

# ANÁLISIS DE LA CUBIERTA SOSTENIDA POR CABLES DEL NUEVO AUDITORIO ESPE

Pablo Caiza Sánchez <sup>(1)</sup>, Pablo Criollo <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Ingeniería Civil, Escuela Politécnica del Ejército

[pcaiza@espe.edu.ec](mailto:pcaiza@espe.edu.ec)

[parmac759@hotmail.com](mailto:parmac759@hotmail.com)

## RESUMEN

Se presenta el análisis de una alternativa para la cubierta del Nuevo Auditorio de la ESPE, que consiste en un entramado metálico bidireccional de curvatura simple sostenido con cables. Se describen los efectos p-delta y por grandes deformaciones y su aplicación en el programa SAP2000. Posteriormente se resumen tanto la geometría como las cargas del modelo estructural, y dentro de estas últimas las debidas a viento. Finalmente se entregan resultados tales como deformaciones y fuerzas axiales de los elementos estructurales más importantes. Se concluye que el trabajo realizado constituye una alternativa válida y novedosa.

**Palabras clave:** estructuras con cables, efecto p-delta, grandes deformaciones.

### 1. Introducción

En la alternativa presentada para la cubierta del Nuevo Auditorio de la ESPE, una armadura sostenida por cables, el elemento más complicado de analizar son los cables, por su comportamiento no lineal.

La experiencia diaria muestra que una tensión inicial en ellos disminuye sus deformaciones y aumenta su capacidad resistente. Basta recordar un alambre con tensión y otro sin ella en un tendedero. Sin embargo esfuerzos y deformaciones normalmente se asocian con rigideces definidas por parámetros tales como área de la sección transversal, longitud del elemento y módulo de elasticidad. Parece por tanto necesario añadir a estas inercias iniciales otras determinadas por las cargas de tensión. Matricialmente el problema tiene la siguiente forma:

$$\begin{array}{c}
T_i \\
T_j \\
F_i \\
F_j \\
\vdots \\
\text{righ} \\
\vdots \\
\vdots \\
\vdots \\
[\ ] = \frac{E A}{L} \\
\vdots \\
\begin{array}{cccc}
1 & 0 & 0 & 0 \\
0 & -1 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0
\end{array} \\
\vdots \\
\text{righ} \\
\vdots \\
\vdots \\
\vdots \\
[\ ] \\
\vdots \\
u_i \\
u_j \\
v_i \\
v_j \\
\vdots \\
\text{righ} \\
\vdots \\
\vdots \\
\vdots \\
[\ ] + \frac{T}{L} \\
\vdots \\
\begin{array}{cccc}
0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 1 & -1 \\
0 & 0 & -1 & 1
\end{array} \\
\vdots \\
\text{righ} \\
\vdots \\
\vdots \\
\vdots \\
[\ ] \\
\vdots
\end{array} \tag{1}$$

Donde  $T_i$  y  $T_j$  son fuerzas axiales en los extremos  $i$  y  $j$  del cable,  $F_i$  y  $F_j$  son fuerzas perpendiculares al eje del cable debidas a desplazamientos laterales en sus puntos extremos,  $u_i$  y  $u_j$  desplazamientos axiales,  $v_i$  y  $v_j$  desplazamientos laterales,  $E$  el módulo de elasticidad del material,  $A$  el área de la sección transversal,  $L$  la longitud del elemento,  $T$  la fuerza axial promedio en el elemento. Para resolver este problema se parte de un valor supuesto para  $T$ , el cual se comprueba que coincida o no en ciclos sucesivos.

Nótese que los nuevos términos aparecen debido al desplazamiento transversal de los extremos del cable y a la existencia de fuerzas de tensión en éste, es decir se trata de un problema del tipo denominado p-delta, fuerzas adicionales debidas a los desplazamientos en los extremos de los elementos de la estructura.

Obsérvese también que la forma misma del cable depende de la tensión que tenga. Si se desean deformadas realistas de los cables hay que considerar su tensión y ésta puede cambiar de acuerdo a su deformada. Para calcular la geometría del cable se recurre a métodos que empiezan considerando al cable inextensible para posteriormente incluir su comportamiento elástico. Las soluciones “exactas” obtenidas se pueden comparar con las aproximadas, que forman la teoría clásica de los cables y que incluyen suposiciones tales como la forma parabólica o el uso de módulos de elasticidad reducidos. Sólo se hace hincapié en este momento en las limitaciones de estas aproximaciones tales como que no permiten tomar en cuenta variaciones en la carga axial durante un proceso iterativo de cálculo.

La formulación clásica para un cable inextensible parte de la siguiente ecuación:

$$H \frac{d^2 z}{dx^2} = mg \frac{ds}{dx} \quad (2)$$

Donde  $H$  es la componente horizontal de la tensión en el cable,  $z$  es la coordenada vertical,  $x$  la coordenada horizontal,  $m$  masa,  $g$  la aceleración de la gravedad,  $ds$  el diferencial de longitud de cable.

La forma del cable se obtiene de la ecuación (2) a continuación:

$$z = \frac{H}{mg} \left[ -\cosh \frac{mgl}{2H} + \cosh \frac{mg}{H} \left( x - \frac{l}{2} \right) \right] \quad (3)$$

Donde  $l$  es la longitud horizontal proyectada del cable.

La longitud del cable  $s$  se obtiene de la ecuación (4):

$$s = \frac{H}{mg} \left[ \sinh\left(\frac{mgl}{2H}\right) - \sinh\left(\frac{mg}{H}\right)\left(\frac{l}{2} - x\right) \right] \quad (4)$$

La componente H puede resolverse de

$$\sinh\left(\frac{mgl}{2H}\right) = \frac{mgL_o}{2H} \quad (5)$$

Siendo  $L_o$  un dato que puede ser conocido, la longitud del cable.

La tracción en cualquier punto x se calcula con (6):

$$T = H \cosh\left(\frac{mg}{H}\left(\frac{l}{2} - x\right)\right) \quad (6)$$

Para estos cálculos también se puede recurrir al enfoque variacional, según el cual se trata de encontrar la curva que minimiza la energía potencial gravitatoria sujeta a la restricción de mantener una longitud prefijada.

Este tipo de enfoque se usa a continuación para resolver el problema del cable elástico, es decir el que tiene deformaciones elásticas axiales. Para este caso la energía potencial V del sistema se compone de dos términos, la energía potencial de deformación  $V_e$  y la variación de la energía gravitacional  $\Delta V_g$  respecto al estado inextensible:

$$V_e = \int_0^{L_o} \frac{1}{2} EA \left( \frac{dp}{ds} - 1 \right)^2 ds \quad (7)$$

$$\Delta V_g = \int mg(z^* - z) ds \quad (8)$$

Siendo p una coordenada de tipo lagrangiano y  $z^*$  la coordenada correspondiente del cable inextensible.

Las coordenadas cartesianas de la curva descrita por un cable elástico bajo la acción de su peso propio son:

$$x(s) = \frac{Hs}{EA} + \frac{H}{mg} \left[ \ln(T(s) + mgs + V) - \ln(T(0) + V) \right] \quad (9)$$

$$z(s) = \frac{mgs}{EA} \left( \frac{V}{mg} - \frac{s}{2} \right) + \frac{1}{mg} (T(s) - T(0)) \quad (10)$$

Los valores desconocidos de H y V se encuentran de estas ecuaciones para  $x(L_o)=l$  y  $z(L_o)=h$ .

Ecuaciones similares a las indicadas son usadas por el programa SAP2000 para determinar la geometría de los cables. Este programa parte de datos iniciales tales como la tensión supuesta

del cable y permite considerar al cable no sólo en su forma deformada sino en la no deformada. Si se usa la forma deformada, tiene varias opciones para dividir al cable en varios segmentos. Nótese a todo esto, que la tensión inicial supuesta en los cables de la estructura que se presenta en este artículo, la cubierta del Nuevo Auditorio de la ESPE, hace que la geometría deformada de éste sea muy similar a la no deformada. Este es un caso común para este tipo de estructuras y da como resultado que el efecto p-delta sea el fundamental para el cálculo de las cargas en los cables.

## 2. ESTRUCTURA SOSTENIDA POR CABLES

Para este modelo, partimos de la geometría básica de la primera estructura, se procedió a remplazar las correas por tubos cuadrados de 100x3mm, esta estructura esta soportada por dos arcos conformados por secciones de tipo I de dimensiones 500x8x300x10 y 500x6x300x10

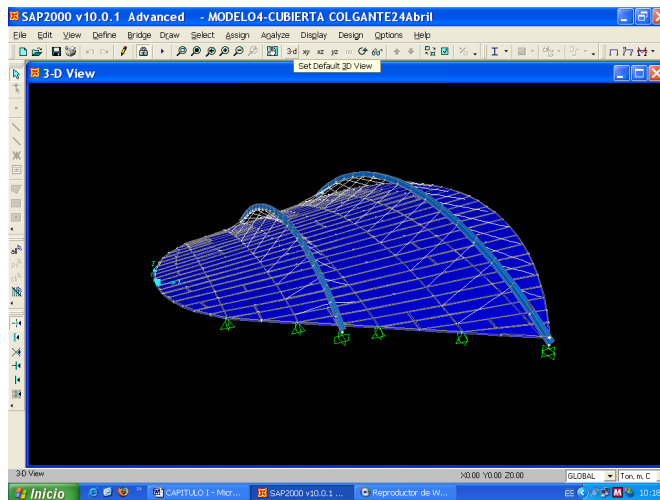


Figura 1 Modelo de la Estructura 3 en el programa SAP2000

### 2.1 ANÁLISIS DE CARGAS

Una de las tareas más importantes es determinar de la manera más precisa posible el valor de las cargas que soportará la estructura durante su vida útil, así como su posición y también determinar las combinaciones más desfavorables que de acuerdo a los reglamentos pueda presentarse.

#### TIPOS DE CARGAS

- Cargas muertas
- Cargas vivas
- Cargas accidentales

### 2.3.1 CARGAS MUERTAS O PERMANENTES

Denominamos cargas muertas aquellas que permanecen constantes en magnitud y ubicación durante la vida útil de la estructura, para nuestros modelos consideraremos dentro de cargas muertas a las siguientes:

- Peso propio
- Instalaciones
- Temperatura

#### **Peso propio**

Para este caso, la carga originada por el peso propio se determinara con la ayuda del programa SAP2000, tomando en cuenta el peso de todos los elementos estructurales y el peso del panel de cubierta.

#### **Instalaciones**

Se tomo un valor estándar de 10 Kg/m<sup>2</sup> distribuido uniformemente en toda la estructura por unidad de área.

#### **Temperatura**

Tomando en cuenta las continuas variaciones de temperatura que producen los cambios bruscos del clima en la zona de implantación, se determino que la carga de temperatura sea considerada como una carga permanente, con una variación crítica positiva de 12°C, ya que al presentarse una dilatación en los elementos, se producen esfuerzos de compresión que en este caso son los más críticos.

### 2.3.2 CARGAS VIVAS

Son cargas que varían en magnitud y posición debido a la propia característica de la estructura, se supone que cada estructura esta sometida a cargas vivas uniformes, las cuales depende del propósito para el cual han sido diseñadas.

Para el caso de las estructuras metálicas es necesario establecer que junto con la resistencia, es necesario controlar su funcionamiento ante las cargas de servicio (deformaciones excesivas)

En el CEC2001, se supone que las cargas vivas actúan de forma vertical sobre el área horizontal proyectada, para nuestros modelos, estas cargas están provocadas por los siguientes elementos

- Mantenimiento
- Granizo
- Ceniza

Estas cargas en la Tabla 1, se especifican como uniformemente repartidas por unidad de área, para las estructuras, tomaremos un valor estándar de 60Kg/m<sup>2</sup>

**Tabla 1** Cargas vivas mínimas para cubiertas en Kg/m<sup>2</sup> (CEC2001)

INCLINACION DE LA CUBIERTA	AREA TRIBUTARIA EN METROS CUADRADOS PARA CUALQUIER ELEMENTO ESTRUCTURAL		
	0 – 20	21 – 60	Sobre 60
Plana o con pendiente menor que 1:3 Arco o bóveda con flecha menor que 1/8 de luz	100	80	60
Pendiente de 1:3 a menos de 1:1 Arco o bóveda con flecha de 1/8 de luz a menos de 3/8 de luz	80	70	60
Pendiente de 1:1 y mayor Arco o bóveda con flecha de 3/8 de luz o mayor	60	60	60
Marquesinas excepto cubiertas con tela.	25	25	25
Invernaderos y edificios Agrícolas	50	50	50

### 2.3.3 CARGAS ACCIDENTALES

#### Viento

Estas cargas dependen de la ubicación de la estructura, de su altura, del área expuesta y de la posición. Las cargas de viento se manifiestan como presiones y succiones. En algunas normas se especifica el cálculo de estas presiones de acuerdo a las características de la estructura, para este caso nos basamos en el ASCE-7-98.

**Tabla 2** Valores de constantes de viento para modelación de carga de Viento

<b>Velocidad del viento mph</b>	75	
<b>Tipo de Exposición</b>	C	Terreno abierto construcciones dispersas
<b>Factor de Importancia</b>	1	No propenso a huracanes
<b>Factor topográfico, Kzt</b>	1	Coefficiente de exposición a presión de velocidad
<b>Factor de Ráfaga</b>	0.85	

Para la carga de viento se tomo en cuenta un viento con una velocidad de 75mph, equivalente a 120 Km/h, el cual determina las presiones en las estructuras

**Tabla 3** Valor coeficiente Cp de Presión externa

TECHOS EN ARCO	
<b>FLECHA</b>	4.65
<b>LUZ</b>	30.4
<b>r = Flecha/luz</b>	0.15

<b>Ubicación</b> techo en una estructura elevada	
<b>UBICACIÓN</b>	<b>Cp</b>
<b>Cuarto de Barlovento</b>	-0.90
<b>Mitad Central</b>	-0.92
<b>Cuarto Sotavento</b>	-0.50

### **Sismo**

Estas cargas inducidas en las estructuras están en relación a su masa y elevación a partir del suelo; así como de las aceleraciones del terreno y de la capacidad de la estructura para disipar energía; estas cargas se pueden determinar como fuerzas estáticas horizontales aplicadas a los centros de masas de la estructura, aunque en ocasiones debido a la altura de los estructuras, esbeltez se hace necesario un análisis dinámico para verificar los resultados obtenidos mediante la aplicación del modelo estático equivalente.

### **Análisis estático equivalente**

Considerando a nuestras cubiertas como un caso especial de estructura, el cálculo de las fuerzas laterales mínimas a las que estará sujeta este tipo de estructura, viene dado por el mayor valor obtenido con las expresiones descritas en en CEC2001, tabulados en la Tabla 4

Los valores de  $Z$ ,  $R$  e  $I$ , son tomados de las tablas propuestas en el CEC2001, en la parte 1 de Requisitos Generales de Diseño.

Así se tiene:

**Tabla 4** Determinación del coeficiente para Cortante Basal

ANALISIS LATERAL		
$V = 0.48ZIW$ o $V = \frac{1.14ZI}{R}W$		
Donde:		
R=	Factor por comportamiento plástico	
Z=	Factor de zona	
I=	Indice de importancia	
FACTOR DE ZONA		
Para la Provincia de Pichincha	Z=	0.4
FACTOR DE IMPORTANCIA		
Por tratarse de una estructura común y corriente	I=	1
FACTOR DE COMPORTAMIENTO		
Estructura no especificada en Código	R=	3
	<i>coef</i> =	0.192    W
	<i>coef</i> =	0.152    W

### 3. GENERACION DE ELEMENTOS CABLE EN SAP2000

#### 3.1 MATERIALES

La característica principal de un cable es su flexibilidad, la cual esta en proporción inversa de los diámetros de los alambres externos del mismo, en cuanto la resistencia a la abrasión es directamente proporcional al diámetro del cable utilizado.

En nuestro caso como necesitamos que nuestros cables presenten una menor flexibilidad, utilizaremos la composición de 6x7,

**Tabla 5** Propiedades del Cable 6x7 3/8"

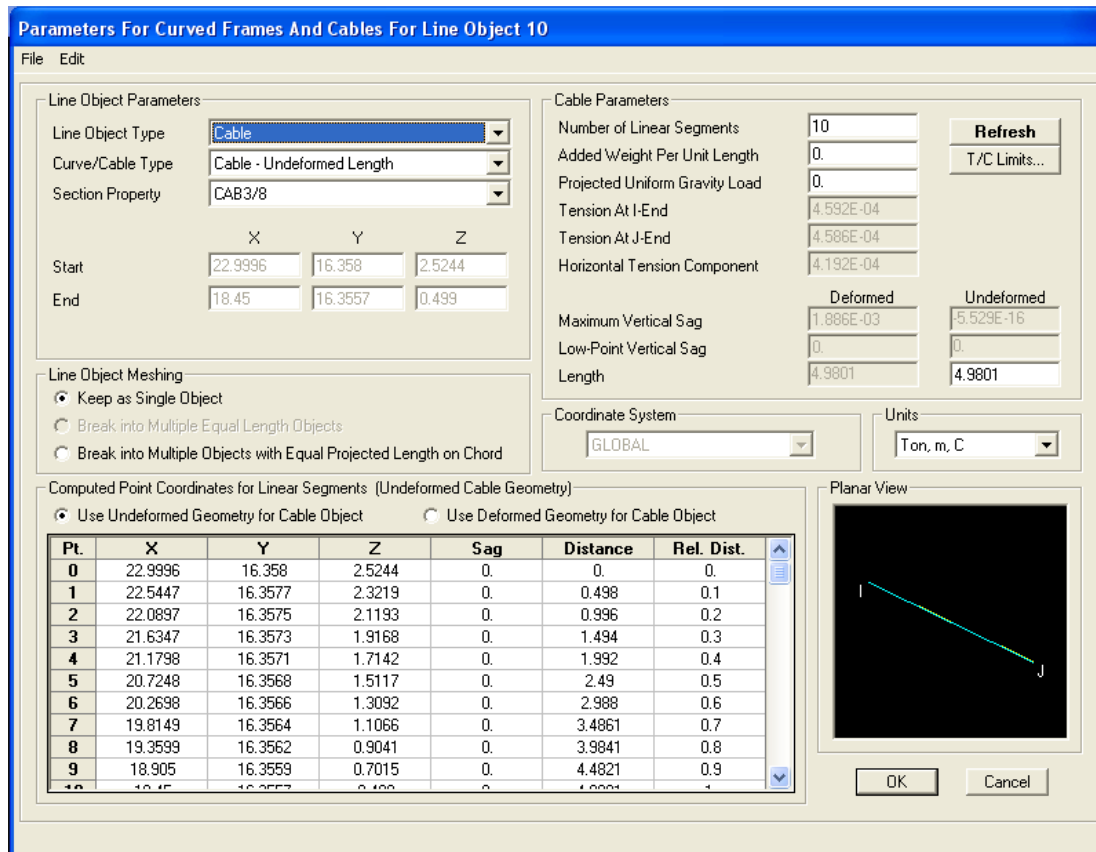
TIPO	JIRAFÁ (AA-30)	
	DIAMETRO	3/8"
	CONSTRUCCION	6 X 7
	ALMA	ACERO (6/1)
	TORCIDO	REGULAR DERECHO
	ACABADO	NEGRO
	PESO ESPECÍFICO	2.42 T/m <sup>3</sup>
	MODULO DE ELASTICIDAD	7000 kg/m <sup>2</sup>

Con las características del cable a utilizar, se definió el material del cual esta conformado nuestros cables para la inclusión de estos datos en el modelo de la estructura, estos datos vienen dados por las tablas de los diferentes fabricantes.

#### 3.2 PARAMETROS PARA CABLES EN SAP2000

Después de haber definido la geometría de los elementos de la cubierta y los arcos desde los cuales se proyectaron los cables, procedimos a generar uno a uno estos elementos, los cuales cuentan con una serie de parámetros que son resueltos para definir la geometría inicial del cable de antemano antes de pasar a la resolución general de la estructura.

Como se puede ver en la Figura 2, la pantalla presenta varios parámetros a ser definidos por el usuario, entre los cuales podemos destacar los siguientes.

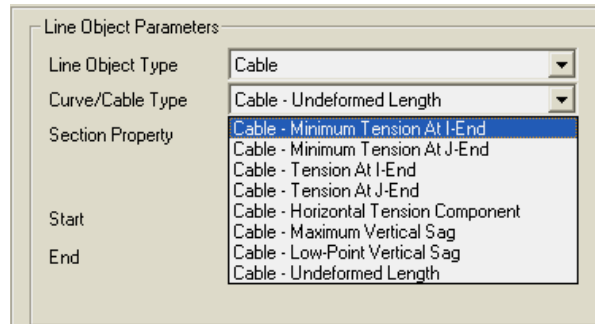


**Figura 2** Pantalla para definición de propiedades en elementos Cable

### Curve/Cable Type

Esta es la opción principal para la modelación de los cables, ya que en ella se definen las opciones principales para la configuración geométrica de los cables, entre las opciones disponibles tenemos:

- Longitud fija
- Tensión mínima en el inicio o en el final
- Tensión en el inicio o en el final
- Componente horizontal de tensión
- Longitud de la flecha del cable



**Figura 3** Parámetros para determinar la geometría inicial del Cable

En un principio se considero en los modelos a los cables sin ninguna deformación, lo cual es incierto, ya que debido a su peso propio estos tienen una curvatura denominada catenaria, sin embargo para eliminar estos efectos de esta deformación podemos considerar cualquiera de las opciones disponibles, para nuestro caso es suficiente el otorgarles una tensión mínima en el extremo inicial para mantener una deformación mínima, la cual como vemos en la comparación de resultados nos presenta una variación mínima, debido a que nuestra estructura cuenta a mas de los cables con soportes de tipo fijo y móvil, además de que las longitudes no son representativas, sin embargo estos efectos pueden ser mas perceptibles en otras estructuras donde estos elementos presentarán mayores deformaciones.

## 4. RESULTADOS

### 1.1. FUERZAS EN LOS ELEMENTOS

**Tabla 6** Fuerzas axiales Estructura de cubierta Modelo 4

<b>Elemento</b>	19	28	30	32	39	46	52	53	54
<b>P (ton)</b>	-3.59	1.33	-2.61	-2.65	1.33	1.35	1.35	1.37	1.38
<b>Elemento</b>	55	70	71	72	85	86	87	88	89
<b>P (ton)</b>	1.40	1.42	1.43	1.43	-2.20	-0.91	-0.90	-0.88	-0.87
<b>Elemento</b>	90	92	93	94	95	96	97	98	99
<b>P (ton)</b>	-0.85	-0.84	-0.84	-0.83	-0.83	-0.82	-0.82	-0.81	-0.81
<b>Elemento</b>	100	118	119	120	121	122	123	124	136
<b>P (ton)</b>	-0.81	-6.86	-6.65	-6.55	-6.47	-6.41	-6.36	-6.35	-0.75
<b>Elemento</b>	137	138	139	140	141	142	143	144	145
<b>P (ton)</b>	-0.85	-1.24	-1.56	-1.81	-2.04	-2.23	-2.39	-2.52	-2.63
<b>Elemento</b>	146	147	148	149	150	151	165	172	173
<b>P (ton)</b>	-2.71	-2.79	-2.85	-2.92	-2.96	-2.98	-3.58	-4.93	-5.17
<b>Elemento</b>	174	175	176	177	178	179	180	181	182
<b>P (ton)</b>	-5.33	-5.39	-5.43	-5.44	-5.44	-5.44	-5.43	-5.43	-5.44
<b>Elemento</b>	183	184	185	234	235	236	237	238	239
<b>P (ton)</b>	-5.45	-5.46	-5.47	4.71	4.76	4.80	4.84	4.86	4.90
<b>Elemento</b>	240	241	242	243	244	245	285	286	287
<b>P (ton)</b>	4.94	4.99	5.04	5.07	5.10	5.10	3.91	3.92	2.68
<b>Elemento</b>	288	289	290	291	292	293	294	295	296
<b>P (ton)</b>	2.68	-0.68	-0.68	-0.98	-0.97	-2.38	-2.37	-1.27	-1.28
<b>Elemento</b>	297	298	299	300	301	302	303	304	305
<b>P (ton)</b>	-1.75	-1.74	-1.22	-1.21	-1.69	-1.68	-1.60	-1.59	-2.00
<b>Elemento</b>	306	307	308	309	310	311	312	313	313
<b>P (ton)</b>	-2.01	-2.68	-2.65	-2.98	-2.96	-3.34	-5.99	4.50	-0.64
<b>Elemento</b>	314	321	322	323	324	325	326	327	328
<b>P (ton)</b>	4.48	-2.96	-2.91	-4.52	-4.47	-2.99	-2.96	-1.33	-1.31
<b>Elemento</b>	329	330	331	332	333	334	335	336	337
<b>P (ton)</b>	-0.93	-0.92	2.08	2.13	-1.74	-2.64	-1.02	-2.04	-0.54
<b>Elemento</b>	338	339	340	341	342	343	344	345	346
<b>P (ton)</b>	-0.56	1.68	1.62	-1.07	-1.08	-2.28	-2.28	-4.55	-4.54

<b>Elemento</b>	347	348	349	350	351	352	371	372	389
<b>P (ton)</b>	-4.51	-4.54	-1.60	-1.60	-0.93	-0.29	-0.81	-0.82	-1.83

<b>Elemento</b>	390	391	392	393	394	395	396	397	398
<b>P (ton)</b>	-1.97	-1.94	-2.09	-3.20	-3.39	-3.17	-3.33	-2.73	-2.86

<b>Elemento</b>	399	400	401	402	403	404	405	406	407
<b>P (ton)</b>	-2.34	-2.47	-1.84	-1.94	-2.04	-2.24	-1.62	-1.53	-2.30

<b>Elemento</b>	408	409	410	411	412	413	414	423	424
<b>P (ton)</b>	-2.19	-2.52	-2.40	-2.89	-2.76	-2.12	-1.98	-2.03	-1.88

<b>Elemento</b>	435	436	437	438	439	440	441	442	443
<b>P (ton)</b>	-4.39	-4.93	-5.07	-4.24	-2.12	-2.13	-1.76	-1.77	-1.24

<b>Elemento</b>	444	445	446	447	448	449	450	451	452
<b>P (ton)</b>	-1.26	-1.27	-0.90	-0.63	-0.74	-0.71	-0.71	1.06	1.08

<b>Elemento</b>	453	454	455	456	457	458	459	460	461
<b>P (ton)</b>	0.73	1.06	1.10	0.79	2.34	2.28	2.10	2.10	1.11

<b>Elemento</b>	462	463	464	465	466	467	468	469	470
<b>P (ton)</b>	1.45	1.21	0.86	2.52	2.50	2.41	2.41	0.91	0.94

<b>Elemento</b>	482	484	529	530	531	532	534	535	537
<b>P (ton)</b>	-3.35	-3.37	-3.14	-3.14	-3.10	-3.12	-2.40	-2.41	-2.54

<b>Elemento</b>	538	539	540	542	543	544	545	546	547
<b>P (ton)</b>	-2.56	-1.31	-1.32	-1.26	-1.28	-0.66	-0.66	1.83	1.85

<b>Elemento</b>	548	549	550	551	552	553	554	555	556
<b>P (ton)</b>	-0.63	-0.63	2.27	2.25	3.00	2.98	1.10	0.76	2.47

<b>Elemento</b>	557	558	559	560	561	581	614	623	1186
<b>P (ton)</b>	2.45	2.84	2.83	-7.15	-7.15	-4.02	-4.50	-0.90	-11.40

<b>Elemento</b>	1187	1188	1189	1190	1191	1192	1193	1194	1323
<b>P (ton)</b>	-11.40	-11.32	-10.30	-8.88	-7.09	-11.38	-11.56	-11.53	1.63

<b>Elemento</b>	1340	1341	1343	1344	1345	1346	1347	1348	1349
<b>P (ton)</b>	-2.97	-3.50	-1.78	-2.32	-2.97	-1.20	-1.01	0.60	0.84

<b>Elemento</b>	1350	1351	1352	1353	1354	1428	1429	1430	1431
<b>P (ton)</b>	1.87	2.93	4.41	5.67	4.91	-2.47	-2.99	-3.42	-3.79

<b>Elemento</b>	1432	1433	1434	1435	1465	1466	1467	1468	1469
<b>P (ton)</b>	-3.58	-1.81	-1.38	-2.44	10.58	10.19	7.99	6.55	3.74

<b>Elemento</b>	1470	1471	1472	1473	1474	1475	1511	1512	1513
-----------------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

<b>P (ton)</b>	3.4818	4.2251	5.7956	7.5852	8.1544	9.4917	11.884	10.233	8.9326
----------------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

<b>Elemento</b>	1514	1515	1516	1517	1518	1519	1520	1521	1522
<b>P (ton)</b>	6.19	4.37	2.01	1.43	1.95	1.98	3.61	3.62	6.12

<b>Elemento</b>	1523	1565	1566	1567	1568	1569	1570	1571	1572
<b>P (ton)</b>	7.27	-2.77	-2.31	-1.84	-1.09	-1.65	-3.36	-5.19	-7.00

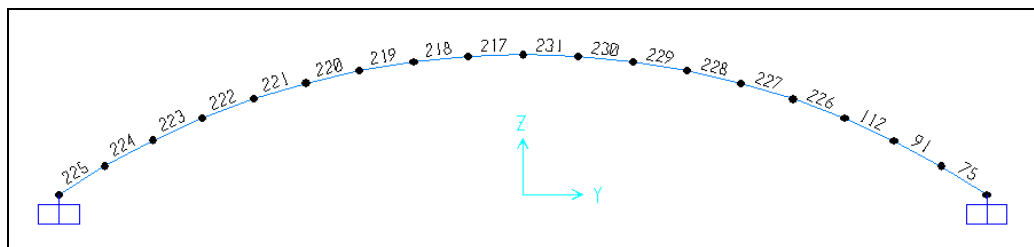
<b>Elemento</b>	1573	1574	1575	1576	1577	1578	1579	1626	1627
<b>P (ton)</b>	-7.51	-9.65	-10.22	-12.23	-12.83	-14.42	-19.99	-17.12	-14.84

<b>Elemento</b>	1628	1629	1630	1631	1632	1633	1634	1635	1636
<b>P (ton)</b>	-11.11	-6.99	-5.19	-6.09	-8.21	-9.37	-10.38	-10.55	-10.73

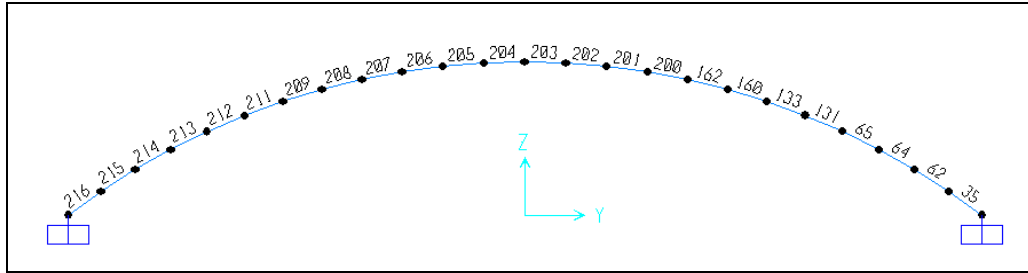
<b>Elemento</b>	1637	1638	1639	1640	1641
<b>P (ton)</b>	-9.99	-10.28	-9.36	-5.36	-2.48

	<b>P/ ton</b>	<b>N° Barra</b>
<b>Max Tensión</b>	11.88	1511
<b>Max Compresión</b>	-19.99	1579

Como podemos darnos en cuenta en la tabla que contiene los valores de fuerzas axiales de la estructura de cubierta, la mayoría de elementos trabajan bajo fuerzas de compresión debido a la configuración en arco de la estructura, teniendo los mayores valores de compresión en los elementos cercanos a los apoyos, existen valores de tensión en los elementos de la parte superior de los arcos.



**Figura 4** Identificación de elementos del arco N° 1 Modelo 4

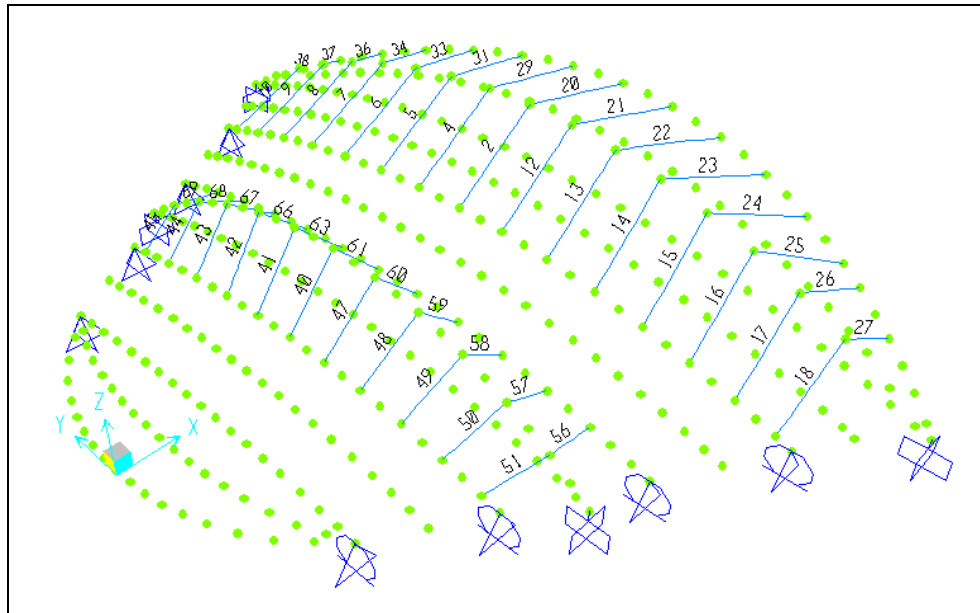


**Figura 5** Identificación de elementos del arco N° 1 Modelo 4

**Tabla 7** Fuerzas axiales y momentos en Arcos Modelo 4

Estructura	Frame Text	P Ton	M2 Ton-m	M3 Ton-m
Arco 2	204	-54.68	0.00	5.49
	205	-54.71	-0.04	4.49
	206	-54.92	-0.04	4.44
	207	-54.99	0.17	2.00
	208	-55.44	0.17	1.89
	209	-55.55	-0.05	-1.74
	211	-56.46	0.07	-5.57
	212	-56.58	0.07	-5.59
	213	-57.26	0.04	-6.64
	214	-57.27	0.06	-6.63
	215	-57.09	-0.15	-3.77
Arco 1	216	-56.76	-0.03	12.61
	217	-47.04	0.45	9.33
	218	-47.76	0.25	8.65
	219	-49.27	0.01	5.97
	220	-51.62	-0.44	-2.78
	221	-54.66	-0.16	-7.49
	222	-58.15	-0.03	-10.09
	223	-60.25	-0.03	-10.59
	224	-62.30	0.03	-8.21
225	-62.03	0.00	19.38	

Como se puede ver la distribución de las fuerzas axiales a lo largo de la estructura en arco tiene una distribución uniforme, teniendo como es obvio un mayor esfuerzo conforme nos acercamos a los apoyos.



**Figura 6** Identificación de elementos tipo cables en el Modelo 4

**Tabla 8** Fuerzas axiales en Cables Modelo 4

Estructura	Frame Text	P Ton
Cables Arco N° 1	2	4.75
	12	4.78
	13	4.81
	14	4.84
	15	4.69
	16	4.30
	17	3.45
	18	2.95
	20	3.97
	21	3.99
	22	4.00
	23	4.14
	24	4.21
	25	4.26
26	3.26	
27	3.46	

Estructura	Frame Text	P Ton
Cables Arco N° 2	40	4.78
	47	4.85
	48	5.04
	49	5.23
	50	4.25
	51	0.43
	56	0.41
	57	3.78
	58	4.54
	59	4.26
60	4.09	
61	4.06	

Las resultantes de las fuerzas axiales en los cables de los dos arcos, presentan valores uniformes, sin embargo en el arco 2, existen 2 cables que presentan fuerzas sumamente bajas, por lo cual, estos cables podrían ser eliminados y dejando que estas fuerzas sean absorbidas por el resto del conjunto.

## 4.2 REACCIONES

**Tabla 9** Resumen reacciones en apoyos estructura de cubierta Modelo 4

Joint Text	OutputCase Text	F1 Ton	F2 Ton	F3 Ton
487	DEAD	4.89	-7.25	3.76
487	LIVE	6.54	-10.03	5.00
487	TEMP	-9.53	-4.86	-0.33
490	DEAD	-5.48	-3.43	0.94
490	LIVE	-7.29	-3.63	1.04
490	TEMP	9.36	3.03	0.49
517	DEAD	0.88	0.00	0.96
517	LIVE	1.47	0.00	1.38
517	TEMP	-1.31	0.00	-0.23
523	DEAD	-5.02	0.00	-0.74
523	LIVE	-6.49	0.00	-0.92
523	TEMP	1.63	0.00	0.47
529	DEAD	-4.03	0.00	0.55
529	LIVE	-5.81	0.00	0.59
529	TEMP	7.85	0.00	0.67
571	DEAD	-0.39	6.51	-1.56
571	LIVE	-0.77	8.33	-2.01
571	TEMP	1.32	0.88	0.23
589	DEAD	0.24	4.28	-0.50
589	LIVE	0.28	5.35	-0.53
589	TEMP	-2.57	0.95	-0.82
593	DEAD	9.05	0.00	2.33
593	LIVE	12.17	0.00	3.00
593	TEMP	-6.65	0.00	-1.24

**Tabla 10** Resumen reacciones en apoyos de Arcos principales Modelo 4

Joint Text	OutputCase Text	F1 Ton	F2 Ton	F3 Ton	M1 Ton-m	M2 Ton-m	M3 Ton-m
313	DEAD	-0.023	-16.16	9.61	6.99	-0.089	-0.115
313	LIVE	0.016	-19.39	11.25	8.67	-0.109	-0.162
313	TEMP	-0.052	0.56	-0.74	1.34	0.018	0.048
318	DEAD	-0.025	-17.62	8.86	11.21	0.000	0.012
318	LIVE	-0.035	-20.45	9.56	14.64	0.005	0.027
318	TEMP	0.019	-2.36	1.00	2.71	0.021	0.021
341	DEAD	-0.041	16.35	9.19	-8.11	-0.108	0.138
341	LIVE	0.004	19.64	10.77	-9.99	-0.122	0.180
341	TEMP	-0.067	-0.60	-0.62	-0.91	-0.008	-0.020
351	DEAD	-0.062	17.31	9.04	-9.73	-0.056	0.060
351	LIVE	-0.077	20.17	9.85	-12.79	-0.069	0.070
351	TEMP	0.003	2.39	1.11	-2.30	0.008	-0.010

**Tabla 11** Deflexiones en un punto de la estructura

Joint Text	Case Text	Type Text	U1 m	U2 m	U3 m
192	DEAD	NonStatic	0.00514	-0.00386	-0.034394
192	LIVE	LinStatic	0.007463	-0.004897	-0.04888
192	TEMP	LinStatic	0.001944	-0.000468	0.004312
192	SISMOX	LinStatic	-0.000416	0.00005	0.001272
192	SISMOY	LinStatic	-0.000024	-0.000666	-0.000042
192	VIENTO	LinStatic	-0.003751	0.002143	0.022902

## CONCLUSIONES

- Los esfuerzos desarrollados en los elementos de la estructura, de cubierta se distribuyen de manera uniforme a lo largo de toda la estructura, lo cual nos permitió utilizar una sección de menor, adoptando tubos cuadrados de 100x3mm.
- La determinación de las fuerzas que se desarrollan en los elementos tipo cable, dependen de una resolución geométrica previa, la cual nos provee de la deformación existente producto del peso propio de los mismos, antes de aplicar los diferentes estados de carga, para lograr este efecto el programa SAP2000 nos provee de una serie de alternativas para la obtención de esta geometría, para nuestros modelos, utilizaremos una tensión mínima en el extremo inicial de nuestros cables, lo cual permite adoptar una geometría similar a una línea recta con una deformación mínima.
- Para considerar los efectos de no linealidad en los cables de la estructura, se utilizó en un principio, el efecto P- $\Delta$ , junto al de grandes deformaciones, sin embargo, los cables utilizados en esta estructura poseen una longitud reducida con relación a estructuras de mayor envergadura, donde estos elementos alcanzan dimensiones mayores, por lo cual en nuestra estructura consideramos en una revisión el efecto P- $\Delta$ , con el cual los resultados se mantuvieron con una variación mínima.
- Finalmente, los cables tendrán una cierta rigidez debido a su propia configuración y una rigidez producto de la aplicación de una tensión, y producto de la cual estos tienen un comportamiento más eficiente.

## BIBLIOGRAFÍA

1. “Código Ecuatoriano de la Construcción”, Quito, 2000.
2. “Cargas de viento”, Artículo, Ing. Pablo Caiza.
3. “Manuales de uso del SAP2000”, Monografía, Ing. Pablo Caiza.
4. “Apuntes de clase de Estructuras Metálicas”, Sexto Nivel de Ingeniería Civil, Escuela Politécnica del Ejército, Sangolquí, 2005
5. “Specification for Structural Steel Building”, American Institute of Steel Construction, Marzo 9, 2005
6. “Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures” ,American Society of Civil Engineers, ASCE 7-98