

Análisis y diseño de estructura retráctil para usarse como aula provisional

Jorge Armando Ávila Montero¹, Servio Tulio de la Cruz Cháidez², Abraham Leonel López León²,
Jesús Eduardo Aguilera González²

¹Egresado PMIC

²PTC UACJ

Resumen

La presente documento presenta el diseño de una estructura retráctil para un aula de capacitación y servicios, tomando en cuenta los avances tecnológicos y científicos en las áreas de estructuras desplegables, acorde a las necesidades de capacitación y educación continua del contexto social en las poblaciones rurales y en aquellas donde no se cuenta con la infraestructura adecuada. Las estructuras retráctiles presentan un gran potencial para definir estructuras en el futuro; éstas se han caracterizado por ser ligeras y de fácil instalación, sus usos y desarrollo han trascendido principalmente en la aplicación militar y en la industria aeroespacial. La adaptabilidad se plantea como un concepto integral, que consiste en la generación de espacios que respondan de una manera comprometida a las exigencias sociales, ambientales y tecnológicas. Las estructuras retráctiles.

Palabras clave: Estructuras Retráctiles, Infraestructura, Aulas.

Introducción

Las estructuras retráctiles o de despliegue (*deployable structures*) es un nombre genérico para una amplia categoría de estructuras prefabricadas que pueden ser transformadas a partir de una configuración compacta cerrada, a una forma ampliada predeterminada en la que la estructura es estable y pueden soportar cargas (Gantes, 1991). Las estructuras retráctiles se han caracterizado por ser ligeras y de fácil instalación, sus usos y desarrollo han

trascendido principalmente en la aplicación militar y en la industria aeroespacial.

Las estructuras de mayor adopción de despliegue están basadas en elementos de tijera (*SLE, scissor-like element*). Sobre la base del módulo básico, varias vigas de despliegue se pueden desarrollar. Por ejemplo, en la figura 1 se muestran estructuras a base de triángulos equiláteros, cuadrados, o hexágonos normales (Chen, et al., 2002).

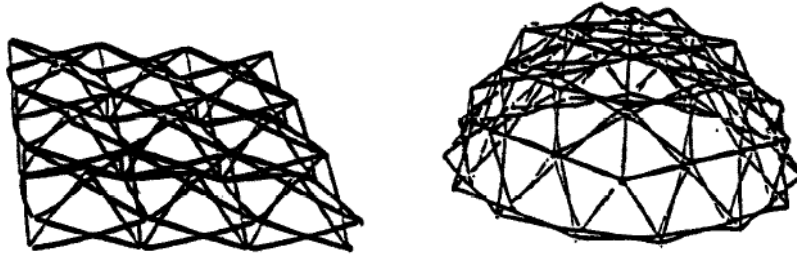


Figura 1. Estructuras de despliegue, basadas en elementos de tijera (Chen, et al, 2002)

Desde el punto de vista geométrico, la idea de este tipo de estructuras es que los pares de barras conectadas entre sí en un punto intermedio a través de una articulación giratoria les permite girar libremente alrededor de un eje perpendicular del mismo

plano, como se ilustra en la figura 2, pero retiene todos los otros grados de libertad, mientras que, al mismo tiempo, sus puntos finales están articuladas al puntos finales de los otros SLEs (Gantes, 2004).

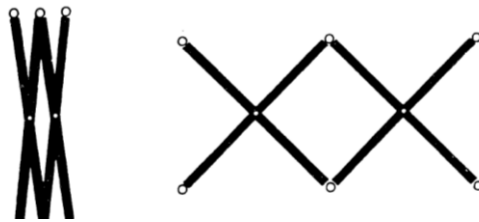


Figura.2. Configuración básica de una estructura de despliegue (Gantes, 2004)

La primera estructura desplegable fue diseñada y construida por Pérez Piñero en 1961 siendo el primero en usar los módulos de tijera, donde se articulan barras sobre un nudo. Posteriores trabajos realizados por Pellegrino y Gantes (1990), dedujeron los principios de la geometría estructural básica para la generación de sistemas espaciales a partir de los sistemas de tijeras rectas.

La adaptabilidad se plantea como un concepto integral, que consiste en la generación de espacios que respondan de una manera comprometida a las exigencias sociales, ambientales y tecnológicas. El concepto moderno de adaptabilidad busca constructivamente (Franco y Torres, 2006):

1. Estructuras ligeras, de fácil transporte y montaje
2. Eficiencia, minimalización y utilización eficiente de recursos y energía
3. Modulación e industrialización; sistematización y fácil producción de componentes

Las estructuras retráctiles presentan un gran potencial para definir estructuras en el futuro; éstas se han considerado muy prácticas y resistentes. Se piensa en términos generales que las estructuras desplegadas son uno de los métodos más eficientes en términos de instalación, transportación y funcionalidad

(Franco y Torres, 2006). Por el hecho de proporcionar un espacio rápido y fácil, pueden presentar un gran alivio económico ante la escasez de recursos para construir aulas con los sistemas constructivos tradicionales. Las estructuras desplegadas brindan un área de estudio bastante adecuada para la innovación y la creatividad del sector académico.

La demanda de una permanente educación y actualización del quehacer humano, en un contexto mundial, la competitividad hace necesario la habilitación de aulas para programas de educación, formación y capacitación, que contribuyan al desarrollo de capacidades en áreas rurales, así como también en áreas donde no se cuente con la infraestructura adecuada.

El desarrollo de estas estructuras se apoya en diversos conceptos e ideas generadas en el campo de la optimización estructural, por supuesto que la aplicación en un aula es diferente porque aquí no sólo se trata de una optimización en términos de peso y costo o cualquier otro objetivo de la función, sino de una facilidad de transporte y funcionalidad, lo cual aportaría una infraestructura móvil y adaptable al campo de la capacitación.

En el presente documento se presenta el diseño de una estructura retráctil para un aula de capacitación y servicios, tomando en cuenta los avances tecnológicos y científicos en las áreas de estructuras desplegadas, acorde a las necesidades de capacitación y educación continua del contexto social en las poblaciones rurales y en aquellas donde no se cuente con la infraestructura adecuada.

Metodología

La metodología para el diseño de las estructuras plegables es un proceso complejo. Existen multitud de parámetros que tienen que ser seleccionados, pero también tiene que considerarse la naturaleza del comportamiento estructural en las dos fases de la vida de la estructura, la compacta y la desplegada. Un diseño aceptable debe de proveer la rigidez necesaria en su fase desplegada como la flexibilidad en su fase compacta. Debido a que son dos objetivos que se contradicen uno a otro se tiene que elaborar un comportamiento balanceado.

Con base en los trabajos de Charis Gantes en 1989, quien ha realizado un estudio comparativo de las metodologías utilizadas en el pasado, el diseño geométrico debe tener la más alta prioridad, porque solamente éste puede garantizar la capacidad de despliegue de la estructura y la seguridad para ofrecer el servicio para el cual fue diseñada. Opina que no se debe dejar de considerar la capacidad de despliegue pero que este criterio no debe tomarse como prioridad. El proceso de diseño de estructuras plegables que propone es el que se muestra en la figura 3.

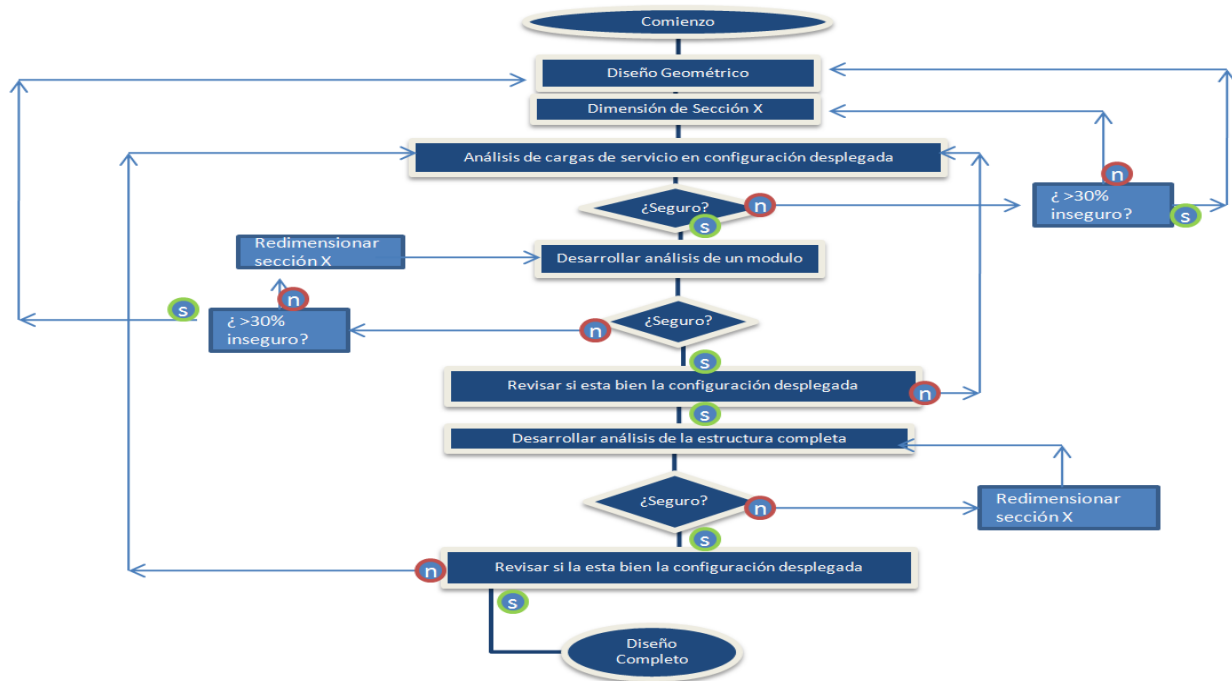


Figura 3. Metodología de diseño de una estructura plegable.

Para la realización del proyecto de aulas de capacitación se propone la utilización del modelo de Gantes debido a que comparativamente con los anteriores, muestra el mayor avance tecnológico en este campo.

Análisis cualitativo para la especificación de las necesidades

En el proyecto se propone la realización de un estudio para la satisfacción de usuarios. Esta metodología contempla el establecimiento de necesidades en las áreas de capacitación y servicios de zonas rurales y en aquellas donde no se cuente con la infraestructura adecuada. Para estos efectos se realizarán entrevistas a personas que se desempeñan en las áreas laborales desde donde se ofrecen comúnmente servicios y capacitación en dichas zonas y que serán los

usuarios potenciales de las estructuras móviles que contempla este proyecto: 1. Salud, 2. Trabajo comunitario, 3. Educación, 4. Nuevas tecnologías, 5. Agricultura, 6. Administrativas, 7. Militar.

Modelo a escala de la sección a utilizar acorde a técnicas usadas en las referencias de bibliografía.

La Construcción de modelos físicos de pequeña escala, contruidos para verificar las directrices de diseño geométrico y de ofrecer visión inicial sobre el comportamiento estructural. Este modelo se realizará acorde a técnicas usadas en las referencias de bibliografía y se elaborará en su forma desplegada cumpliendo con todos los principios geométricos, para que sea posible el despliegue desde su forma compacta. Para

este modelo se utilizarán como material la madera y pegamento.

Selección de materiales

Las pruebas permiten someter los materiales a condiciones controladas y verificar que su comportamiento es óptimo. En caso de obtener resultados desfavorables es necesario realizar los cambios pertinentes. El principal objetivo es analizar el comportamiento de los materiales bajo distintas condiciones de carga y restricciones, permitiendo visualizar los diferentes patrones de esfuerzo y evaluar su desempeño estructural con condiciones de carga superiores a las reales. En el proyecto se propone utilizar métodos experimentales para la caracterización de los materiales mediante pruebas de difracción de rayos-x, cámara de niebla salina así como las pruebas de tensión y compresión de los materiales a utilizar, y asimismo dar una visión cualitativa de la composición de los mismos.

Consideraciones de diseño

Un aspecto del diseño de las estructuras retráctiles es que tienen dos estados, cuando la estructura está completamente cerrada o totalmente desplegada, por lo tanto puede ser llamado bi-estable. Sin embargo, durante la transición entre el estado cerrado o desplegado se pueden encontrar

incompatibilidades entre las longitudes de los miembros los cuales conducen a la aparición de deformaciones de segundo orden, en otras palabras la estructura no estará estable si su configuración no se encuentra en su totalidad cerrada o a una determinada configuración de despliegue. En este capítulo se muestra el estudio estructural bajo cargas de servicio en la configuración desplegada. El proceso de diseño estructural es complicado ya que requiere de sucesivas interacciones para lograr un cierto equilibrio entre la flexibilidad deseada durante el despliegue y la rigidez necesaria en la configuración de despliegue. En este apartado, se muestra también el cálculo realizado para la obtención de su peso propio.

La idea de este tipo de estructuras de despliegue están basadas en elementos de tijera (*scissor-like element*, SLE, en inglés) como se mencionó, que son pares de barras conectados entre sí en un punto intermedio a través de un nodo que les permite girar libremente sobre un eje perpendicular a su plano, mientras que al mismo tiempo, sus puntos finales son articuladas al final de otros puntos de SLEs. El diseño geométrico final mostrado en la figura 4 se realizó de acuerdo a un conjunto de restricciones geométricas derivadas de la exigencia de la configuración final.

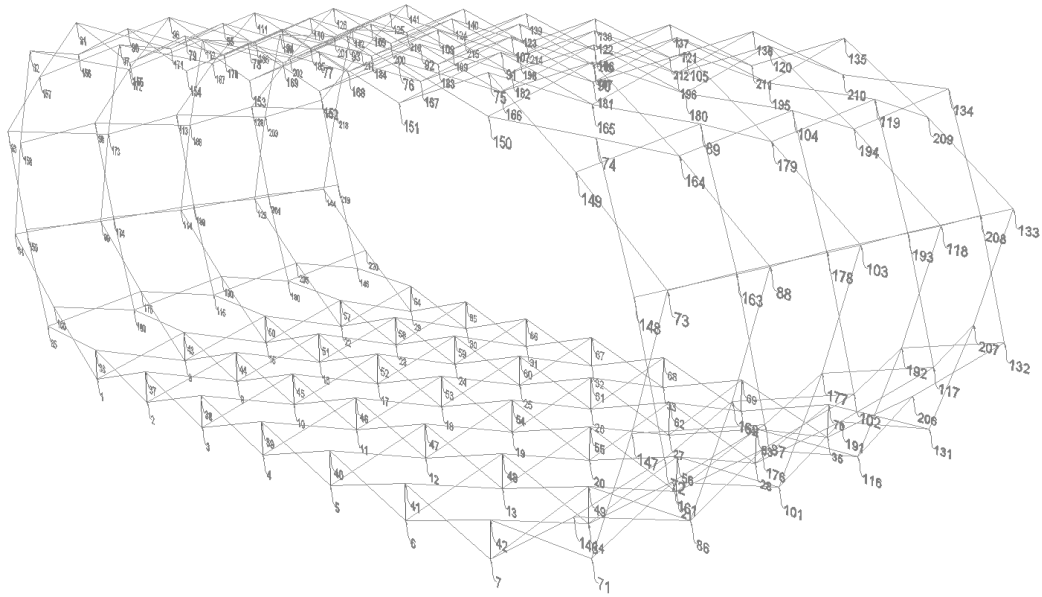


Figura 4. Modelo de estudio en configuración desplegada

Cuando no hay esfuerzos en la estructura significa que no hay deformaciones, por lo tanto, la igualdad de la longitud de las barras en la configuración desplegada es el punto de partida para el diseño geométrico. La manera en las que se resolvió esta geometría fue usando la metodología de diseño de

estructuras plegables mostrada en la figura 2 en donde cada SLE fue analizado en un plano común como se muestra en la figura 5. El requisito adicional que se tuvo que satisfacer fue a través del diseño geométrico es un estado libre de tensiones en la configuración cerrada.

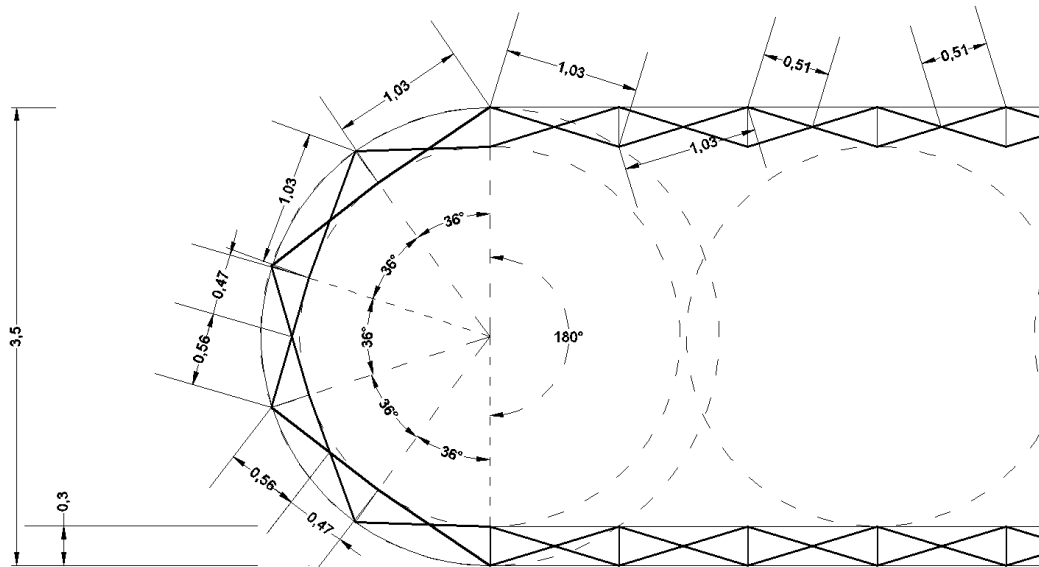


Figura 5. Alzado en configuración desplegada, dimensionamiento de SLEs, unidades en metros.

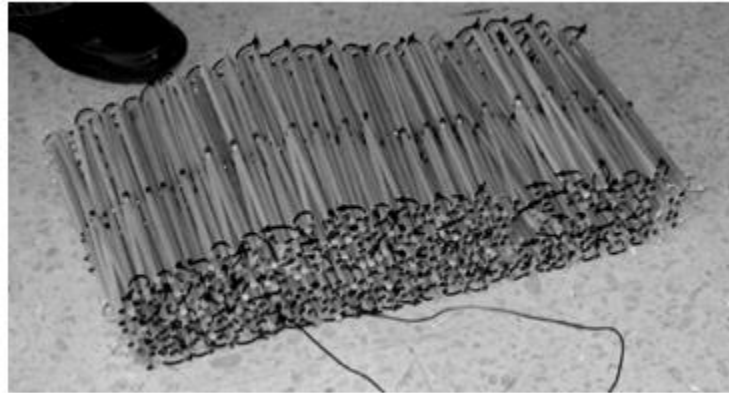
Propuesta de geometría

En la fase de análisis geométrico, se construyó un modelo a escala correspondiente a la estructura para su comprobación de despliegue. Este punto se considera importante en el proceso de una estructura retráctil ya que con la experimentación del modelo se comprueba el aspecto teórico establecido en la tesis. Se analizaron y se propusieron los materiales que mejor se adapten al funcionamiento estructural, lo que obliga, necesariamente, a

estar al tanto de las características mecánicas durante el despliegue.

La metodología de diseño ha sido verificada a través de la construcción de un modelo físico a escala que se muestra en figura 6. Este modelo se realizó con madera y con uniones de plástico, el cual cumplió con los requisitos geométricos para ejecutar el despliegue y de esta manera comprobar la plegabilidad desde su forma compacta, como se muestra en la figura 6a, hasta su forma desplegada, en la figura 6b.

(a)



(b)

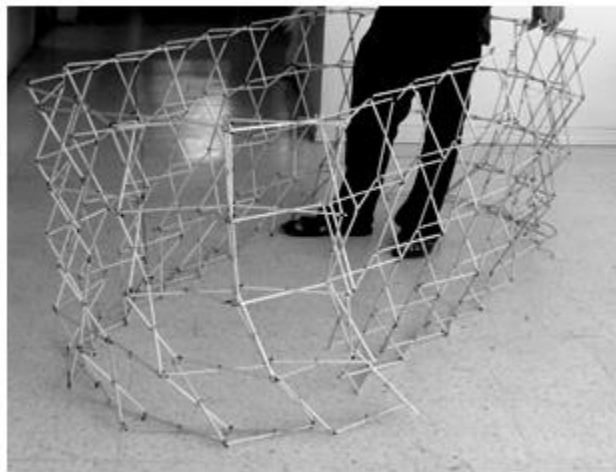


Figura 6. Modelo a escala de una estructura retráctil: a) estructura plegada, b) estructura desplegada

Análisis de Cargas

El aula retráctil fue diseñada como una estructura totalmente integrada capaz de sostener los requerimientos de cargas de diseño de acuerdo al Reglamento de Construcción del Municipio de Ciudad Juárez y debe ser capaz de soportar y mantener la estabilidad de los SLEs como de los nodos sin exceder el límite de esfuerzos y deformaciones admisibles. A continuación se muestra el cálculo realizado para la obtención de la cargas de diseño.

a) Carga muerta y viva de cubierta

Para el caso en estudio, se consideran un tipo de cubierta de lona. La definición geométrica de la cubierta fue determinada anteriormente en la figura 5; la lona de tela engomada resistentes a la intemperie tiene un peso propio de 7 kg/m^2 la cual por el área de cubierta como se muestra en la figura 4.5 es de 23.26 m^2 que proporciona un total de 162.82 kg , esta cantidad será distribuida entre los 35 nodos ubicados en esa área, dando como resultado 4.65 kg por nodo. El peso propio de la estructura que reside en los tubulares de aluminio más las conexiones en el área de cubierta que es de 1.51 kg/m^2 de igual manera por el área de cubierta que es 23.26 m^2 proporciona un total de 35.12 kg ,

esta cantidad será distribuida entre los 35 nodos ubicados en esa área como se muestra

en figura 7a, dando como resultado 1.0 kg por nodo.

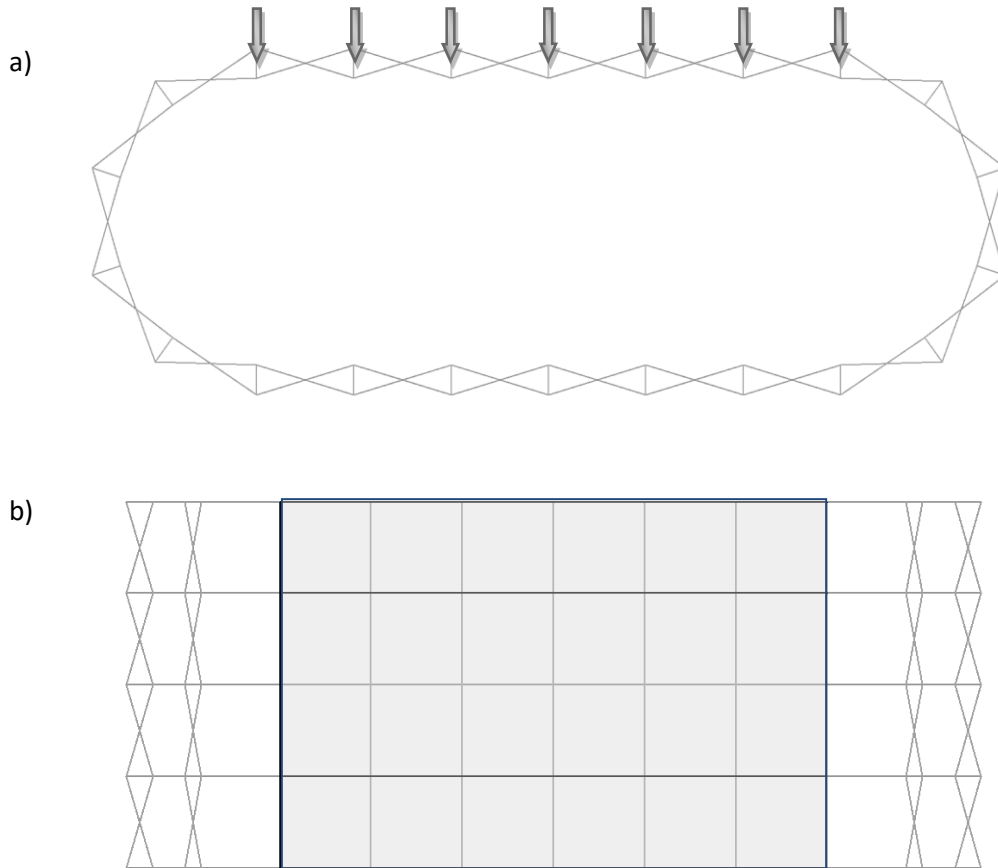


Figura 7. Cargas de cubierta de la estructura: a) alzado, b) planta

Para las instalaciones en la cubierta que considero para la iluminación, cañon proyector y un sistema de dispersión de aire a través de tela con 1.5 kg por cada nodo, el área de las instalaciones se concentra en el

área central, por lo cual son 21 nodos como se muestra en la figura 8b y a diferencia de la cargas de cubierta los nodos aquí considerados son los nodos inferiores de la cubierta como se muestra en figura 8a.

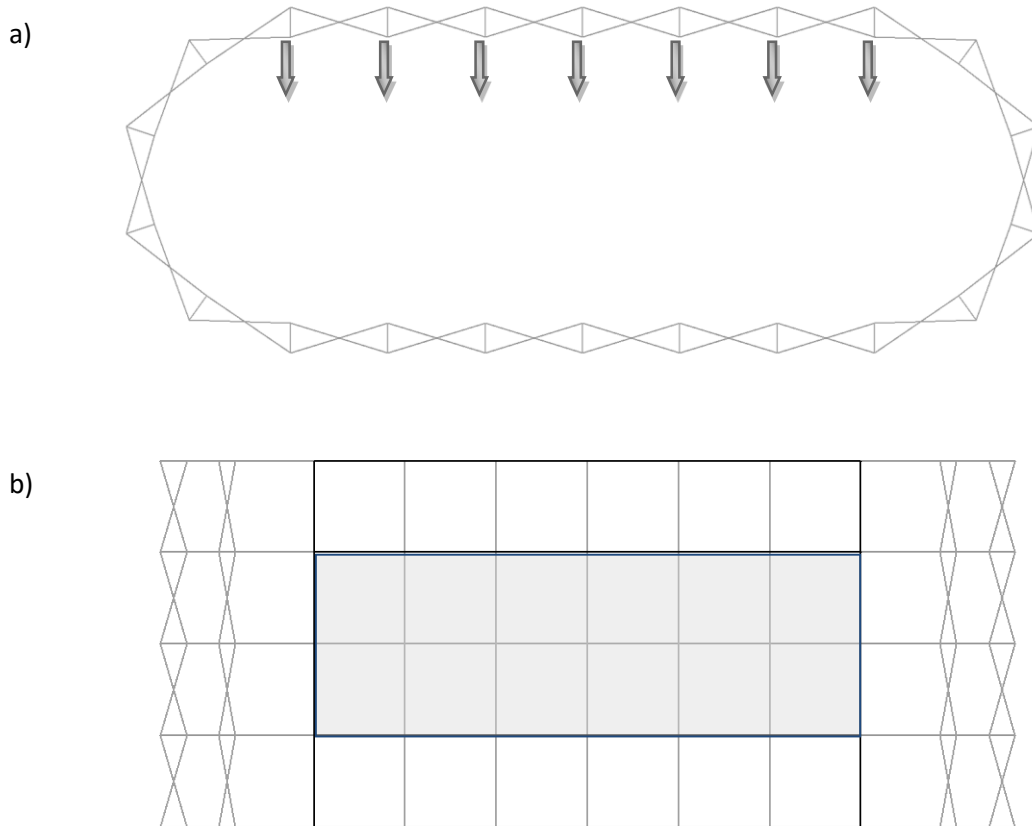


Figura 8. Cargas de instalaciones: a) alzado, b) planta

En relación a las cargas vivas de techo en el área de cubierta se usó un factor de reducción el cual está justificado por la nula actividad de servicios sobre la estructura en su etapa desplegada, el Reglamento de Construcción del Municipio de Juárez asigna 91 kg/m² de carga viva sobre cubiertas de metal ligero, el cual se afectó por un factor de reducción de 0.35, considerando la poca probabilidad de que haya cargas vivas sobre la cubierta. Por

consiguiente, se tienen 59.15 kg/m² de carga viva por un área de cubierta 23.26 m², haciendo un total de 1375.82 kg. Esta cantidad distribuida entre los 35 nodos ubicados en el área superior de la estructura da como resultado un total de la carga viva de techo de 39.30 kg por nodo. En la Tabla 1 se muestran las cargas de cubierta aplicados a los nodos.

Tabla 1. Cargas en nodos de cubierta

Carga Muerta	Carga Muerta	Carga Muerta	Carga Viva
Peso membrana	Peso propio	Instalaciones	Carga viva
4.65 kg / Nodo	1.0 kg x Nodo	1.5 kg x Nodo	39.30 kg x Nodo

Dirección - y	Dirección - y	Dirección - y	Dirección - y
Nodos	Nodos	Nodos	Nodos
75	75	165	75
76	76	166	76
77	77	167	77
78	78	168	78
79	79	169	79
80	80	170	80
81	81	171	81
90	90	180	90
91	91	181	91
92	92	182	92
93	93	183	93
94	94	184	94
95	95	185	95
96	96	186	96
105	105	195	105
106	106	196	106
107	107	197	107
108	108	198	108
109	109	199	109
110	110	200	110
111	111	201	111
120	120		120
121	121		121
122	122		122
123	123		123
124	124		124
125	125		125
126	126		126
135	135		135
136	136		136
137	137		137
138	138		138
139	139		139

140	140	140
141	141	141

b) Cargas muerta y viva de piso

El peso propio de la estructura que reside en los tubulares de aluminio más las conexiones añadiendo paneles rígidos para el piso, las áreas laterales 45.88m^2 mas el área del suelo 23.26 m^2 1.51 kg/m^2 que pesa la estructura proporciona un total de 104.4 kg , esta cantidad será distribuida entre los 35 nodos ubicados en el área inferior, dando como resultado 2.98 kg por nodo. Únicamente para las cuestiones de cálculo los paneles de suelo se escogieron de madera con acabado laminado que dio como resultado 3.19 kg por nodo permitiendo la posibilidad de usar

paneles de aglomerado para suelo técnico de sulfato de calcio.

Referido a las cargas vivas en el área de servicio del aula el Reglamento de Construcción del Municipio de Juárez del Estado de Chihuahua asigna de 200 kg/m^2 de carga viva para aulas de clase. Por consiguiente 200 kg/m^2 por el área de servicio del aula 23.26 m^2 proporciona un total de 4652 kg , esta cantidad distribuida entre los 35 nodos ubicados en esa área, como se muestra en la Fig. 9, dando como total de la carga viva en esta área de 132.91 kg por nodo.

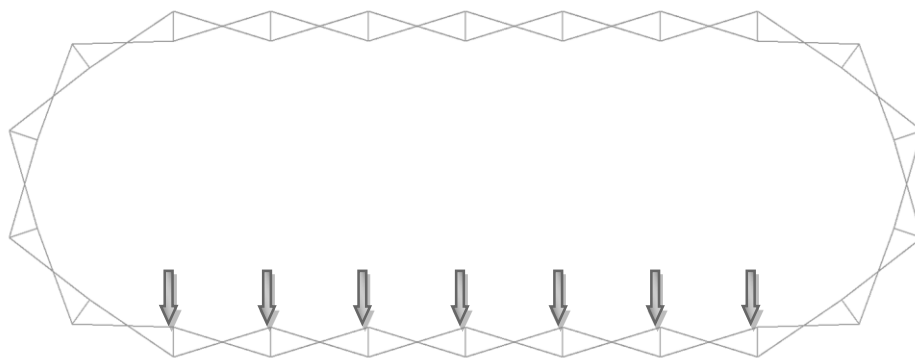


Figura 9. Alzado, cargas de piso

En la Tabla 2 se resumen las cargas vivas en cada nudo.

Tabla 2. Cargas en nodos de piso

Carga Viva	Carga Muerta	Carga Muerta
Suelo	Peso Propio	Panel

132.91 / nodo	2.98 kg / nodo	3.19 kg / nodo
Dirección - y	Dirección - y	Dirección - y
Nodos	Nodos	Nodos
36	36	36
37	37	37
38	38	38
39	39	39
40	40	40
41	41	41
42	42	42
43	43	43
44	44	44
45	45	45
46	46	46
47	47	47
48	48	48
49	49	49
50	50	50
51	51	51
52	52	52
53	53	53
54	54	54
55	55	55
56	56	56
57	57	57
58	58	58
59	59	59
60	60	60
61	61	61
62	62	62
63	63	63
64	64	64
65	65	65
66	66	66
67	67	67

68	68	68
69	69	69
70	70	70

c) Cargas de viento

En relación al estudio de las cargas de viento se determinaron las presiones internas y externas por medio de coeficientes para obtener la carga crítica. La dirección del viento considerada en el análisis se muestra en la Fig. 10.

El análisis de la carga de viento se elaboró con el coeficiente de velocidad de la presión clasificado como exposición tipo D, considerando que la estructura podrá estar expuesta en áreas planas sin obstrucciones. Respecto al factor de importancia se consideró tipo I con una velocidad de viento de 120 km/h.

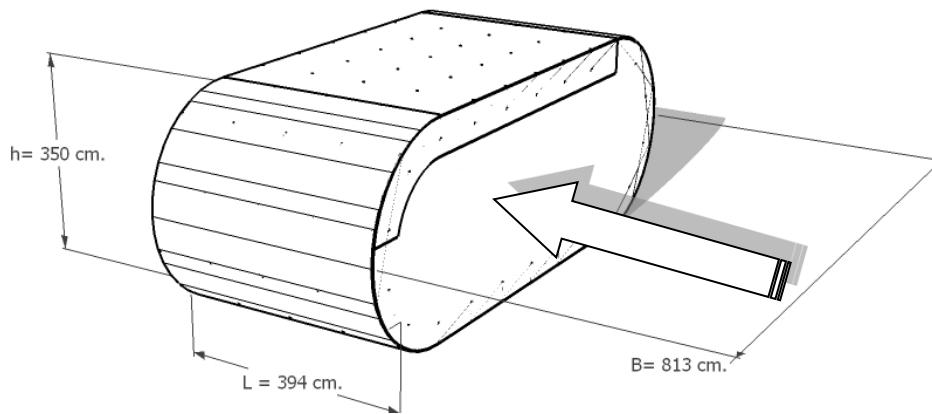


Figura 10. Dirección de las cargas de viento

Análisis:

Coefficiente de exposición a la presión de la velocidad = $K_z = 0.38$ para una altura $h = 3.5 \text{ m}$

Factor de ráfaga $G_z = 1.125$ para una altura $h = 3.5 \text{ m}$

$$q_z = 0.0050 K^2 I^2 V^2 = 0.0050 (0.38) (1)^2 (120)^2 = 27.36 \text{ kg/m}^2.$$

Presión interna: De acuerdo al ANSI A58.1-1982, el coeficiente de presión interna es igual a $+0.75, -0.25$. Entonces, la presión (o succión) interna será igual a:

$$p_i = +0.75 \times 27.36 = +20.52 \text{ kg/m}^2.$$

$$p_i = -0.25 \times 27.36 = -6.84 \text{ kg/m}^2.$$

Coefficientes de presión externa:

Viento transversal

Muro de barlovento: $C_p = 0.8$

Muro de sotavento: $L/B = 0.48$, $C_p = -0.7$

Muros laterales: $C_p = -0.7$

Para el techo a sotavento $C_p = -0.7$

Las presiones se calculan con la expresión $p = qzGzC_p$:

Para el muro,

$$p = (27.36)(1.125)(0.8) = 24.62 \text{ kg/m}^2 \text{ (barlovento)}$$

$$p = (27.36)(1.125)(-0.7) = -21.55 \text{ kg/m}^2 \text{ (sotavento)}$$

Para el techo,

$$p = (27.36)(1.125)(-0.7) = -21.55 \text{ kg/m}^2 \text{ (sotavento)}$$

En la Fig. 11 se muestra la estructura con las presiones externas y las internas.

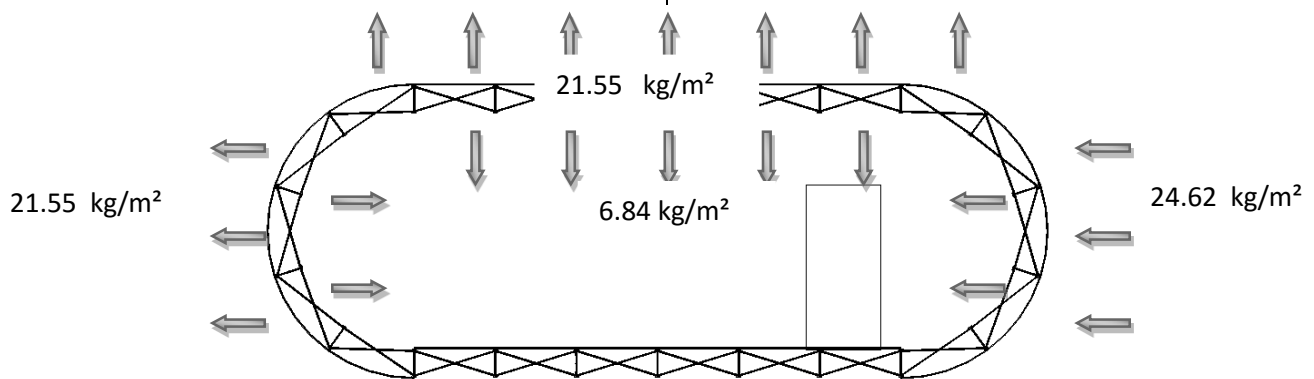


Figura 11. Presiones externas y presiones internas

Las presiones finales p_f se encuentran agregando la presión interna:

Para el muro,

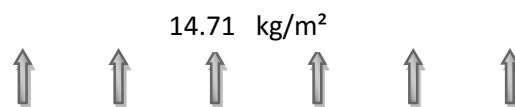
$$p_f = 24.62 + 6.84 = 31.46 \text{ kg/m}^2 \text{ (barlovento)}$$

$$p_f = -21.55 + 6.84 = 14.71 \text{ kg/m}^2 \text{ (sotavento)}$$

Para el techo,

$$p_f = -21.55 + 6.84 = -14.71 \text{ kg/m}^2 \text{ (sotavento)}$$

En la Fig. 12 se muestra la estructura con las presiones finales.



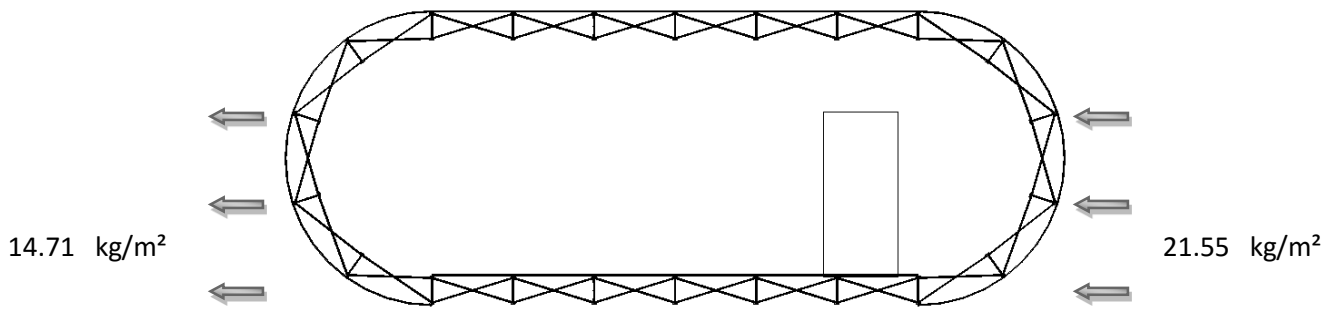


Figura 12. Presiones finales de viento

Una vez determinadas las presiones finales del aula, se prosiguió a distribuir la carga en los nodos laterales, para el área lateral de

30.44 m² con se muestra en figura 13, dio como resultado 14.9 kg por nodo y en área lateral de 21.71 m², 15.59 kg por nodo.

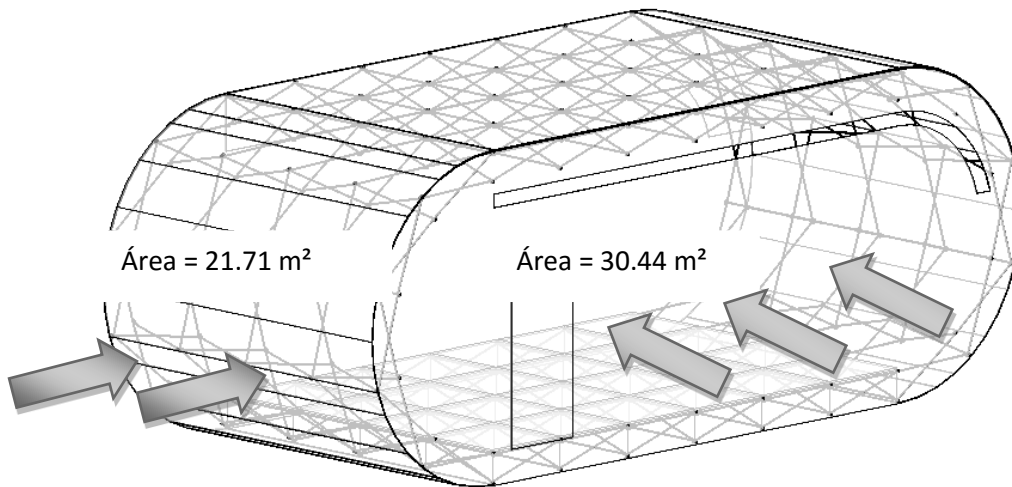


Figura 13. Distribución de cargas de viento en nodos

En la Tabla 3 se resumen las cargas de viento en cada nodo.

Tabla 3. Cargas de viento en nodos

VIENTO	VIENTO
96.5 kg /nodo	43.5 kg /nodo
Dirección X	Dirección Z
Nodos	Nodos

1	81
2	82
3	83
4	84
5	85
6	96
7	97
36	98
37	99
38	100
39	111
40	112
41	113
42	114
71	115
72	126
73	127
74	128
75	129
76	130
77	141
78	142
79	143
80	144
81	145
82	1
83	8
84	15
85	22
146	29
147	
148	
149	
150	
151	

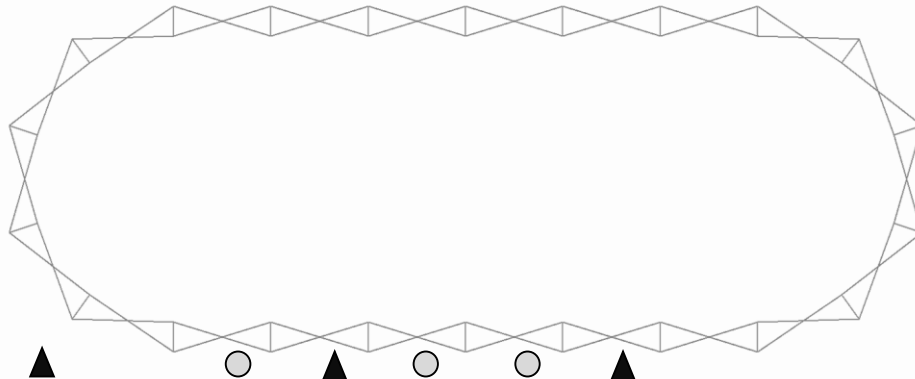
152
153
154
155
156
157
158
159
160

Apoyos

De acuerdo a la geometría, la masa, las conexiones entre los elementos de la estructura, se trata de llegar lo más cerca de la realidad que sea posible para facilitar la interpretación de la respuesta. En adición al modelaje de la geometría y la caracterización de las cargas inducidas a los elementos, la masa asociada a cada grado de libertad debe determinarse, ya que, las fuerzas de inercia contribuyen a la respuesta del aula plegable.

En este caso de estudio se consideró que el 10% de nodos inferiores, no iban a transmitir cargas verticales al suelo, para esto se realizaron simulaciones aleatorias de las cuales se realizó el estudio con la menos favorable como se muestra en la figura 14. Dado que el 90% de los nodos tienen por su situación natural restricción vertical. Del restante 90% se consideró restringir para el caso de estudio el 20% de los nodos a movimientos laterales.

a)



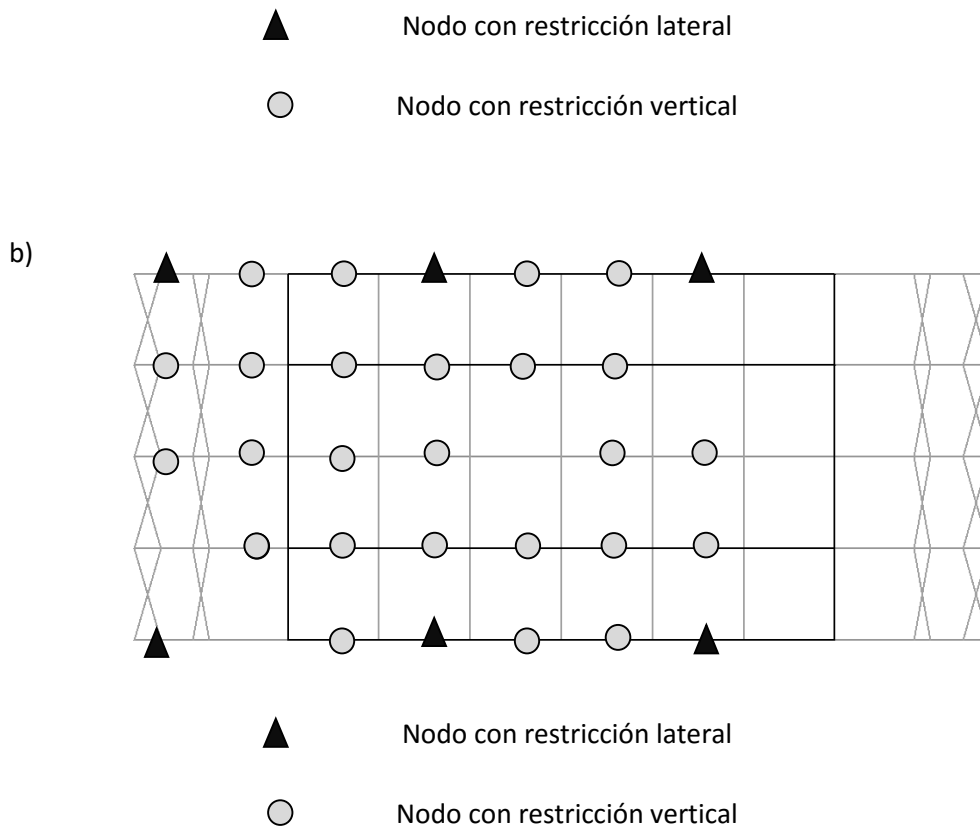


Figura 14. Restricciones en nudos: a) alzado, b) planta

Los puntos de apoyos están conectados a los nodos superiores como se muestra en la figura 15.

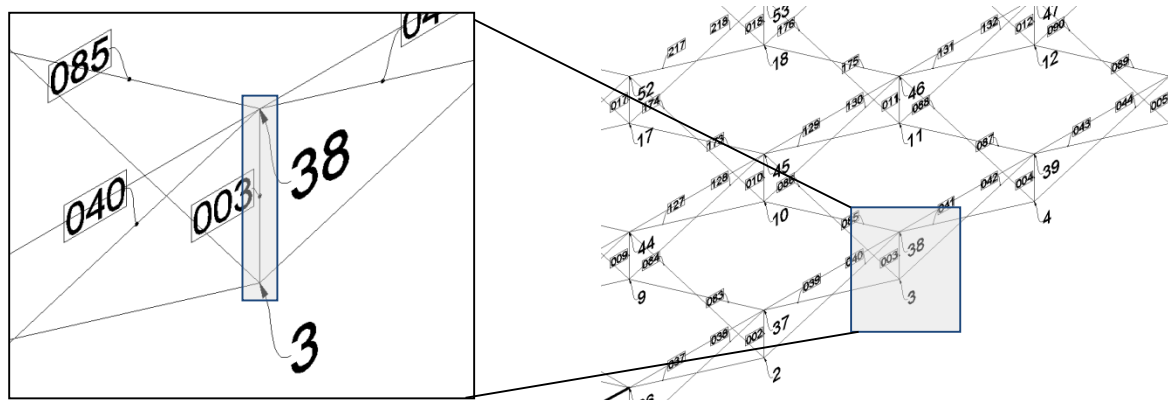


Figura 15. Nodo con restricción vertical conectado al nodo superior

3. Análisis y diseño estructural

Para llevar a cabo el análisis se utilizó el software ADINA (Análisis Dinámico Incremental No-lineal Automático), con el cual se analizó la estructura tridimensional, considerando elementos unidimensionales del tipo armadura (*truss*), conectados mediante articulaciones.

Datos de entrada

Los datos del modelo para su definición son:

Geometría: La geometría del modelo fue definida por los elementos y sus nodos. Para

definir los nodos se proporcionaron los datos correspondientes a las coordenadas de los 418 puntos, en donde en la entrada de datos se consideró como nodo las uniones generadas por los pares de barras, también se proporcionó la matriz de conexión de los nodos por 826 elementos, cada SLE está conformado por 4 elementos como se muestra en la figura 16. Una vez definida la geometría en el programa como se muestra en la figura 17, se introducirán las especificaciones de materiales así como las condiciones estructurales.

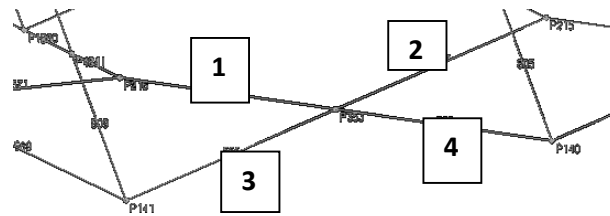


Figura 16. Definición de elementos en el software ADINA.

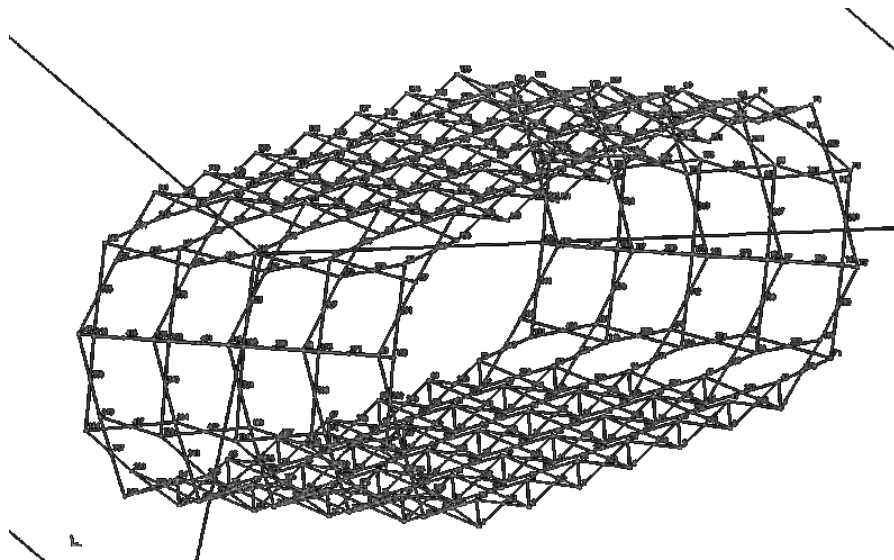


Figura 17. Geometría completa en el software ADINA.

Propiedades de los materiales: Las propiedades de los materiales en este caso el aluminio deben estar asociadas a los elementos generados en la definición de la geometría.

$$\text{Área} = A = 0.552 \text{ cm}^2$$

$$\text{Módulo de elasticidad} = E = 700000 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Relación de Poisson} = \nu = 0.345$$

$$\text{Longitud} = 1.022 \text{ m.}$$

Apoyos o condiciones de frontera: Se deben especificar las condiciones iniciales

restringidas dependiendo del grado de libertad del nodo, tales como condiciones de simetría, desplazamiento o rotaciones.

Condiciones de carga: se realizó en análisis de cargas de diseño en la sección 4.2 a las cuales estará sometido el modelo.

Resultados del Análisis

En las Figs. 18 y 19 se muestran ventanas del ADINA con la estructura deformada bajo las cargas verticales y horizontales, respectivamente.

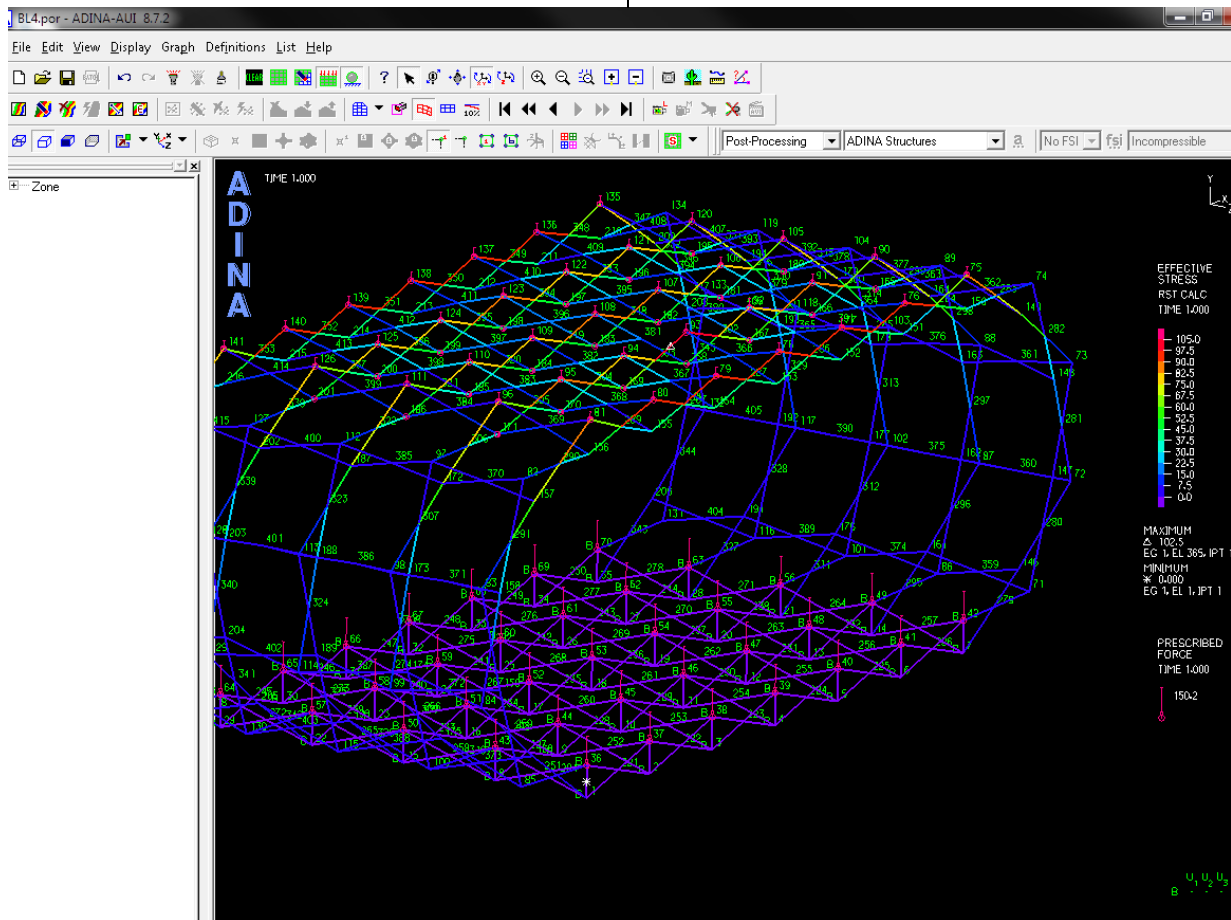


Figura 18. Simulación de cargas verticales en el software ADINA.

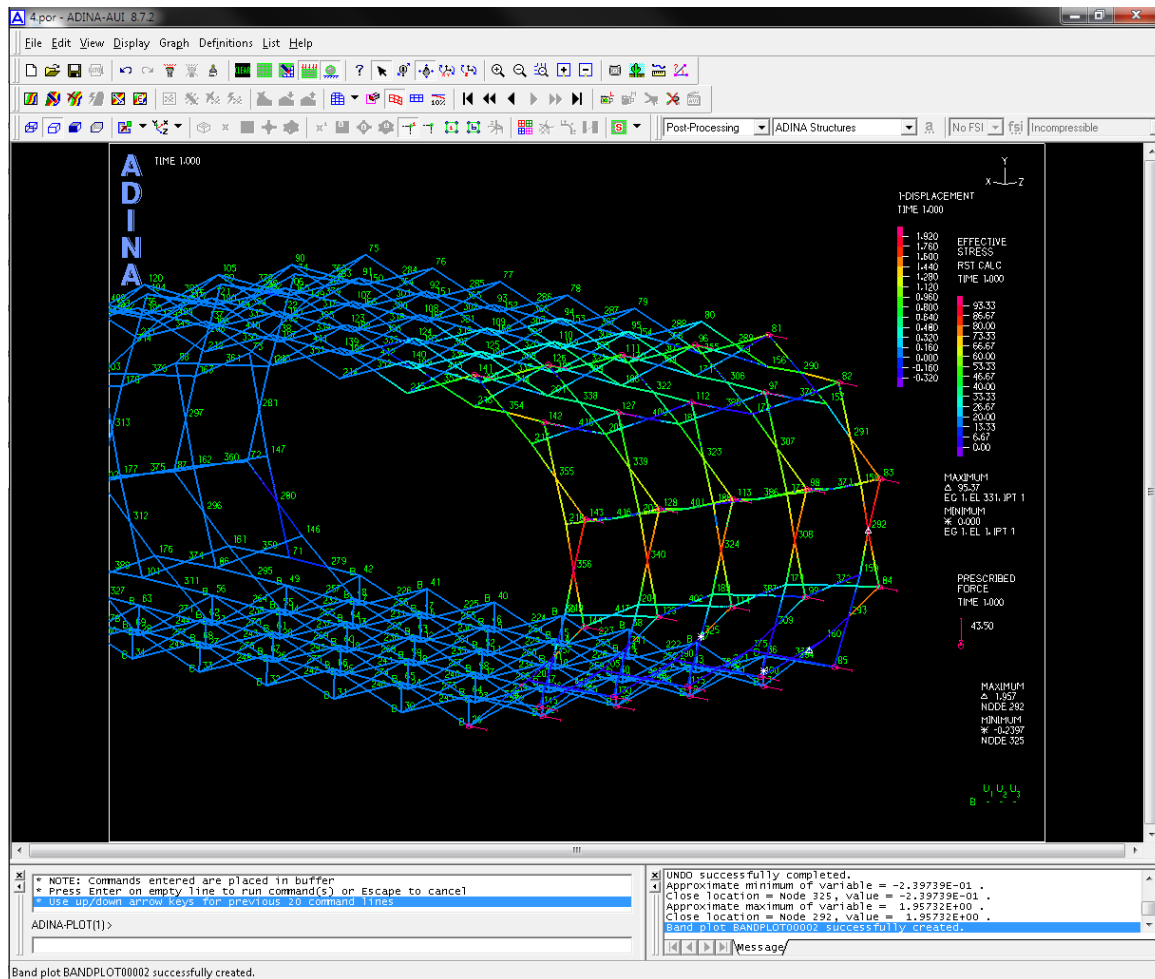


Figura 19. Simulación de cargas horizontales en el software ADINA.

Una vez analizada la estructura sometida a las cargas de servicio mencionadas en la anterior, se utilizó el método de diseño por esfuerzos permisibles para revisar el esfuerzo actuando en cada uno de los elementos. En tensión, los esfuerzos máximos calculados en los elementos de aluminio no deben exceder de 2688.15 kg/cm² de tubular del aluminio definida en los ensayos. En cuanto a las uniones dadas las pruebas resultó un esfuerzo máximo permisible de 844.25 kg/cm².

El método de esfuerzo permisible implica que se satisface automáticamente el estado límite último si no se exceden los esfuerzos permisibles. La comprobación se realizó con el programa ADINA, y esfuerzo máximo que se presenta en la estructura se encuentra ubicado en las barras inferiores con 204.9 kg/cm² como se muestra en la figura 20.

ADINA
TIME 1.000

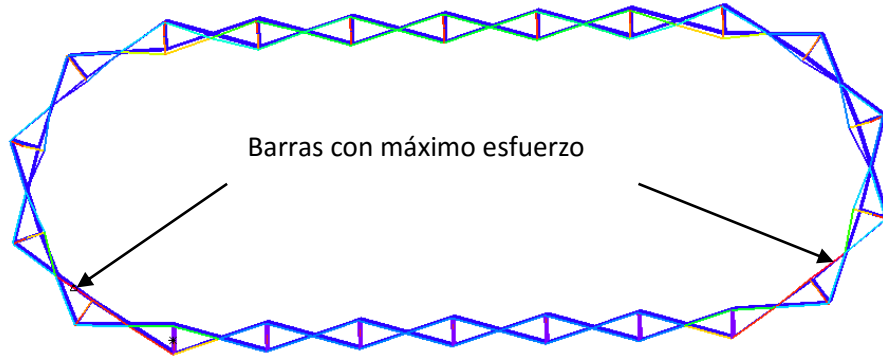


Figura 20. Alzado, esfuerzos máximos de la estructura.

En las figuras 21 y 22 se muestran los esfuerzos en las barras de la estructura bajo cargas verticales y laterales, respectivamente.

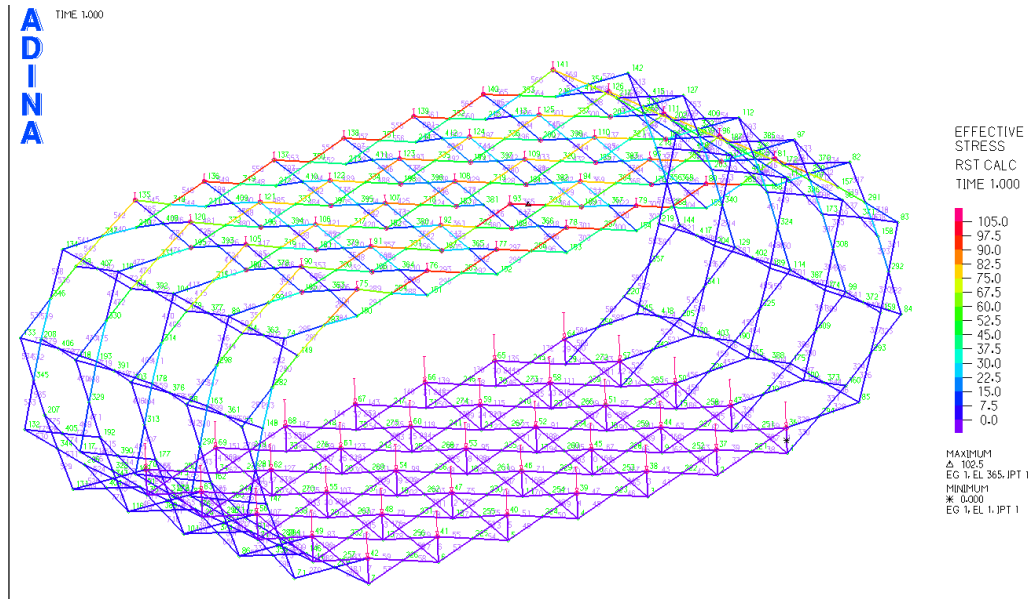


Figura 21. Isométrico, esfuerzos por cargas de suelo y cargas de cubierta.

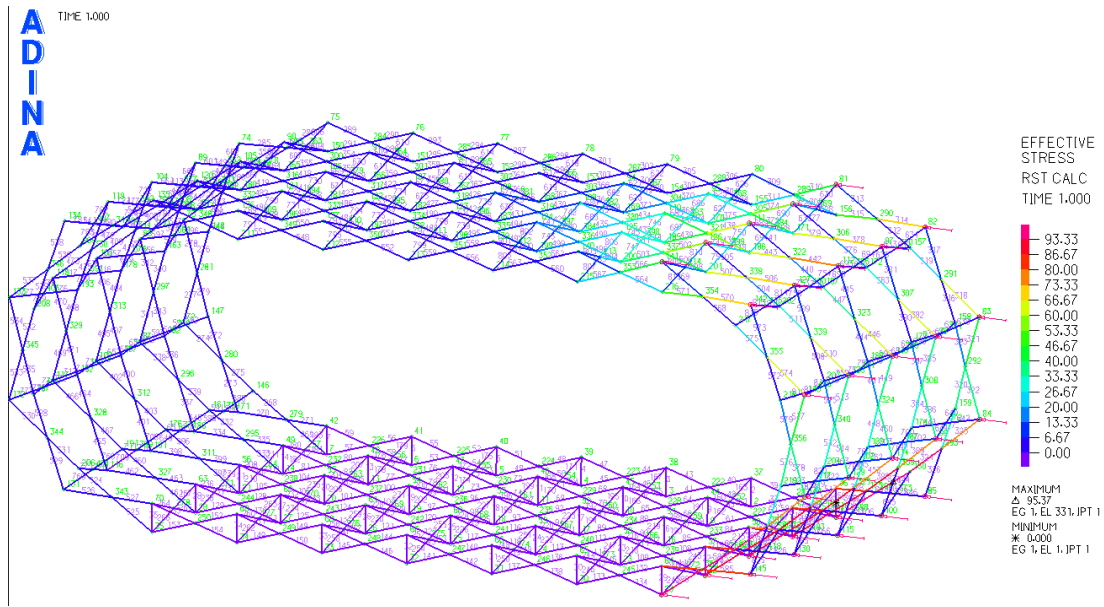


Figura 22. Isométrico, esfuerzos por cargas de viento.

4. Modelo Experimental

Para la comprobación de la aplicabilidad y utilidad del modelo, se experimentará y se describirá el proceso de fabricación del modelo diseñado, la implementación durante la experimentación, los resultados obtenidos

y las conclusiones a las que se arribó. El proceso de la experimentación, tiene dos propósitos principales: comprobar la aplicabilidad de la estructura y evaluar la viabilidad económica. En la figura 23 y 24 se muestra el dimensionamiento del aula a una escala 2:1.

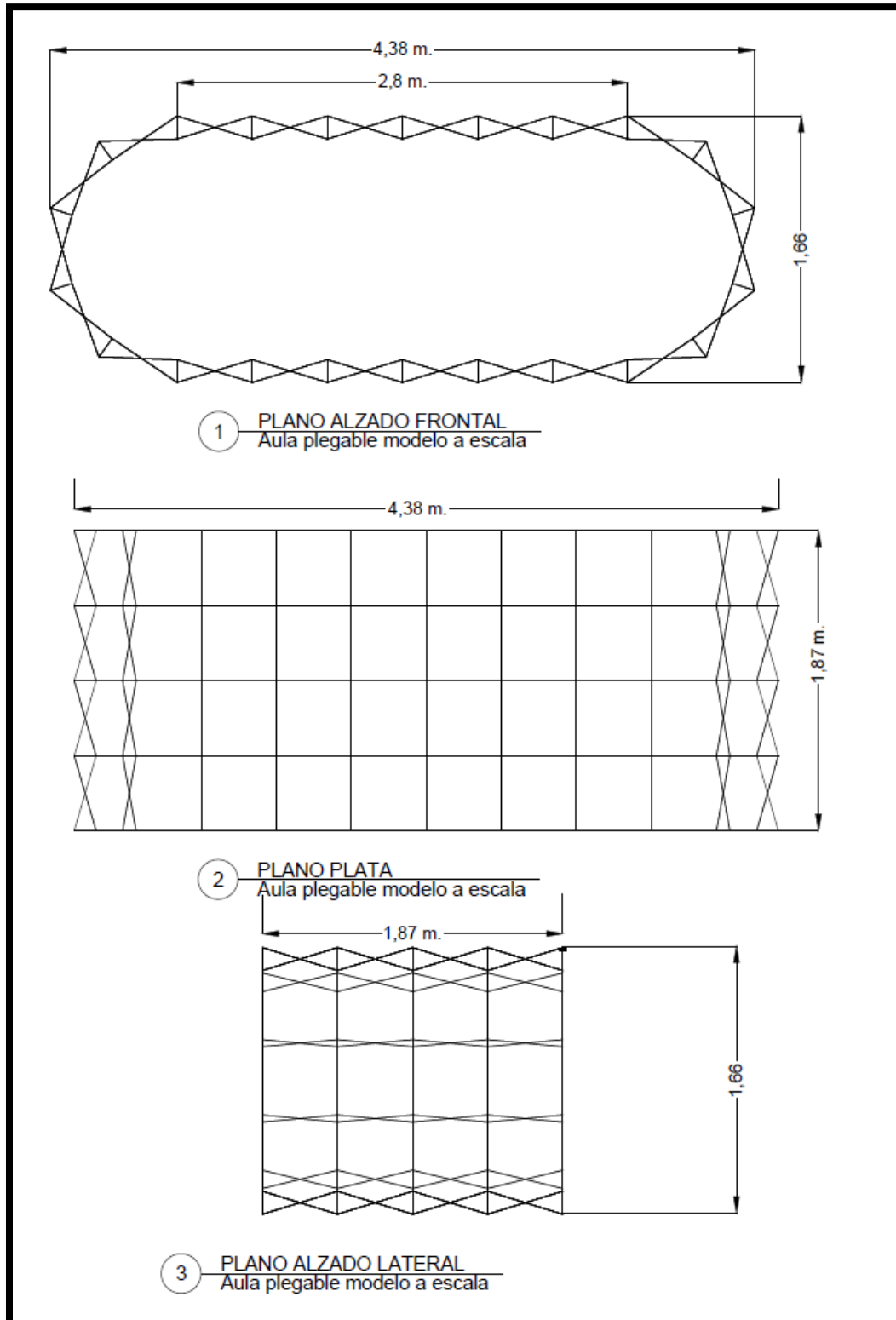
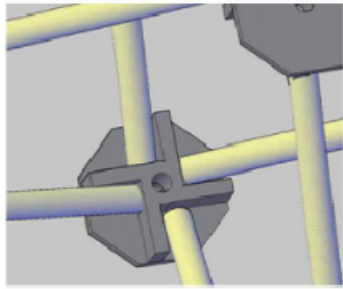
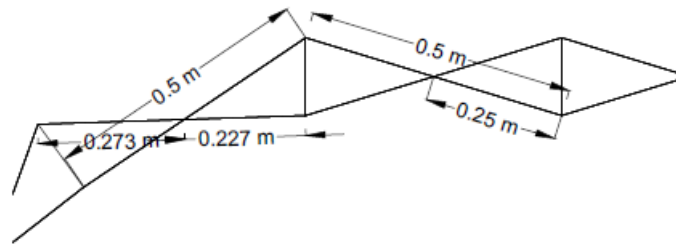


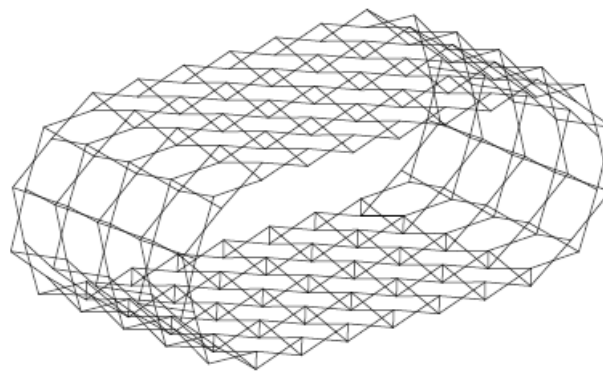
Figura 23. Dimensiones de prototipo de experimentación.



4 CONECTOR



5 CENTROS EN ARTICULACIONES GIRATORIAS



6 ISOMETRICO

Figura 24. Dimensiones de prototipo de experimentación.

Material es

Los materiales directos a utilizar para la estructura se listan en la Tabla 4.

Tabla 4. Materiales utilizados en el modelo a escala

No.	Concepto	Unidad	Cant.	Costo	Total
1	Suministro de conectores	Pza	220	6.50	\$ 1,430.00
2	Suministro de tubos de aluminio de 1/2" de 6.10 m de largo	Pza	80	77.00	\$ 6,160.00
3	Remaches para centros de SLE	Pza	216	0.50	\$ 108.00
4	Remaches para tubo a conector	Pza	880	0.35	\$ 308.00
5	Rondanas	Pza	648	0.20	\$ 129.6

Total \$ **8,049.20**

Proceso de Fabricación

Para la elaboración del prototipo a una escala 1:2 se realizó lo siguiente:

Se cortaron los tubos con sierra de banco a cada 50cm (396 tubulares en total)

Se realizaron las 3 perforaron los tubos con taladro de banco (1188 perforaciones en total) 296 tubulares con perforación a 25cm y 100 con perforación a 22.7cm

Se realizaron los SLEs uniend o cada par de tubulares con remaches (198 en total)

Ya teniendo las SLEs terminadas se prosiguió a realizar las uniones del tubular con el conector. Para este paso se realizó un plan para juntar los elementos como se muestra en las figuras 25 y 26.

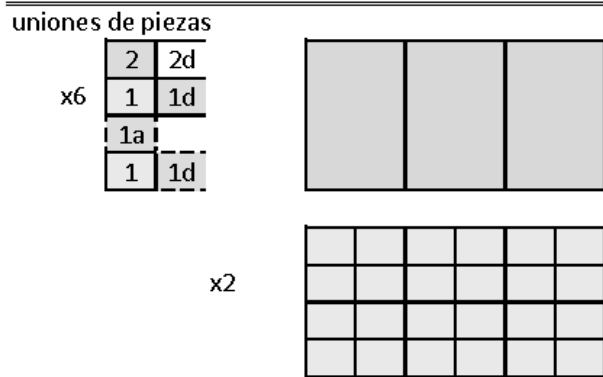
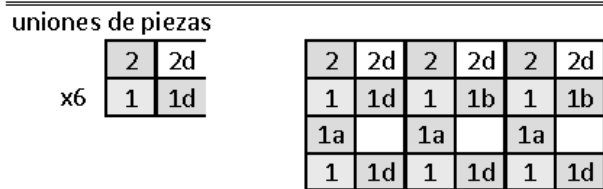
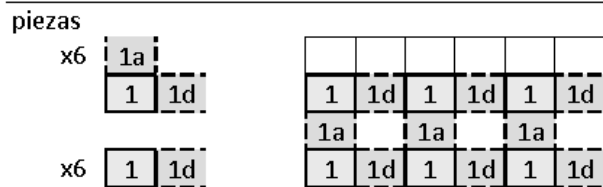
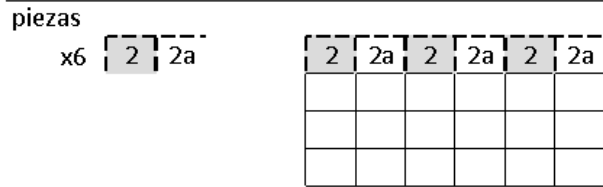
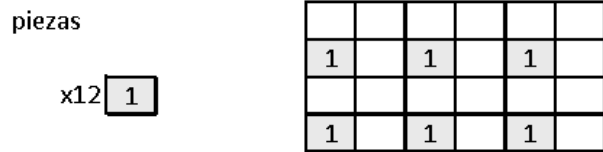


Figura 25. Plan para ensamble de estructura techo y piso

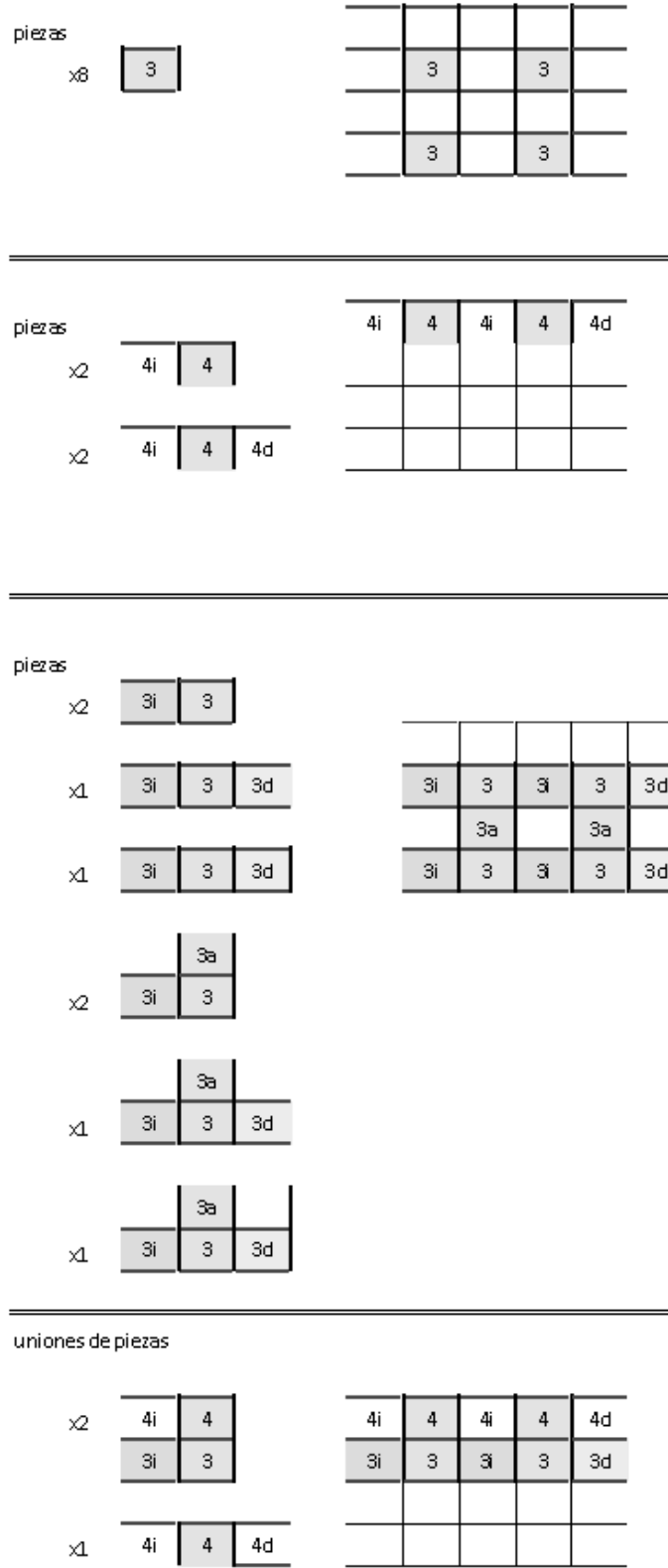
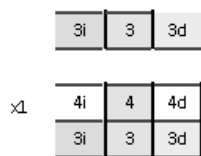
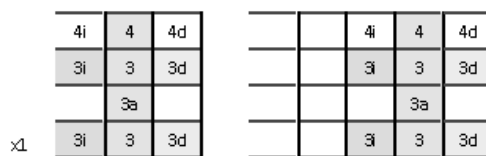
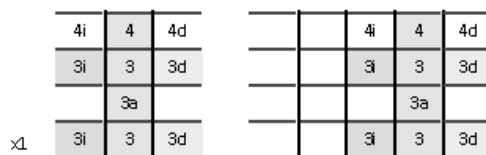
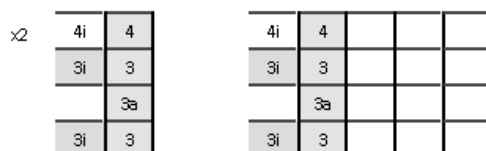


Figura 26. Plan para ensamble de estructura muros curvos.



uniones de piezas



uniones de piezas

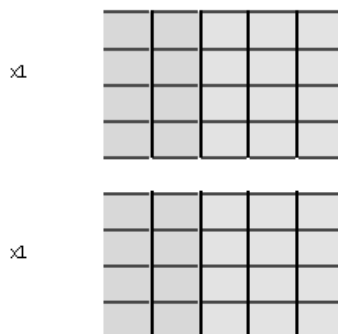


Figura 26 (Continuación). Plan para ensamble de estructura muros curvos.

Conclusiones y Recomendaciones

Del prototipo diseñado, analizado y construido se pueden destacar lo siguiente:

Los conectores y el método de unión de los tubulares al conector no fueron los más adecuados porque la fuerza aplicada al momento de abrir los remaches generó grietas en el conector de fibra de vidrio.

Por otra parte, si se realiza esta misma geometría, pero haciéndola trabajar con conectores metálicos uniéndolos con

tornillos y tuerca, los resultados mejorarán y las juntas serán más adecuadas para el prototipo, pero se deberá tomar en cuenta que incrementará el costo, el peso y el tiempo de elaboración.

Por último, con respecto al diseño geométrico, se recomienda mecanizar la apertura de la estructura para que los tiempos y esfuerzos de instalación se disminuyan.

Bibliografía

ADINA R&D, I. (1984). Programa de elemento finito para el análisis automático dinámico incremental no-lineal. Watertown, Massachusetts: ADINA R&D.

Chen, W., & Fu, G. (2001). A new design conception for large span deployable flat grid structures. *International Journal of Space Structures* (16), 75-82.

Connor, J., Gantes, C., & Logchar, R. (1994). An equivalent continuum model for the analysis of flat deployable slabs. *Journal of Aerospace Engineering*, 7 (1), 72-91.

Duch Gary, I., Garybay, F., & Galván, E. (2005). *La Capacitación, otra mirada: lecciones de experiencias mexicanas de capacitación rural*. México: Universidad Pedagógica Nacional.

Ermolaeva, N. S. (2002). Materials selection combined with optimal structural design:

concept and some results. *Materials & Design*, 23 (5), 459-470.

Escrig, F., & Valcarcel, J. (1993). Geometry of expandable space structures. *Internacional Journal of Space Structures* (8), 71-84.

Escrig, F., & Varcárcel, P. (1992). La obra arquitectónica de Emilio Pérez Piñero. *Boletín Académico de la E.T.S.A.* (16), 3-4.

Escrig, F., Sánchez, J., & Valcárcel, P. (Octubre de 1996). Recent realization in deployable structures. *Proceedings of International Symposium on Conceptual Design of Structures*, 994-1002.

Franco, R., & Torres, L. (2006). Estructuras adaptables. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Artes.

Gantes, C. (1996). A creative aspect of destructive phenomenon: using snap-trough buckling as a form of prestressing.

Proceedings of International Symposium on Conceptual Design of Structures , 1, 227.

Gantes, C. (1991). *A Design Methodology for Deployable Structures*. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology.

Gantes, C. (1997). An Improved Analytical Model for the Prediction of the Nonlinear Behavior of Flat and Curved Deployable Space Frames. *Journal Construct. Steel Res.* (44), 129-158.

Gantes, C., & Konitopoulou, E. (2004). Geometric design of arbitrarily curved bistable deployable arches with discrete joint size. *Internacional Journal of Solids and Structures* (41), 5517-5540.

Gantes, C., Connor, J., & Logcher, R. (1991). Combining numerical analysis and engineering judgment to design deployable structures. *Computeres & Structures* , 40 (2), 431-440.

Hernández, C. (Junio de 1987). *Deployable Structures*. Massachusetts, Estados Unidos.

Jing-Shan, Z., Fulei, C., & Zhi-Jing, F. (2009). The mechanism theory and application of deployable structures based on SLE. *Mechanism and Machine Theory* , 44, 324-335.

Langbecker, T., & F., A. (2001). Kinematic an non-linear analysis of foldable barrel vaults. *Engineering Structures* 21 , 158-171.

Nagaraj, B., Pandyan, R., & Ghosal, A. (2009). A constraint Jacobian based approach for static analysis of pantograph masts. *Computers and Structures* , 95-105.

Rothe, B. (1980). *Patente n° 4241746*. Estados Unidos.

Shan, W. (1992). Computer analysis of foldable structures. *Computers & Structures* , 42 (6), 903-912.

You, Z., & Pellergrino, S. (1997). Foldable Bar Structures. *International Journal of Solids and Structures* , 34 (15), 1825-1847.