de izaje comentado se realiza en la práctica con uso de una viga de disposición horizontal, la cual es anclada mediante cadenas a los cuatro isocorners inferiores del contenedor. Estas cadenas presentan en sus extremos una pieza de acople que encaja en los colisos laterales de los isocorners y permiten la transmisión de la carga. El ángulo de incidencia de las fuerzas de izaje es menor según es más largo el contenedor.

Con el propósito de simular con la mayor fidelidad posible la prueba, y con la intención de evitar modos de sólido rígido en los resultados, en vez de aplicar directamente las fuerzas en ángulo sobre los comentados isocorners se decide crear una aproximación del ensayo mediante la adición al modelo de las piezas de acople de las cadenas, ensambladas en los correspondientes isocorners con una inclinación de 30° con respecto a la horizontal y empotradas en el lado donde se extendería la cadena, tal como se refleja en la próxima imagen. Esto evita los modos de sólido rígido y permite la libre flexión del contenedor. Otra razón por la que las cargas deben ser aplicadas de esta manera y no directamente es que, como ya se ha visto, la asimetría presente en la distribución de algunos elementos internos y las modificaciones realizadas en las paredes del contenedor causan una ligera inclinación del mismo hacia su lado izquierdo al ser elevado, por lo que las fuerzas resultantes en cada isocorner no son iguales:

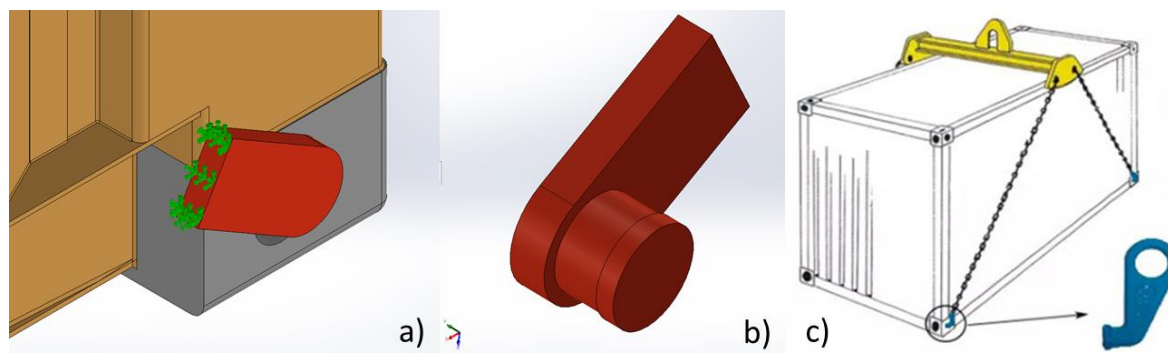


Fig. 3.14. Gancho de izaje modelado para simulación. En las figuras: a) ensamble de gancho de izaje en uno de los isocorners con inclinación de 30° con respecto a la horizontal y con condiciones de empotramiento en su extremo superior; b) modelo del gancho; c) ejemplo de izaje y gancho (en color azul).

Tal como se procedió con la prensa en la prueba de apilamiento, dada su elevada rigidez, estos ganchos son dispuestos en la simulación como sólidos rígidos. Se emplea nuevamente una malla independiente basada en la curvatura de combinado, con elementos sólidos tetraédricos, y se tienen en cuenta las mismas condiciones de diseño del contenedor modificado comentadas en la prueba anterior (masas de los componentes integrados

afectadas por el factor F en tabla 2.1).

3.3.2. Análisis de resultados obtenidos. Tensiones y desplazamientos.

Con razonamiento análogo al expuesto en la prueba anterior, para esta simulación la convergencia de los resultados también está dada por el análisis de desplazamientos resultantes, dado que las tensiones equivalentes se encuentran muy por debajo de los límites elásticos de los materiales, como se apreciará en las próximas imágenes. El refinamiento de la malla es también realizado en el techo del contenedor y en vigas centrales del suelo.

Tabla 3.6. Análisis de convergencia de desplazamientos resultantes. Prueba No. 3.

Convergencia de desplazamientos resultantes		
Nivel de refinamiento	N0	N1
Tamaño de elemento mínimo (mm)	300	150
Tamaño de elemento máximo (mm)	900	450
Número de elementos	204261	230380
Reducción de tamaño	1	1/2
Tiempo de solución (min:seg)	3:13	3:34
Puntos de lectura	Desplazamientos (mm)	
P1	2.98	3.12
P2	2.63	2.67
Puntos de lectura	Diferencia relativa (%)	
P1	-	4.66
P2	-	1.44

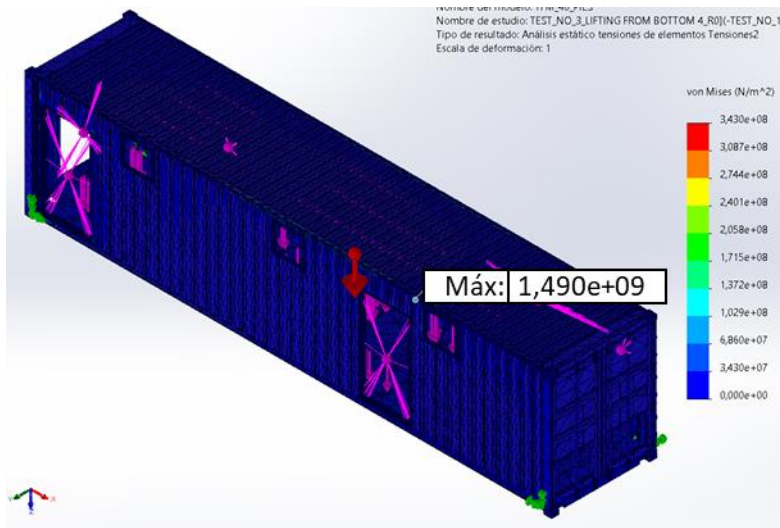


Fig. 3.15. Representación de tensiones equivalentes de Von Mises. Prueba No. 3. Último nivel de refinamiento. Escala de colores de 0 a $3.43 \cdot 10^8$ N/m² (343 MPa).

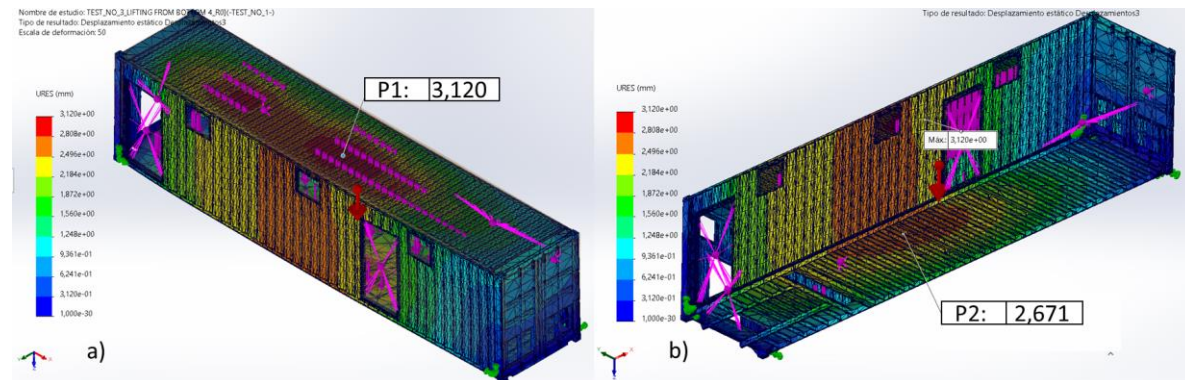


Fig. 3.16. Representación de desplazamientos resultantes. Prueba No. 3. Simulación con nivel de refinamiento final. Escala de colores de 0 a valor máximo resultante registrado (3.120 mm).

Al igual que en el apartado anterior, si se toma el límite elástico del COR-TEN A como referencia ($3.43 \cdot 10^8$ N/m²), se puede apreciar en la figura 3.15 que, en efecto, las tensiones resultantes se encuentran muy por debajo del mismo. El punto de lectura máxima mostrado en esta imagen corresponde a una singularidad, la cual está atribuida a que en su zona aledaña no se haya logrado una correcta conexión entre la pared y el larguero superior derecho del contenedor.

En cuanto a los desplazamientos (figura 3.16), como esperado, se expone la desviación del peso hacia uno de sus lados, debida, tal como se ha comentado en la simulación previa, a la asimetría en la distribución de aisladores del techo y marcos y puertas peatonales en las paredes.

3.3.3. Prueba No. 3. Resumen de conclusiones parciales.

Tras la argumentación anterior, se puede concluir que:

- La estructura modificada resiste las condiciones de carga dadas en la prueba de izaje por los isocorners inferiores.
- Al ser elevado, el contenedor sufrirá una ligera inclinación hacia su lado derecho debida a sus modificaciones y distribución interna de elementos, no obstante, al ser los desplazamientos máximos de alrededor de 3 mm, esta diferencia no representa un peligro para la transportación.
- El suelo del contenedor no sufrirá deformaciones significativas durante el izaje (desplazamiento máximo en simulación de aproximadamente 3 mm).
- El contenedor modificado cumple con los requerimientos dimensionales expuestos en el apartado 1.4.

3.4. Prueba No. 4. Restricción longitudinal.

La prueba de restricción longitudinal se divide en dos partes, y se desarrolla para comprobar la capacidad del contenedor de soportar una restricción externa longitudinal bajo las condiciones dinámicas ferroviarias, las cuales implican una aceleración de 2 g.

3.4.1. Preprocesado.

Al ser transportados los contenedores por tren, estos se fijan longitudinalmente a las bases a través de los colisos dispuestos para ello en los isocorners inferiores. En estos viajes, los contenedores deben ser capaces de resistir las fuerzas resultantes en sus apoyos derivadas de frenados repentinos que puedan ocurrir. Para lo anterior, la norma sugiere la restricción longitudinal del contenedor por un par de isocorners (traseros o frontales) y que sea aplicada por el par opuesto una fuerza igual a $2 R_g$, primero hacia el contenedor y después en sentido contrario. $2 R_g$ está dispuesto en la norma con referencia al ratio R del contenedor multiplicado por la gravedad. En la versión modificada del contenedor, este no contendrá la carga máxima posible, sino aquella de los elementos integrados y con los que fue diseñado, por lo que para el desarrollo de la simulación se tendrá en cuenta el peso de la tara del contenedor y el de los nuevos elementos internos (componentes eléctricos, bancadas y soportes) multiplicado por 2, que es el factor de incremento de carga. Con aproximadamente 11722.43 kg de masa total, lo anterior da lugar a 229994 N de fuerza aplicada (114997 N por isocorner). Resulta importante destacar que como valor de tara del contenedor modificado ha sido tomada la misma masa del contenedor original (3700 kg), que es mayor y provee más seguridad en los cálculos.

El mayor interés en la prueba número 4 es el comportamiento de los isocorners de la base. La siguiente imagen muestra el elemento de anclaje con que son fijados:

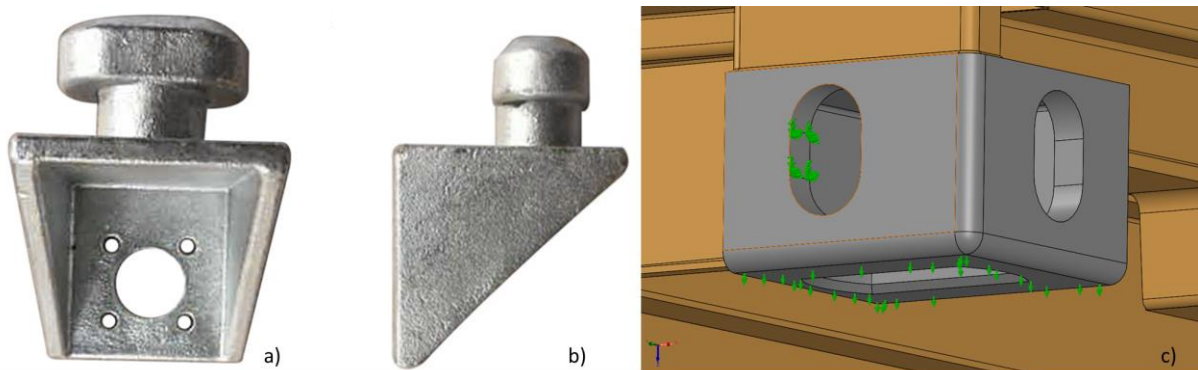


Fig. 3.17. Elemento de anclaje para isocorners de contenedor marítimo. En figura: a) vista superior; b) vista lateral; c) modelo de isocorner trasero en simulación con apoyo simple en su base y empotramiento en cara de contacto con el anclaje (en oposición al sentido de aplicación de la fuerza).

Estos elementos son insertados en los colisos de isocorners para restringir el movimiento de los mismos. Teniéndose esto en cuenta, y dada la elevada rigidez de estos elementos de anclaje, para la simulación los cuatro esquineros de la base del contenedor son restringidos por sus caras inferiores con un apoyo simple y, en los colisos laterales del par trasero, en el área de contacto con los anclajes, contrario al sentido de aplicación de la fuerza, es dispuesto un empotramiento, tal como se muestra en la figura 3.17 c).

Para el mallado se emplea, como en casos anteriores, una malla independiente basada en la curvatura de combinado.

3.4.2. Análisis de resultados obtenidos. Tensiones y desplazamientos.

Tal como se puede apreciar en la figura (3.20), los desplazamientos máximos que surgen en esta prueba son muy pequeños. Con esto en consideración, y siendo el principal interés de esta prueba la resistencia del contenedor (principalmente en las zonas de contacto con los anclajes), la convergencia de la malla se realiza en función de las tensiones equivalentes de von Mises. Los elementos refinados son los isocorners anclados y los largueros laterales inferiores del contenedor. La siguiente tabla muestra el análisis de convergencia (en busca de

menos del 10% de error) para la primera parte de la prueba, es decir, con la fuerza aplicada hacia el contenedor. En la segunda prueba, la fuerza se destina en sentido opuesto y la simulación es ejecutada con el mismo nivel de refinamiento:

Tabla 3.7. Análisis de convergencia de tensiones equivalentes de von Mises. Prueba No. 4. Parte 1.

Convergencia de tensiones equivalentes de von Mises		
Nivel de refinamiento	N0	N1
Tamaño de elemento mínimo	300	150
Tamaño de elemento máximo	900	450
Número de elementos	204261	206446
Reducción de tamaño	1	1/2
Tiempo de solución (min:seg)	3:45	4:36
Puntos de lectura	Tensiones (N/m ²)	
P1	1.75E+08	1.62E+08
P2	6.45E+07	6.76E+07
Puntos de lectura	Diferencia relativa (%)	
P1	-	-7.82
P2	-	4.79

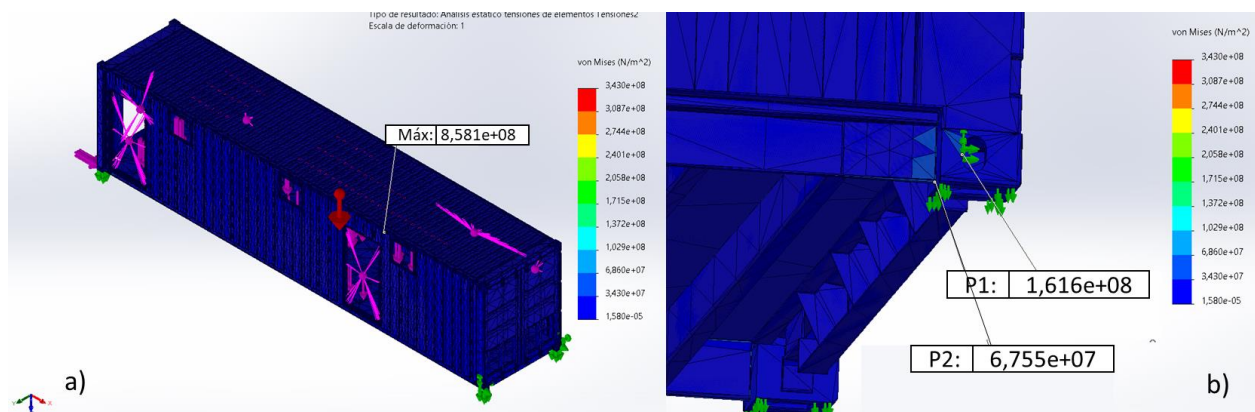


Fig. 3.18. Representación de tensiones equivalentes de von Mises. Prueba No. 4, parte 1: fuerza ejercida hacia el contenedor. Último nivel de refinamiento. Escala de colores de 0 a $3.43 \cdot 10^8$ N/m² (343 MPa). En figura: a) vista isométrica del contenedor; b) acercamiento a isocorner trasero inferior derecho.

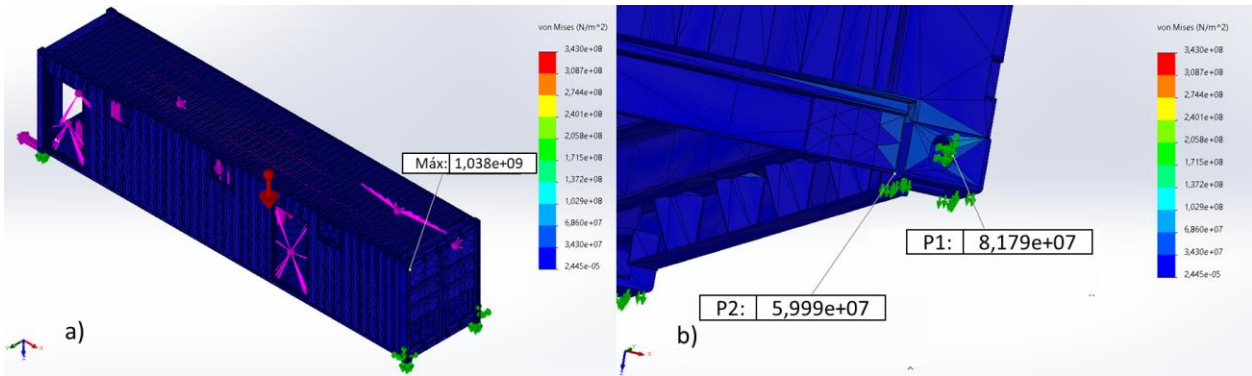


Fig. 3.19. Representación de tensiones equivalentes de von Mises. Prueba No. 4, parte 2: fuerza ejercida desde el contenedor. Último nivel de refinamiento. Escala de colores de 0 a $3.43 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ (343 MPa). En figura: a) vista isométrica del contenedor; b) acercamiento a isocorner trasero inferior derecho.

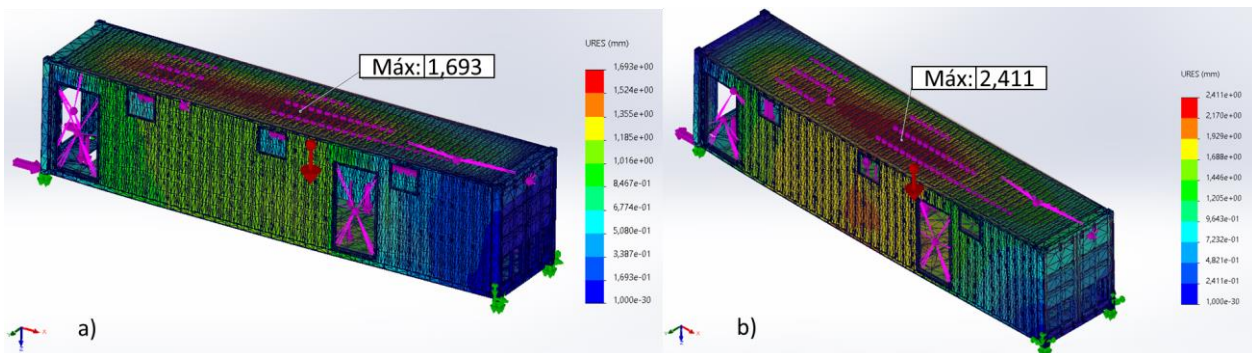


Fig. 3.20. Representación de desplazamientos resultantes. Prueba No. 4. Simulación con nivel de refinamiento final. En figura: a) Parte 1/escala de colores de 0 a valor máximo resultante registrado (1,693 mm); b) Parte 2/ escala de colores de 0 a valor máximo resultante registrado (2,411 mm).

En las figuras 3.18 y 3.19 se aprecia la representación de las tensiones equivalentes de von Mises tanto para el caso de la primera prueba, con la fuerza aplicada hacia el contenedor, como en el caso de la segunda, con la fuerza en sentido contrario. Es notable que en ambas las tensiones resultantes son muy bajas en comparación con el límite elástico de referencia. Esto se debe, en gran medida, a la resistencia de los isocorners y la estructura que conforma el suelo del contenedor, y en parte, a que con las modificaciones realizadas y el diseño dado, la fuerza que se está aplicando representa aproximadamente un 38.5% de la máxima que por diseño original debe soportar el contenedor ($2 R_{g(\text{original})} \approx 598018 \text{ N}$).

En la figura 3.20 se representan los desplazamientos resultantes para las dos pruebas. Si bien no aparecen valores significativos, se puede analizar la naturaleza de las diferencias mostradas entre ambas imágenes:

La figura 3.20 a) está referida a la primera parte de la prueba, en la que la estructura es sometida a una fuerza compresiva por los isocorners inferiores opuestos a aquellos anclados. Esta fuerza, con línea de acción coincidente con el plano de la estructura de suelo del contenedor, transfiere una compresión generalizada al resto del esqueleto, comprimiendo principalmente los largueros inferiores y superiores. Esta compresión produce desplazamientos en sentido contrario a los provocados por las fuerzas de peso de los componentes integrados a la pared lateral derecha y el techo del contenedor. Es por lo anterior que en la primera prueba se presentan unos desplazamientos resultantes en el techo y lado derecho del contenedor inferiores a los de la segunda prueba. La tracción a la que es sometido el contenedor en la segunda simulación da lugar a desplazamientos en el mismo sentido de las fuerzas de peso de los comentados componentes, dándose lugar de esta manera a un efecto contrapuesto al visto con la compresión.

3.4.3. Prueba No. 4. Resumen de conclusiones parciales.

Con lo argumentado, se puede concluir para esta prueba que:

- La estructura modificada resiste las condiciones de carga aplicadas, las que, por su diseño, representan

un 38.5% de las que aparecerían con un contenedor con carga máxima. Esto favorece en gran medida la transportación ferroviaria de estas unidades.

- El modelo modificado cumple con los requerimientos dimensionales expuestos en el apartado 1.4.

3.5. Prueba No. 5. Resistencia de paredes finales.

La prueba de resistencia de paredes finales se lleva a cabo para comprobar el comportamiento de las paredes frontal y trasera del contenedor bajo las mismas condiciones dinámicas de la prueba 4, es decir, esta prueba está también referida a la transportación ferroviaria. Al no ser ambas paredes iguales (una es ciega y la otra tiene portones), el estudio debe ser realizado en dos partes.

3.5.1. Prueba No. 5. Parte 1: resistencia de pared trasera. Preprocesado.

En la prueba anterior fueron analizados principalmente los isocorners del contenedor, dadas las reacciones que surgen en estos apoyos bajo las condiciones dinámicas especificadas. En estas condiciones, propiciadas, por ejemplo, por un frenado repentino del tren que transporta los contenedores, la desaceleración tan brusca puede dar lugar a que algunos de los elementos fijados en su interior se suelten y golpeen contra la pared frontal o trasera del contenedor (en dependencia del sentido de movimiento del transporte). Es por lo anterior que se realizan estas pruebas de resistencia.

La pared trasera del contenedor, la cual porta los portones principales, ha sido modificada con la inclusión en cada puerta de unos filtros enmarcados para facilitar el flujo del aire hacia el interior. La chapa con que es fabricado el marco de estos filtros es de acero S275JR de 3 mm de espesor, el cual presenta un límite elástico mucho menor al del acero corten que se encontraba, antes de la modificación, en esa zona. El material de los filtros es plástico. La disposición de los marcos se muestra en la siguiente imagen:

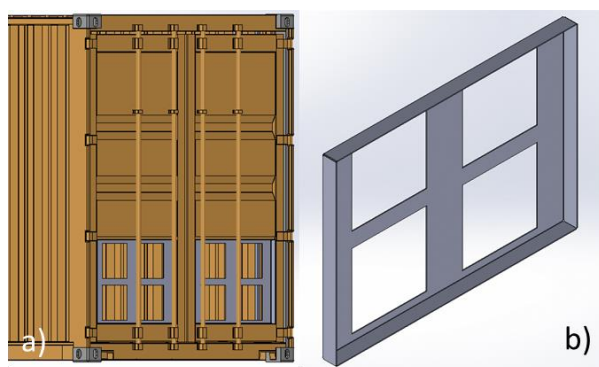


Fig. 3.21. Modificaciones a portones del contenedor. En figura: a) vista general de ensamblaje de marcos soldados; b) vista en isométrico del marco para filtros.

Al ser el material de los marcos el menos resistente, este marcará el límite de interés en el análisis de las tensiones para esta prueba. En la figura 3.21 no aparecen representados los filtros, ya que, al ser de plástico, estos no crearán una resistencia significativa bajo la acción de las cargas.

Para el desarrollo del ensayo la norma ISO 1496 indica la aplicación de una fuerza, normal a la pared ensayada, de valor igual a $0.4 P_g$, estando esta referida al diseño original del contenedor. En el contenedor modificado, la carga a aplicar es W (ver tabla 2.1), calculada como el peso de todos los nuevos componentes integrados al contenedor ($L_g = 78700 \text{ N}$), afectado por el factor 0.4 (resultando en $W = 31480 \text{ N}$). Se destaca que el peso de los nuevos componentes, L_g , se determina como la masa bruta total menos la tara, multiplicado por la gravedad (g , ver tabla 2.1); por lo que incluye el peso de las chapas del suelo y los perfiles que conforman los marcos, los cuales son componentes estructurales soldados al contenedor y que no representan un peligro real para la resistencia de la pared trasera; sin embargo, se mantienen incluidos en L_g para brindar mayor seguridad en los cálculos.

Como el objeto de interés en esta prueba es únicamente el espacio comprendido por la pared trasera, la cual es simétrica, para la simulación se realiza un corte transversal al contenedor y otro longitudinal en su centro, de

forma tal que se permita el estudio solamente de la pared en cuestión, a simetría. En este sentido, la carga a aplicar es la mitad de la total antes comentada, resultando en 15740 N. Todas las caras cortadas transversalmente se establecen con condiciones de empotramiento, lo cual simula la unión con el resto del contenedor ante la carga aplicada y reduce significativamente el gasto computacional.

3.5.2. Prueba No. 5. Parte 2: resistencia de pared frontal. Preprocesado.

De forma análoga a la primera parte de esta prueba, sobre la pared frontal del contenedor modificado es aplicada una carga uniformemente distribuida de $0.4 Lg = W = 31480$ N. En esta pared es donde se hallan el cuadro eléctrico, los extractores y sus correspondientes marcos; todos tapados por una chapa atornillada de acero inoxidable de 2 mm de espesor. Las uniones atornilladas son simuladas a través de una unión rígida entre los dos elementos y los extractores, al no estar diseñados para resistir cargas, son excluidos del análisis.

El cuadro eléctrico está conformado por una caja metálica de acero galvanizado, con puerta, que contiene determinados componentes electrónicos (ver apartado 2.3). Al ser interés de este análisis la resistencia del contenedor y su control dimensional exterior, y ante la posibilidad de que la caja del cuadro se vea deformada bajo la acción de las cargas, se modela de este conjunto únicamente la puerta del cuadro eléctrico, que da al exterior del contenedor, y la chapa metálica que lo cubre durante su transportación.

Siendo el menor límite elástico entre los componentes modelados el de la chapa de acero inoxidable (aproximadamente $1.72 \cdot 10^8$ N/m² [17]), este marcará la escala de interés en el análisis de las tensiones resultantes.

Al igual que en la primera parte de esta prueba, la pared frontal es tratada sola en la simulación, con condiciones de empotramiento en las caras del corte transversal realizado al contenedor y de simétrica con respecto a su plano longitudinal central. La carga aplicada tiene entonces un valor igual a la mitad de W (15740 N).

3.5.3. Análisis de resultados obtenidos. Tensiones y desplazamientos. Partes 1 y 2.

En este epígrafe son analizados los resultados de tensiones y desplazamientos de ambas partes de la simulación del ensayo número 5.

En cada simulación las estructuras fueron malladas con uso del mallador basado en la curvatura. Tal como se ha comentado en el apartado 2.3.3, este tipo de mallado crea más elementos en las zonas de mayor curvatura, haciéndolo ideal para estudios con tantos pliegues de chapa.

A diferencia de la prueba anterior, en la presente existe un particular interés en el estudio de los desplazamientos máximos, no solo por comprobarse los requerimientos dimensionales referidos en la norma, sino porque componentes como el cuadro eléctrico y los marcos que soportan los filtros tienen integrados componentes no modelados que pudieran fallar o romperse si fuesen sometidos a grandes desplazamientos (como por ejemplo: filtros plásticos, cableado y placa electrónica del cuadro eléctrico).

En las siguientes tablas y figuras se exponen los análisis de convergencia y resultados de las simulaciones:

Tabla 3.8. Análisis de convergencia de tensiones equivalentes de von Mises y desplazamientos resultantes.
Prueba No. 5. Parte 1.

Convergencia de tensiones equivalentes de von Mises			Convergencia de desplazamientos resultantes		
Nivel de refinamiento	N0	N1		N0	N1
Tamaño de elemento mínimo (mm)	32	16		32	16
Tamaño de elemento máximo (mm)	162	162		162	162

Número de elementos	74967	206446		74967	206446
Reducción de tamaño	1	1/2		1	1/2
Tiempo de solución (min:seg)	1:23	4:36		1:23	4:36
Puntos de lectura	Tensiones equivalentes (N/m ²)		Puntos de lectura	Desplazamientos resultantes (mm)	
P1	1.05E+08	1.14E+08	P3	9.32	10.28
P2	8.83E+07	9.58E+07	P4	4.51	4.49
Puntos de lectura	Diferencia relativa (%)				
P1	-	8.06	P3	-	7.60
P2	-	8.52	P4	-	-0.31

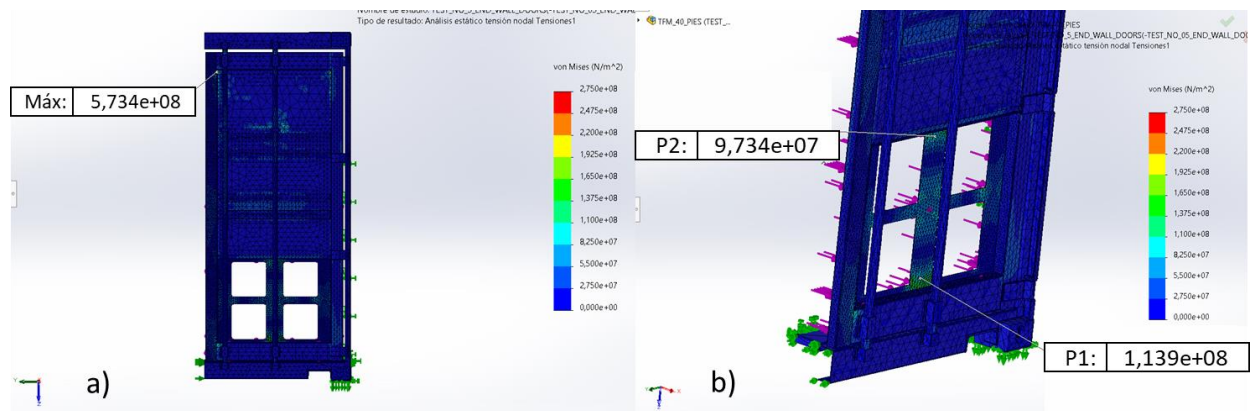


Fig. 3.22. Representación de tensiones equivalentes de von Mises. Prueba No. 5. Parte 1. Último nivel de refinamiento. Escala de colores de 0 a $2.75 \cdot 10^8$ N/m² (275 MPa). En figura: a) vista frontal simétrica de la pared trasera; b) acercamiento a la zona más peligrosa y exposición de puntos de lectura.

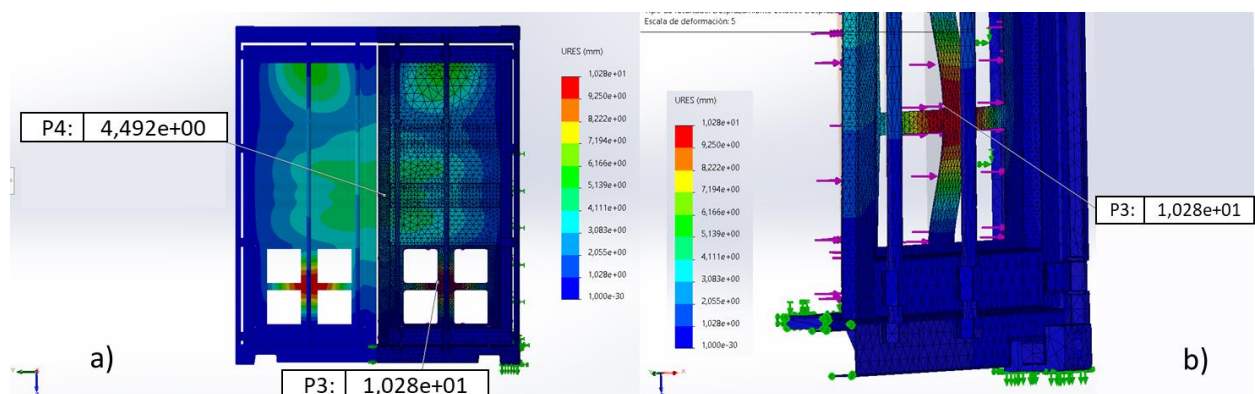


Fig. 3.23. Representación de desplazamientos resultantes. Prueba No. 5. Parte 1. Último nivel de refinamiento. Escala de colores de 0 a valor máximo resultante registrado (10.28 mm). En figura: a) vista frontal de pared trasera; b) acercamiento a la zona más peligrosa y exposición de puntos de lectura.

trasera con mallado simétrico; b) acercamiento a zona de mayor desplazamiento resultante.

Dada la pequeña cantidad de elementos, en comparación con mallados de simulaciones anteriores, en la presente se decidió realizar el análisis de convergencia de tensiones en conjunto con el de desplazamientos, refinándose tanto los componentes relacionados con los sensores de tensiones (marco para filtros) como aquellos vinculados a los puntos de interés en desplazamientos.

Se puede apreciar en la tabla 3.7 que, al refinarse la malla, se reduce a la mitad el tamaño mínimo de elementos pero se mantiene constante el tamaño máximo. Esto es porque el control de malla con el mallador basado en la curvatura no se trabaja con valores de tamaño mínimo y máximo, sino con el tamaño mínimo y un factor de crecimiento. Con estos, se concentran los elementos más pequeños en las curvaturas y se incrementa el tamaño de los restantes, paulatinamente, con uso del mencionado factor. En la presente simulación se empleó un factor de crecimiento de 1.4. Los tamaños de elemento iniciales están dados por recomendación del software, el cual basa su sugerencia en el análisis de los tamaños de los componentes y radios de curvatura más pequeños.

La imagen 3.22 muestra una representación de las tensiones equivalentes en el último nivel de refinamiento. Como se ha comentado, para la escala de colores expuesta se ha tomado como límite elástico de interés el de $2.75 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$, siendo este el menor límite elástico presente en el conjunto. Se puede apreciar en la imagen a) que, a excepción de la tensión máxima señalada (correspondiente a la ya comentada singularidad que se crea en la esquina de unión entre la chapa de la puerta y su marco), los componentes de la puerta original presentan tensiones muy por debajo de su límite elástico. Es por ello que el estudio se centra en el marco soldado para soporte de los filtros.

Se muestra en la figura 3.22. b) que la tensión más alta leída en el marco es de $1.139 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$, la cual dota a la pieza con un factor de seguridad de aproximadamente 2.4.

En la figura 3.23. b) se aprecia que el desplazamiento máximo registrado es de 10 mm, el cual no es excesivo (considerándose que la chapa tiene un espesor de solo 3 mm) y que no excede los límites del contenedor ni afecta su manipulación; sin embargo, el diseño no es recomendable. Cada marco posee cuatro aperturas cuadradas para el ensamblaje de los filtros, los cuales, como se ha comentado, son de plástico y no han sido incluidos en la simulación. Ante las condiciones dinámicas a las que estaría sometido el contenedor, es posible que alguno de los elementos integrados más pequeños (por ejemplo, un aislador) salga despedido hacia el exterior a través de una de las aperturas del marco, dando lugar a un posible accidente o afectación. Dicho esto, lo aconsejable es el ensamblaje de una rejilla metálica, con límite elástico al menos igual al del marco, soldada a este por el exterior, de manera que permita la entrada de aire por los filtros e incremente la seguridad ante situaciones como la simulada.

Las siguientes tabla e imágenes exponen los resultados y análisis de convergencia para la segunda parte de la prueba:

Tabla 3.9. Análisis de convergencia de tensiones equivalentes de von Mises y desplazamientos resultantes.
Prueba No. 5. Parte 2.

Convergencia de tensiones equivalentes de von Mises				Convergencia de desplazamientos resultantes			
Nivel de refinamiento	N0	N1	N2		N0	N1	N2
Tamaño de elemento mínimo (mm)	34	17	8.5		34	17	8.5
Tamaño de elemento máximo (mm)	170	170	170		170	170	170
Número de elementos	79460	186446	294403		79460	206446	294403
Reducción de tamaño	1	1/2	1/4		1	1/2	1/4

Tiempo de solución (min:seg)	0:15	1:24	2:57		0:15	1:24	2:57
Puntos de lectura	Tensiones equivalentes (N/m ²)			Puntos de lectura	Desplazamientos resultantes (mm)		
P1	2.08E+08	2.66E+08	2.79E+08	P2	8.95	9.73	10.40
				P3	8.77	9.36	10.16
Puntos de lectura	Diferencia relativa (%)						
P1	-	28.12	4.92	P2	-	8.70	6.66
				P3	-	6.73	8.57

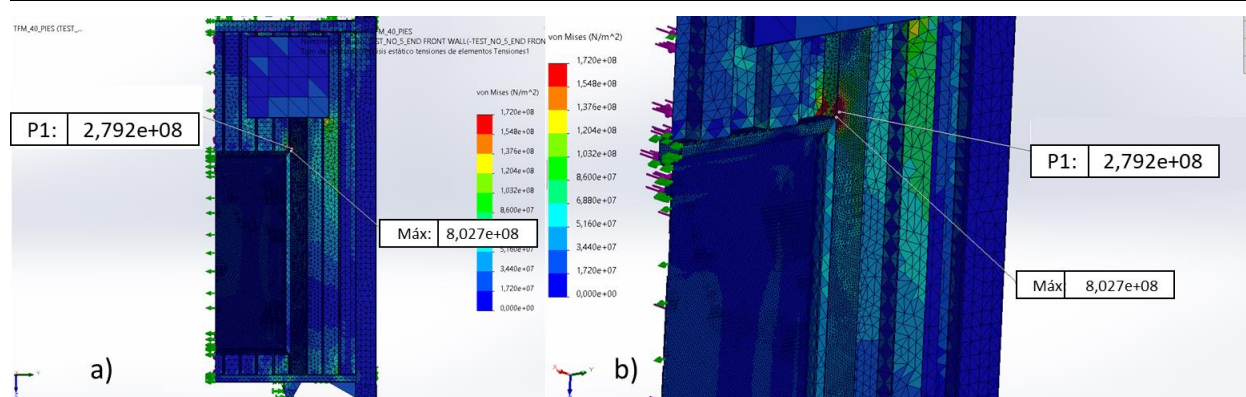


Fig. 3.24. Representación de tensiones equivalentes de von Mises. Prueba No. 5. Parte 2. Último nivel de refinamiento. Escala de colores de 0 a $1.72 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ (172 MPa). En figura: a) vista frontal a simetría de la pared frontal; b) acercamiento a zona de interés y ubicación de puntos de lectura.

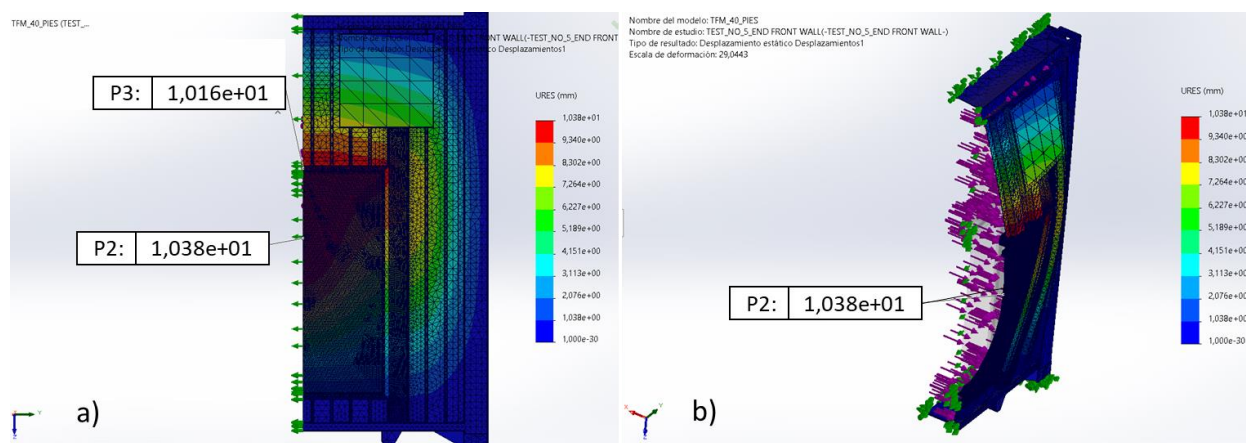


Fig. 3.25. Representación de desplazamientos resultantes. Prueba No. 5. Parte 2. Último nivel de refinamiento. Escala de colores de 0 a valor máximo resultante registrado (10.38 mm). En figura: a) vista frontal de pared frontal a simetría; b) deformada.

En la segunda parte de la prueba número 5 se estudia el comportamiento de la pared frontal. La figura 3.24 muestra los resultados de tensiones equivalentes con una escala de colores que presenta $1.72 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ como valor máximo, el cual es el límite elástico de las chapas de acero inoxidable que cubren las zonas de los extractores y cuadro eléctrico. Se observa en esta misma figura cómo el punto de mayor peligro no se encuentra en estas láminas, sino que se desarrolla en la esquina formada por la unión del marco del cuadro eléctrico y la chapa corrugada de la pared. Es importante destacar que en esta zona el sensor se ha colocado algo alejado de la esquina debido a la existencia de singularidades (para más detalles, ver Anexo C). El valor de tensión medido

en el punto 1 es inferior al límite elástico del acero COR-TEN A, por lo que la pared resistirá, no obstante, resulta significativo aclarar que en realidad las tensiones existentes en esta zona serán inferiores a las mostradas, debido al cordón aplicado en la soldadura entre los dos componentes, el cual da lugar a un alivio de tensiones.

En cuanto a los desplazamientos, se puede decir que al ser transportados por tren los contenedores se colocan uno, o dos apilados, por vagón, por lo que a pesar de que las deformaciones mostradas exceden los límites del espacio que ocupa el contenedor (deformación descrita por el marco del cuadro eléctrico), no producirán afectaciones a otras estructuras aledañas. Estos desplazamientos se desarrollan dentro del rango elástico, por lo que no provocan deformaciones permanentes o inhabilitan de alguna manera el uso del contenedor, cumpliendo de esta manera con los requerimientos dimensionales establecidos en la ISO 1496. Por otro lado, se puede destacar que el desplazamiento máximo dado en el centro de la chapa del cuadro eléctrico (10.38 mm) no representa un peligro para la integridad de los elementos eléctricos internos del cuadro. En el área descrita por la pared del fondo del cuadro, va ensamblada una placa eléctrica de dimensiones aproximadamente iguales a las de dicha pared. Esta placa es colocada a una separación de entre 15 y 20 mm del fondo, y además cuenta con cierto grado de elasticidad.

3.5.4. Prueba No. 5. Resumen de conclusiones parciales.

Con lo argumentado en los subepígrafes anteriores se puede llegar a las siguientes conclusiones parciales con respecto a los resultados de la prueba 5:

- La estructura modificada resiste las condiciones de carga establecidas en la norma para la prueba de resistencia de paredes finales.
- Los desplazamientos máximos alcanzados en la parte de la simulación referida a la pared trasera no inhabilitan la apertura y cierre de las puertas del contenedor, sin embargo, el diseño actual del marco para filtros no cumple con los requerimientos de seguridad normados y se recomienda se mejore el mismo, posiblemente, con la inclusión de unas rejillas metálicas soldadas por el lado exterior o que se modifique para que pueda ser atornillada una chapa de acero inoxidable de seguridad para la transportación, tal como se hace en el resto de los marcos del contenedor.
- El contenedor modificado cumple (a excepción del punto anterior) con los requerimientos dimensionales expuestos en el apartado 1.4.

3.6. Prueba No. 6. Resistencia de paredes laterales.

La prueba de resistencia de paredes laterales se desarrolla para comprobar la capacidad del contenedor de resistir las cargas dinámicas derivadas de los movimientos del barco, y debe ser llevada a cabo en ambas paredes laterales cuando el contenedor no es simétrico, sin embargo, en el presente trabajo solo es ejecutada la simulación del ensayo en la pared lateral derecha. El modelo original del contenedor, tal como se argumentó en apartados anteriores, cumple con los requerimientos de las normas, y es propósito de este estudio el analizarlo nuevamente a causa de las modificaciones realizadas. La pared lateral izquierda solo cuenta con la integración de un pequeño marco soldado, mientras que a la derecha se le han realizado varios cortes para la integración de puertas peatonales y paneles de explosión (ver apartado 2.3), por lo que se entiende que, si la pared derecha cumple con los requerimientos normados, también lo hará la izquierda, que prácticamente no se ha modificado.

3.6.1. Preprocesado.

Al igual que en la prueba anterior, para la simulación de la pared lateral derecha se ha realizado un corte al contenedor, de manera que permita analizar solo la pared y aquellos componentes inmediatos a los que está conectada. Del mismo modo, se ha impuesto una condición de empotramiento en todas las caras cortadas y en las caras inferiores de los isocorners del suelo. La fuerza aplicada, en este caso, se dispone normal y uniformemente distribuida sobre todo el espacio que ocupa la pared y nuevos componentes integrados, con sentido desde el interior del contenedor hacia afuera; su valor es de $0.6 Lg = 47220 \text{ N} = W$ (ver tablas 1.5 y 2.1).

De igual forma que en la prueba anterior, las puertas peatonales y paneles de explosión también cuentan con

chapas de acero inoxidable de 2 mm de espesor atornilladas que los cubren, lo cual marca que el límite elástico de interés a representar en la escala para esta simulación sea el de $1.72 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$. Las puertas peatonales no aparecen en la simulación, sino que forman parte de la fuerza aplicada, ya que se asume el peor de los casos, en el que estas también se sumen a la carga que presiona la chapa cobertora.

3.6.2. Análisis de resultados obtenidos.

Para el mallado fue seleccionado nuevamente el mallador basado en la curvatura. Como se trata de una cantidad pequeña de componentes (en comparación con pruebas anteriores) se decide nuevamente tomar la recomendación del software en cuanto a tamaños de elemento iniciales, esta vez, entre 80 y 400 mm, con un factor de crecimiento de 1.4.

A pesar de que la carga es ahora mayor, en comparación con la prueba 5, lo es también el área sobre la cual es aplicada. Esto justifica que las tensiones equivalentes, tras la simulación, se encuentren muy por debajo del límite elástico (ver figura 3.26), por lo que el análisis de convergencia es basado únicamente en los desplazamientos:

Tabla 3.10. Análisis de convergencia de desplazamientos resultantes. Prueba No. 6.

Convergencia de desplazamientos resultantes		
Nivel de refinamiento	N0	N1
Tamaño de elemento mínimo (mm)	80	40
Tamaño de elemento máximo (mm)	400	400
Número de elementos	197540	329249
Reducción de tamaño	1	1/2
Tiempo de solución (min:seg)	0:30	0:53
Puntos de lectura	Desplazamientos (mm)	
P1	1.951	2.077
Puntos de lectura	Diferencia relativa (%)	
P1	-	6.46

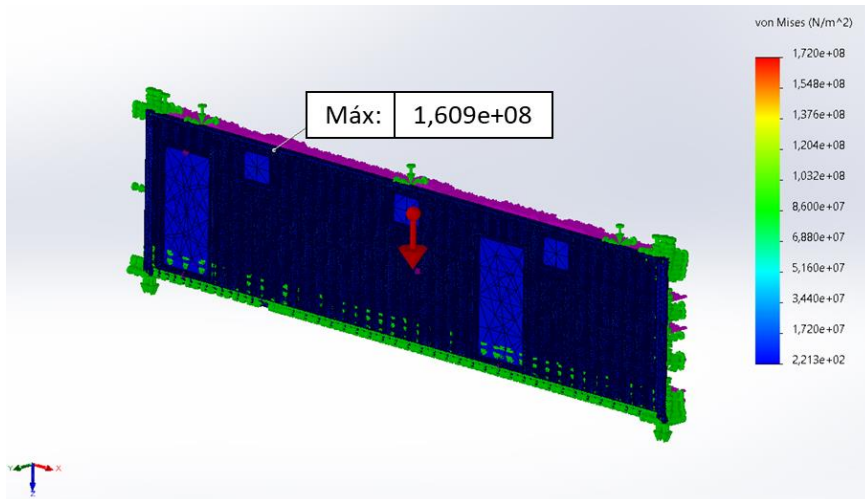


Fig. 3.26. Representación de tensiones equivalentes de von Mises. Prueba No. 6. Último nivel de refinamiento. Escala de colores de $2.213 \cdot 10^2 \text{ N/m}^2$ a $2.75 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ (275 MPa). Escala de deformación 1:1.

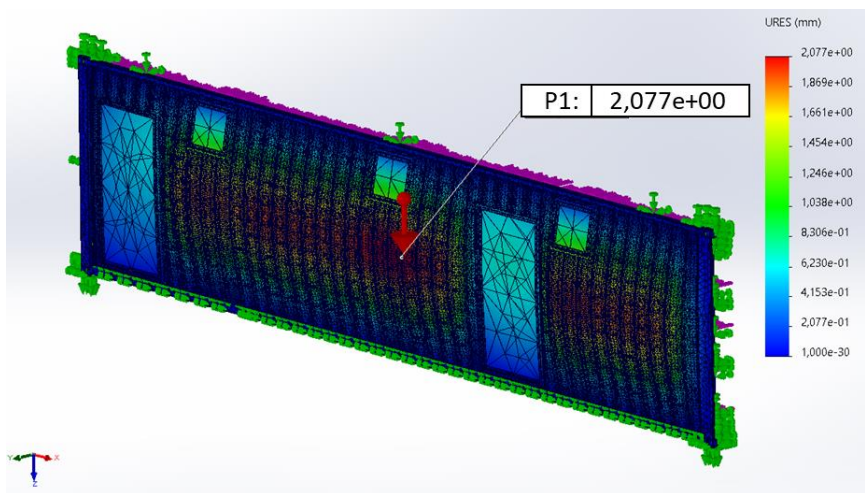


Fig. 3.27. Representación de desplazamientos resultantes. Prueba No. 6. Último nivel de refinamiento. Escala de colores de 0 a valor máximo resultante registrado (2,077 mm). Escala de deformación 100:1.

Como comentado, en la figura 3.26 puede apreciarse que las tensiones resultantes se encuentran muy por debajo del límite elástico de los materiales, correspondiendo la máxima señalada a una singularidad formada en la esquina de unión entre uno de los plegados de la chapa de la pared con el larguero superior. Por otra parte, queda expuesto en la figura 3.27 que los desplazamientos máximos tras la convergencia no son significativos.

3.6.3. Prueba No. 6. Resumen de conclusiones parciales.

Tras lo desarrollado, puede concluirse que:

- Las modificaciones realizadas a las paredes del contenedor no causan que el mismo pierda su capacidad para resistir las condiciones de carga dadas en la prueba número 6, adaptada al nuevo diseño.
- Siendo el desplazamiento máximo de aproximadamente 2 mm, no se desarrollarán afectaciones que inhabiliten la apertura y cierre de las puertas peatonales a causa de los efectos dinámicos del movimiento del barco.
- El contenedor modificado, dentro del ámbito de la prueba número 6, cumple con los requerimientos dimensionales expuestos en el apartado 1.4.

3.7. Prueba No. 7. Resistencia del techo.

La prueba de resistencia del techo se ejecuta para comprobar la capacidad del techo del contenedor para soportar las cargas impuestas por personas trabajando sobre este.

3.7.1. Preprocesado.

Para desarrollar el ensayo la norma ISO 1496 sugiere que sea aplicada una carga uniformemente distribuida de 300 kg sobre un área de 600 x 300 mm en la parte más débil del techo del contenedor. El modelo del contenedor modificado contiene varios perfiles soldados al techo, los cuales soportan aisladores y pararrayos. Aún con el peso impuesto por estos elementos, se ha comprobado en pruebas anteriores que el mayor desplazamiento del techo se desarrolla aproximadamente en el centro del mismo (siempre que no sean aplicadas cargas externas que produzcan un efecto diferente), siendo este el punto más distante de su perímetro soldado al resto del contenedor. Dicho lo anterior, para la simulación se dispone una carga de 2943 N (C en tabla 2.1) uniformemente distribuida sobre un área de 600 x 300 mm ubicada en el centro del techo del contenedor (con dimensión de 600 mm paralela a los largueros laterales).

Al igual que en las pruebas 5 y 6, se decide simplificar el modelo mediante un corte al contenedor, paralelo al plano del techo, de forma tal que sean analizados únicamente este componente y sus adyacentes inmediatos. Asimismo, se establecen condiciones de empotramiento en todas las caras cortadas y se colocan las fuerzas de peso de los aisladores, perfiles y pararrayos en sus correspondientes posiciones en el techo.

3.7.2. Análisis de resultados obtenidos.

Dado que el elemento principal a analizar contiene muchos redondeos, se malla el modelo a través del mallador basado en la curvatura, con tamaños de elemento iniciales entre 92 y 460 mm (a sugerencia del software), y con un factor de crecimiento de 1.4.

En las siguientes tabla e imágenes pueden apreciarse el análisis de convergencia y los resultados obtenidos en el último nivel de refinamiento. Puesto que se trata de pocos componentes a malla, se decidió realizar la convergencia de tensiones y desplazamientos en conjunto, refinándose en cada nivel tanto el área de aplicación de la carga C (donde aparecen los mayores desplazamientos) como los bordes exteriores de las ondulaciones del techo (donde se concentran las tensiones):

Tabla 3.11. Análisis de convergencia de tensiones equivalentes de von Mises y desplazamientos resultantes. Prueba No. 7.

Convergencia de tensiones equivalentes de von Mises				Convergencia de desplazamientos resultantes			
Nivel de refinamiento	N0	N1	N2		N0	N1	N2
Tamaño de elemento mínimo (mm)	92	46	23		92	46	23
Tamaño de elemento máximo (mm)	460	400	401		460	400	401
Número de elementos	245756	257359	269071		245756	257359	269071
Reducción de tamaño	1	1/2	1/4		1	1/2	1/4
Tiempo de solución (min:seg)	0:27	0:34	0:37		0:27	0:34	0:37
Puntos de lectura	Tensiones equivalentes (N/m ²)			Puntos de lectura	Desplazamientos resultantes (mm)		
P1	4.65E+08	1.37E+08	1.36E+08	P1	11.3	17.7	19.38

Diferencia relativa (%)							
P1	-	-70.63	-0.73	P1	-	56.51	9.68

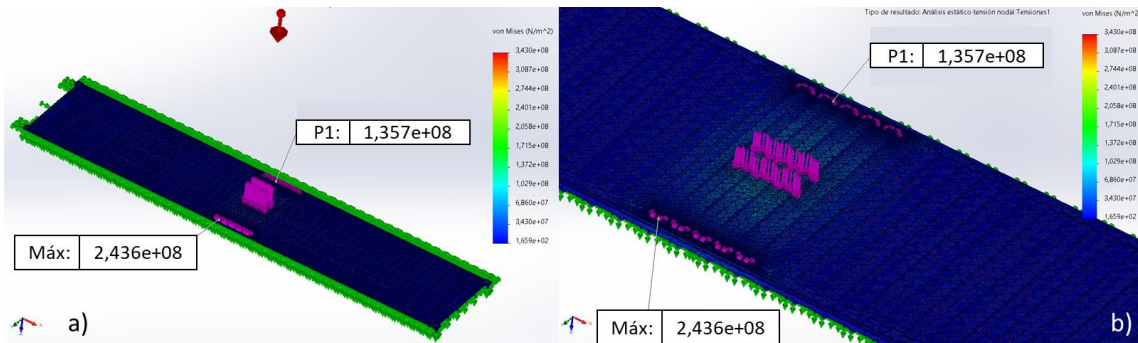


Fig. 3.28. Representación de tensiones equivalentes de von Mises. Prueba No. 7. Último nivel de refinamiento. Escala de colores de $1.659 \cdot 10^2 \text{ N/m}^2$ a $3.43 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ (343 MPa). Escala de deformación 1:1.

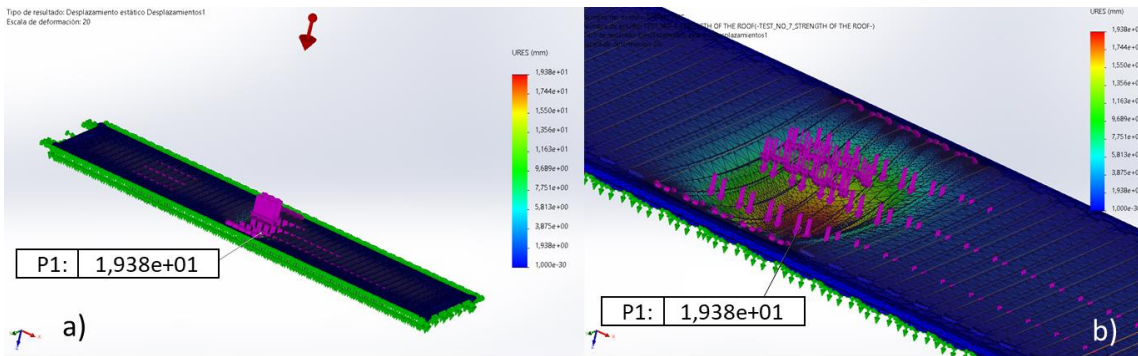


Fig. 3.29. Representación de desplazamientos resultantes. Prueba No. 7. Último nivel de refinamiento. Escala de colores de 0 a valor máximo resultante registrado ($1.938 \cdot 10^1 \text{ mm}$). Escala de deformación 20:1.

Como se aprecia en las imágenes, bajo la aplicación de la carga ocurrirá un desplazamiento de hasta alrededor de 20 mm pero dentro del límite elástico del material. Esta deformación es normal si se tiene en cuenta el peso impuesto y la distancia desde la zona de aplicación a los bordes soldados de la chapa de 2 mm de espesor que constituye el techo. Al igual que en pruebas anteriores, aquí no se determina el factor de seguridad dado que de por sí las cargas aplicadas se tienen sus valores aumentados. Finalmente, se destaca que en el análisis de tensiones mostrado en la figura 3.28, con el primer mallado, el punto de lectura 1 era inicialmente el punto de tensión máxima, el cual, como se aprecia, cambió con el refinamiento, sin embargo, se señala que ambos puntos son convergentes.

3.7.3. Prueba No. 7. Resumen de conclusiones parciales.

Tras el estudio realizado, se llega a las siguientes conclusiones:

- El techo del contenedor resistirá las cargas impuestas por personas trabajando sobre el mismo, siempre que la masa total de los trabajadores y su equipamiento no superen los 300 kg.
- El peso de los componentes integrados al techo no perjudica la capacidad del mismo para soportar las condiciones especificadas para la prueba.
- Con la carga aplicada no se producen deformaciones permanentes que inhabiliten el contenedor para su uso y transportación
- En esta prueba se cumplen los requerimientos dimensionales expuestos en el apartado 1.4.

3.8. Prueba No. 9. Rigidez transversal.

Durante la transportación en barco, a causa del oleaje y los vientos, se dan condiciones dinámicas que provocan fuerzas de trasiego sobre los contenedores. En la presente prueba se estudia la rigidez del contenedor bajo la acción de estas fuerzas en dirección transversal.

3.8.1. Preprocesado.

Para el desarrollo de la prueba, la norma ISO 1496 indica que el contenedor, en condición de tara, debe ser colocado sobre cuatro soportes de nivel bajo los isocorners del suelo. Su movimiento debe ser restringido en la dirección vertical y lateral mediante anclajes en los colisos de los esquineros inferiores; disponiéndose la restricción lateral únicamente en los esquineros diagonalmente opuestos (en el mismo marco) a los isocorners superiores sobre los cuales será aplicada la carga. Posteriormente, debe ser aplicada una fuerza de 150 kN sobre cada uno de los mencionados isocorners superiores, en dirección paralela al plano de la base y al plano de la pared trasera. Estas fuerzas deben ser aplicadas de un mismo lado, primero hacia el contenedor y luego en sentido opuesto.

Para la simulación del ensayo descrito en el texto anterior sobre el modelo del contenedor modificado, se toma para su condición de tara todos los cambios realizados que pasan a formar parte intrínseca de la estructura, es decir: cortes a las paredes y suelo, y marcos y suelo de acero soldados. El resto de los componentes integrados quedan excluidos del análisis, a excepción del cuadro eléctrico, el cual es incorporado en el modelo por comprender una parte significativa de la pared frontal y aportar rigidez a la misma. En este cuadro se decide, por simplicidad, no modelar su puerta, sino el cuerpo que conforma la caja cobertora, ya que la puerta no aporta rigidez bajo las cargas a aplicar.

Con respecto a las condiciones de contorno, se restringe el movimiento vertical a través de un apoyo simple en las caras inferiores de los isocorners del suelo, y se simula el contacto con los anclajes de restricción lateral a partir de un empotramiento en los colisos laterales de los correspondientes isocorners, aplicado en las caras opuestas al sentido de acción de las fuerzas (análogo a la restricción longitudinal aplicada en la prueba 4). Finalmente, se dispone la carga de 150 kN en las caras laterales de cada uno de los isocorners superiores diagonalmente opuestos a aquellos restringidos lateralmente, con sentido hacia el contenedor en la primera parte de la simulación, y desde el contenedor en la segunda.

Siendo las paredes frontal y trasera simétricas con respecto al plano vertical central, solo es necesario ejecutar el ensayo de un solo lado.

3.8.2. Prueba No. 9. Parte 1: fuerzas aplicadas hacia el contenedor. Análisis de resultados.

En este epígrafe se exponen y analizan los resultados de tensiones y desplazamientos cuando las fuerzas son aplicadas con sentido hacia el contenedor.

Siendo las tensiones resultantes tan bajas en comparación con el límite elástico de los materiales (ver figura 3.30), a excepción de las mostradas en la pared frontal en áreas no importantes (aledañas a los marcos de los extractores); y considerándose que el principal objetivo del ensayo es el estudio de la rigidez; se decide desarrollar el análisis de convergencia con base en los desplazamientos resultantes.

El mallado, al igual que en la prueba número 1, es realizado con el mallador basado en la curvatura de combinado, con tamaños de elementos iniciales entre 300 y 900 mm. Son refinados en cada nivel los componentes que integran los marcos de las paredes frontal y trasera. Una vez se tiene la convergencia, se comparan las diagonales principales de las paredes ensayadas antes y después de la deformación y se analiza si estas cumplen con los requerimientos dimensionales expuestos al final del apartado 1.4.

Tabla 3.12. Análisis de convergencia de desplazamientos resultantes. Prueba No. 9. Primera parte.

Convergencia de desplazamientos resultantes		
Nivel de refinamiento	N0	N1
Tamaño de elemento mínimo (mm)	300	150
Tamaño de elemento máximo (mm)	900	450
Número de elementos	206591	209844
Reducción de tamaño	1	1/2
Tiempo de solución (min:seg)	2:32	2:36
Puntos de lectura	Desplazamientos resultantes (mm)	
P1	4.796	4.893
P2	4.267	4.357
P3	0.711	0.718
P4	7.149	7.235
P5	7.380	7.479
P6	0.7559	0.7624
Puntos de lectura	Diferencia relativa (%)	
P1	-	2.02
P2	-	2.11
P3	-	0.98
P4	-	1.20
P5	-	1.34
P6	-	0.86

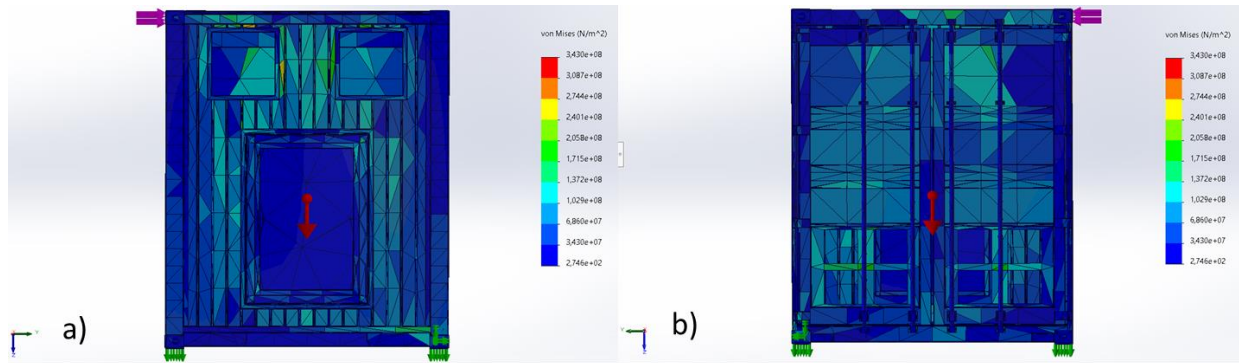


Fig. 3.30. Representación de tensiones equivalentes de von Mises. Prueba No. 9. Parte 1. Último nivel de refinamiento. Escala de colores de $2.246 \cdot 10^2 \text{ N/m}^2$ a $3,43 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ (343 MPa). En figura: a) vista frontal; b) vista trasera. Escala de deformación 1:1.

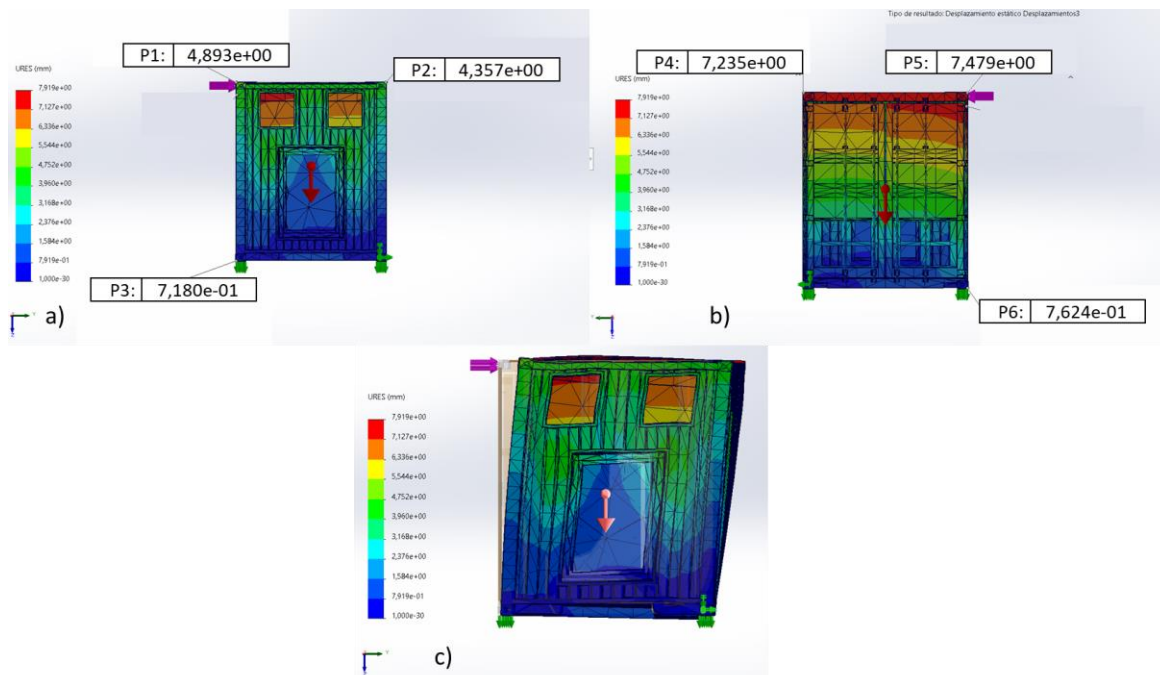


Fig. 3.31. Representación de desplazamientos resultantes. Prueba No. 9. Parte 1. Último nivel de refinamiento. Escala de colores de 0 a valor máximo resultante registrado (7.919 mm). Ubicación de puntos de lectura. En figura: a) vista frontal (deformación en escala 1:1); b) vista posterior (deformación en escala 1:1); c) deformada, vista frontal (deformación en escala 50:1).

Se puede apreciar en la deformada mostrada en la figura 3.31. c) cómo las cargas actuantes afectan la forma del marco tanto de la pared frontal como la trasera, haciendo que una de sus diagonales principales se alargue mientras la otra se acorta. La suma de los cambios en longitud sufridos por estas diagonales son precisamente el objeto principal de estudio de este ensayo, los cuales no pueden exceder los 60 mm (ver apartado 1.4). En las siguientes imágenes se expone la medición de estas diagonales tras la deformación:

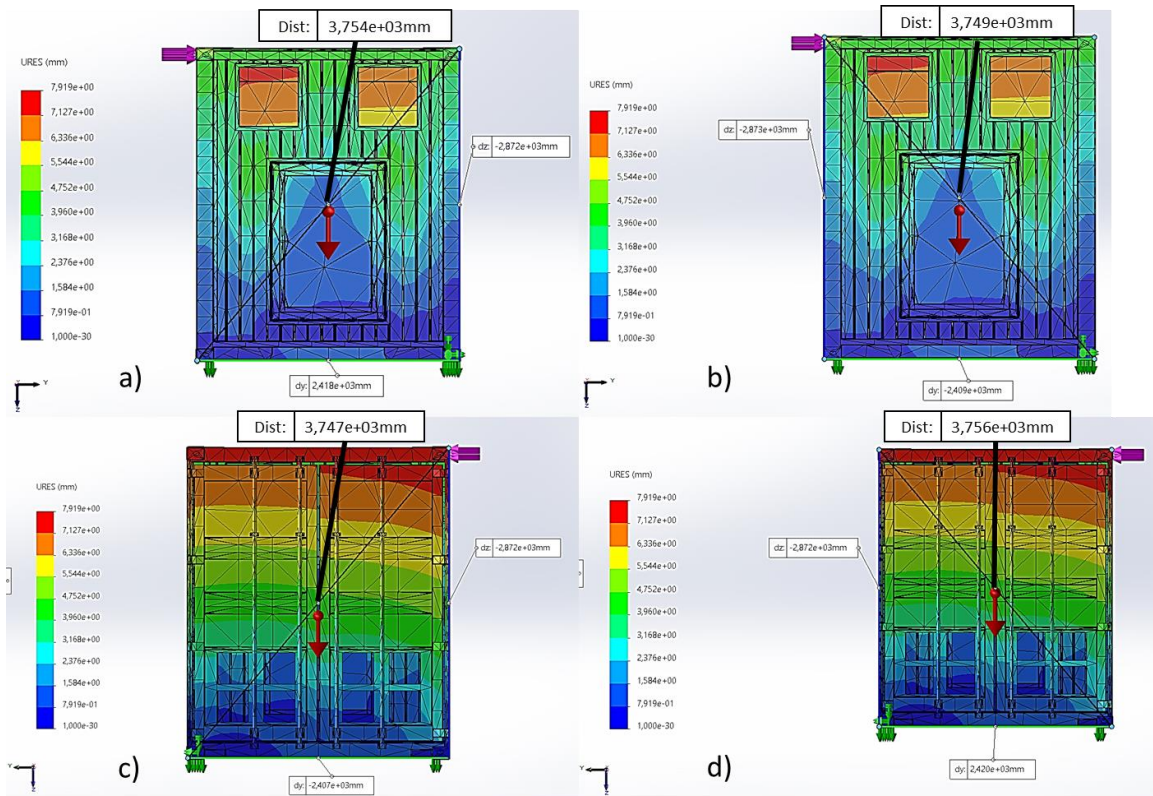


Fig. 3.32. Medición de las diagonales principales tras deformada. Prueba No.9. Parte 1. Último nivel de refinamiento. Escala de colores de 0 a valor máximo resultante registrado (7.919 mm). En figura: a), b) diagonales principales de pared frontal; c), d) diagonales principales de pared trasera.

La longitud inicial de las diagonales principales en los marcos delantero y trasero es de aproximadamente 3752 mm. La comparación entre las longitudes es establecida en la siguiente tabla:

Tabla 3.13. Comparación de longitudes de diagonales principales tras la deformación. Prueba No. 9. Parte 1.

Parámetros	Longitud original (mm)	Longitud deformada mayor (mm)	Longitud deformada menor (mm)	Sumatoria de diferencias modulares	Límite por norma
Marco frontal	3752	3754	3749	5	60
Marco trasero	3752	3756	3747	9	60

Teniéndose en cuenta la información mostrada, es deducible que el contenedor modificado es lo suficientemente rígido como para pasar la primera parte de la prueba 9 bajo los criterios dimensionales de la ISO 1496. Se destaca además, en lo que respecta al cuadro eléctrico integrado, que los desplazamientos máximos en zonas aledañas al mismo se encuentran entre 3 y 4 mm, lo cual no representa un valor significativo, por lo que se puede alegar que las cargas de trasiego aplicadas no perjudicarán a este dispositivo durante la transportación.

3.8.3. Prueba No. 9. Parte 2: fuerzas aplicadas desde el contenedor. Análisis de resultados.

Para el desarrollo de la segunda parte de la simulación se toma el mismo nivel de refinamiento alcanzado en el apartado anterior. Esta vez, el empotramiento que simula la restricción de movimiento lateral del contenedor es dispuesto en los mismos colisos laterales de los isocorners pero en la cara opuesta, dado que el sentido de la carga aplicada es contrario al impuesto en la prueba anterior. En las siguientes imágenes se exponen los resultados de tensiones equivalentes y desplazamientos:

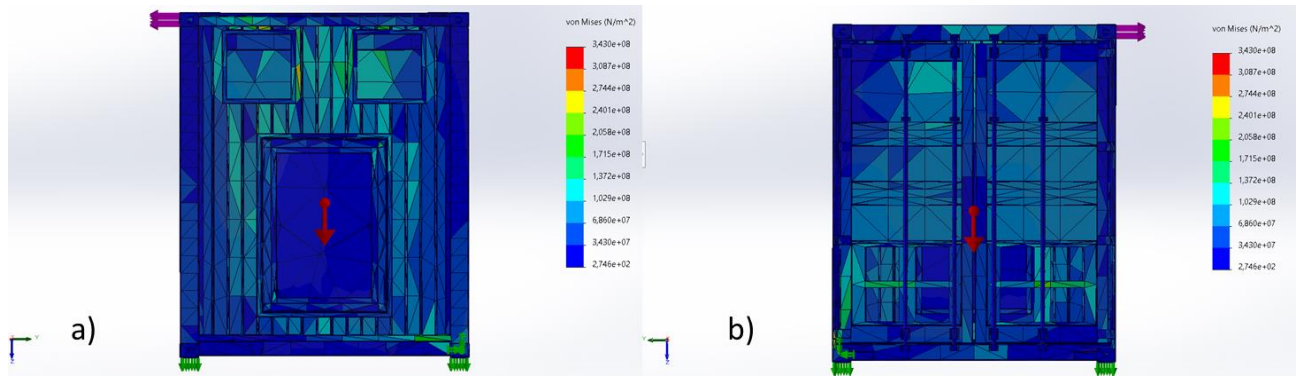


Fig. 3.33. Representación de tensiones equivalentes de von Mises. Prueba No. 9. Parte 2. Último nivel de refinamiento. Escala de colores de $2.746 \cdot 10^2 \text{ N/m}^2$ a $3,43 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ (343 MPa). En figura: a) vista frontal; b) vista posterior. Escala de deformación 1:1.

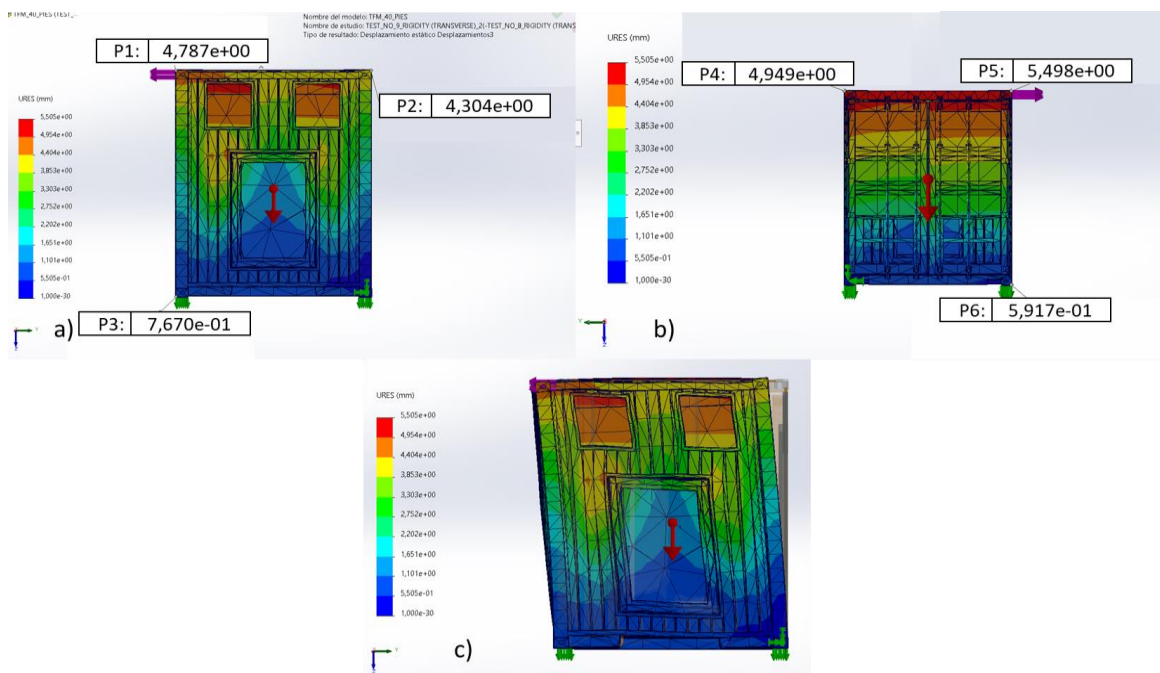


Fig. 3.34. Representación de desplazamientos resultantes. Prueba No. 9. Parte 2. Último nivel de refinamiento. Escala de colores de 0 a valor máximo resultante registrado (5.505 mm). Ubicación de puntos de lectura. En figura: a) vista frontal (deformación en escala 1:1); b) vista posterior (deformación en escala 1:1); c) deformada, vista frontal (deformación en escala 50:1).

Aun con el cambio de sentido de las cargas aplicadas, se aprecia en la figura 3.33 que las tensiones resultantes se encuentran muy por debajo del límite elástico de los materiales, a excepción, como en la simulación anterior, de las zonas menos importantes aledañas a los marcos de los extractores. En las siguientes figuras es mostrada la medición de las diagonales principales de los marcos estudiados tras la deformación:

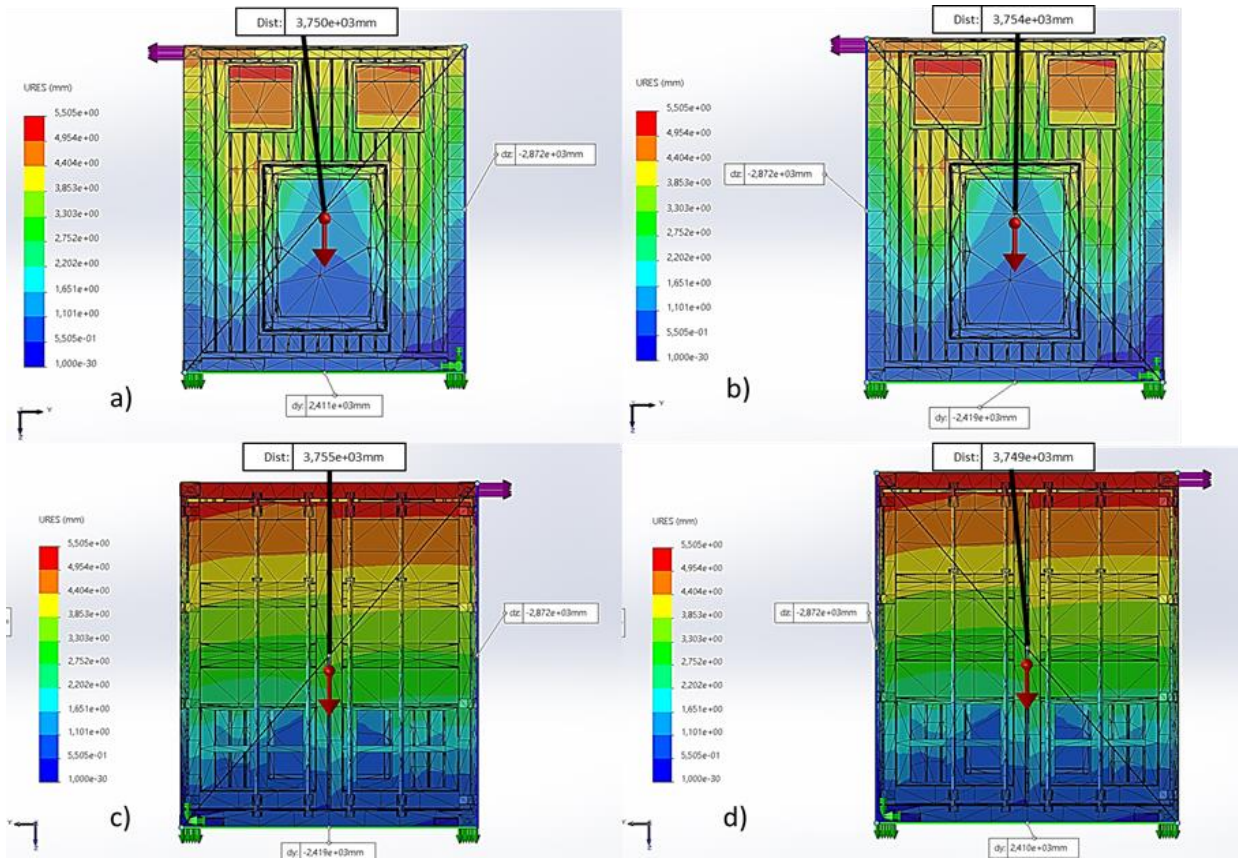


Fig. 3.35. Medición de las diagonales principales tras deformada. Prueba No.9. Parte 2. Último nivel de refinamiento. Escala de colores de 0 a valor máximo resultante registrado (5.505 mm). En figura: a), b) diagonales principales de pared frontal; c), d) diagonales principales de pared trasera.

Tabla 3.14. Comparación de longitudes de diagonales principales tras la deformación. Prueba No. 9. Parte 2.

Parámetros	Longitud original (mm)	Longitud deformada mayor (mm)	Longitud deformada menor (mm)	Sumatoria de diferencias modulares	Límite por norma
Marco frontal	3752	3754	3750	4	60
Marco trasero	3752	3755	3749	6	60

Con los resultados expuestos puede apreciarse que incluso con las modificaciones sufridas el contenedor es lo suficientemente rígido como para soportar las cargas de trasiego impuestas, bajo los criterios dimensionales ya argumentados. Si se establece una comparación entre la información mostrada en las tablas 3.12 y 3.13, puede deducirse además que bajo los dos sentidos de aplicación de las cargas la pared frontal se muestra más rígida que la trasera. La pared trasera contiene los portones del contenedor, los cuales ocupan la mayor parte de su espacio y están unidos al marco a través de bisagras y pinzas de bloqueo de las barras, los cuales le permiten cierta flexibilidad. En comparación, en el marco frontal la pared, aun tras los cortes, continúa ocupando la mayor parte del espacio y se encuentra soldada a perfiles de refuerzo que conforman los marcos de los extractores y cuadro eléctrico, lo que hace al conjunto más rígido.

3.8.4. Prueba No. 9. Resumen de conclusiones parciales.

Tras el análisis desarrollado, se puede concluir con respecto al comportamiento del contenedor ante las condiciones de la prueba 9:

- La estructura modificada resiste las condiciones de carga dadas en la prueba de rigidez transversal.
- No se verá afectada la integridad del cuadro eléctrico por los efectos de las cargas de trasiego durante la transportación.
- La sumatoria de los cambios en las longitudes de las diagonales principales de los marcos frontal y trasero del contenedor, bajo la aplicación de las cargas, no superan el límite establecido de 60 mm.
- El contenedor modificado, bajo las condiciones de carga de la prueba 9, cumple con los requerimientos dimensionales expuestos en el apartado 1.4.

3.9. Prueba No. 10. Rigidez longitudinal.

Análogo a la prueba anterior, se desarrolla en este apartado la simulación del ensayo de rigidez longitudinal, destinado a estudiar la rigidez del contenedor bajo la acción de las fuerzas de trasiego en la dirección longitudinal.

3.9.1. Preprocesado.

La simulación de la prueba es preparada del mismo modo que en el apartado anterior, solo que esta vez el objeto de estudio son las caras laterales del contenedor. La estructura en condición de tara se dispone con apoyos simples en las caras inferiores de los isocorners del suelo y se aplica un empotramiento en una cara de los colisos de los isocorners inferiores (simulando el contacto con el anclaje) diagonalmente opuestos a aquellos donde es aplicada la carga y en el mismo marco (lo que da lugar a una restricción longitudinal). La carga se impone en las caras exteriores de los isocorners del techo diagonalmente opuestos a los restringidos longitudinalmente en el suelo, en dirección paralela al plano del suelo y a los planos de las caras laterales, primero hacia el contenedor y luego en sentido contrario (donde se cambia a su vez la restricción longitudinal dada, siempre opuesta a la dirección de la fuerza). En este ensayo las cargas aplicadas por isocorner tienen un valor de 75 kN (ver apartado 1.4).

La prueba de rigidez longitudinal debe ser realizada en ambas caras laterales del contenedor, así como a ambos lados de una misma cara si esta no es simétrica con respecto a su eje central [10], tal como sucede en el presente caso. Sin embargo, teniéndose en cuenta que los cambios realizados a la pared lateral izquierda original del contenedor solo consisten en un pequeño corte y soldadura de un marco metálico, y que los mayores cambios fueron realizados en la pared derecha, en la que fueron ejecutados cortes de dimensiones considerables y soldados una mayor cantidad de marcos, para los propósitos del trabajo la simulación solo es realizada sobre la pared derecha.

A diferencia de la prueba anterior en la que fue incluido el cuerpo del cuadro eléctrico en la simulación, en esta prueba no se incluyen en el modelo los paneles de explosión y las puertas peatonales. Los mencionados paneles consisten en una delgada chapa metálica diseñada para ceder al recibir determinada carga interna producto de la expansión de los gases ante una explosión, por lo que no aporta valor a la rigidez del contenedor. Las puertas peatonales, en cambio, como elemento son lo suficientemente rígidas, pero están unidas al contenedor mediante bisagras y un cierre con pasador; dado que existe la posibilidad de que alguno de estos elementos falle o que algún operario no cierre correctamente las puertas, estas no pueden ser incluidas en el análisis.

3.9.2. Análisis de resultados.

Para el mallado de la estructura se ha empleado el mallador basado en la curvatura de combinado, con tamaños de elemento iniciales entre 300 y 900 mm. Como las tensiones resultantes se encuentran muy por debajo del límite elástico de los materiales (ver figura 3.36), y teniéndose en cuenta que el propósito principal del ensayo es comprobar la rigidez, se decidió realizar el análisis de convergencia con basamento en los desplazamientos. En las siguientes tabla e imágenes se exponen los resultados de la simulación sobre la pared derecha cuando la fuerza es aplicada sobre el isocorner de la pared frontal en sentido hacia el contenedor:

Tabla 3.15. Análisis de convergencia de desplazamientos resultantes. Prueba No. 10. Pared lateral derecha. Fuerza aplicada hacia el contenedor en cara frontal.

Convergencia de desplazamientos resultantes		
Nivel de refinamiento	N0	N1
Tamaño de elemento mínimo (mm)	300	150
Tamaño de elemento máximo (mm)	900	450
Número de elementos	203200	209844
Reducción de tamaño	1	1/2
Tiempo de solución (min:seg)	2:06	2:36
Puntos de lectura	Desplazamientos resultantes (mm)	
P1	2.845	2.872
P2	0.4019	0.4096
P3	2.082	2.093
Puntos de lectura	Diferencia relativa (%)	
P1	-	0.95
P2	-	1.92
P3	-	0.53

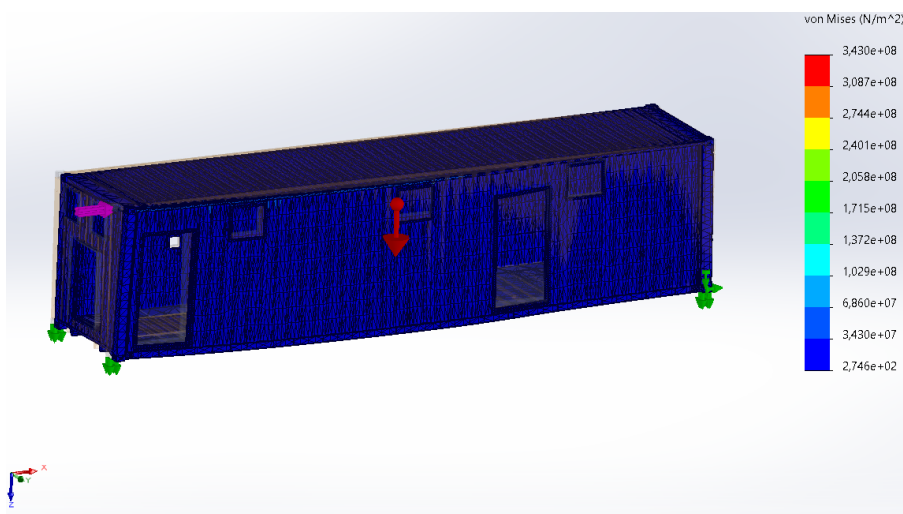


Fig. 3.36. Representación de tensiones equivalentes de von Mises y deformada del contenedor. Prueba No. 10. Fuerza aplicada hacia el contenedor en cara frontal. Último nivel de refinamiento. Escala de colores de $2.746 \cdot 10^2$ N/m² a $3.43 \cdot 10^8$ N/m² (343 MPa). Escala de deformación 100:1.

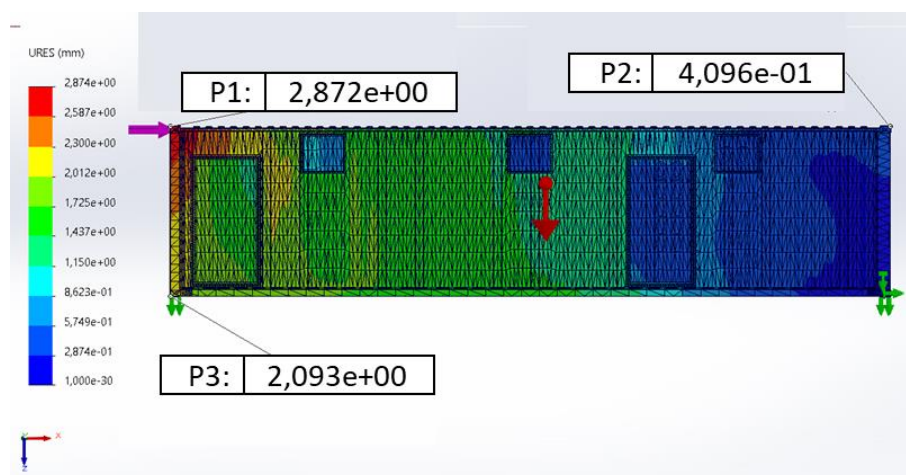


Fig. 3.37. Representación de desplazamientos resultantes. Prueba No. 10. Fuerza aplicada hacia el contenedor en cara frontal. Último nivel de refinamiento. Escala de colores de 0 a valor máximo resultante registrado (2.874 mm). Ubicación de puntos de lectura. Escala de deformación 1:1.

Como se puede apreciar, con las condiciones dadas se producen desplazamientos muy pequeños cuando la carga es aplicada desde el lado de la pared frontal. Siguiéndose el mismo procedimiento, y con el mismo nivel de refinamiento alcanzado, son realizadas las simulaciones con la fuerza aplicada desde la pared frontal en sentido contrario y cuando esta es impuesta desde la pared trasera, primero hacia el contenedor y luego desde este. Todos los resultados de las pruebas pueden observarse en detalle en el Anexo D.

En la siguiente tabla se recoge la comparación entre las longitudes de las diagonales deformadas en cada simulación con las dimensiones originales del modelo del contenedor, en orden de analizarse si la suma de los cambios en las longitudes cumple con los límites normados en la ISO 1496:

Tabla 3.16. Comparación de longitudes de diagonales principales tras la deformación. Prueba No. 10.

Parámetros	Longitud original (mm)	Longitud deformada mayor (mm)	Longitud deformada menor (mm)	Sumatoria de diferencias modulares	Límite por norma
Marco frontal. Fuerza hacia el contenedor	12502	12502	12501	1	25
Marco frontal. Fuerza desde el contenedor	12502	12504	12503	3	25
Marco trasero. Fuerza hacia el contenedor	12502	12502	12500	2	25
Marco trasero. Fuerza desde el contenedor	12502	12504	12503	3	25

Como se puede apreciar, para todos los escenarios de carga simulados el contenedor modificado cumple con los límites establecidos en la norma.

3.9.3. Prueba No. 10. Resumen de conclusiones parciales.

Las conclusiones parciales referidas a la simulación de la prueba 10 son:

- La estructura modificada resiste las condiciones de carga dadas en la prueba de rigidez longitudinal.

- Los desplazamientos resultantes son muy pequeños en todos los componentes de la pared lateral derecha, por lo que la integridad y funcionamiento de las puertas peatonales y paneles de explosión instalados no se verá afectada.
- La sumatoria de los cambios en las longitudes de las diagonales principales de los marcos laterales, bajo la aplicación de las cargas especificadas, no superan el límite establecido de 25 mm.
- El contenedor modificado, bajo las condiciones de carga de la prueba 10, cumple con los requerimientos dimensionales expuestos en el apartado 1.4.

4 Conclusiones

Con el desarrollo de la presente investigación se ha logrado adaptar las condiciones de las pruebas físicas referidas en el Convenio sobre la Seguridad de Contenedores y la norma ISO 1496 al entorno de simulación de Solidworks, y desarrollar las mismas basadas en las características del modelo de los 8 contenedores modificados del proyecto M. Seguidamente, se presentan las conclusiones finales del estudio:

1. Las modificaciones realizadas a los contenedores no alteran de forma perjudicial la deformada de su estructura ante los ensayos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9 y 10 referidos en la norma ISO 1496 y el CSC.
2. En condición de apilamiento, los contenedores modificados podrán resistir el peso de 8 contenedores superpuestos, de hasta 26670 kg de masa bruta máxima cada uno, o 7 contenedores de hasta 30480 kg, en las celdas guías de barco, con posibles zonas de plastificación localizada que no afectarán su manipulación, apertura de puertas o incumplirán los requerimientos dimensionales normados en la ISO 1496 y el CSC; no obstante, se recomienda que no les sea impuesta la carga máxima.
3. En cualquiera de los modos de izaje admitidos por las regulaciones (izaje vertical por los cuatro isocorners superiores o en ángulo por los isocorners inferiores) se notará una pequeña inclinación del contenedor hacia su lado derecho. Esta inclinación no será significativa durante la realización de estas tareas.
4. El diseño concebido del marco para filtros no cumple con los requerimientos de seguridad normados en la ISO 1496 y el CSC. Se sugiere la inclusión de unas rejillas metálicas soldadas por su lado exterior o que se modifique su diseño para que pueda ser atornillada al mismo una chapa de acero inoxidable de seguridad para la transportación.
5. A excepción del mencionado marco para filtros, bajo las condiciones de carga dadas en las pruebas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9 y 10, no se ven afectados los nuevos componentes integrados a la estructura del contenedor.
6. Los contenedores modificados son lo suficientemente rígidos como para soportar las cargas de trasiego dadas por los movimientos del barco, bajo los requerimientos dimensionales expuestos en la ISO 1496 y el CSC.
7. A excepción del punto 4, tras la finalización de las pruebas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9 y 10 el modelo de contenedor modificado no muestra deformación permanente que inutilice su función de transporte de carga y los requerimientos dimensionales referidos a la manipulación, seguridad e intercambio son satisfechos.

Bibliografía

- [1] Cargo Flores. (2020, 10-08-24). *Containers: tipos, medidas y usos*. Disponible: <https://www.cargoflores.com/containers/>
- [2] NayaTrans Logística. (2022, 10-08-24). *Contenedores de mercancías: descubre 9 tipos y su transporte*. Disponible: <https://nayatrans.com/contenedores-de-transporte/>
- [3] International Organization for Standardization. *Series 1 freight containers - Classification, dimensions and ratings.*, ISO 668:2020[E], 2020.
- [4] Organización Marítima Internacional. (2021, 11-08-24). *Convenio internacional sobre la seguridad de los contenedores (CSC)*. Disponible: [https://www.imo.org/es/About/Conventions/Paginas/International-Convention-for-Safe-Containers-\(CSC\).aspx](https://www.imo.org/es/About/Conventions/Paginas/International-Convention-for-Safe-Containers-(CSC).aspx)
- [5] TITAN, *Technical Specification for 40' x 8' x 9'6" ISO Type Dry Cargo Steel Container*. 2007.
- [6] Total Materia. [En línea]. Disponible: <https://portal.totalmateria.com/>
- [7] Ju Feng Special Steel. [En línea]. Disponible: <https://www.jfs-steel.com/>
- [8] The World Material. [En línea]. Disponible: <https://www.theworldmaterial.com/>
- [9] Ministerio de Fomento, *Documento Básico SE-M: Seguridad estructural. Madera*. España, 2019.
- [10] International Organization for Standardization. *Series 1 freight containers - Specification and testing. Part 1: General cargo containers for general purposes*, ISO 1496-1:2013[E], 2013.
- [11] J. A. Alfonso. Moreno, "Análisis del efecto de la tensión fuera del plano en la conformabilidad de chapa metálica," Proyecto de Fin de Carrera, Departamento de Ingeniería Mecánica y Fabricación. Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, 2014.
- [12] M. Vázquez y E. López, *El método de los elementos finitos aplicado al análisis estructural*. Madrid, España, 2001.
- [13] Goengineer. (2024, 12-08-2024). *Simulation*. Disponible: <https://www.goengineer.com/solidworks/simulation/solidworks-simulation>
- [14] J. M. Jiménez. (2018, 12-08-2024). *Introducción a Solidworks Simulation y análisis de elemento finito*. Disponible: <https://ditlag.wordpress.com/2018/03/05/introduccion-a-solidworks-simulation-y-analisis-de-elemento-finito/>
- [15] Dassault Systemes. (2024, 1-10-2024). *SOLIDWORKS Web Help*. Disponible: <https://help.solidworks.com/>
- [16] Hawk Ridge Systems. (2013, 01-10-2024). *Curvature Based Mesh Advantages in Solidworks Simulation*. Disponible: <https://hawkridgesys.com/blog/curvature-based-mesh-advantages>
- [17] Dassault Systèmes, "Solidworks Material Database," ed, 2023.

Anexos

Anexo A: Designaciones de contenedores de carga seca.

Tabla A.1: Dimensiones externas, tolerancias permisibles y ratios para contenedores de carga seca de serie 1 [3].

Freight container designation	Length, <i>L</i>				Width, <i>W</i>				Height, <i>H</i>				Rating, <i>R</i> ^a (gross mass)	
	mm	tol.	ft and in	tol.	mm	tol.	ft	tol.	mm	tol.	ft and in	tol.	kg	lb
1EEE	13 716	0 -10	45'	0 -3/8	2 438	0 -5	8	0 -3/16	2 896 ^b	0 -5	9' 6"	0 -3/16	30 480 ^a	67 200 ^a
1EE									2 591 ^b	0 -5	8' 6"	0 -3/16	30 480	67 200 ^a
1AAA	12 192	0 -10	40'	0 -3/8	2 438	0 -5	8	0 -3/16	2 896 ^b	0 -5	9' 6"	0 -3/16	30 480 ^a	67 200 ^a
1AA									2 591 ^b	0 -5	8' 6"	0 -3/16		
1A									2 438	0 -5	8'	0 -3/16		
1AX									<2 438		<8'			
1BBB	9 125	0 -10	29' 11 1/4"		2 438	0 -5	8	0 -3/16	2 896 ^b	0 -5	9' 6"	0 -3/16	30 480 ^a	67 200 ^a
1BB									2 591 ^b	0 -5	8' 6"	0 -3/16		
1B									2 438	0 -5	8'	0 -3/16		
1BX									<2 438		<8'			
1CCC	6 058	0 -6	19' 10 1/2"	0 -1/4	2 438	0 -5	8	0 -3/16	2 896 ^b	0 -5	9' 6"	0 -3/16	30 480 ^a	67 200 ^a
1CC									2 591 ^b	0 -5	8' 6"	0 -3/16		
1C									2 438	0 -5	8'	0 -3/16		
1CX									<2 438		<8'			
1D	2 991	0 -6	9' 9 3/4"	0 -3/16	2 438	0 -5	8	0 -3/16	2 438	0 -5	8'	0 -3/16	10 160	22 400
1DX									<2 438		<8'			

^a Higher values are permissible under certain conditions. See 5.2.2.

^b Legal limitations to the overall height of vehicle and load can exist in certain countries (for example for rail/road service).

Anexo B: Diagnóstico de zona activa de tensión. Prueba No. 1.

La herramienta de Diagnóstico zona activa de tensión detecta las regiones del modelo donde los gradientes de tensión entre elementos adyacentes son irregulares. En ciertos casos, estos gradientes de tensión alta irregulares se pueden atribuir a las singularidades de tensión [15]. Para ser determinadas, el software pide un valor de sensibilidad del análisis entre 1 y 100 y ejecuta sucesivos refinamientos (predefinidos por el usuario) en las aristas afectadas. Según el valor de sensibilidad es dispuesto más cercano a 100, más abarcador es el estudio. Se destaca que lo anterior no significa que con 100 sean detectadas todas las singularidades existentes (como se verá en la escala numérica de la próxima imagen), ya que esto depende de varios factores, como lo son: el tamaño del modelo, el refinamiento de la malla y las cargas aplicadas.

La siguiente figura muestra el análisis realizado con un grado de sensibilidad de 100. Las áreas marcadas en color gris corresponden a aquellas afectadas por singularidades aledañas:

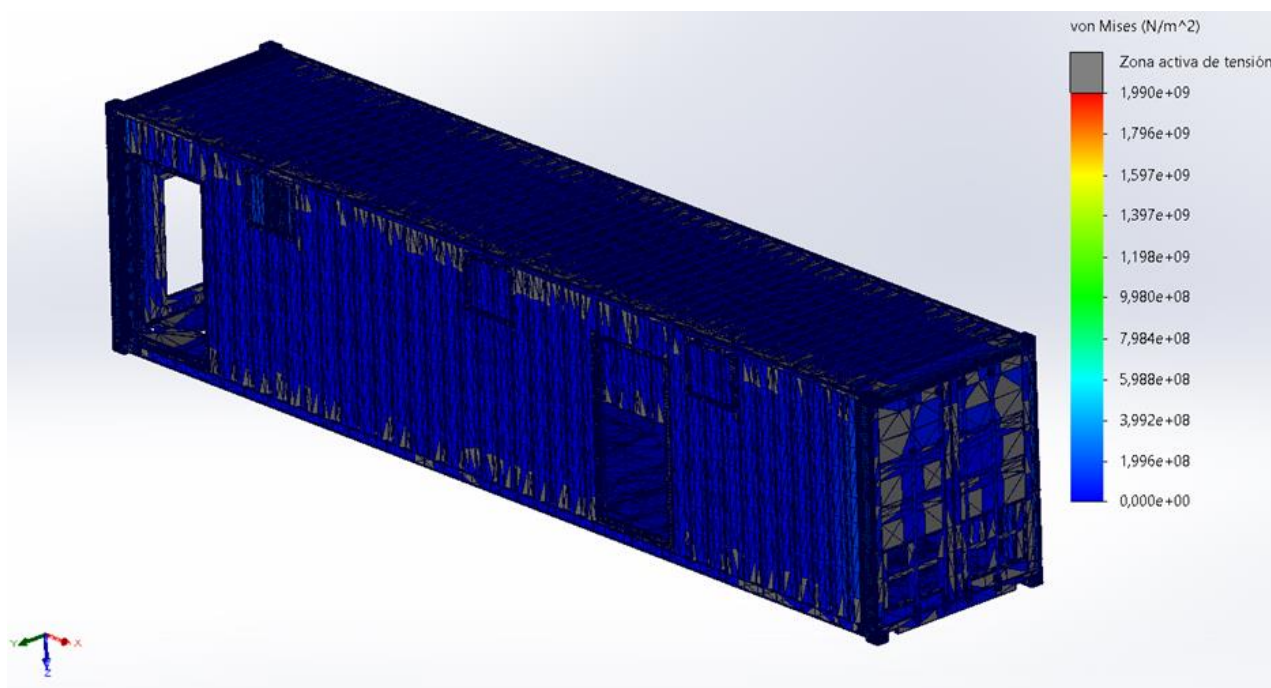


Fig. A. 1. Diagnóstico de zona activa de tensión. Prueba No. 1. Tamaños de elementos en componentes refinados entre 18.75 y 56.25 mm. Malla global con tamaños de elementos entre 300 y 900 mm.

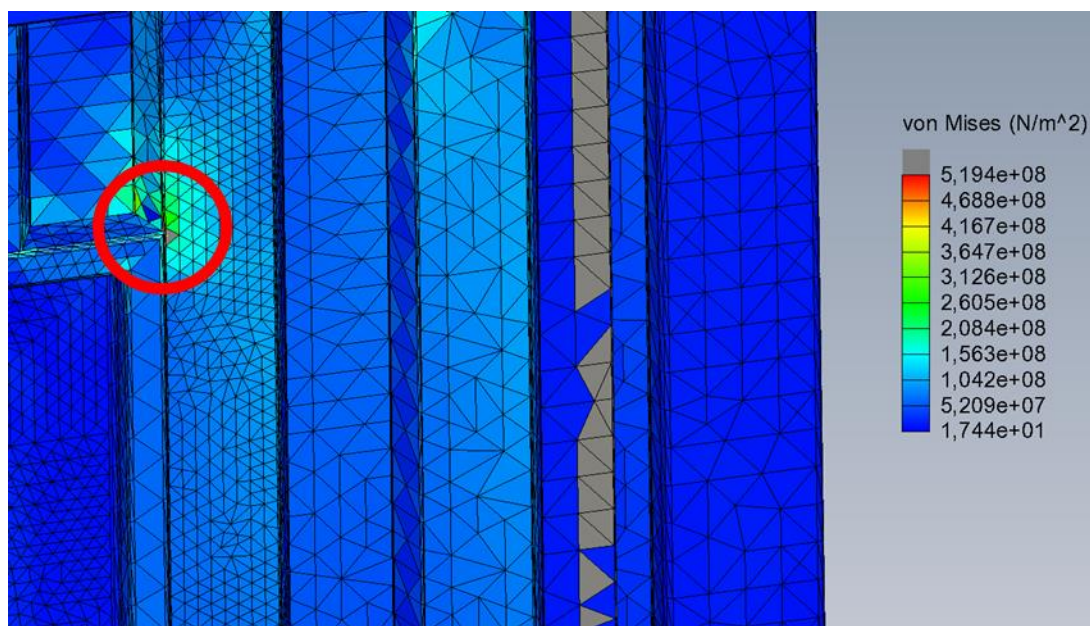
Anexo C: Diagnóstico de zona activa de tensión. Prueba No. 5. Parte 2.

Fig. A. 2. Diagnóstico de zona activa de tensión para Prueba No. 5. Parte 2. Señalización de elemento afectado por singularidad de tensión en zona de estudio.

Anexo D: Prueba No. 10. Rigidez longitudinal. Variaciones de aplicación de la carga.

En este anexo se exponen los resultados de las simulaciones de la prueba de rigidez longitudinal no incluidas en el cuerpo principal del trabajo. El mallado trabajado en estas simulaciones coincide con el último nivel de refinamiento estudiado para la prueba 10 y expuesto en la tabla 3.15.

D.1. Prueba No. 10. Fuerza aplicada en cara frontal desde el contenedor.

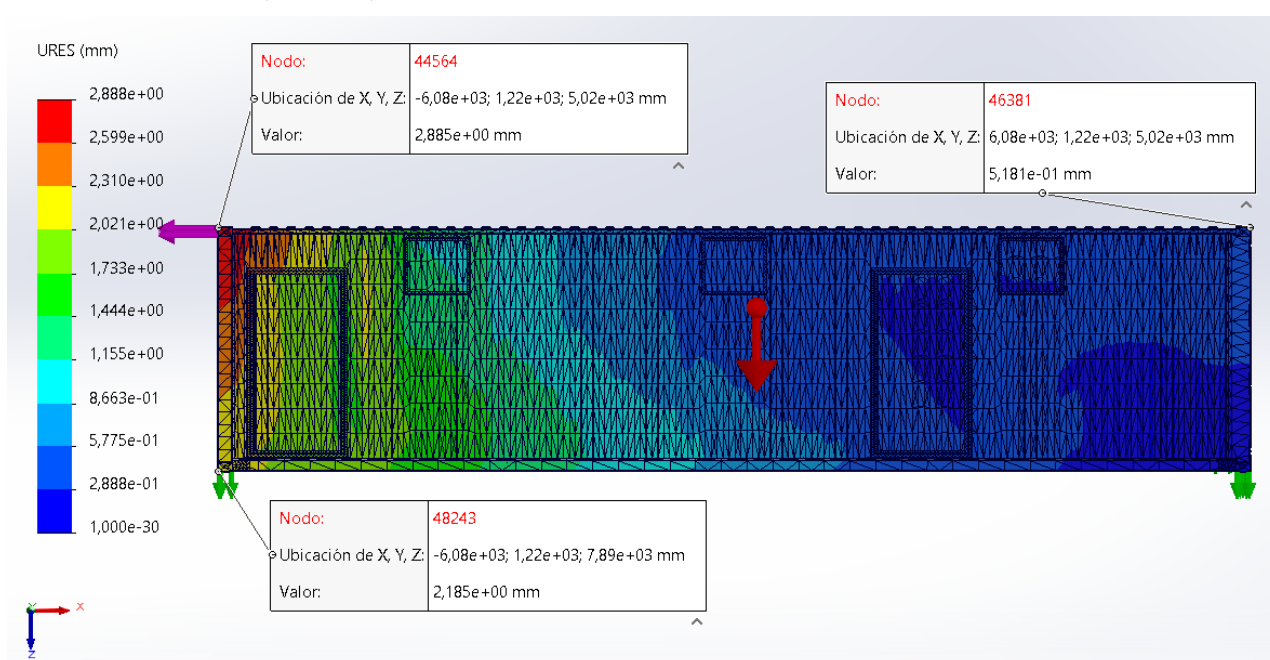
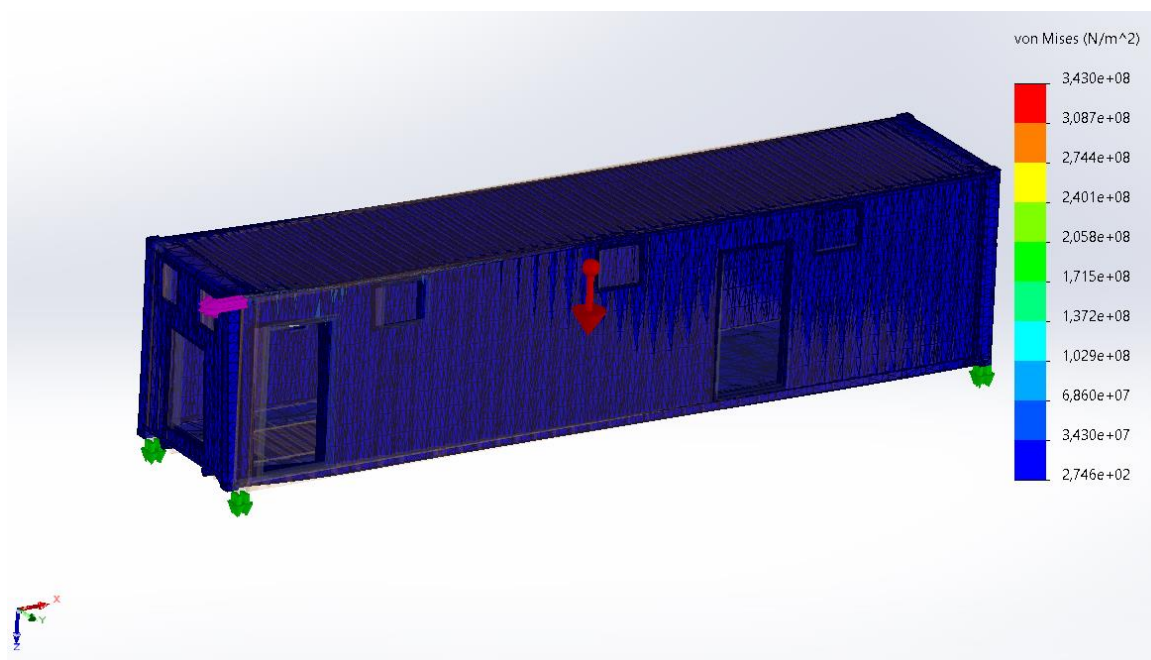


Fig. A. 4. Representación de desplazamientos resultantes. Prueba No. 10. Fuerza aplicada desde el contenedor

en cara frontal. Último nivel de refinamiento. Escala de colores de 0 a valor máximo resultante registrado (2.888 mm). Ubicación de puntos de lectura. Escala de deformación 1:1.

D.2. Prueba No. 10. Fuerza aplicada en cara posterior hacia el contenedor

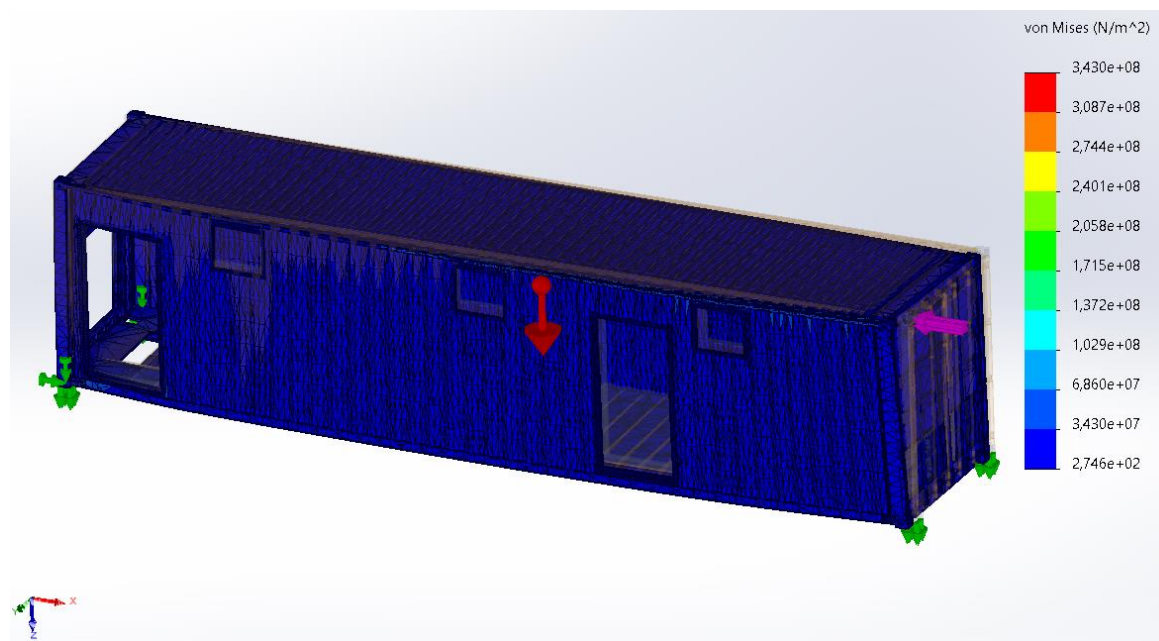


Fig. A. 5. Representación de tensiones equivalentes de von Mises y deformada del contenedor. Prueba No. 10. Fuerza aplicada hacia el contenedor en cara posterior. Último nivel de refinamiento. Escala de colores de $2.746 \cdot 10^2 \text{ N/m}^2$ a $3,43 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ (343 MPa). Escala de deformación 100:1.

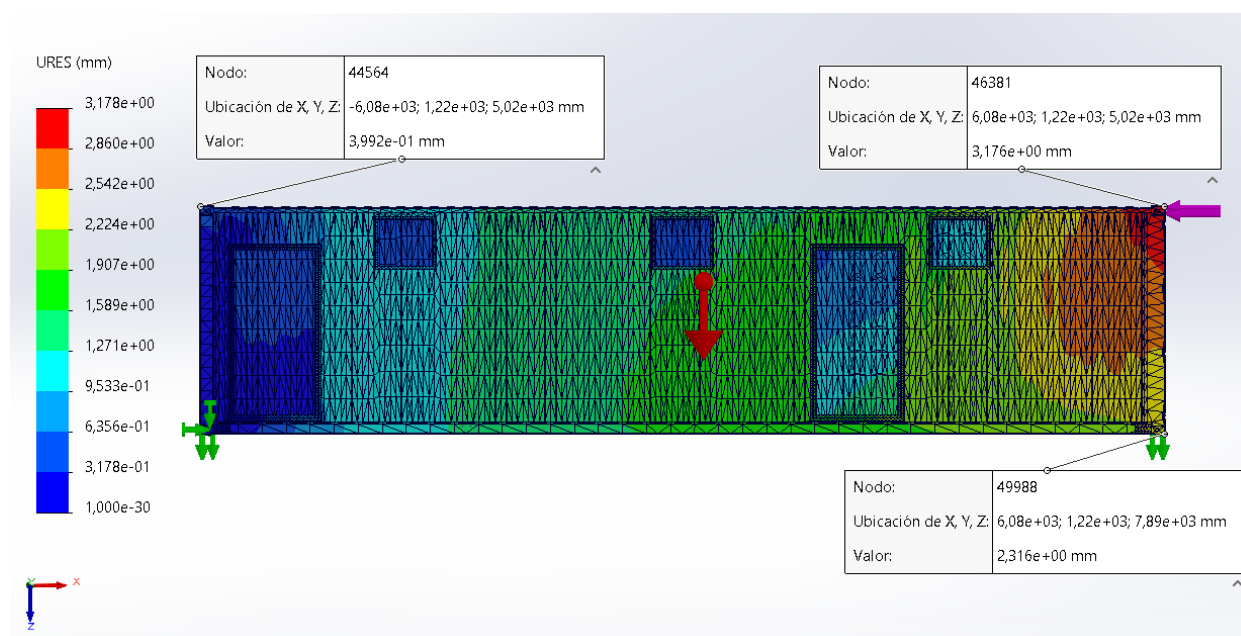


Fig. A. 6. Representación de desplazamientos resultantes. Prueba No. 10. Fuerza aplicada hacia el contenedor en cara posterior. Último nivel de refinamiento. Escala de colores de 0 a valor máximo resultante registrado (3.178 mm). Ubicación de puntos de lectura. Escala de deformación 1:1.

D.3. Prueba No. 10. Fuerza aplicada en cara posterior desde el contenedor.

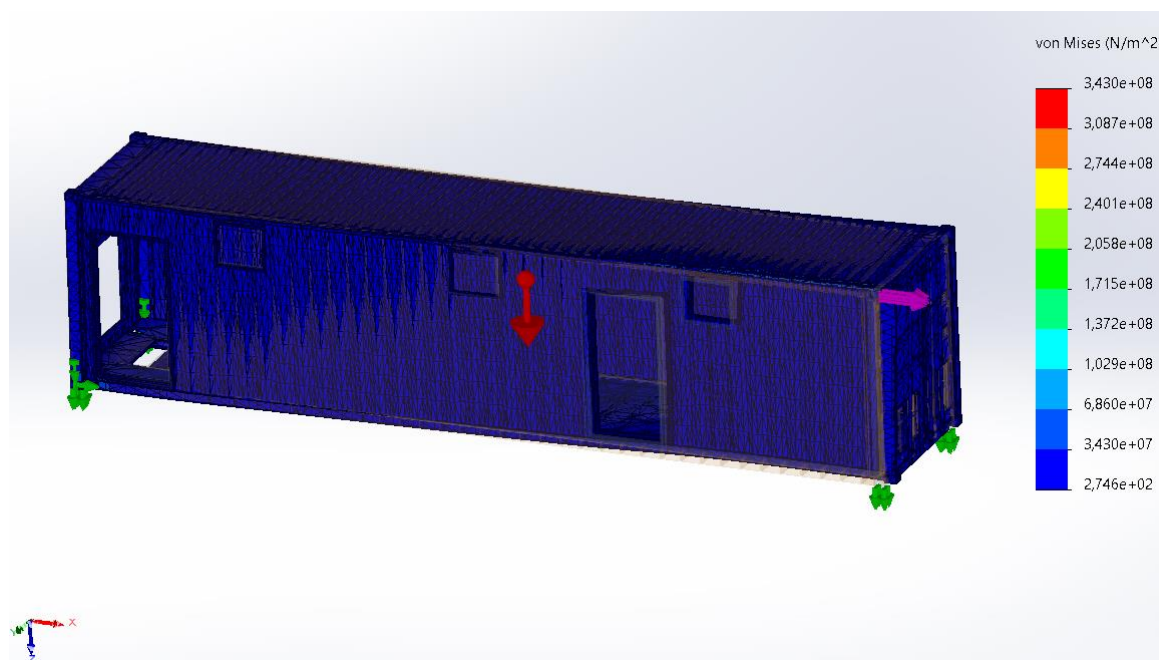


Fig. A. 7. Representación de tensiones equivalentes de von Mises y deformada del contenedor. Prueba No. 10. Fuerza aplicada desde el contenedor en cara posterior. Último nivel de refinamiento. Escala de colores de $2.746 \cdot 10^2 \text{ N/m}^2$ a $3,43 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ (343 MPa). Escala de deformación 100:1.

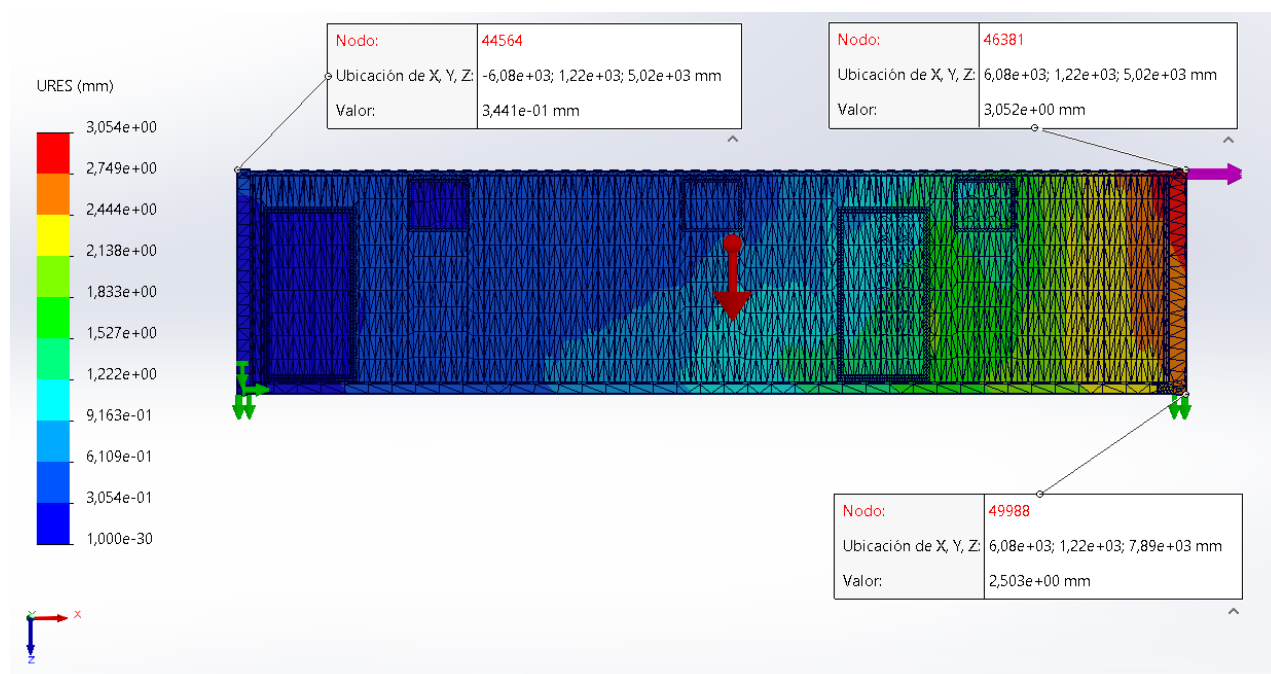


Fig. A. 8. Representación de desplazamientos resultantes. Prueba No. 10. Fuerza aplicada desde el contenedor en cara posterior. Último nivel de refinamiento. Escala de colores de 0 a valor máximo resultante registrado (3.054 mm). Ubicación de puntos de lectura. Escala de deformación 1:1.