



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

Estudio de viabilidad estructural de un soporte para equipos de Telecomunicaciones

Autor:

Gómez Martín, Javier

Tutor:

Lorenzana Ibán, Antolín

Magdaleno González, Álvaro

C.A., I.T., M.M.C. y Teoría de Estructuras

Valladolid, SEPTIEMBRE de 2020

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer tanto a mi tutor Antolín, como a Álvaro, su dedicación y enseñanzas, las cuales me han servido para poder llevar a cabo este TFG.

Por descontado, a mis padres, Pablo e Isabel, y a toda mi familia, la cual me ha apoyado durante todo mi periodo académico.

Por último, especial mención a los amigos que he ido conociendo a lo largo de la carrera, por hacer todo mucho más fácil y llevadero.

A cada uno de vosotros, MUCHAS GRACIAS.

RESUMEN

En el presente trabajo de fin de grado se explicará brevemente cómo funcionan, en qué consisten y las partes que conforman las subestaciones (nodos) de telecomunicaciones.

A continuación, centraremos nuestro estudio en la presentación de los equipos y antenas que se servirán del mástil y su estructura para realizar su función, además de los diferentes elementos que lo componen (perfiles, tubos, etc...).

Por último, mediante los software de elementos finitos Sap2000 y CYPE, modelaremos la estructura y realizaremos un estudio comparativo de los resultados obtenidos, presentando la conclusión final.

PALABRAS CLAVE

Mástil, estructura, perfil, telecomunicaciones

ABSTRACT

This project will explain, by way of introduction, how they work, what they consist of and the parts that make up the telecommunications substations (nodes), in our case, urban

We will focus our study on the presentation of the equipment and antennas that will use the structure to perform its function, in addition to the different elements that make up the mast (profiles, tubes, etc ...)

Finally, using the Sap2000 and CYPE finite element programs, we will model the structure and carry out a comparative study of the results obtained, presenting the conclusion on the structural viability of the mast.

KEY WORDS

Mast, structure, profile, telecommunications

ÍNDICE

Capítulo 1: Introducción	14
1.1. Motivación del proyecto	19
1.2. Objetivos.....	19
1.3. Software	20
1.4. Estructura de la memoria.....	20
Capítulo 2: Fundamentos básicos de la red móvil.....	21
Capítulo 3: Estación base y su estructura	24
3.1. Introducción	24
3.2. Infraestructura	24
3.2.1. Elementos que componen la estación base	24
• Terreno	24
• Caseta	26
• Torre	30
• Mástil.....	32
Capítulo 4. Caso real. Presentación y análisis previo.....	34
4.1 Presentación	34
4.1.1 Elementos que componen la estructura.....	36
• Mástil.....	37
• Tubos.....	38
• Perfiles	39
• Herrajes.....	41
4.2 Equipos.....	41
• Antena KATHREIN 80010991RI	42
• Antena KATHREIN 80010621.....	43
• RRU12	43
• Radioenlace (parábola de 60cm de diámetro)	44
Capítulo 5. Hipótesis, modelado y cálculo.....	45
5.1 Hipótesis y cálculos previos.....	45
5.2 Modelado mediante CYPE Metal 3D.....	51

ESTUDIO DE VIABILIDAD ESTRUCTURAL EN MÁSTIL DE
TELECOMUNICACIONES Y ANÁLISIS MEDIANTE SOFTWARE

5.2.1 Fases del modelado	51
5.2.2 Análisis de axiles	68
5.2.3 Análisis de cortantes	69
5.2.4 Análisis de flectores	71
5.2.5 Análisis de desplazamientos	73
5.2.6 Análisis de tensión	77
5.3 Modelado mediante SAP2000	78
5.3.1 Fases del modelado	78
5.3.2 Análisis de axiles	97
5.3.3 Análisis de cortantes	98
5.3.4 Análisis de flectores	101
5.3.5 Análisis de desplazamientos	104
5.3.6 Análisis de tensiones	107
5.3.7 Análisis de inestabilidad	108
Capítulo 6. Comparación y conclusiones	110
Capítulo 7. Consideraciones adicionales	114
7.1 Seguridad	114
7.2 Aspecto medioambiental	114
7.3 Aspecto Económico	115
Referencias	116

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Características 5G.....	16
Figura 1.2: Principales operadores de red móvil en España.....	17
Figura 1.3: Porcentaje de hogares equipados con teléfono móvil en España 2005-2019.....	17
Figura 1.4: Evolución de las líneas móviles en España (en miles) 2000-2013	18
Figura 1.5: Evolución de la facturación años 2000-2017.....	18
Figura 2.1: Espectro radioeléctrico.....	21
Figura 2.2: Red celular.....	22
Figura 2.3: Antenas telefonía.....	22
Figura 3.1: Emplazamiento rural.....	25
Figura 3.2: Emplazamiento urbano.....	25
Figura 3.3: Caseta telecomunicaciones.....	26
Figura 3.4: Cuadro eléctrico.....	27
Figura 3.5: Equipo de fuerza.....	27
Figura 3.6: Equipo de transmisión.....	28
Figura 3.7: Equipos de radio.....	29
Figura 3.8: Torre de celosía.....	30
Figura 3.9: Torre tubular.....	31
Figura 3.10: Mástil anclado a dado de hormigón.....	32
Figura 3.11: Mástil anclado a casetón.....	33
Figura 4.1: Parte superior del mástil (1).....	35
Figura 4.2: Parte superior del mástil (2)	35
Figura 4.3: Anclaje	36
Figura 4.4: Características mecánicas acero S275	36
Figura 4.5: Características mástil.....	37

Figura 4.6: Detalle anclaje antena.....	38
Figura 4.7: Detalle anclaje RRU.....	38
Figura 4.8: Características tubos.....	39
Figura 4.9: Detalle anclaje a tubo.....	40
Figura 4.10: Detalle anclaje a mástil.....	40
Figura 4.11: Características perfiles.....	40
Figura 4.12: Equipos.....	42
Figura 4.13: Características antena 80010991RI.....	42
Figura 4.14: Características antena K80010621.....	43
Figura 4.15: Características RRU12.....	43
Figura 4.16: Parábola.....	44
Figura 5.1: Selección de normas.....	51
Figura 5.2: Estados límites.....	52
Figura 5.3: Acciones.....	53
Figura 5.4: Tipo de acero.....	53
Figura 5.5: Nodos.....	54
Figura 5.6: Perfiles.....	55
Figura 5.7: Referencias.....	55
Figura 5.8: Modelado de tubos.....	56
Figura 5.9: Descripción de materiales.....	57
Figura 5.10: Secciones generales.....	58
Figura 5.11: Orientaciones secciones tubos.....	59
Figura 5.12: Orientaciones secciones perfiles.....	60
Figura 5.13: Estructura final.....	61
Figura 5.14: Detalle estructura.....	62
Figura 5.15: Cargas en punta de mástil.....	63

Figura 5.16: Pesos de equipos.....	63
Figura 5.17: Viento frontal en antenas de 2m.....	64
Figura 5.18: Viento lateral en antenas de 2m.....	65
Figura 5.19: Viento frontal en antenas de 1.5m.....	66
Figura 5.20: Resultado final.....	67
Figura 5.21 Esfuerzos axiles.....	68
Figura 5.22 Tabla esfuerzos mástil.....	69
Figura 5.23 Esfuerzo cortante y (V_y).....	70
Figura 5.24 Esfuerzo cortante z (V_z).....	70
Figura 5.25 Comparación de cortantes.....	70
Figura 5.26 Tabla esfuerzos mástil (2).....	71
Figura 5.27 Momento flector y (M_y).....	72
Figura 5.28 Momento flector z (M_z).....	72
Figura 5.29 Comparación de flectores.....	72
Figura 5.30 Tabla esfuerzos mástil (3).....	73
Figura 5.31 Flecha xy.....	73
Figura 5.32 Flecha xz.....	73
Figura 5.33 Flecha máxima.....	74
Figura 5.34 Tabla flechas.....	74
Figura 5.35 Desplazamientos máximos eje y.....	75
Figura 5.36 Desplazamientos máximos eje x.....	75
Figura 5.37 Selección modelo SAP.....	77
Figura 5.38 Editado de la malla.....	78
Figura 5.39 Malla.....	79
Figura 5.40 Mástil.....	80
Figura 5.41 Perfiles.....	81
Figura 5.42 Tubos.....	82

Figura 5.43 Selección de material.....	82
Figura 5.44 Asignación de material.....	83
Figura 5.45 Secciones.....	84
Figura 5.46 Estructura final.....	84
Figura 5.47 Detalle estructura.....	85
Figura 5.48 Cargas en punta de mástil (2).....	86
Figura 5.49 Pesos de equipos (2).....	87
Figura 5.50 Pesos propios.....	89
Figura 5.51 Viento frontal en antenas de 2m (2).....	90
Figura 5.52 Viento lateral en antenas de 2m (2).....	91
Figura 5.53 Viento frontal en antenas de 1.5m (2).....	92
Figura 5.54 Viento lateral en antenas de 1.5m (2).....	93
Figura 5.55 Resultado final (2).....	94
Figura 5.56 Esfuerzos axiles (2).....	95
Figura 5.57 Resultado axiles.....	96
Figura 5.58 Esfuerzo cortante (Vz) (2).....	97
Figura 5.59 Esfuerzo cortante (Vy) (2).....	97
Figura 5.60 Resultado cortante Vz.....	98
Figura 5.61 Resultado cortante Vy.....	98
Figura 5.62 Momento flector (My) (2).....	99
Figura 5.63 Momento flector (Mz) (2).....	100
Figura 5.64 Resultado flector My.....	100
Figura 5.65 Resultado flector Mz.....	101
Figura 5.66 Deformada.....	102
Figura 5.67 Tabla desplazamientos (eje X).....	103
Figura 5.68 Tabla desplazamientos (eje Y).....	103
Figura 5.69 Desplazamientos.....	104

Figura 5.70 Definición de caso de carga.....	106
Figura 5.71 Condiciones caso de carga.....	106
Figura 5.72 Comparación de axiles.....	108
Figura 5.73 Comparación de cortantes.....	109
Figura 5.74 Comparación de flectores.....	110
Figura 5.75 Comparación de desplazamientos.....	111

Capítulo 1: Introducción

Hace relativamente poco, cualquiera de nosotros hubiese pensado que hablar a través de un teléfono sin cable sería algo exclusivo de las películas de ciencia ficción. Este avance ha sido uno de los más importantes que se han producido durante la era moderna.

La red móvil, para realizar su función, se sirve del uso de antenas. Éstas se sustentan sobre una estructura de soporte, cuya comprobación es el objetivo de éste trabajo de fin de grado.

Dedicaremos los próximos párrafos a realizar un breve resumen de las principales tecnologías móviles existentes y su evolución.

Nos apoyaremos para nuestra exposición en la documentación existente en la página web de la Universidad Internacional de Valencia (abril, 2020) [W1].

2G – Red de comunicación móvil de Segunda Generación

En 1990 se protocolizó el estándar GSM-900 (Global System for Mobile), seguido por el estándar DCS-1800 en 1991.

Gracias al protocolo GSM, se consiguió transportar información de un teléfono móvil a otro mediante ondas de radio, a través de las frecuencias de 900 y 1800MHz.

Comenzaron a usarse las tarjetas SIM, que hicieron posibles las conexiones a la red móvil de los operadores identificando a los usuarios.

Con el desarrollo de esta tecnología pudimos navegar por las páginas web a través de los teléfonos móviles lanzando los protocolos WAP (Wireless Application Protocol).

Características:

- Velocidad – 14 Kbps a 64 Kbps.
- Banda de frecuencia - 850 - 1900 MHz (GSM) y 825 - 849 MHz (CDMA).
- Servicios: Voz Digital, SMS, roaming internacional, llamadas a larga distancia.

3G - Red de comunicación móvil de Tercera Generación

Pasamos del protocolo GPRS al UMTS a través de la nueva tecnología W-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access).

Con los nuevos sistemas 3G, las compañías pudieron ofrecer un aumento de las tasas de datos (hasta 384 Kbps), mayor capacidad de voz y un mayor soporte a las diversas aplicaciones que fueron surgiendo.

Características

- Velocidad: 384 Kbps – 2 Mbps
- Frecuencia: aproximadamente 800 a 2500 MHz
- Ancho de banda: de 5 a 20 MHz
- Servicios: telefonía móvil de voz, acceso a Internet de alta velocidad, llamadas de video, chat y conferencias, televisión móvil, vídeo a la carta, correo electrónico, mapas de navegación y juegos o servicios multimedia.

4G - Red de comunicación móvil de Cuarta Generación

El objetivo principal de la tecnología 4G fue proporcionar mayor velocidad, una alta capacidad de transmisión, mayor seguridad y servicios de bajo coste. Para usar la red de comunicación móvil 4G, los dispositivos de los usuarios necesitaban ser capaces de seleccionar el sistema inalámbrico de destino.

Otro punto clave fue la movilidad del terminal, que permitía proporcionar servicios inalámbricos en cualquier momento y en cualquier lugar.

Características

- Velocidad - 100 Mbps en movimiento y 1 Gbps cuando se permanece inmóvil.
- Bandas de frecuencia: - la tecnología LTE cubre una gama de diferentes bandas. En el caso de España, las denominadas como 20, 3 y 7 (800/1800/2600MHz).
- Ancho de banda: de 5 a 20 MHz.
- Servicios - telefonía móvil de voz, acceso a Internet de alta velocidad, llamadas de video, chat y conferencias, televisión móvil, vídeo a la carta, correo electrónico, mapas de navegación, juegos, música móvil y servicios multimedia.

5G – El futuro

Con ayuda de la documentación existente en la página web de National Geographic (abril, 2020) [W2], indicaremos algunas de las posibilidades que nos ofrecerá el la tecnología 5G.

La implantación de la red móvil de quinta generación cambiará la manera de comunicarnos, multiplicará la capacidad de las autopistas de la información y posibilitará que objetos cotidianos, desde la nevera hasta los automóviles, puedan conectarse (con nosotros y entre sí) en tiempo real. Su despliegue supone una auténtica revolución tecnológica que permitirá, por ejemplo, realizar intervenciones quirúrgicas teleasistidas, desplegar nuevas flotas de vehículos autónomos y coordinar los trabajos agrícolas a través de sensores instalados en distintos puntos de un campo de cultivo.

El avance más significativo vendrá de la mano de la velocidad, ya que el 5G permitirá navegar hasta a 1 GBps (gigabyte por segundo).

Otro punto importante será la latencia (tiempo de respuesta de la red) que también experimentará un avance significativo. Según los operadores, ésta podría reducirse a 5 milisegundos, un período casi imperceptible para los humanos. Este dato es especialmente importante, por ejemplo, para minimizar el tiempo de respuesta de un vehículo autónomo de cara a mejorar la seguridad tanto de los ocupantes como de cualquier viandante que le circunde.

Las principales características de la nueva red 5G se pueden observar en la figura 1.

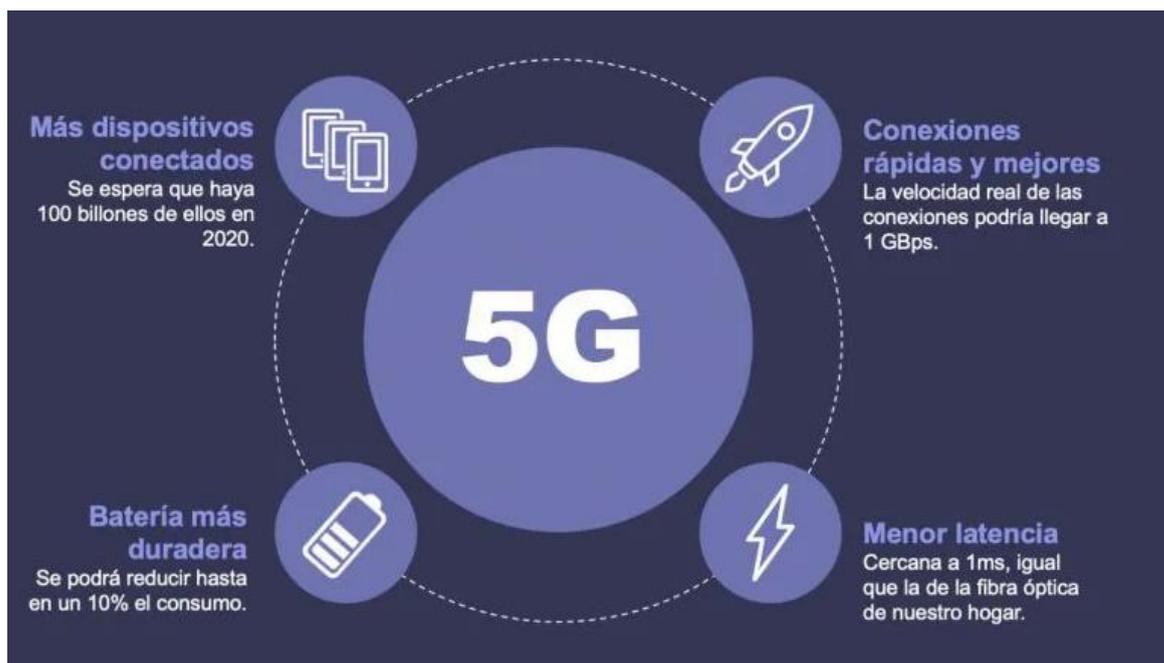


Figura 1.1: Características 5G (abril, 2020) [W3]

En España operan principalmente las compañías que se muestran en la figura 1.1.

- MOVISTAR
- VODAFONE
- ORANGE
- YOIGO (GRUPO MÁSMÓVIL)



Figura 1.2: Principales operadores de red móvil en España (abril, 2020) [W4]

La primera operadora en ofrecer servicios móviles fue Telefónica, a través de TeleMovi. Posteriormente, se unieron a ella Airtel (hoy en día Vodafone) y Amena (Orange).

La evolución en nuestro territorio ha sido similar a la evolución general de las redes móviles y en 2019, el número de móviles existentes era superior a la población de nuestro país.

En el gráfico de la figura 1.2, podemos observar el porcentaje de hogares equipados con teléfono móvil en España y su evolución desde 2005 hasta 2019.

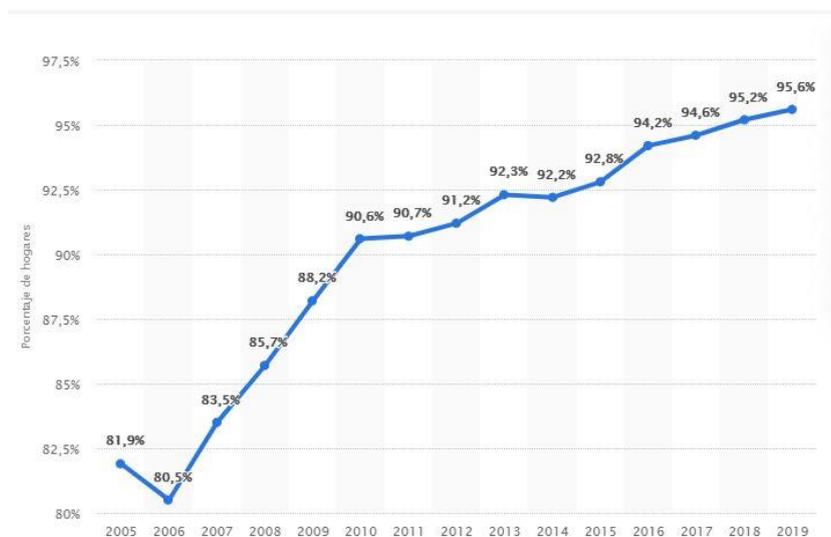


Figura 1.3: Porcentaje de hogares equipados con teléfono móvil en España de 2005 a 2019 (abril, 2020) [W5]

De igual forma, en la figura 1.3 es posible analizar la evolución de líneas móviles (en miles) desde 2000 hasta 2013:

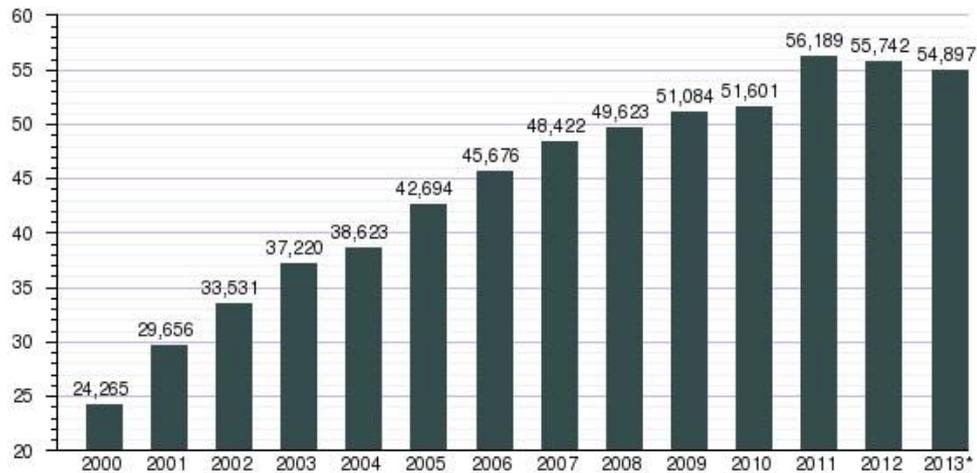


Figura 1.4: Evolución de las líneas móviles en España (en miles) 2000-2013 (abril, 2020) [W6]

Si evaluamos la facturación (en miles de millones de euros), se observa en la figura 1.4 que creció de forma continua hasta el año 2008, a partir del cuál se produjo un prolongado descenso (debido en parte a la crisis que sufrió nuestro país), recuperándose en el año 2015:

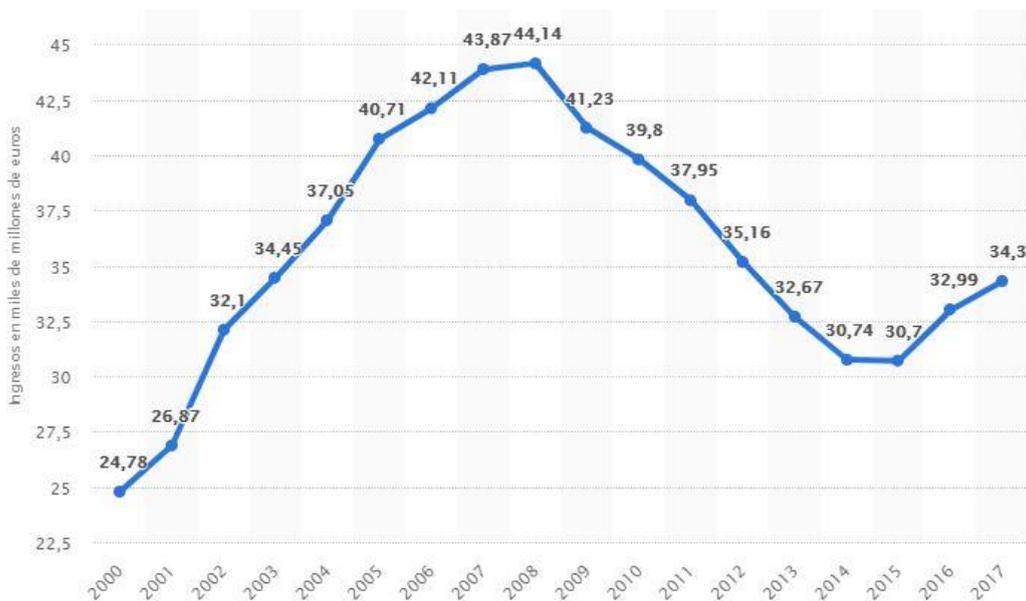


Figura 1.5: Evolución de la facturación entre los años 2000-2017 (abril, 2020) [W7]

1.1. Motivación del proyecto

El principal motivo a la hora de realizar un trabajo de fin de grado sobre esta temática, consiste en aunar la parte laboral de mi trabajo actual (realización de estudios de carga para estaciones base de telefonía) con la parte teórica desarrollada en asignaturas como Resistencia de Materiales o Estructuras.

1.2. Objetivos

Los principales objetivos del presente proyecto son los siguientes:

- Exponer de forma breve e informativa el funcionamiento del sector de las telecomunicaciones referido a las redes móviles.
- Mostrar el proceso laboral que implica realizar un estudio de viabilidad estructural cuando un operador lo solicita para cualquiera de sus estaciones base.
- Comprobar que para la nueva solución de radio que propone el cliente (en éste caso sustituir 2 de las antenas existentes por otras 2 nuevas) el mástil seguira cumpliendo y no cederá.
- Aprender el funcionamiento básico del programa informático Sap2000 y comparar sus resultados con CYPE, otro software utilizado para análisis de estructuras.

1.3. Software

Nos apoyaremos en los software informáticos Sap2000 y CYPE. Se trata de programas de elementos finitos que permiten modelar, dimensionar y analizar multitud de problemas relacionados con ingeniería de estructuras.

Los hemos elegido debido a la gran versatilidad que ofrecen, pudiendo modelar tanto en 3D como en 2D estructuras como pueden ser puentes, edificios, estadios, etc.

En nuestro caso, analizaremos un mástil genérico típico de las estructuras de telefonía móvil y comprobaremos su estado tensional bajo un determinado estado de cargas.

1.4. Estructura de la memoria

Este trabajo está dividido en 7 capítulos bien diferenciados y correlativos:

- Capítulo 1: En este capítulo haremos una pequeña introducción general con datos referentes a las tecnologías móviles.
- Capítulo 2: Se explicará brevemente el fundamento teórico de las redes móviles.
- Capítulo 3: Se relatarán las distintas partes que componen una estación base de telefonía.
- Capítulo 4: Mediante información y datos obtenidos de un proyecto real, se expondrán los diferentes equipos y antenas instaladas en el mástil.
- Capítulo 5: Explicaremos las bases teóricas de cálculo y los pasos fundamentales que hemos llevado a cabo mediante Sap2000 y CYPE para modelar la estructura y calcular los estados tensionales para su posterior comparación.
- Capítulo 6: Expondremos las conclusiones a las que hemos llegado a través de toda la información y cálculos realizados en el trabajo.
- Capítulo 7: Tendremos en cuenta ciertas consideraciones adicionales tales como el aspecto económico, el aspecto ambiental o la seguridad.

Capítulo 2: Fundamentos básicos de la red móvil.

La red móvil emplea para sus comunicaciones ondas electromagnéticas que se ubican dentro del espectro radioeléctrico representado en la figura 2.1 (al igual que la TDT, la radio AM, FM, la comunicación satelital, etc).

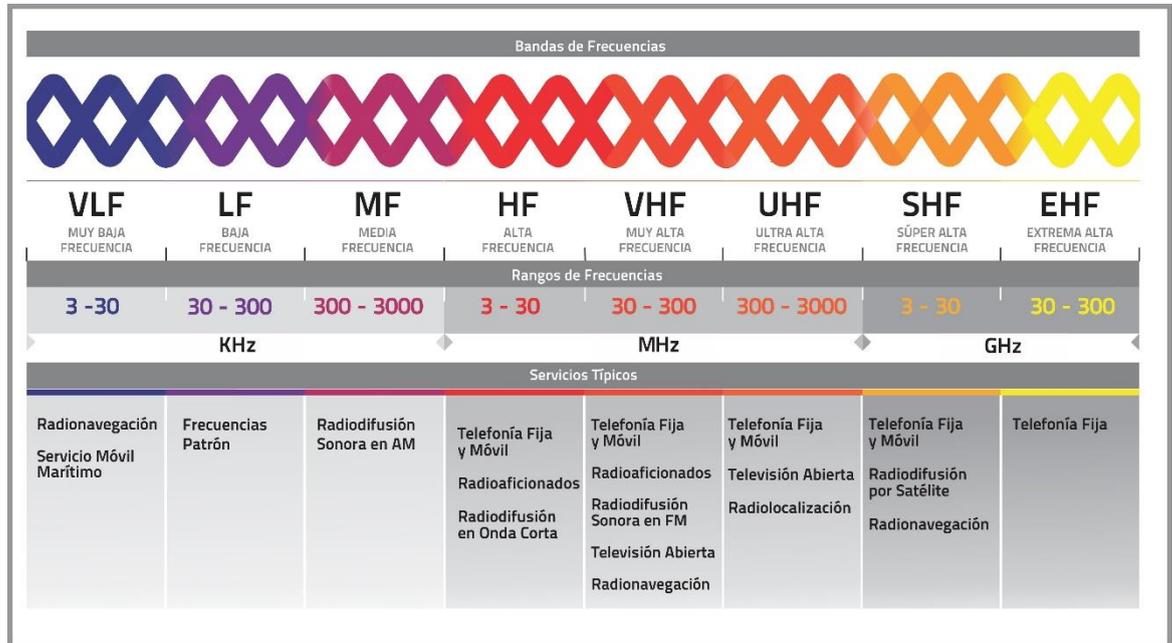


Figura 2.1: Espectro radioeléctrico (abril, 2020) [W8]

Como bien se explica en la propia página web de Orange (abril, 2020) [W9], éste tipo de redes operan en la zona UHF (ultra alta frecuencia), entre las frecuencias de 700 MHz y 3600 MHz.

En esencia, un teléfono móvil es un transceptor que recibe y envía ondas electromagnéticas de radiofrecuencia. El terminal modula las ondas sonoras o de datos en ondas electromagnéticas que viajan a través del aire, siendo recibidas y reenviadas hasta el destinatario del mensaje mediante una o más antenas. Una vez alcanzan el teléfono del destinatario, son demoduladas y éste recupera la información enviada por el transmisor.

Para que la comunicación sea efectiva, el usuario móvil debe estar en el área de alcance de una antena. Ésta tiene un alcance limitado y cubre una pequeña área alrededor llamada “celda” (de ahí el nombre de “red de celdas” o “red celular” utilizado a menudo para designar las redes móviles). Para cubrir el máximo territorio y garantizar que los usuarios puedan siempre llamar, los operadores despliegan miles de celdas, cada una equipada con su estación base.

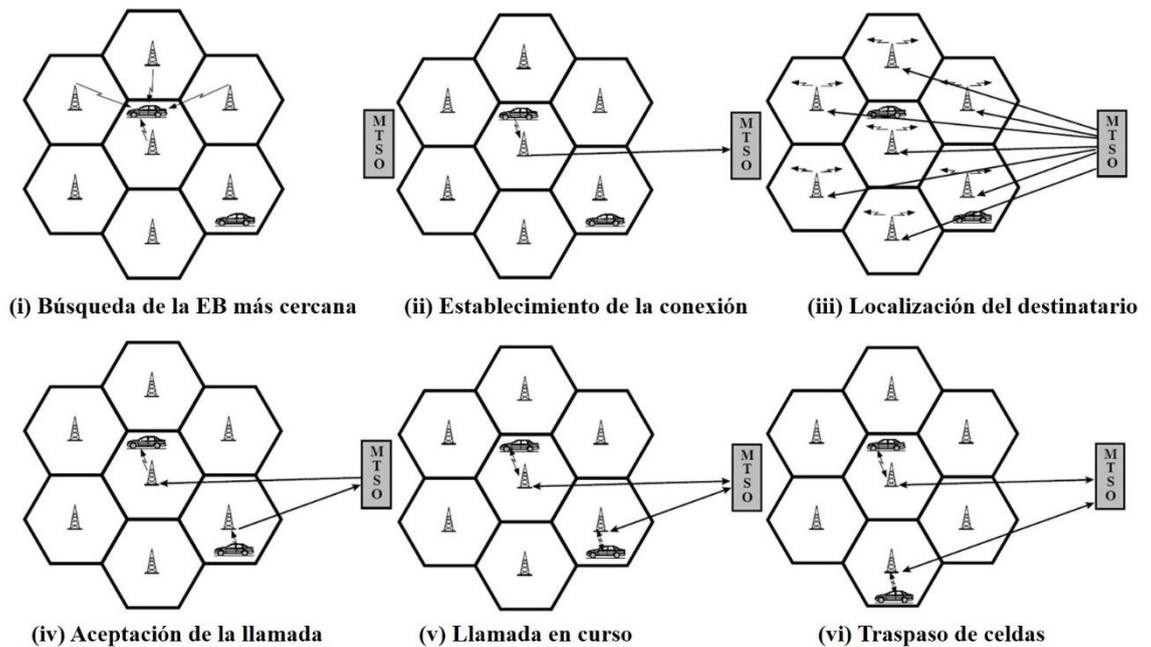


Figura 2.2: Red celular (abril, 2020) [W10]

La red celular ideal mostrada en los libros tiene celdas hexagonales, similares las representadas en la figura 2.2. En la práctica, la cobertura de la celda varía considerablemente dependiendo del terreno, la ubicación de la antena, las construcciones que pudieran interferir, los puntos de medición o las barreras.

El tamaño de las celdas también depende de muchos factores como el tipo de antenas utilizado, el terreno (llanuras, montañas, valles, etc.), la ubicación de la instalación (área rural, urbana, etc.), la densidad de población, etc

En la figura 2.3 están representados los 2 tipos de estaciones (rural y urbana) que podemos encontrar.



Figura 2.3: Tipos de estaciones base (Rural/Urbana)

Una estación base tiene una capacidad de transmisión limitada y sólo puede gestionar simultáneamente un determinado número de llamadas.

Por ello, en las zonas urbanas con alta densidad de población y un número importante de comunicaciones, las celdas tienden a ser numerosas y pequeñas (a cientos o incluso a sólo unas decenas de metros de distancia).

En las zonas rurales con menor densidad de población, el tamaño de las celdas es mucho mayor (hasta varios kilómetros).

En cuanto a las frecuencias, se utilizan las bandas bajas (800 MHz – 900 MHz) para las zonas rurales, ya que tienen mayor longitud de onda y mayor capacidad de penetración (lo que implica mayor cobertura), mientras que las bandas altas (1800MHz – 2100MHz – 2600MHz) se utilizan en zonas urbanas, al ser capaces de soportar una mayor cantidad de dispositivos.

Capítulo 3: Estación base y su estructura

3.1. Introducción

Una estación base consta de varias partes bien diferenciadas y basadas en distintas ramas de la Ingeniería.

Tales ramas serán la ingeniería de estructuras (que realiza los proyectos de instalación, los estudios de cargas, la instalación de torres, mastiles, etc) la ingeniería eléctrica (que se encarga de realizar los proyectos y diseños de instalación de los cuadros eléctricos, equipos rectificadores, etc) y la ingeniería de telecomunicaciones que, en última instancia, se sustenta en las demás para poder cumplir su objetivo.

3.2. Infraestructura

3.2.1. Elementos que componen la estación base

Cada nodo tiene distintas partes que lo conforman, cumpliendo cada una de ellas una función:

- **Terreno**

Parece una obviedad, pero nos sirve para diferenciar los 2 tipos de estaciones que existen; rurales y urbanas.

Mientras que en un emplazamiento rural el terreno puede ser propiedad de un particular (una finca, la azotea de una vivienda unifamiliar) o pública (un depósito de agua, terrenos de un ayuntamiento) en función de donde el operador desee situar la estación, los emplazamiento urbanos se ubican siempre en azoteas (comunidades de viviendas, hoteles, etc) ya que interesa conseguir la mayor cobertura posible.

La figura 3.1 nos muestra un emplazamiento rural, mientras que la figura 3.2 muestra la morfología de un emplazamiento urbano.

ESTUDIO DE VIABILIDAD ESTRUCTURAL EN MÁSTIL DE TELECOMUNICACIONES Y ANÁLISIS MEDIANTE SOFTWARE



Figura 3.1: Emplazamiento rural



Figura 3.2: Emplazamiento urbano

- **Caseta**

En la mayoría de los casos (aunque hay excepciones en las que se emplean equipos de exterior) la caseta alberga gran parte del equipamiento de la estación.

Suele ser prefabricada (de fibra de vidrio) y similar a la que se muestra en la figura 3.3, aunque también puede ser de hormigón.

Se clasifica en función del número de “huellas” (espacio de 60x60 cm) de las que dispone. Por ejemplo, una caseta con 5 huellas a cada lado, se denominará EB5, una con 7 huellas, EB7, etc.



Figura 3.3: Caseta

Dentro de ella, se encuentran los equipos básicos para el funcionamiento de la estación:

Cuadro eléctrico

Hasta él llega la acometida eléctrica (trifásica o monofásica) que será de un tipo u otro en función de la negociación del operador con la propiedad. Se suele denominar CGBT (cuadro general de baja tensión).

Funciona con corriente alterna y desde él se alimentan los distintos equipos de la estación (radio, transmisión, alimentación), las alarmas, el aire acondicionado, las balizas, etc...

En la figura 3.4 podemos diferenciar un cuadro eléctrico de interior de uno de exterior.



Figura 3.4: Cuadro eléctrico

Equipo de fuerza

Se trata del equipo que convierte la corriente alterna (+220V) a corriente continua (-48V), mediante la cuál se alimentan todos los equipos. Dispone de varios rectificadores en función de la necesidad de la alimentación. Suelen ser de entre 2000W y 3500W.

Dentro de él se encuentran los disyuntores de continua y en su parte inferior las baterías que alimentarían la estación en caso de fallo en la red eléctrica.

En la figura 3.5 podemos observar tanto la parte de rectificadores y baterías (izquierda) cómo la parte que contiene los disyuntores (derecha).



Figura 3.5: Equipo de fuerza

Equipo de transmisión

Podemos ver un ejemplo en la figura 3.6.

Se trata del equipo que realiza la comunicación entre estaciones base, ya sea mediante radioenlaces (parábolas) o mediante fibra óptica. Suele estar ubicado en un rack de 19" y se alimenta desde el equipo de fuerza.



Figura 3.6: Equipo de transmisión

Equipos de radio:

Son equipos proporcionados por el cliente y se componen de bastidores sobre los que van instalados los equipos que se encargan de la transmisión de radio (controladoras y radios remotas). Se alimentan directamente en corriente continua desde el equipo de fuerza.

El ejemplo de la figura 3.7 muestra un equipo de interior (instalado en caseta) en el que se pueden observar tanto las controladoras como los equipos de radio.



Figura 3.7: Equipos de radio

- Torre

En el caso de los emplazamientos rurales, para poder radiar y dar cobertura, es necesario ubicar las antenas a una altura considerable. La forma de conseguirlo es mediante torres de celosía (figura 3.8) o tubulares (figura 3.9). La estructura dispondrá de un sistema de seguridad obligatorio (línea de vida o raíl) que deberá ser revisado periódicamente.

En la torre se instalan las antenas (que suelen ir en la parte superior), los equipos de radio remotos y los radioenlaces de comunicación.



Figura 3.8: Torre de celosía



Figura 3.9: Torre tubular

- **Mástil**

Se trata del caso que estudiaremos. Se emplean en los emplazamientos urbanos ya que, aunque los propios edificios proporcionan altura suficiente para radiar, los mástiles generan la altura adicional necesaria para salvar las cornisas de los edificios (hay una normativa al respecto) y permiten ubicar las antenas (en algunos casos, también los equipos). Se diseñan a medida en función de las necesidades que tengamos.

Para anclar el mástil al edificio se utilizan riostras, bancadas autoportadas, anclajes a pared, etc.

- Mástil anclado a dado de hormigón (figura 3.10):



Figura 3.10: Mástil anclado a dado de hormigón

- Mástil anclado a casetón (figura 3.11):



Figura 3.11: Mástil anclado a casetón

Capítulo 4. Caso real. Presentación y análisis previo

A continuación, presentaremos el caso que nos ocupa en éste documento, explicando las partes que lo componen y los equipos que serán responsables de las tensiones que se generen sobre la estructura del mismo.

4.1 Presentación

En cuanto a su base, nuestro mástil tubular estará anclado mediante 2 planchas y 4 pernos a un perfil en doble T sobre la azotea del edificio. Es una solución muy empleada ya que es menos aparatosa que una bancada autosoportada y para emplazamientos cómo el que nos ocupa, en el que el espacio es limitado, es ideal.

En las figuras 4.1 y 4.2 se puede observar la parte superior del mástil y los equipos (tanto antenas como rrus) que soporta.

La figura 4.3 muestra el detalle del anclaje del mástil a la azotea.

La principal preocupación a la hora de realizar nuestro estudio, será que las fuerzas transmitidas al punto de anclaje provoquen la rotura de los pernos. Tendremos por tanto que analizar detenidamente los resultados para cerciorarnos de que no se produce dicha rotura.

En cuanto a las partes que lo componen, tenemos el propio mástil, los perfiles que unen dicho mástil con los 5 tubos (cuya sección tiene forma de U y están anclados mediante abrazaderas) y los 5 tubos que soportan los equipos.



Figura 4.1: Parte superior del mástil (1)



Figura 4.2: Parte superior del mástil (2)



Figura 4.3: Anclaje

4.1.1 Elementos que componen la estructura

Todos los elementos que componen la estructura (mástil, anclajes, perfiles y tubos) son de acero S275, cuyas características mecánicas muestra la figura 4.4:

Límite elástico mínimo y Resistencia a tracción (N/mm ²)				
Tipo	Espesor nominal de la pieza, t (mm)			
	t ≤ 40		40 < t ≤ 80	
	Límite elástico, <i>f_y</i>	Resistencia a tracción, <i>f_u</i>	Límite elástico, <i>f_y</i>	Resistencia a tracción, <i>f_u</i>
S 235	235	360 < <i>f_u</i> < 510	215	360 < <i>f_u</i> < 510
S 275	275	430 < <i>f_u</i> < 580	255	410 < <i>f_u</i> < 560
S 355	355	490 < <i>f_u</i> < 680	335	470 < <i>f_u</i> < 630

Figura 4.4: Características del acero S275

- **Mástil**

Se trata de la base. Recibe todas las tensiones y las transmite al anclaje.

Generalmente se fabrican a medida dependiendo de las necesidades ya que por ley, las antenas deben estar a una altura mínima respecto del suelo. Habrá azoteas en las que con 3 m tengamos suficiente, mientras que en otras, un poco mas “complejas” o con mas obstáculos, necesitaremos 6 m.

Nuestro mástil tiene las siguientes características (figura 4.5):

- ◆ Longitud: 4 m
- ◆ Diámetro: 140 mm
- ◆ Espesor: 6 mm

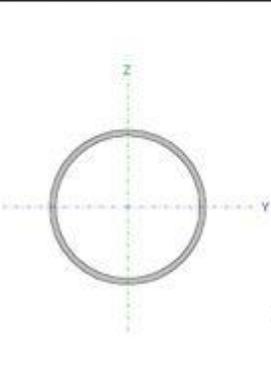
Perfil: TC 140x6 Material: Acero (S275)				
	Características mecánicas			
	Área (cm ²)	$I_{yy}^{(1)}$ (cm ⁴)	$I_{zz}^{(1)}$ (cm ⁴)	$I_{tt}^{(2)}$ (cm ⁴)
	25.26	568.06	568.06	1136.12

Figura 4.5: Características mástil

- Tubos

Están unidos al mástil mediante perfiles. En nuestro caso tenemos 5; el primero sujetará el radioenlace (parábola), 2 de ellos soportarán el peso de una antena cada uno y los 2 restantes soportarán el peso de una antena y una radio remota.

Los equipos están anclados a ellos mediante herrajes propios que proporciona el cliente. Podemos ver en las figuras 4.6 y 4.7 que dichos herrajes son similares a las abrazaderas comunes.



Figura 4.6: Detalle anclaje antenas



Figura 4.7: Detalle anclaje radio remota

El tubo que sujeta el radioenlace tiene una longitud de 60 cm. Los 2 tubos que soportan una antena y una radio remota (RRU) tienen una longitud de 2 m. Los que soportan únicamente una antena tienen una longitud de 3 m siendo esta de mayor longitud.

Las características mecánicas de los tubos son las siguientes (figura 4.8):

- ◆ Diámetro: 60 mm
- ◆ Espesor: 2 mm

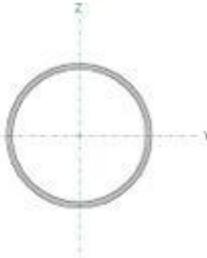
Perfil: TC 60x2				
Material: Acero (S275)				
	Características mecánicas			
	Área (cm ²)	$I_{yy}^{(1)}$ (cm ⁴)	$I_{zz}^{(1)}$ (cm ⁴)	$I_{yy}^{(2)}$ (cm ⁴)
	3,65	15.34	15.34	30.68

Figura 4.8: Características tubos

- **Perfiles**

Son los encargados de realizar la unión entre el mástil central y los tubos que soportan las antenas y los equipos. Están anclados tanto al primero cómo a los segundos a través de abrazaderas. Se cortan a medida en función de la longitud necesaria.

Se utilizan diferentes tipos de sección, siendo en nuestro caso perfiles en U de 50x4x20x4 mm.

En las figuras 4.9, 4.10 y 4.11 podemos apreciar los anclajes tanto a los tubos cómo al mástil, además de las características mecánicas del perfil:

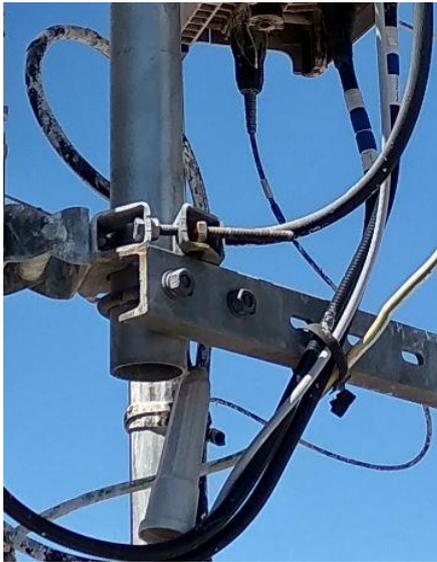


Figura 4.9: Detalle anclaje a tubo



Figura 4.10: Detalle anclaje a mastil

Perfil: CS 50x4x20x4 Material: Acero (S275)						
	Características mecánicas					
	Área (cm ²)	$I_{y_{c}^{(1)}}$ (cm ⁴)	$I_{z_{c}^{(1)}}$ (cm ⁴)	$I_{y_{e}^{(2)}}$ (cm ⁴)	$y_{g_{c}^{(3)}}$ (mm)	$z_{g_{c}^{(3)}}$ (mm)
	3.28	10.95	1.08	0.17	-4.10	0.00

Figura 4.11: Características mecánicas perfiles

- **Herrajes**

Como hemos comentado anteriormente, son los encargados de realizar las uniones entre tubos, mástil, antenas, etc.

Es necesario que tengan el tamaño y la resistencia suficientes para soportar en primer lugar el peso de los distintos elementos y, en segundo lugar, las tensiones y fuerzas que actúan sobre ellos.

4.2 Equipos

En este apartado introduciremos los distintos equipos que emplean el mástil como soporte para realizar sus funciones.

Dichas funciones son realizar la comunicación de emisión y recepción con los dispositivos móviles (antenas), transmitir la información entre antenas y controladoras (equipos de radio remotas) o comunicar estaciones base (radioenlaces o parábolas).

Las tensiones que se transmiten a la estructura se deben al llamado coloquialmente “efecto vela”, que se produce al incidir el viento perpendicularmente sobre la superficie de los distintos elementos.

Este efecto será mayor cuanto mayor sea la superficie sobre la que incide, por lo que los elementos más preocupantes serán las antenas (cuyas superficies son mucho mayores).

Nuestro mástil (figura 4.12) soportará los siguientes equipos:

- ◆ 2 antenas modelo KATHREIN 80010991RI (nueva antena que instalaremos en sustitución de las actuales) (1)
- ◆ 2 antenas modelo KATHREIN 80010621 (2)
- ◆ 2 radios remotas modelo RRU 12 (3)
- ◆ 1 radioenlace de comunicación entre estaciones de 60 cm de diámetro (Ø60) (4)



Figura 4.12: Equipos

- Antena KATHREIN 80010991RI

Sus características generales se muestran en la figura 4.13.

Los esfuerzos serán producidos principalmente por la cara frontal de mayores dimensiones (1999x508 mm), influyendo en menor medida la cara lateral (1999x175 mm)

- ◆ Peso: 50.8 Kg (incluidos los anclajes)
- ◆ Dimensiones: 1999x508x175 mm

KATHREIN						
12-Port Antenna	R1	R2	Y1	Y2	Y3	Y4
Frequency Range	698-960	698-960	1695-2690	1695-2690	1695-2690	1695-2690
Dual Polarization	X	X	X	X	X	X
HPBW	65°	65°	65°	65°	65°	65°
Adjust. Electr. DT	2°-12°	2°-12°	2°-14°	2°-14°	2°-14°	2°-14°

Mechanical specifications		
Input	12 x 4.3-10 female	
Connector Position	bottom	
Adjustment Mechanism	FlexRET, continuously adjustable	
Wind load (at Rated Wind Speed: 150 km/h) (93 mph)	N lbf	Frontal: 1130 254 Maximal: 1140 256 Lateral: 200 45
EPA (m² ft²)	Front: 1.041 11.21 Lateral: .183 1.97	
Max. Wind Velocity	km/h mph	241 150
Height / Width / Depth	mm inches	1999 / 508 / 175 78.7 / 20.0 / 6.9
Category of Mounting Hardware	XH (X-Heavy)	
Weight	kg lb	45.8 / 50.8 (clamps incl.) 100.9 / 111.9 (clamps incl.)
Packing Size	mm inches	2200 / 542 / 268 86.6 / 21.3 / 10.6
Scope of Supply	Panel and 2 units of clamps for 55-115 mm 2.2-4.5 inches diameter	



Figura 4.13: Características antena 80010991RI

- **Antena KATHREIN 80010621**

Sus características generales se muestran en la figura 4.14.

Se trata de una antena bastante más pequeña que la anterior, por lo que el efecto del viento sobre ella será menor:

- ◆ Peso: 8.5 Kg (incluidos los anclajes)
- ◆ Dimensiones: 1452x154x70 mm

2-Port Antenna		Y1	
Frequency Range		1710-2690	
Dual Polarization		X	
HPBW		65°	
Adjust. Electr. DT		2°-14°	
Enhanced Sidelobe Suppression		18dB	
Downtilt set by hand or by optional RCU (Remote Control Unit)			
KATHREIN			
			
Mechanical specifications			
Input		2 x 7-16 female	
Connector position		Bottom	
Adjustment mechanism		1x, Position bottom continuously adjustable	
Wind load (at Rated Wind Speed: 150 km/h)	N lbf	Frontal:	250 57
		Maximal:	275 62
Max. wind velocity	km/h mph	200 124	
Height/width/depth	mm inches	1452 / 154 / 70 57.2 / 6.0 / 2.8	
Category of mounting hardware		M (Medium)	
Weight	kg lb	6.5 / 8.5 (clamps incl.) 4.3 / 18.7 (clamps incl.)	
Packing size	mm inches	1725 x 172 x 92 7.9 x 6.8 x 3.6	
Scope of supply		Panel and 2 units of clamps for 42-115 mm 1.7-4.5 inches diameter	

Figura 4.14: Características antena 80010621

- **RRU12**

Sus características generales se muestran en la figura 4.15.

Es el elemento que menos influye sobre el mástil junto al radioenlace, al ser sus dimensiones menores.

- ◆ Peso: 26,3 Kg (incluida la cubierta solar)
- ◆ Dimensiones: 518x470x187 mm

RRUS 12	
Unidad	Dimensión
Altura	518 mm
Anchura	470 mm
Profundidad	187 mm
Peso (cubierta solar incluida)	RRUS 12: 26.3 Kg RRUS 13: 22.4 Kg



Figura 4.15: Características RRU12

- **Radioenlace (parábola de 60cm de diámetro)**

Se trata del equipo más pequeño de los 4. La figura 4.16 muestra su morfología. Hay mucha diferencia entre su parte circular frontal (la de mayor incidencia) y su parte lateral en cuanto al efecto que produce sobre el mástil.

- ◆ Peso: 15 Kg
- ◆ Dimensiones: Ø60 cm



Figura 4.16: Parábola

Capítulo 5. Hipótesis, modelado y cálculo

5.1 Hipótesis y cálculos previos

Pasaremos ahora a introducir las distintas hipótesis que hemos tenido en cuenta para realizar todo el proceso de cálculo, así como los pasos que hemos seguido para modelar la estructura y obtener los resultados.

Dichas hipótesis se emplean generalmente para el cálculo estructural en el terreno laboral y tienen en cuenta pesos adicionales, cargas accidentales, cargas de viento, etc.

En cuanto al modelado, emplearemos 2 programas de software (CYPE y SAP 2000) ampliamente usados a nivel de diseño de estructuras en el ámbito de la construcción, siendo una herramienta fundamental ya que disponen de una gran precisión.

Actualmente, el mástil es capaz de soportar las exigencias que provocan los distintos elementos, pero tendremos que comprobar que para la nueva solución de radio que propone el cliente (sustituir 2 de las antenas instaladas actualmente por otras 2 nuevas) seguirá cumpliendo y no cederá. Podremos afirmar entonces que el cambio de antenas es viable.

HIPÓTESIS Y CONDICIONES:

CONDICIÓN DE DEFORMACIONES:

El ángulo que forma la deformada de la estructura sometida a las cargas de diseño con el tubo en posición de reposo debe tener el valor máximo de deformación de 1° para una velocidad de viento de 150 Km./h, con la carga repartida de antenas. Si el mástil debe soportar parábolas de transmisión, este ángulo se reduce a $0,6^\circ$.

CONDICIÓN DE ROTURA:

En el estado límite de rotura se debe verificar que dentro del diagrama tensión deformación de los materiales no se debe producir deformación permanente ni sobrepasar las tensiones admisibles. En el dimensionamiento se establecen las siguientes cargas eólicas:

ESTUDIO DE VIABILIDAD ESTRUCTURAL EN MÁSTIL DE TELECOMUNICACIONES Y ANÁLISIS MEDIANTE SOFTWARE

H (m)	v/viento (Km/h)	q (Kg/m ²)
0-10	102	50
11-30	125	75
>30	144	100

Siendo “H” la cota de coronación de la estructura soporte de antenas sobre el nivel del suelo del edificio en que está colocada y “q” es la carga eólica aplicada sobre la estructura.

La superficie de carga de los elementos en el mástil a considerar es la que corresponde a los siguientes elementos (ya documentados anteriormente):

- 2 Antenas KATHREIN 80010991RI (nueva antena propuesta en sustitución de K80010291V02)
- 2 Antenas KATHREIN K-80010621
- 2 RRU 12
- 1 MLK de Ø60 cm

Se establecen los siguientes coeficientes de ponderación de las cargas y minoración de las resistencias de los materiales para el caso de las estructuras metálicas según el Documento Básico DB-SE-A, Seguridad estructural. Acero, del Código Técnico de Edificación CTE, de Marzo de 2006.

Para los elementos de unión tubo edificio, la base del tubo se dimensionará de acuerdo a los siguientes criterios:

- Coeficiente de mayoración de las cargas: 1.5
- Coeficiente de minoración del acero: 1.2
- Coeficiente de minoración del hormigón: 1.7

CÁLCULOS PREVIOS:

La transmisión de cargas de las antenas al mástil metálico se realiza a las barras sobre las que apoya por la compatibilidad de deformaciones de las antenas al mástil.

Realizaremos los calculos previos para determinar que cargas afectan a nuestra estructura, las cuales desglosaremos más adelante, y explicaremos en que dirección están aplicadas y cual es su valor.

MÉTODO DE CÁLCULO DEL ACERO LAMINADO:

Se dimensionan los elementos metálicos de acuerdo al Código Técnico de Edificación, en el Documento Básico DB-SE A (acero) y el Documento Básico DB SE AE (acciones en la edificación), determinándose las tensiones y deformaciones, así como la estabilidad de acuerdo a los principios de la Mecánica Racional y la Resistencia de Materiales.

Se realiza un cálculo lineal de primer orden, admitiéndose localmente plastificaciones de acuerdo a lo indicado en la norma.

La estructura se supone sometida a las acciones exteriores, mayorándose para la obtención de las tensiones y comprobación de secciones, y sin mayorar para la comprobación de deformaciones, de acuerdo con los límites de agotamiento de tensiones y límites de flechas establecidos.

Para el cálculo de los elementos comprimidos se tiene en cuenta el pandeo por compresión, y para los flectados el pandeo lateral, de acuerdo a las indicaciones de esta norma.

La transmisión de cargas de las antenas al mástil metálico se realiza a las barras sobre las que apoya por la compatibilidad de deformaciones de las antenas al mástil.

CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES A UTILIZAR:

ACEROS LAMINADOS:

Especificaciones para toda la obra (acero en perfiles laminados, conformados y chapas)	
Clase y designación	S-275
Límite elástico (N/mm ²)	275

UNIONES ENTRE ELEMENTOS:

Especificaciones para toda la obra (Tornillos de alta resistencia)	
Designación	8.8 Acero A10t

LÍMITES DE DEFORMACIÓN:

El cálculo de deformaciones es un cálculo de estados límites de utilización con las cargas de servicio, por lo tanto se utilizan como coeficiente de mayoración de cargas el valor 1 y de minoración de resistencias el valor 1.

Para el cálculo de las flechas se ha tenido en cuenta tanto el proceso constructivo, como las condiciones ambientales, edad de puesta en carga, de acuerdo a unas condiciones habituales de la práctica constructiva en la edificación convencional.

La deformación máxima admisible para los mástiles es de 1° en punta para un viento de 150 Km/h. en mástil de antenas y de 0,6° para un mástil que soporte radioenlaces.

ACCIONES ADOPTADAS EN EL CÁLCULO:

◆ PESO PROPIO DE LOS PERFILES DE MÁSTIL Y ELEMENTOS DE MONTAJE:

El valor de los pesos propios de los perfiles se introduce automáticamente en el programa CYPE y se añade el peso propio de las antenas, los radioenlaces, equipos y la escalera, ya que el programa no los contempla por sí mismos.

En el caso de SAP, tendremos que introducirlos manualmente.

◆ SOBRECARGA DE USO:

Se establece una carga gravitatoria en la punta superior del mástil de valor 150 Kg (1470 N) como sobrecarga de uso para el mantenimiento de la antena

◆ SOBRECARGA ACCIDENTAL:

Según las condiciones de dimensionamiento se establece para las condiciones de rotura una carga accidental de 1000 Kg (9800 N) debida al impacto que generaría el uso del sistema anticáida en caso de accidente. Esta carga se dispondrá en el eje vertical del mástil, como una carga axial, también en la punta

◆ SOBRECARGA DE VIENTO:

Según las condiciones de dimensionamiento se establece para las condiciones de rotura una carga eólica de viento correspondiente a una velocidad de 150 Km/h que equivale a una carga de 108,5 Kg/m².

La carga de viento se traslada linealmente al fuste del mástil, sobre las antenas, sobre los diferentes equipos y sobre los cables. El valor de la carga se obtiene multiplicando la carga de viento obtenida por la superficie sobre la que actúa la carga de viento.

La estructura está calculada para soportar las cargas de viento consideradas en situación expuesta de 150 km/h, por lo que la carga a aplicar es la calculada a partir de multiplicar la carga de viento resultante de la velocidad de éste por las superficies de antenas, radio remota y radioenlace expuestas al viento.

Para realizar el cálculo, tendremos en cuenta la carga de viento, y la multiplicaremos por el ancho tanto de la superficie de la cara mayor, como de la cara menor.

VIENTO SOBRE LAS ANTENAS:

Estas cargas se aplican en la posición más desfavorable, la correspondiente a una carga distribuida uniformemente a lo largo de las antenas y del mástil, y a una carga puntual en el soporte del radioenlace. Para dar una mayor dimensión al cálculo, supondremos que el viento influye en 2 direcciones, cosa que es imposible en la realidad, pero que consideraremos como el caso mas desfavorable posible.

Para la antena más desfavorable (K-80010991RI) que es la que se propone instalar en sustitución de la actual, tendremos los siguientes resultados:

$$W_{\text{antena frontal}} = q \times L = 108,5 \times 0,508 = 55,12 \text{ Kg/m} \cdot 9.8 \text{ m/s}^2 = 540,15 \text{ N/m}$$

$$W_{\text{antena lateral}} = q \times L = 108,5 \times 0,175 = 18.98 \text{ Kg/m} \cdot 9.8 \text{ m/s}^2 = 186,077 \text{ N/m}$$

Para el segundo tipo de antena (K-80010621), obtenemos los siguientes resultados:

$$W_{\text{antena frontal}} = q \times L = 108,5 \times 0,154 = 16,7 \text{ Kg/m} \cdot 9.8 \text{ m/s}^2 = 163.74 \text{ N/m}$$

$$W_{\text{antena lateral}} = q \times L = 108,5 \times 0,07 = 7,57 \text{ Kg/m} \cdot 9.8 \text{ m/s}^2 = 74,43 \text{ N/m}$$

En cuanto al radioenlace, se considera una superficie expuesta al viento de $\pi \cdot r^2$ en la cara frontal y de $0,15 \times 2r$ en la cara lateral.

$$W_{tx \text{ frontal}} = q \times \pi r^2 = 108,5 \times \pi (0,30)^2 = 30,67 \text{ Kg} \cdot 9.8 \text{ m/s}^2 = 300 \text{ N}$$

$$W_{tx \text{ lateral}} = q \times 0,15 \times 2r = 108,5 \times (0,15 \times 0,60) = 9,76 \text{ Kg} \cdot 9.8 \text{ m/s}^2 = 95,69 \text{ N}$$

Por último, para las 2 RRU, se considera una superficie expuesta al viento de 470 mm en la cara frontal y de 187 mm en la cara lateral.

$$W_{RRU \text{ frontal}} = q \times L = 108,5 \times 0,470 = 50,99 \text{ Kg/m} \cdot 9.8 \text{ m/s}^2 = 499,7 \text{ N/m}$$

$$W_{RRU \text{ lateral}} = q \times L = 108,5 \times 0,187 = 20,29 \text{ Kg/m} \cdot 9.8 \text{ m/s}^2 = 198,7 \text{ N/m}$$

5.2 Modelado mediante CYPE Metal 3D

5.2.1 Fases del modelado

En este apartado procederemos a explicar las distintas fases de desarrollo de la estructura que hemos llevado a cabo mediante CYPE METAL 3D, explicando paso a paso cuál ha sido la senda seguida.

En primer lugar, se han tomado como base visitas previas al emplazamiento para desarrollar propuestas y tomar fotografías que sirven para hacernos una idea general y documentar el tipo de mástil. Dichas visitas se han realizado anualmente ya que las estaciones base cambian con el paso del tiempo y a medida que van implantándose y desarrollándose nuevas tecnologías.

En base a dichas fotografías y a las medidas de las distancias respecto al suelo, entre abrazaderas, distancias de perfiles, longitudes de tubos, etc, se ha realizado un croquis previo a mano alzada para utilizarlo como punto de partida.

Con los conceptos claros comenzamos a dibujar. Seleccionamos las normas (figura 5.1) por las cuáles se regirá nuestra estructura en función del material. Nos interesa especialmente la de los aceros, tanto laminados como conformados.

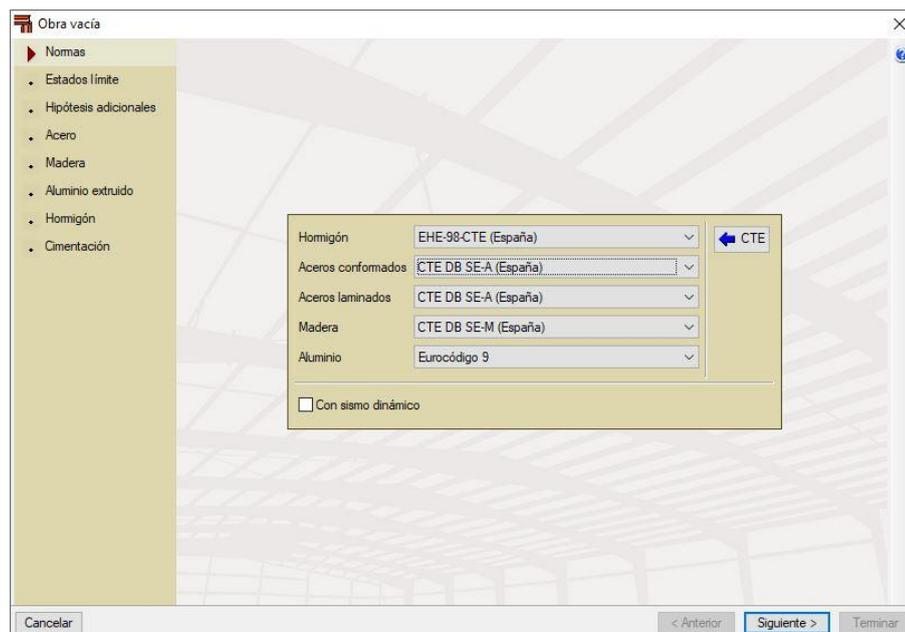


Figura 5.1: Selección de normas

A continuación, tendremos que seleccionar los estados límite (figura 5.2). En nuestro caso, al ser en Valladolid, no superamos los 1000 metros de altura, por lo que no tenemos en cuenta cargas de nieve:

- ◆ Control de la ejecución: Normal
- ◆ Cota de nieve: Altitud inferior o igual a 1000 m
- ◆ Nieve: Altitud inferior o igual a 1000 m

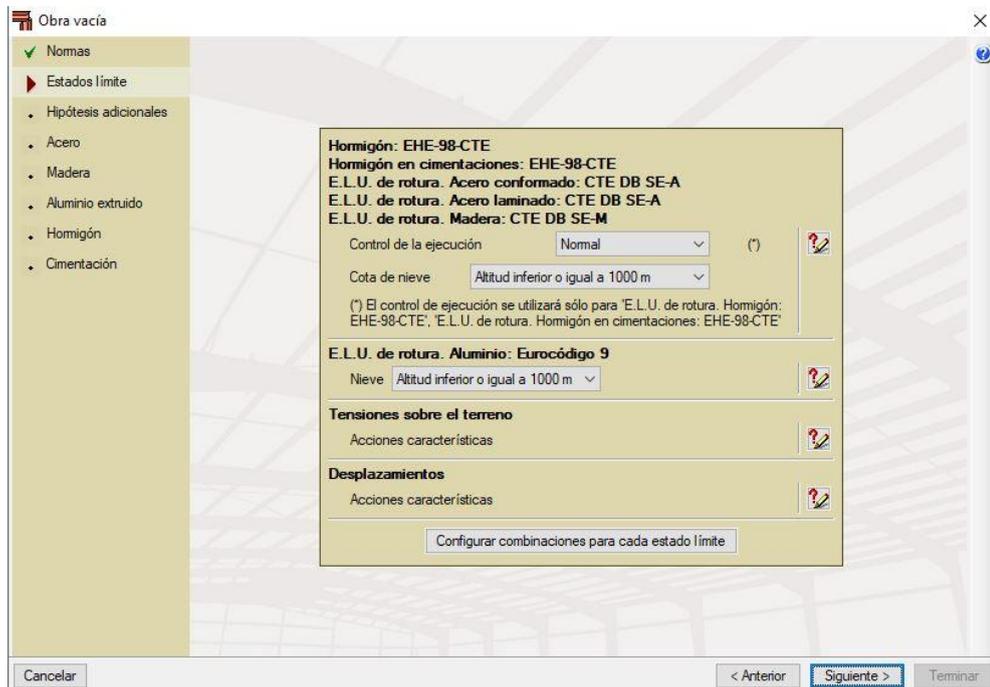


Figura 5.2: Estados límite

En el siguiente paso se nos pedirá seleccionar la categoría de uso, por lo que seleccionaremos la opción “Zonas residenciales” (figura 5.3). Añadiremos como cargas automáticas (permanentes) la sobrecarga accidental, la sobrecarga de uso y los pesos propios. Las cargas adicionales serán las debidas al viento.

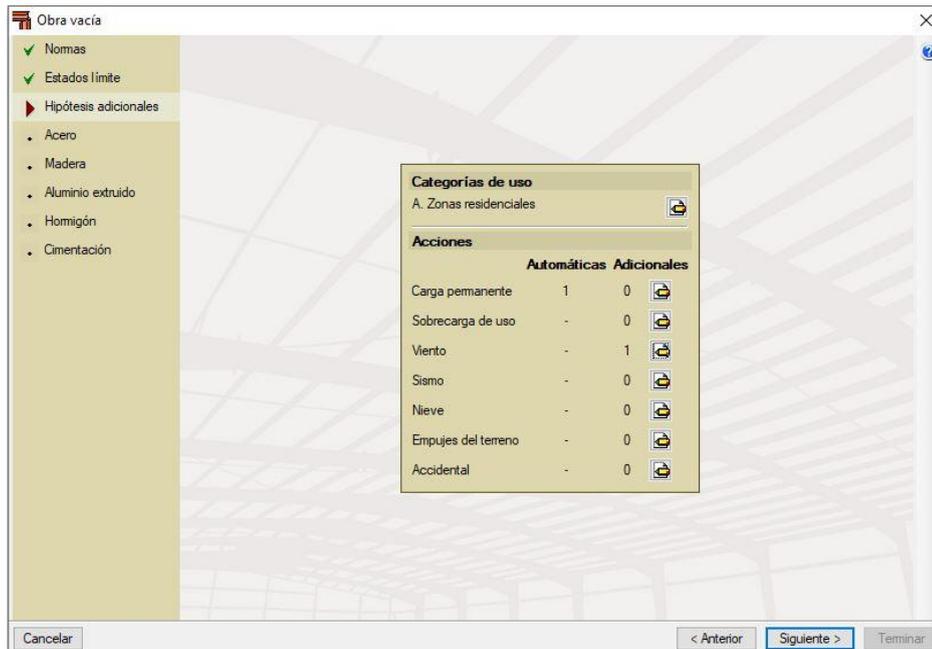


Figura 5.3: Acciones

Por último seleccionaremos el acero S275 (figura 5.4).

El resto de apartados (madera, aluminio, hormigón) no son de interés en nuestro caso, por lo que dejaremos las opciones predefinidas.

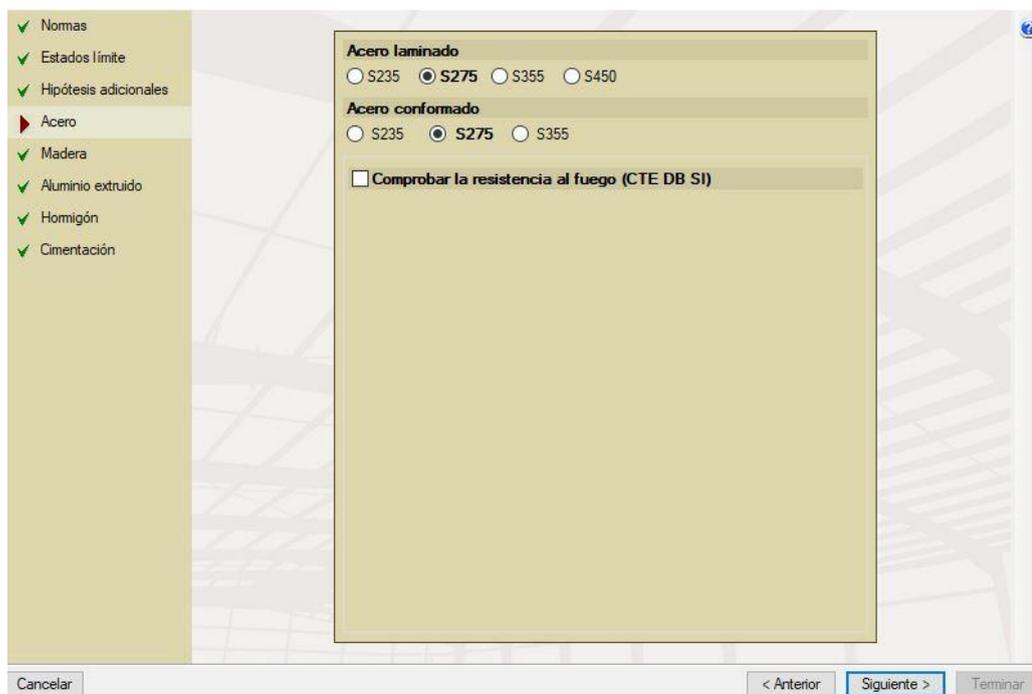


Figura 5.4: Tipo de acero

Una vez que hemos seleccionado las premisas, comenzamos a dibujar.

Diseñamos en primer lugar el mástil de 4 m de alto, ya que es la base de la estructura.

En función de las cotas tomadas en la visita y dibujadas en el croquis, dibujamos los nudos. A partir de ellos saldrán los perfiles que unen el mástil con los tubos exteriores.

El resultado se muestra en la figura 5.5.

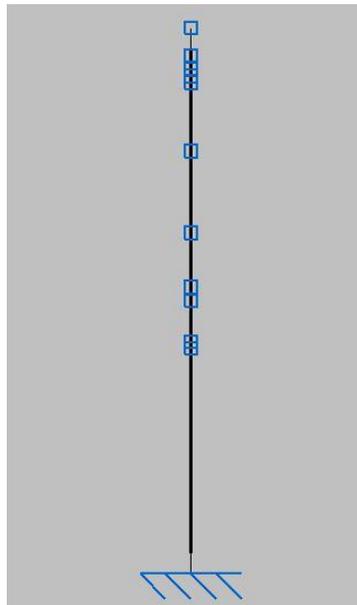


Figura 5.5: Nudos

A partir de aquí, iremos modelando barras ya que al seleccionar su dirección y longitud (0,3 m para los perfiles de los tubos que soportan antenas y 0,15 m para el que soporta el radioenlace), el programa genera los nudos automáticamente.

El resultado se muestra en la figura 5.6:

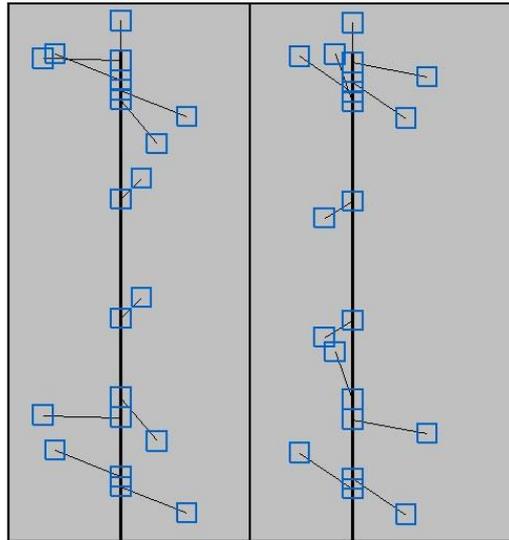


Figura 5.6: Perfiles

Como referencias utilizamos las líneas que el propio programa nos genera al ir dibujando los elementos, algo que simplifica el modelado (podemos ir uniendo barras en puntos ya determinados).

Para presentar las imagenes en éste document, se han ocultado porque dificultan bastante la visión a medida que se van acumulando en pantalla. La imagen real que tendríamos para la estructura dibujada hasta ahora se muestra en la figura 5.7:

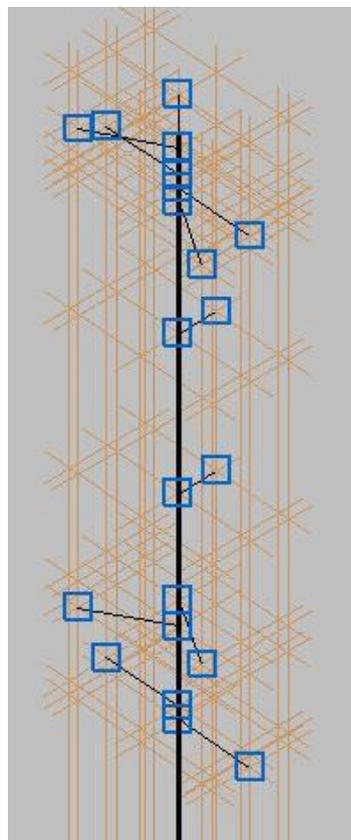


Figura 5.7: Referencias

Seguidamente pasaremos a dibujar los tubos exteriores.

Tendremos 4 tubos; 2 de ellos de 3 m, otros 2 que medirán 2 m, y por último el del radioenlace cuya longitud es de 0.8 m.

Como hemos comentado previamente, utilizaremos las líneas de referencia ya generadas por los nudos de los perfiles para guiarnos y poder modelar los tubos, de forma que al seleccionar un punto inicial, solo tengamos que introducir la longitud del tubo.

El resultado sería el que muestra la figura 5.8:

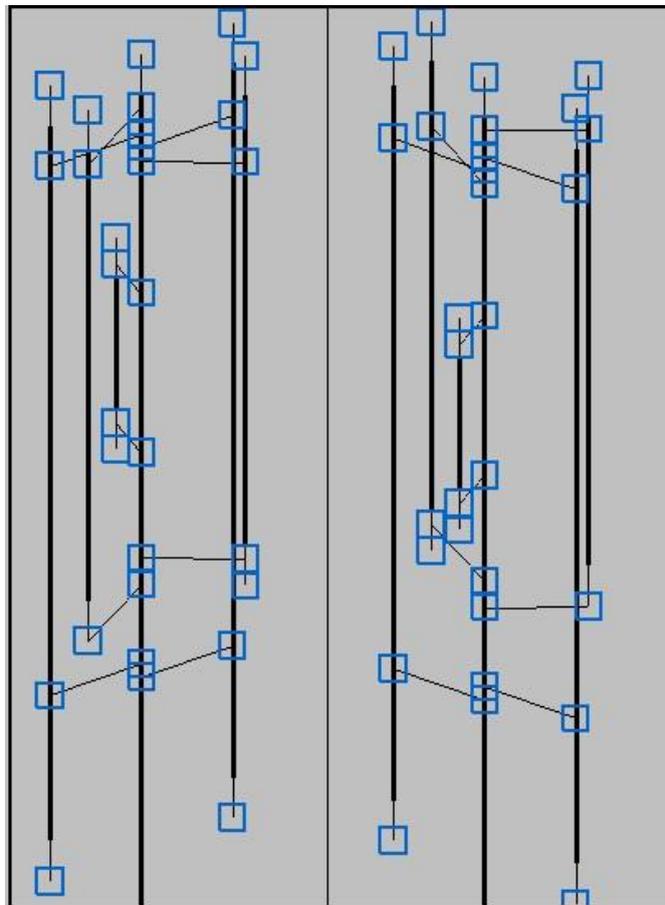


Figura 5.8: Modelado de tubos

Una vez que tenemos la base de la estructura dibujada, necesitaremos asignar los materiales a cada elemento, así como los distintos tipos de sección. De esta forma, el programa tendrá la base para realizar los cálculos posteriores.

Todos los elementos son de acero S275 como ya hemos mencionado anteriormente, lo que simplifica la operación.

Los más usados industrialmente vienen predefinidos con todas sus características y propiedades.

Mediante el comando “describir material”, añadimos el material (figura 5.9):

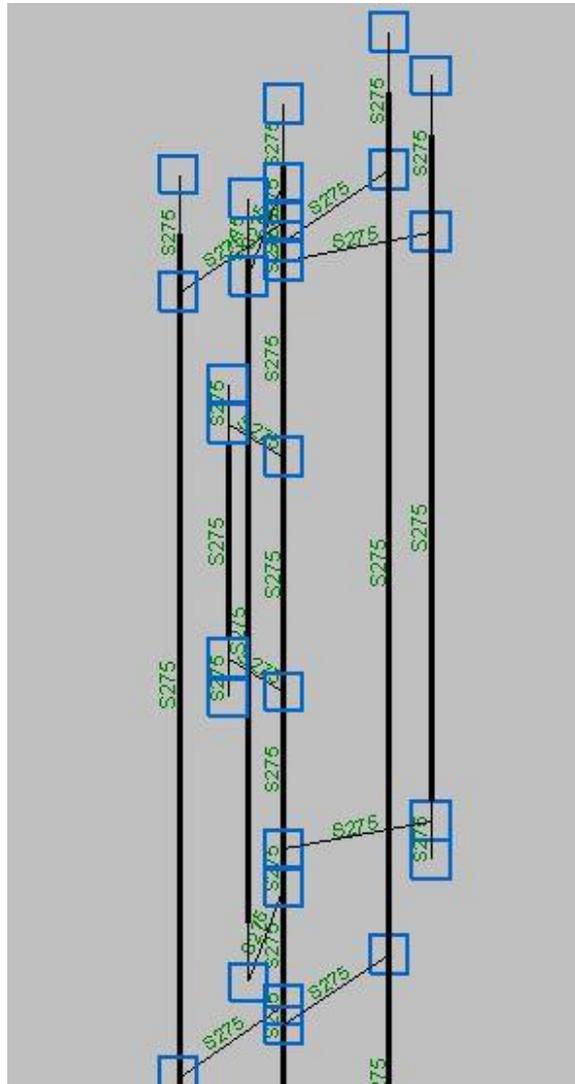


Figura 5.9: Descripción del material

El siguiente paso será la asignación del tipo de sección a cada pieza. Este proceso nos llevará un poco más de tiempo, ya que habrá distintos tipos en función del elemento de la estructura.

Tendremos que tener en cuenta la orientación para poder reflejarlas tal y como estén dispuestas en la estructura (al ser algunas secciones simétricas solo respecto de un eje, sus propiedades no son las mismas en todas las direcciones).

En nuestro caso, tendremos las siguientes:

ELEMENTO	SECCIÓN (mm)
MÁSTIL	TUBULAR - 140x6
PERFILES	EN C - 50x4x20x4
TUBOS	TUBULAR - 60x2

En la figura 5.10 presentamos una vista general de todas las secciones (tanto el tipo y geometría como su disposición) que desglosaremos después:

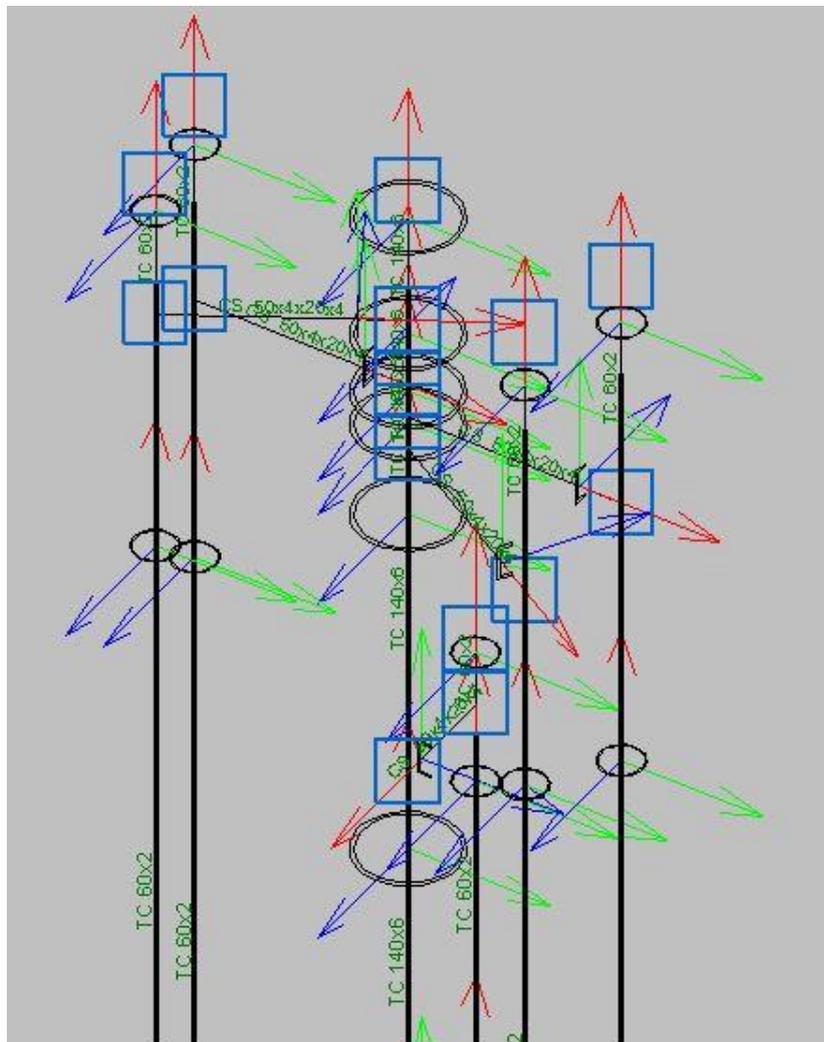


Figura 5.10: Secciones generales

Empezando por los tubos y el mástil, se observa que el eje principal de sus secciones coincide con el eje vertical de la estructura, por lo que podemos determinar que están en la posición correcta ya que los tubos están orientados en esa dirección en la realidad.

Para los perfiles tenemos distintas orientaciones de sus secciones en función del tubo que soportan.

Es decir, para los tubos “traseros” de 3 m y el que soporta el radioenlace, la “C” está orientada hacia abajo, mientras que para los tubos delanteros de 2 m, las “C” están orientadas hacia los tubos traseros.

Para modificar la orientación, utilizamos el comando “describir disposición”, mediante el cual podemos girarlas, o incluso invertirlas.

Lo explicado anteriormente se puede observar en las figuras 5.11 y 5.12.

El programa nos indica la forma mediante un dibujo y los ejes locales de cada elemento (en rojo y azul):

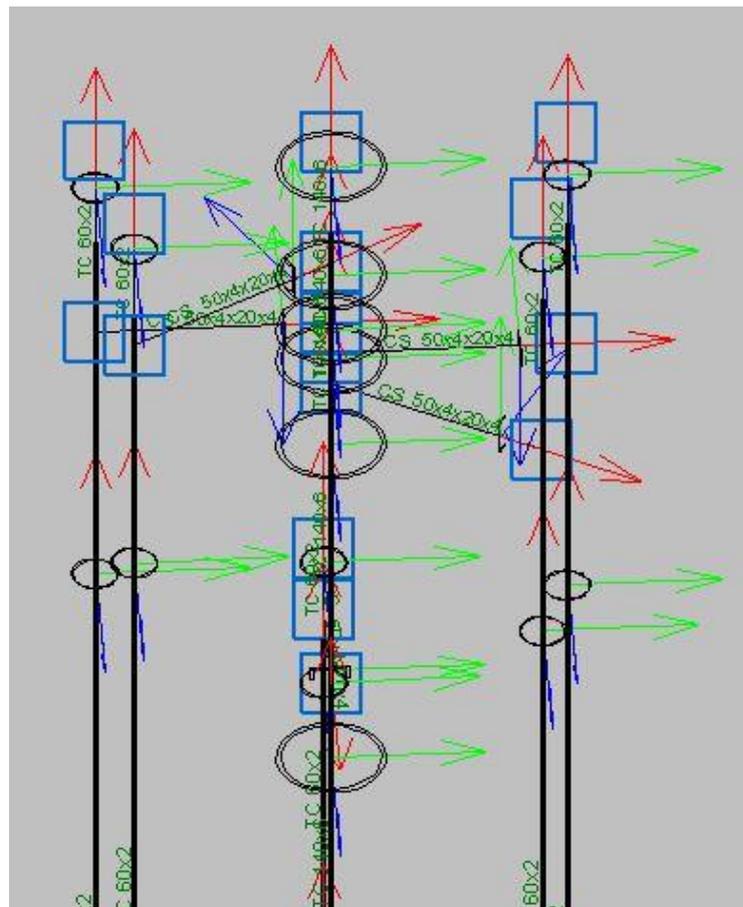


Figura 5.11: Orientaciones secciones tubos

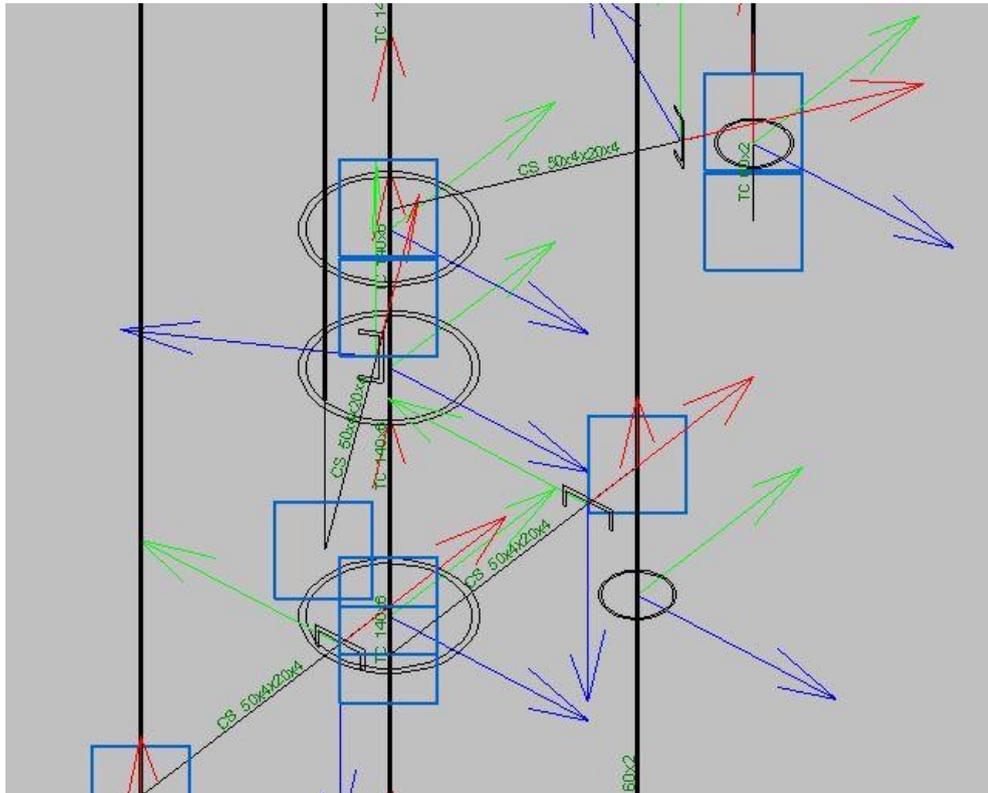


Figura 5.12: Orientaciones secciones perfiles

Una vez que tenemos la estructura definida, tanto en geometría como en materiales y secciones, podemos ver la simulación que nos ofrece el programa para comprobar su aproximación con la realidad.

El resultado será el mostrado en la figura 5.13, con color verde para secciones en tipo "C" y rojo para secciones tubulares.

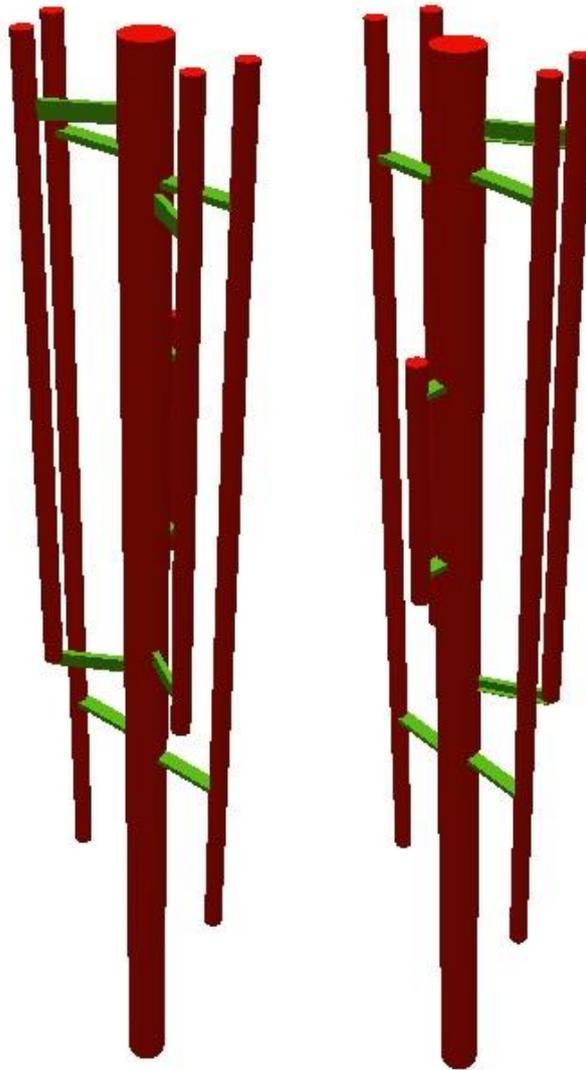


Figura 5.13: Estructura final

A primera vista, el resultado es bastante acertado y similar a la realidad, pero tendremos que comprobar que todos los perfiles están correctamente orientados.

Para ello, jugamos con la perspectiva y comparamos. La figura 5.14 nos permite ver que, efectivamente, todo esta en su sitio.

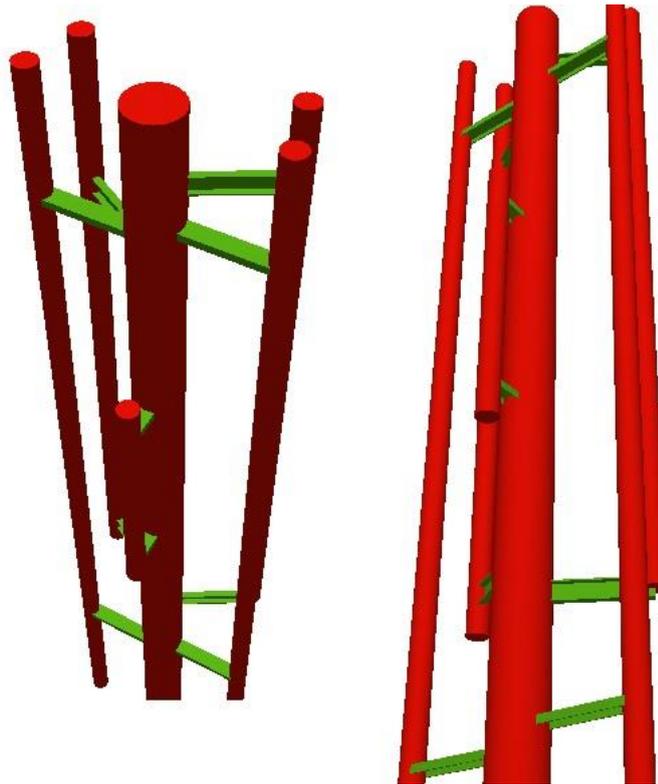


Figura 5.14: Detalle estructura

El paso siguiente consiste en simular las cargas externas, tanto puntuales como distribuidas, que afectan a la estructura (añadiremos también los pesos propios de los equipos).

Las enumeramos previamente y, a modo de resumen, serán las siguientes:

CARGA	VALOR
SOBRECARGA DE USO	150 Kg - 1470 N
SOBRECARGA ACCIDENTAL	1000 Kg - 9800 N
SOBRECARGA DE VIENTO ANTENA K80010991	55.12 Kg/m - 540,15 N/m (frontal) 18.98 Kg/m - 186,07 N/m (lateral)
SOBRECARGA DE VIENTO ANTENA K80010621	16,7 Kg/m - 163,54 N/m (frontal) 7,57 Kg/m - 74,43 N/m (lateral)
SOBRECARGA DE VIENTO RRU12	50,99 Kg/m - 499,7 N/m (frontal) 20,29 Kg/m - 198,7 N/m (lateral)
SOBRECARGA DE VIENTO RADIOENLACE	30,67 Kg - 300 N (frontal) 9,76 Kg - 95,69 N (lateral)

Comenzamos esta parte añadiendo las cargas puntuales.

En primer lugar, en punta del mástil, mediante el comando “Introducir carga sobre nudo”, asignamos tanto la sobrecarga de uso como la sobrecarga accidental.

Dicha sobrecarga accidental nos permite sobredimensionar el mástil ya que tiene en cuenta el caso en el que el sistema de seguridad se active. Las añadimos como 2 cargas puntuales de 1479 N y 9800 N (figura 5.15).

En segundo lugar, implementamos las cargas que genera el radionlace sobre el punto superior del tubo que lo soporta, las cuales serán de 300 N y 95,69 N.

Por último, asignamos los pesos propios de los equipos. En este caso, los colocaremos sobre los puntos medios, entre los anclajes del tubo. Para los tubos que tienen antenas y rrus, sumaremos los pesos (figura 5.16).

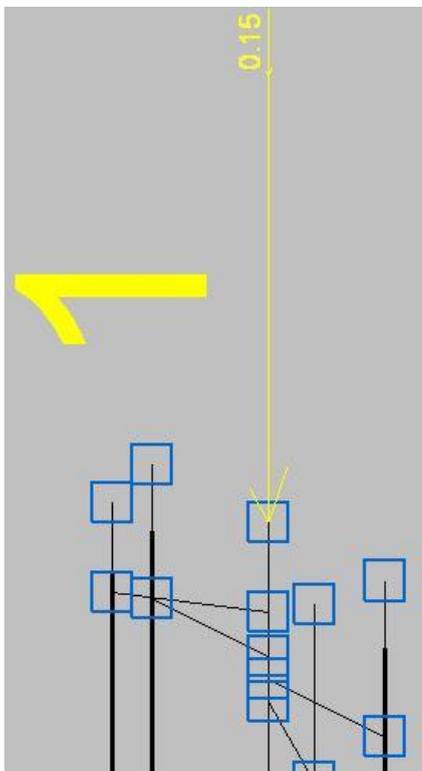


Figura 5.15 Cargas en punta de mástil

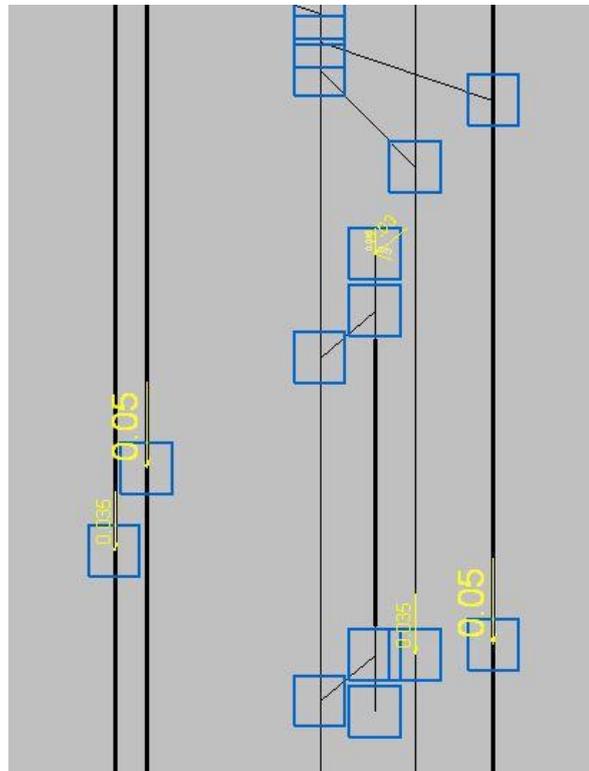


Figura 5.16 Pesos de equipos

Dibujaremos ahora las cargas distribuidas que generan principalmente las antenas y las rrus cuando el viento incide sobre ellos.

Son las cargas más preocupantes para la estructura al generar momento flector en la base de la misma. Mientras que en el caso anterior las cargas puntuales generan esfuerzos axiales verticales (sobre el eje z) que la estructura es capaz de soportar sin problemas, los esfuerzos debidos al momento flector son los que pueden producir la plastificación tanto del mástil en su parte inferior, como de los pernos o de la base de anclaje.

Además, en nuestro caso, hemos supuesto el caso mas desfavorable (que nunca se va a producir en la realidad) en el cual el viento sopla en 2 direcciones. De esta forma, si el resultado de nuestro análisis es viable, soportará cualquier requerimiento que se produzca en la realidad.

Con los cálculos previos realizados y los datos obtenidos, utilizamos la opción “Introducir cargas sobre barras” y seleccionamos las barras que sufren las cargas. Comenzaremos por asignar las cargas que afectan a la estructura en la dirección del eje Y.

Para las antenas de mayores dimensiones (3m), tendremos una carga distribuida de 540,15 N/m.

En la figura 5.17 se muestra el resultado.

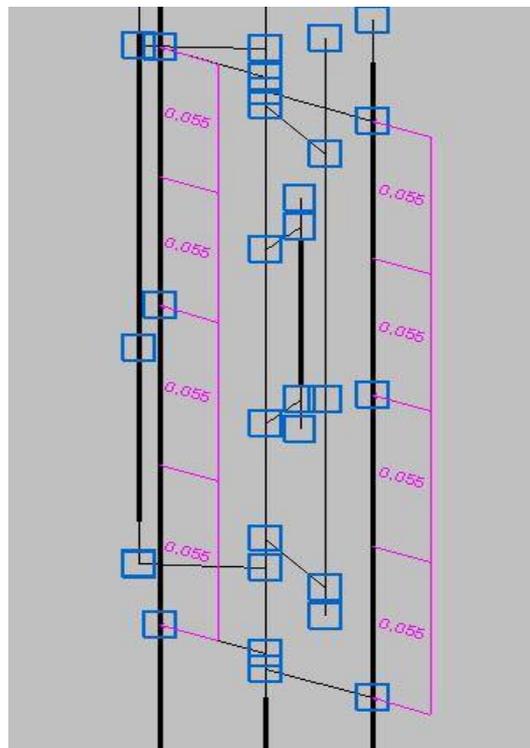


Figura 5.17 Viento frontal en antenas de 2 m

Para completar las cargas sobre dichas antenas añadimos a mayores una carga distribuida a lo largo del tubo en la dirección positiva del eje X, en este caso de 186,07 N/m, perpendicular a la anterior.

En la figura 5.18 podemos ver la combinación de ambas cargas.

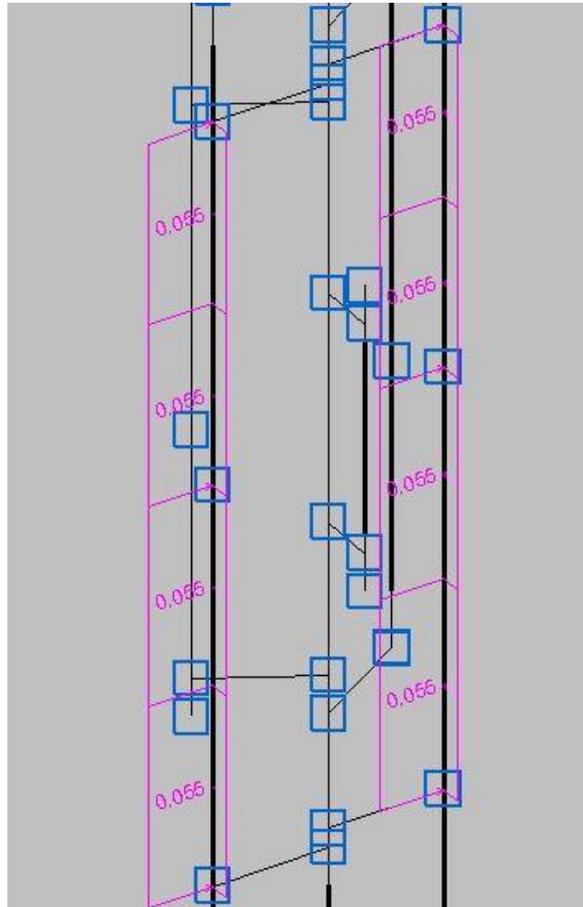


Figura 5.18 Viento lateral en antenas de 2 m

Continuaremos estableciendo las cargas que sufren las antenas de 1,5 m. Estas antenas son de mucha menor anchura y longitud, por lo que no son tan críticas en cuanto a cargas y harán sufrir menos al mástil.

Hay que tener en cuenta que en el tubo, además de las antenas, hay ubicadas unas RRUS detras de éstas, por lo que el área efectiva sobre la que actúa el viento será mayor.

Tendremos que sumar por tanto a la anchura de la antena, el área que “sobresale” de las RRUS.

En consecuencia, tendremos 2 tramos con un valor de 163,54 N/m y un tramo intermedio con una carga de 499,7 N/m.

En la figura 5.19 podemos ver el resultado:

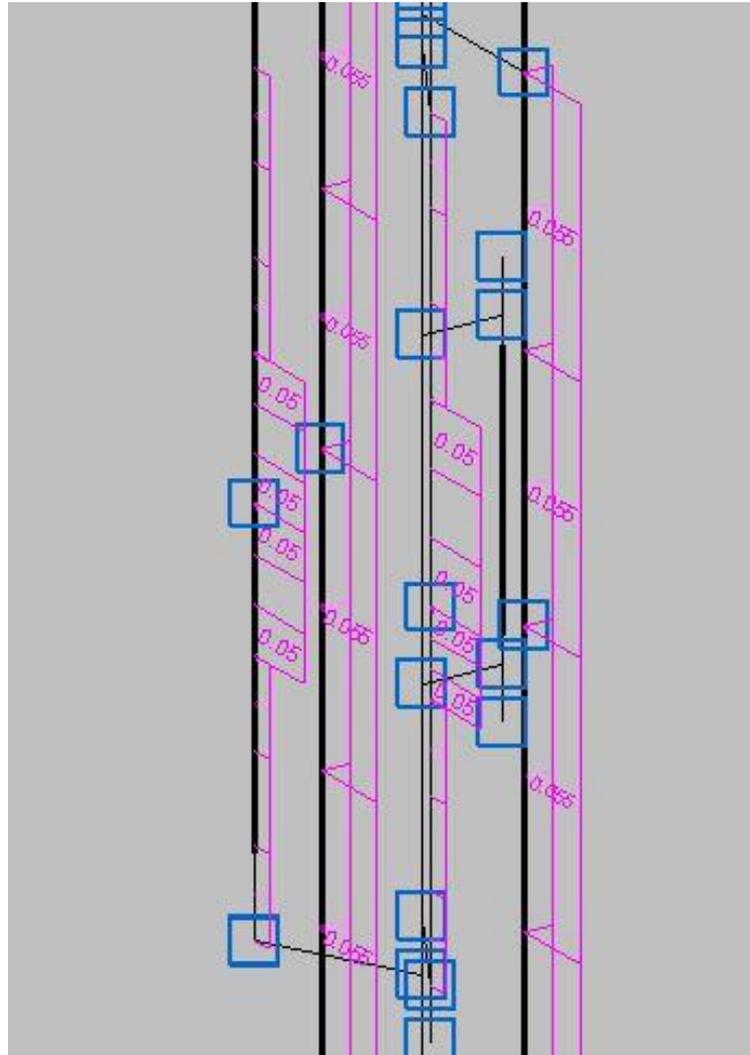


Figura 5.19 Viento frontal en antenas de 1.5 m

Por último, añadimos las cargas laterales sobre los tubos.

En este caso, igual que en el paso anterior, tendremos que tener en cuenta el efecto que produce el viento sobre el lateral de la antena y sumarle el efecto que produce el viento sobre la RRU. Tendremos 3 tramos:

Un primer tramo en el que la fuerza distribuida será de 74,43 N/m, un segundo tramo en el que será de 273,13 N/m (198,7 N/m de la RRU + 74,43 N/m de la antena) y un último tramo que volverá a sufrir una carga de 74,43 N/m.

Con ello damos por finalizado el modelado en CYPE.

El resultado final se muestra en la figura 5.20:

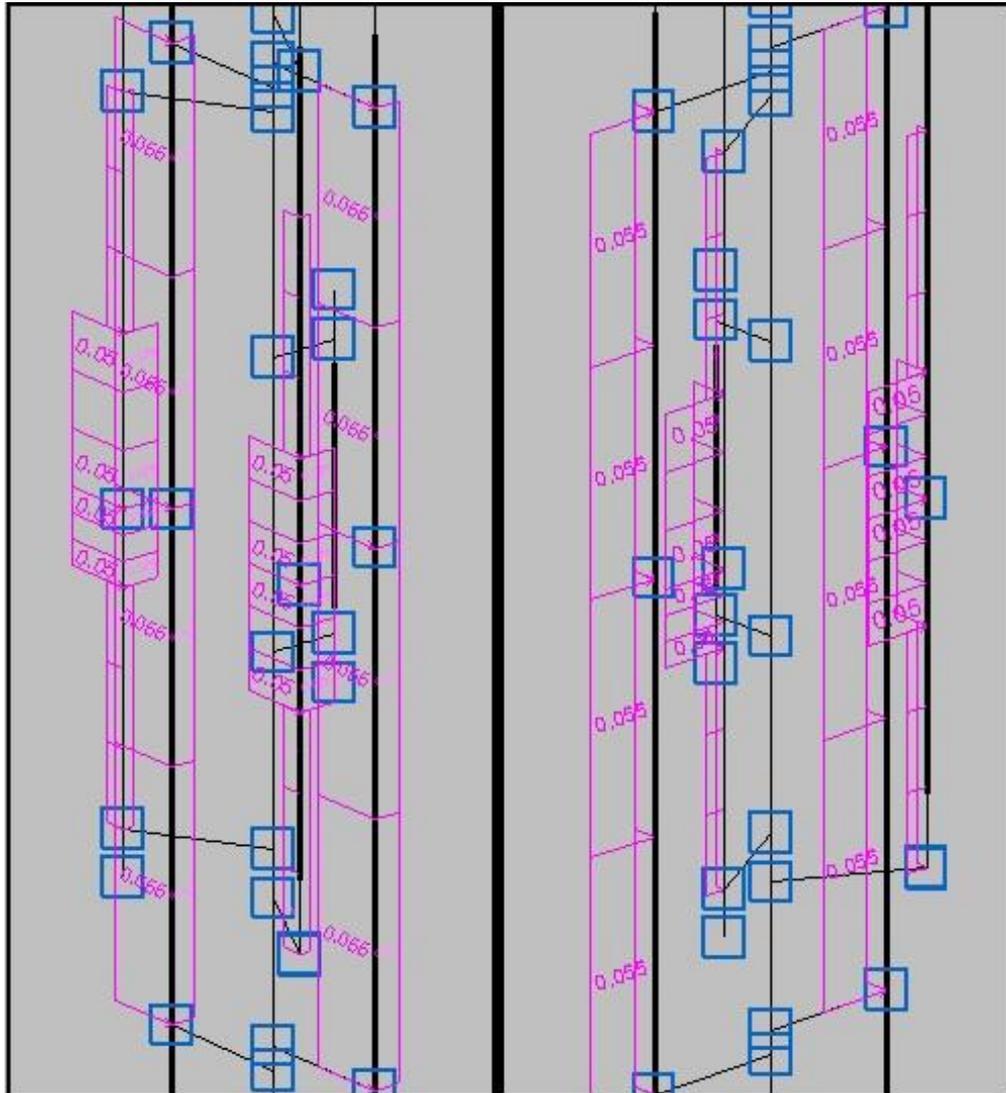


Figura 5.20 Resultado final

Ya finalizado el diseño e introducidas todas las cargas (tanto puntuales como distribuidas), secciones y tipos de material, procedemos al cálculo para realizar el análisis de resultados.

Empleando el comando “calcular”, el programa realiza el cálculo de todas las barras y nos proporciona los datos de esfuerzos (axiles, cortantes y flectores), desplazamientos, flechas, etc, los cuáles analizaremos en los próximos apartados.

5.2.2 Análisis de axiles

El primer diagrama que analizaremos será el diagrama de axiles que afectarán a toda la estructura.

Como podemos observar en la figura 5.21 para esta escala, el único elemento preocupante es el mástil. Sufre la mayor parte de los esfuerzos axiles, aumentando estos cuanto menor es la cota o altura.

El valor de mayor magnitud se produce lógicamente en su base y punto de unión con el perfil que lo soporta.

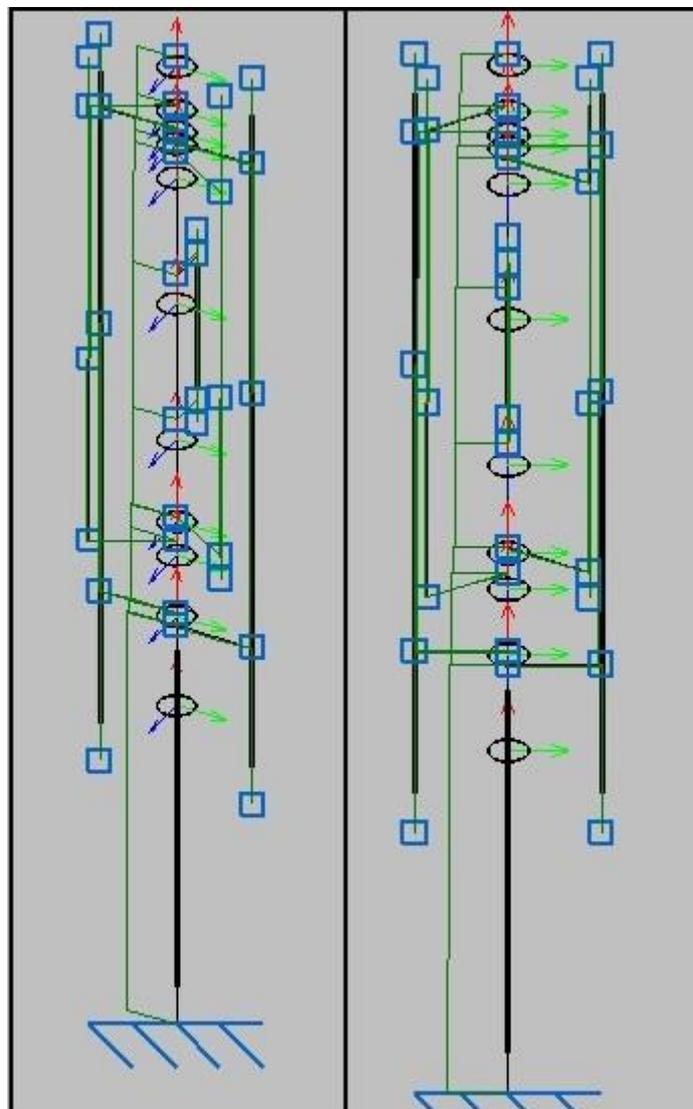


Figura 5.21 Esfuerzos axiles

**ESTUDIO DE VIABILIDAD ESTRUCTURAL EN MÁSTIL DE
TELECOMUNICACIONES Y ANÁLISIS MEDIANTE SOFTWARE**

Dicho valor será de 19000 N en el nudo 1 para una cota de Z=0 m.
El resultado podemos cotejarlo en la figura 5.22:

Envolventes de los esfuerzos en barras											
Barra	Tipo de combinación	Esfuerzo	Posiciones en la barra								
			0.000 m	0.206 m	0.412 m	0.619 m	0.825 m	1.031 m	1.237 m	1.443 m	1.650 m
N1/N3	Acero laminado	N _{mín}	-1.960	-1.955	-1.949	-1.944	-1.938	-1.933	-1.927	-1.922	-1.916
		N _{máx}	-1.162	-1.158	-1.155	-1.152	-1.149	-1.145	-1.142	-1.139	-1.136
		V _y _{mín}	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024
		V _y _{máx}	0.217	0.217	0.217	0.217	0.217	0.217	0.217	0.217	0.217
		V _z _{mín}	-0.468	-0.468	-0.468	-0.468	-0.468	-0.468	-0.468	-0.468	-0.468
		V _z _{máx}	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008
		M _t _{mín}	-0.017	-0.017	-0.017	-0.017	-0.017	-0.017	-0.017	-0.017	-0.017
		M _t _{máx}	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
		M _y _{mín}	-1.275	-1.178	-1.082	-0.985	-0.889	-0.792	-0.696	-0.599	-0.503
		M _y _{máx}	-0.025	-0.023	-0.022	-0.020	-0.018	-0.017	-0.015	-0.014	-0.012
		M _z _{mín}	0.085	0.080	0.075	0.070	0.065	0.060	0.055	0.050	0.045
		M _z _{máx}	0.623	0.578	0.534	0.489	0.444	0.399	0.355	0.310	0.265

5.22 Tabla esfuerzos mástil

5.2.3 Análisis de cortantes

En segundo lugar, será objeto de nuestro estudio el diagrama de cortantes de toda la estructura.

Para este análisis, tenemos que tener en cuenta que habrá 2 esfuerzos cortantes (V_z y V_y) que analizar, por lo que habrá que compararlos para ver cuál tiene un valor mayor y por tanto será mas crítico.

Igual que en el análisis de axiles, podemos observar que el elemento más preocupante sigue siendo el mástil central. Esto se debe a que es el punto de concentración de todos los esfuerzos y contribuciones de los tubos y perfiles que se van sumando a medida que disminuimos la cota de la estructura.

Todo ello se traduce en el resultado que reflejan las envolventes de ambos esfuerzos (tanto V_z cómo V_y) en las figuras 5.23, 5.24 y 5.25.

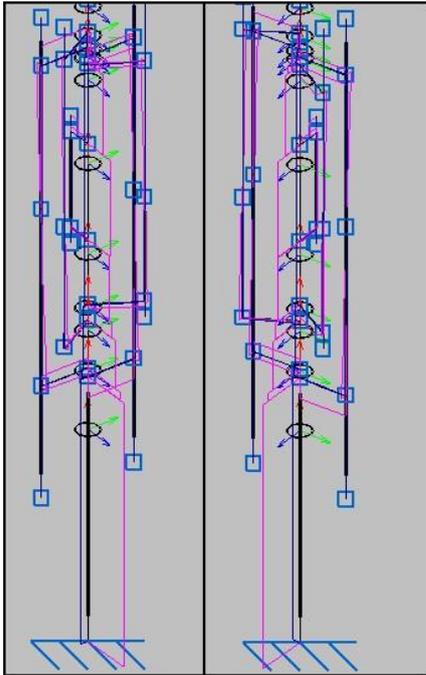


Figura 5.23 Esfuerzo cortante y (Vy)

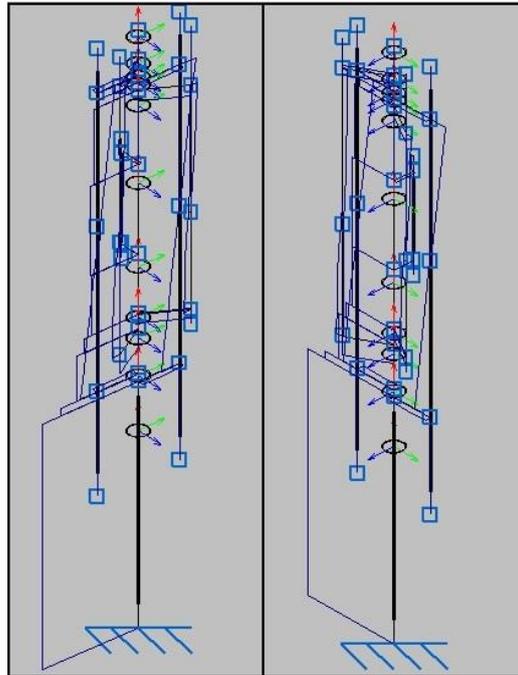


Figura 5.24 Esfuerzo cortante z (Vz)

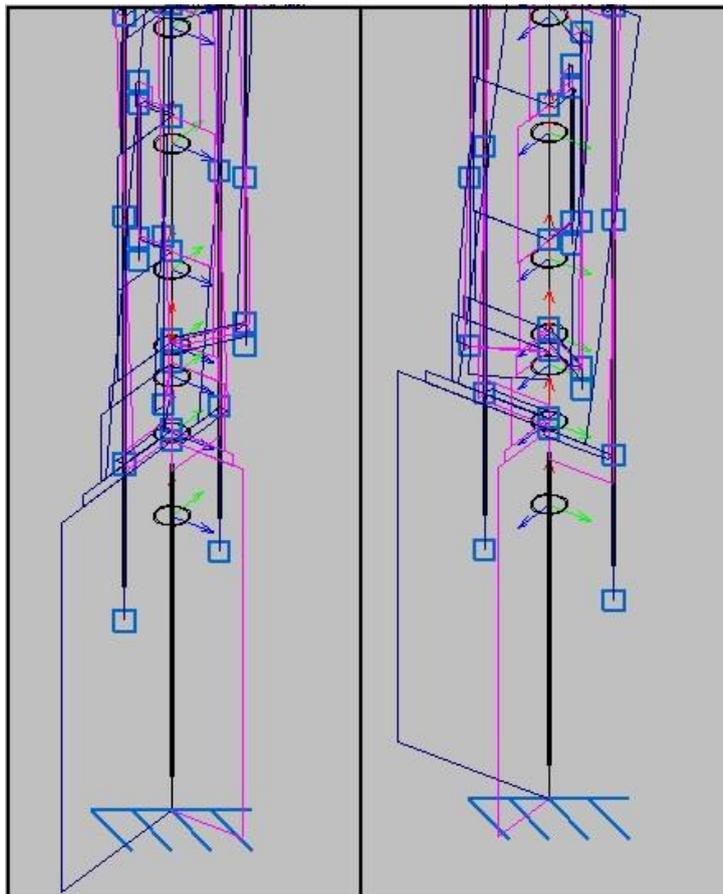


Figura 5.25 Comparación de cortantes

ESTUDIO DE VIABILIDAD ESTRUCTURAL EN MÁSTIL DE TELECOMUNICACIONES Y ANÁLISIS MEDIANTE SOFTWARE

El valor máximo absoluto para el esfuerzo V_y (pasado a N) será de 2126 N constante a lo largo de la parte inferior del mástil (desde la cota 0 hasta 1,650 m).

El valor máximo absoluto para el esfuerzo V_z será de 4586 N constante a lo largo de la parte inferior del mástil (desde la cota 0 hasta 1,650 m).

Ambos resultados se pueden comprobar en la figura 5.26.

Envolventes de los esfuerzos en barras											
Barra	Tipo de combinación	Esfuerzo	Posiciones en la barra								
			0.000 m	0.206 m	0.412 m	0.619 m	0.825 m	1.031 m	1.237 m	1.443 m	1.650 m
N1/N3	Acero laminado	$N_{mín}$	-1.960	-1.955	-1.949	-1.944	-1.938	-1.933	-1.927	-1.922	-1.916
		$N_{máx}$	-1.162	-1.158	-1.155	-1.152	-1.149	-1.145	-1.142	-1.139	-1.136
		$V_{y,mín}$	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024
		$V_{y,máx}$	0.217	0.217	0.217	0.217	0.217	0.217	0.217	0.217	0.217
		$V_{z,mín}$	-0.468	-0.468	-0.468	-0.468	-0.468	-0.468	-0.468	-0.468	-0.468
		$V_{z,máx}$	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008
		$M_{t,mín}$	-0.017	-0.017	-0.017	-0.017	-0.017	-0.017	-0.017	-0.017	-0.017
		$M_{t,máx}$	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
		$M_{V,mín}$	-1.275	-1.178	-1.082	-0.985	-0.889	-0.792	-0.696	-0.599	-0.503
		$M_{V,máx}$	-0.025	-0.023	-0.022	-0.020	-0.018	-0.017	-0.015	-0.014	-0.012
		$M_{Z,mín}$	0.085	0.080	0.075	0.070	0.065	0.060	0.055	0.050	0.045
		$M_{Z,máx}$	0.623	0.578	0.534	0.489	0.444	0.399	0.355	0.310	0.265

Figura 5.26 Tabla esfuerzos mástil (2)

5.2.4 Análisis de flectores

Analizaremos por último los diagramas de flectores de la estructura (figuras 5.27, 5.28 y 5.29).

También tendremos en este caso 2 esfuerzos flectores que estudiar: M_y y M_z . Se repite el mismo patrón que en el caso de los cortantes, ya que de nuevo tendremos como punto mas crítico la base del mástil.

El valor máximo absoluto para el esfuerzo M_y será de 12495 N·m en la base del mástil (cota cero).

El valor máximo absoluto para el esfuerzo M_z será de 6105 N·m en la base del mástil (cota cero).

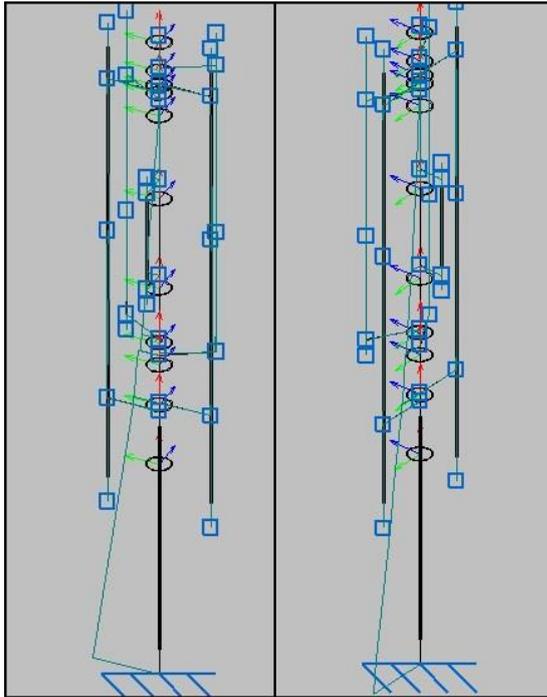


Figura 5.27 Momento flector y (M_y)

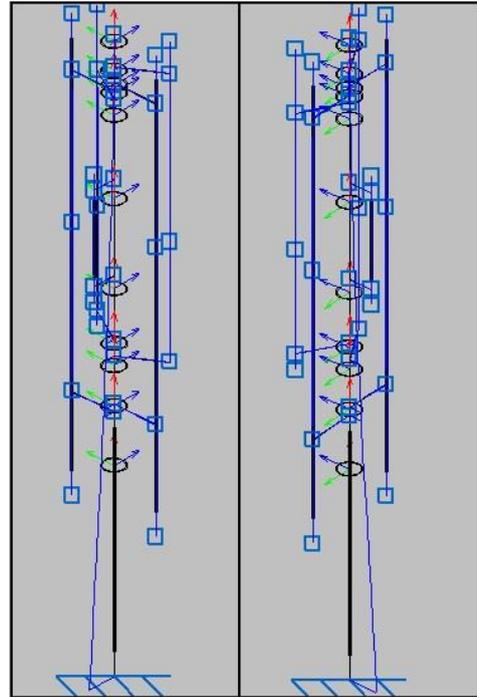


Figura 5.28 Momento flector z (M_z)

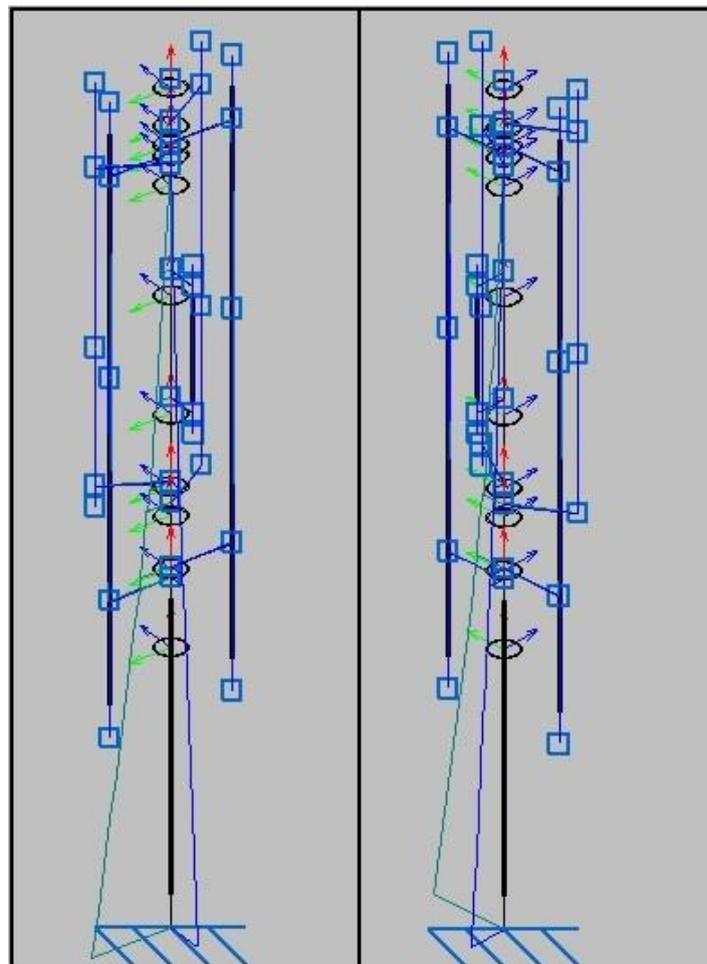


Figura 5.29 Comparación de flectores

La figura 5.30 nos permite comprobar los resultados:

Envolventes de los esfuerzos en barras											
Barra	Tipo de combinación	Esfuerzo	Posiciones en la barra								
			0.000 m	0.206 m	0.412 m	0.619 m	0.825 m	1.031 m	1.237 m	1.443 m	1.650 m
N1/N3	Acero laminado	N _{mín}	-1.960	-1.955	-1.949	-1.944	-1.938	-1.933	-1.927	-1.922	-1.916
		N _{máx}	-1.162	-1.158	-1.155	-1.152	-1.149	-1.145	-1.142	-1.139	-1.136
		V _y _{mín}	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024
		V _y _{máx}	0.217	0.217	0.217	0.217	0.217	0.217	0.217	0.217	0.217
		V _z _{mín}	-0.468	-0.468	-0.468	-0.468	-0.468	-0.468	-0.468	-0.468	-0.468
		V _z _{máx}	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008
		M _t _{mín}	-0.017	-0.017	-0.017	-0.017	-0.017	-0.017	-0.017	-0.017	-0.017
		M _t _{máx}	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
		M _y _{mín}	-1.275	-1.178	-1.082	-0.985	-0.889	-0.792	-0.696	-0.599	-0.503
		M _y _{máx}	-0.025	-0.023	-0.022	-0.020	-0.018	-0.017	-0.015	-0.014	-0.012
		M _z _{mín}	0.085	0.080	0.075	0.070	0.065	0.060	0.055	0.050	0.045
		M _z _{máx}	0.623	0.578	0.534	0.489	0.444	0.399	0.355	0.310	0.265

Figura 5.30 Tabla esfuerzos mástil (3)

5.2.5 Análisis de desplazamientos

Pasaremos ahora a analizar tanto los desplazamientos máximos en los distintos puntos de la estructura, como la flecha máxima.

Estos datos nos los ofrece el programa de forma gráfica mediante diagramas (al igual que los esfuerzos) y de forma escrita, por lo que utilizaremos las 2 fuentes para realizar el estudio.

Las figuras 5.31, 5.32 y 5.33 nos ofrecen el resultado visual, mientras que la figura 5.34 nos ofrece los datos numéricos.

Para el caso de la flecha, la desglosaremos en sus 2 componentes (XY y XZ) y veremos la construcción de la resultante.

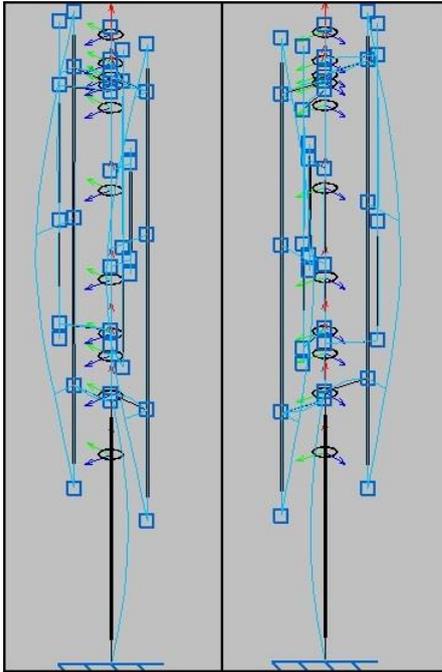


Figura 5.31 Flecha xy

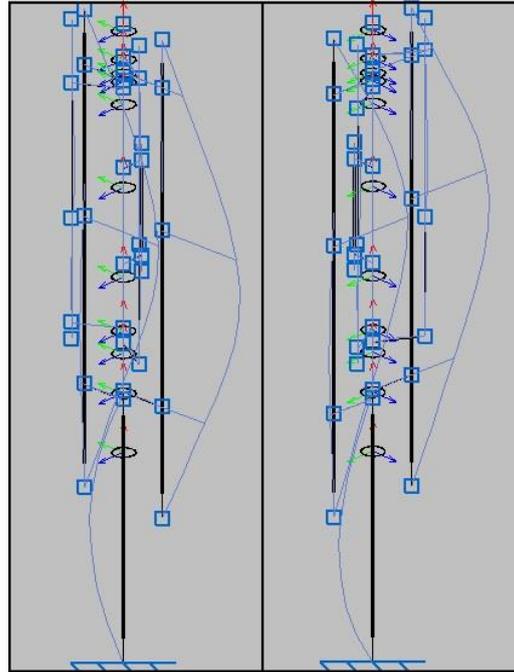


Figura 5.32 Flecha xz

Los valores máximos de las flechas componentes xy y xz serán respectivamente de 2.09 mm y 3.95 mm en el punto $x=1,62$ de la barra cuyos nudos extremos son el 14 y 15 (se trata de una de las barras traseras de 3 m).

Para calcular la flecha total habrá que sumar las componentes.
El resultado será de (ecuación 1):

$$2.09^2 + 3.95^2 = F^2_{[1]}$$

$$F = 4.469 \text{ mm}$$

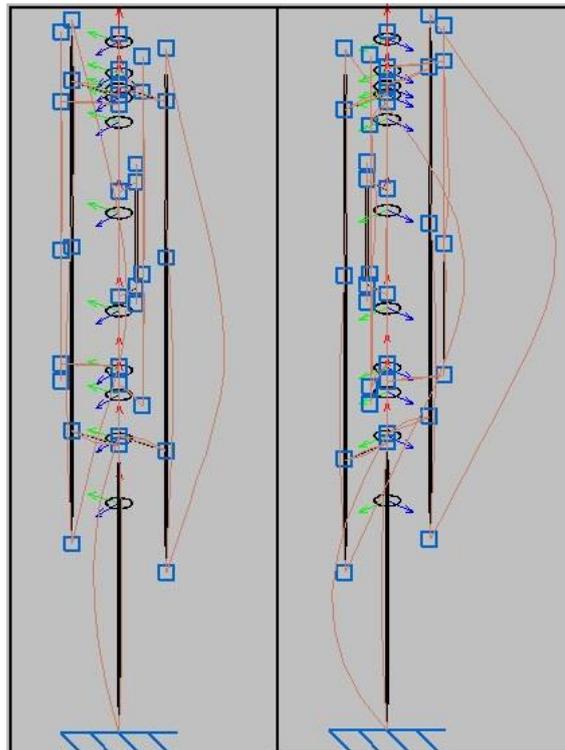


Figura 5.33 Flecha máxima

Flechas								
Grupo	Flecha máxima absoluta xy Flecha máxima relativa xy		Flecha máxima absoluta xz Flecha máxima relativa xz		Flecha activa absoluta xy Flecha activa relativa xy		Flecha activa absoluta xz Flecha activa relativa xz	
	Pos. (m)	Flecha (mm)						
N12/N10	0.150	0.13	0.150	0.01	0.150	0.14	0.150	0.01
	0.150	L/(>1000)	0.150	L/(>1000)	0.150	L/(>1000)	0.150	L/(>1000)
N9/N13	0.150	0.16	0.150	0.01	0.150	0.15	0.150	0.01
	0.150	L/(>1000)	0.150	L/(>1000)	0.150	L/(>1000)	0.150	L/(>1000)
N14/N15	1.620	2.09	1.620	3.95	1.620	2.09	1.620	3.81
	1.620	L/(>1000)	1.620	L/759.0	1.620	L/(>1000)	1.620	L/802.2
N16/N17	1.525	2.00	1.700	3.76	1.525	2.00	1.525	3.84
	1.525	L/(>1000)	1.700	L/798.3	1.525	L/(>1000)	1.700	L/822.4
N3/N18	0.150	0.16	0.150	0.01	0.150	0.18	0.150	0.01
	0.150	L/(>1000)	0.150	L/(>1000)	0.150	L/(>1000)	0.150	L/(>1000)
N19/N4	0.150	0.20	0.150	0.01	0.150	0.18	0.150	0.01
	0.150	L/(>1000)	0.150	L/(>1000)	0.150	L/(>1000)	0.150	L/(>1000)
N20/N11	0.150	0.01	0.150	0.04	0.150	0.01	0.150	0.04
	0.150	L/(>1000)	0.150	L/(>1000)	0.150	L/(>1000)	0.150	L/(>1000)

Figura 5.34 Tabla flechas

En el caso de los desplazamientos, el programa los analiza por nudos en lugar de barras, de forma que lo más interesante es analizar en primer lugar la tabla de resultados e ir a los nudos con mayor desplazamiento para comprobar los resultados.

Hay varios nudos con valores similares en cuanto a desplazamientos en el eje y (Dy), todos ellos ubicados en la parte más alta del mástil (tiene sentido al ser los más alejados del apoyo).

ESTUDIO DE VIABILIDAD ESTRUCTURAL EN MÁSTIL DE
TELECOMUNICACIONES Y ANÁLISIS MEDIANTE SOFTWARE

Dichos nodos serán los numerados como N2, N15, N17, N22 y N24 (figura 5.35):

Envolvente de los desplazamientos en nudos								
Referencia	Combinación		Desplazamientos en ejes globales					
	Tipo	Descripción	Dx (mm)	Dy (mm)	Dz (mm)	Gx (mRad)	Gy (mRad)	Gz (mRad)
N2	Desplazamientos	Valor mínimo de la envolvente	4.228	-30.781	-0.099	0.395	1.451	-0.304
		Valor máximo de la envolvente	15.804	-1.178	-0.098	10.458	5.400	0.047
N15	Desplazamientos	Valor mínimo de la envolvente	4.218	-29.728	-3.290	0.731	1.372	0.045
		Valor máximo de la envolvente	15.117	-1.279	-0.540	6.940	3.152	0.073
N17	Desplazamientos	Valor mínimo de la envolvente	4.181	-29.270	-0.319	0.001	1.358	-0.637
		Valor máximo de la envolvente	15.211	-1.040	2.413	6.136	3.242	0.045
N22	Desplazamientos	Valor mínimo de la envolvente	4.234	-30.643	-3.439	0.421	1.425	-0.446
		Valor máximo de la envolvente	15.607	-1.176	-0.427	9.464	4.935	0.040
N24	Desplazamientos	Valor mínimo de la envolvente	4.210	-30.645	-0.229	0.328	1.437	-4.150
		Valor máximo de la envolvente	16.083	-1.144	1.683	9.036	4.221	0.041

Figura 5.35 Desplazamientos máximos eje y

Para el caso del desplazamiento en el eje x (Dx), también habrá nudos con valores similares, sobrepasando todos ellos los 15 mm.

Dichos nodos coinciden con los que más se desplazan en el eje y (caso anterior) al ser los más alejados del apoyo y serán los numerados como N2, N15, N17, N22 y N24 (figura 5.36):

Envolvente de los desplazamientos en nudos								
Referencia	Combinación		Desplazamientos en ejes globales					
	Tipo	Descripción	Dx (mm)	Dy (mm)	Dz (mm)	Gx (mRad)	Gy (mRad)	Gz (mRad)
N2	Desplazamientos	Valor mínimo de la envolvente	4.228	-30.781	-0.099	0.395	1.451	-0.304
		Valor máximo de la envolvente	15.804	-1.178	-0.098	10.458	5.400	0.047
N15	Desplazamientos	Valor mínimo de la envolvente	4.218	-29.728	-3.290	0.731	1.372	0.045
		Valor máximo de la envolvente	15.117	-1.279	-0.540	6.940	3.152	0.073
N17	Desplazamientos	Valor mínimo de la envolvente	4.181	-29.270	-0.319	0.001	1.358	-0.637
		Valor máximo de la envolvente	15.211	-1.040	2.413	6.136	3.242	0.045
N22	Desplazamientos	Valor mínimo de la envolvente	4.234	-30.643	-3.439	0.421	1.425	-0.446
		Valor máximo de la envolvente	15.607	-1.176	-0.427	9.464	4.935	0.040
N24	Desplazamientos	Valor mínimo de la envolvente	4.210	-30.645	-0.229	0.328	1.437	-4.150
		Valor máximo de la envolvente	16.083	-1.144	1.683	9.036	4.221	0.041

Figura 5.36 Desplazamientos máximos eje x

5.2.6 Análisis de tensión

Para terminar con la parte de CYPE, realizaremos un análisis de las tensiones máximas que soporta la sección mas crítica.

Nos servirá también como aplicación de la teoría de la resistencia de materiales.

Utilizando los datos recogidos anteriormente en cuanto a esfuerzos axil y flector, podemos determinar que la sección más cargada es la base del mástil.

Para dicha sección, el axil y el flector tienen los siguientes valores:

- ◆ $N_{max} = 19000 \text{ N}$
- ◆ $M_{zmax} = 12.495 \text{ N}\cdot\text{m}$

En cuanto a los datos de la sección que necesitaremos para realizar el cálculo, ya comentamos anteriormente que se trata de una sección tubular con las siguientes características:

- ◆ $\text{Area} = 25.26 \text{ cm}^2$
- ◆ $I_y = 568.06 \text{ cm}^4$
- ◆ $I_z = 568.06 \text{ cm}^4$
- ◆ $I_t = 1136.12 \text{ cm}^4$

Utilizamos ecuación 2 para determinar la tensión máxima que se produce en ese punto:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{I_z} \cdot h_{max} + \frac{N_{max}}{A} \quad [2]$$

Sustituyendo los datos:

$$\sigma_{max} = \frac{12495 \text{ (N}\cdot\text{m)}}{568.06 \cdot 10^{-8} \text{ (m}^4\text{)}} \cdot 70 \cdot 10^{-3} \text{ (m)} + \frac{19000 \text{ (N)}}{25.26 \cdot 10^{-4} \text{ (m}^2\text{)}}$$
$$\sigma_{max} = 161509449 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \text{ (Pa)} = 161,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \text{ (MPa)}$$

Comprobamos que no plastifica comparando el valor resultante con el límite elástico (ecuación 3):

$$\sigma_{max} = 161,5 \text{ MPa} \leq \sigma_e = 275 \text{ MPa} \quad [3]$$

5.3 Modelado mediante SAP2000

Una vez finalizado en análisis mediante CYPE, procederemos al análisis mediante SAP2000.

5.3.1 Fases del modelado

Al igual que en el modelado mediante CYPE, tomaremos como base las fotografías y el croquis realizado a mano alzada previamente.

Iniciamos el programa, seleccionamos la opción “New model” (figura 5.37) y definimos tanto las unidades (N, m, C) como el tipo de malla (Grid Only):

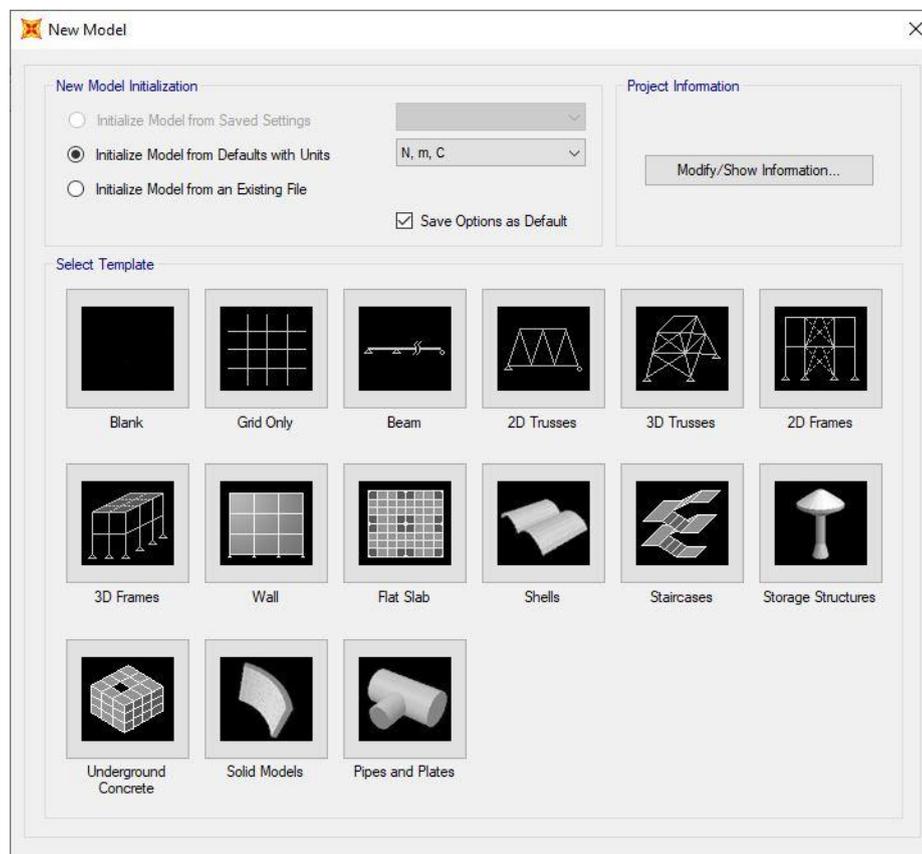


Figura 5.37 Selección modelo SAP

ESTUDIO DE VIABILIDAD ESTRUCTURAL EN MÁSTIL DE TELECOMUNICACIONES Y ANÁLISIS MEDIANTE SOFTWARE

El paso siguiente consiste en crear la malla. Tenemos que tener clara la ubicación de cada nudo y de cada elemento, ya que dicha malla nos sirve como base para el modelado (aunque en caso de error podremos ir modificándola).

Abrimos el editor y seleccionamos en cada eje los puntos clave que nos permitirán luego ubicar las barras.

Una vez definidos todos los puntos y sus coordenadas tál y como aparecen en la figura 5.38, el resultado será el mostrado en la figura 5.39.

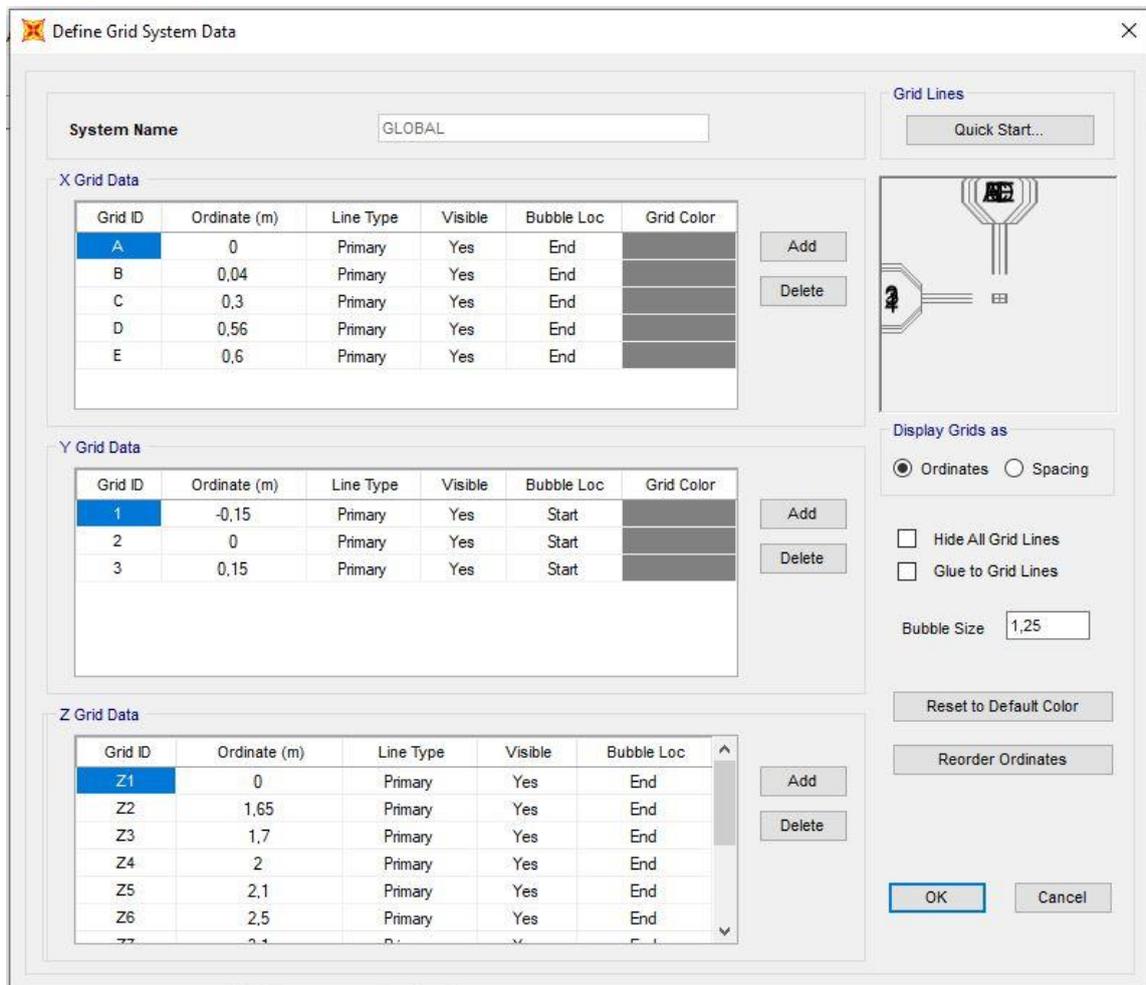


Figura 5.38 Editado de la malla

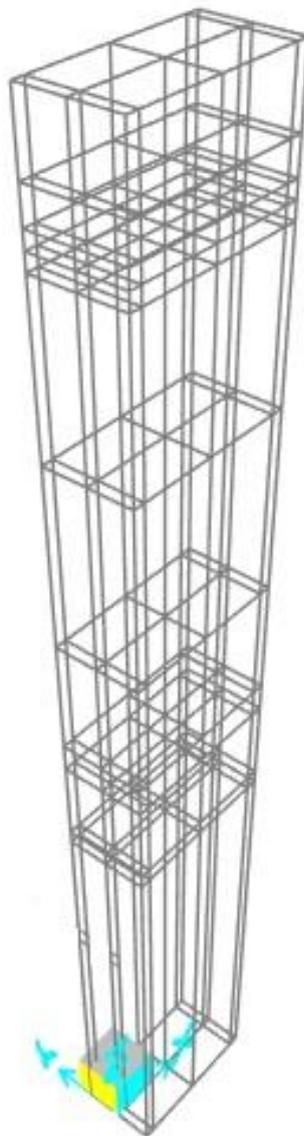


Figura 5.39 Malla

Procederemos ahora a dibujar el mástil.

Mediante el comando “Draw Frame/Cable/Tendon” seleccionamos su punto de origen (la base) y su punto final.

Su color será azul. El resto de tubos y perfiles serán de diferente color para diferenciarlos. En cuanto al material, como ya hemos comentado anteriormente, se trata de acero S275.

El resultado se muestra en la figura 5.40.

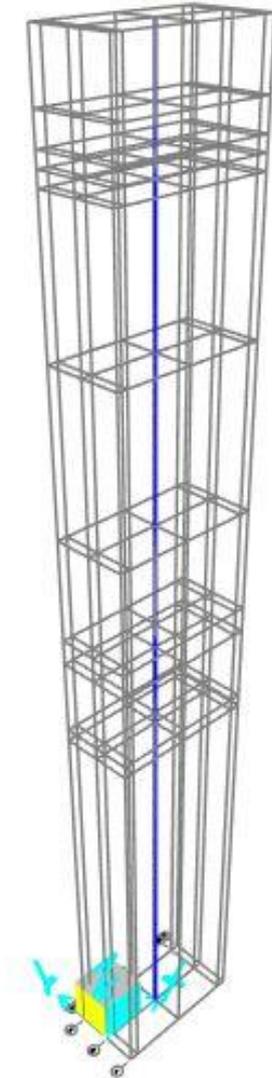


Figura 5.40 Mástil

Dibujaremos a continuación los perfiles que unirán nuestro mástil con los tubos exteriores.

Para ello, utilizamos de nuevo el comando “Draw Frame/Cable/Tendon” uniendo los nudos presentes en la malla generada previamente.

Cabe destacar que crear la malla al inicio del proceso de modelado, aunque sea más complejo, nos facilita mucho la labor posterior. Si la hemos generado correctamente bastará con unir los puntos extremos que forman las barras.

A partir de ahora, mostraremos la estructura ocultando la malla para que su visión sea más clara.

El resultado se muestra en la figura 5.41:

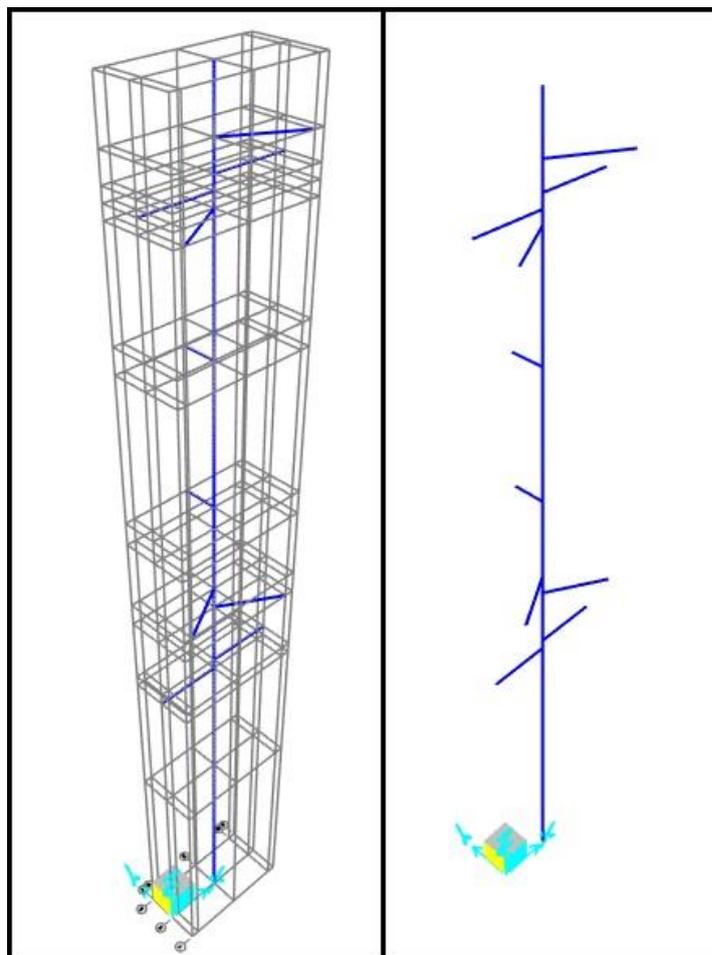


Figura 5.41 Perfiles

El paso siguiente consistirá en dibujar los tubos de 2 m, 3 m y 0,8 m.

Los tubos traseros serán los 2 de 3 m y el de 0,8 m, y los delanteros serán los 2 de 2 m. Uniremos los nudos extremos de cada tubo para modelarlos, comprobando después que las longitudes y cotas de los extremos coinciden con la realidad y con el modelado previo en CYPE.

El resultado se puede observar en la figura 5.42.

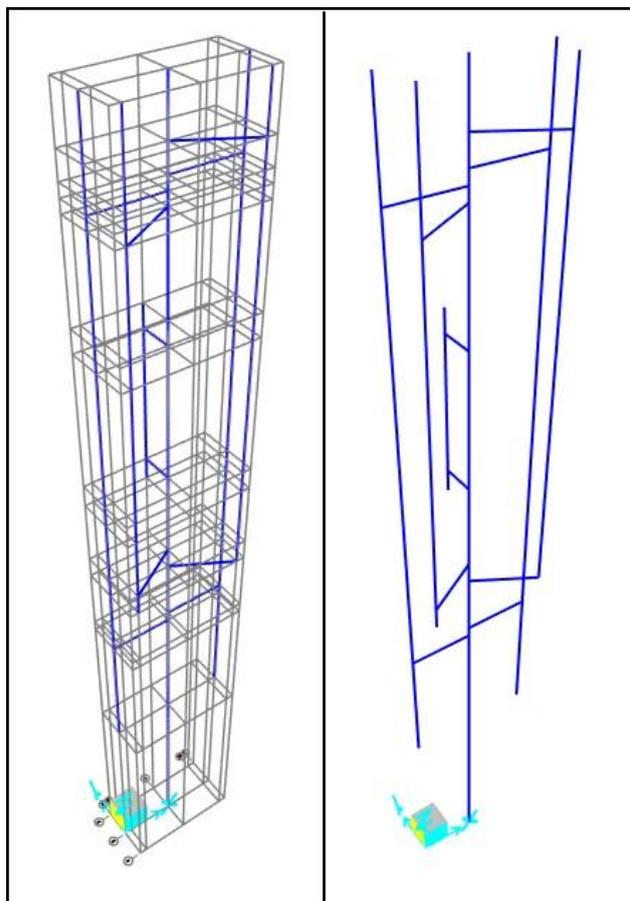


Figura 5.42 Tubos

Pasaremos ahora a definir el material (acero S275) dentro del programa y asignarlo a todos los elementos (mástil, tubos y perfiles) para que se tengan en cuenta sus propiedades mecánicas.

Mediante el comando “Define-Materials - Add New Material” (figura 5.43) marcamos las opciones de región Europea y acero con un grado S275 en los desplegables:

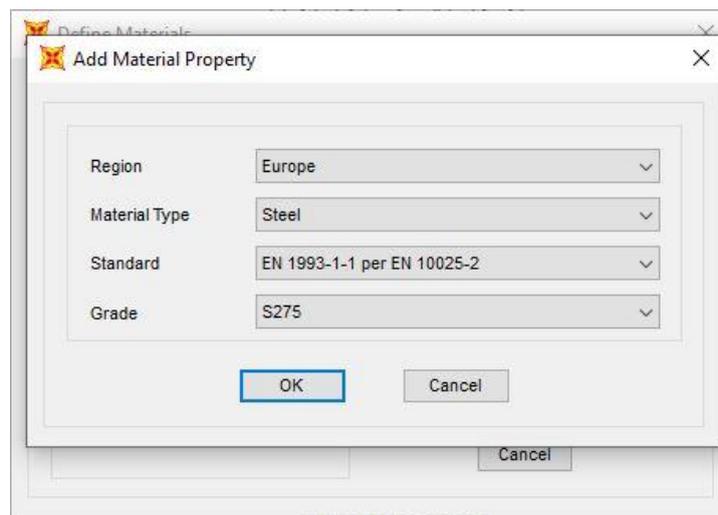


Figura 5.43 Selección de material

Seleccionamos todos los elementos de la estructura (mástil, perfiles y tubos) y nos vamos al comando “Assign-Frame-Material Property Overwrites” con la opción “S275”.

Gracias a este comando podemos asignar el material a todos los elementos a la vez, quedando correctamente definidos según la figura 5.44:

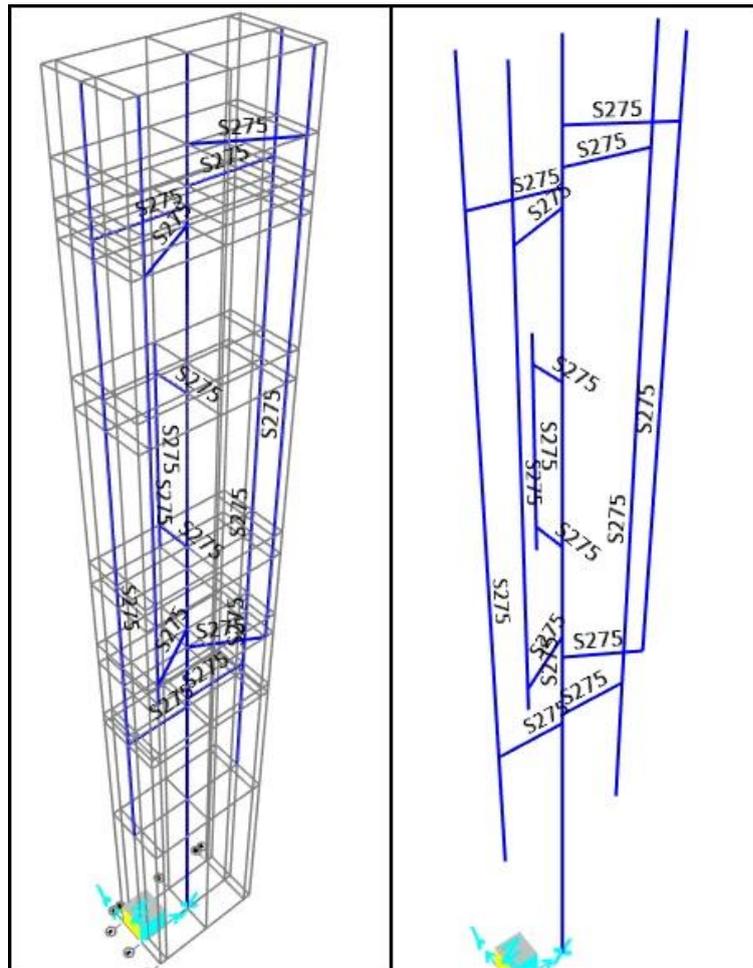


Figura 5.44 Asignación de material

El siguiente paso (figura 5.45) será la creación y asignación de secciones. Crearemos los diferentes tipos mediante el comando “Define-Section properties-Frame Sections”.

Diferenciaremos 3 clases de secciones:

- ◆ MÁSTIL - Tubular (140x6 mm)
- ◆ TUBOS - Tubular (60x2 mm)
- ◆ PERFILES - En C (50x4x20x4 mm)

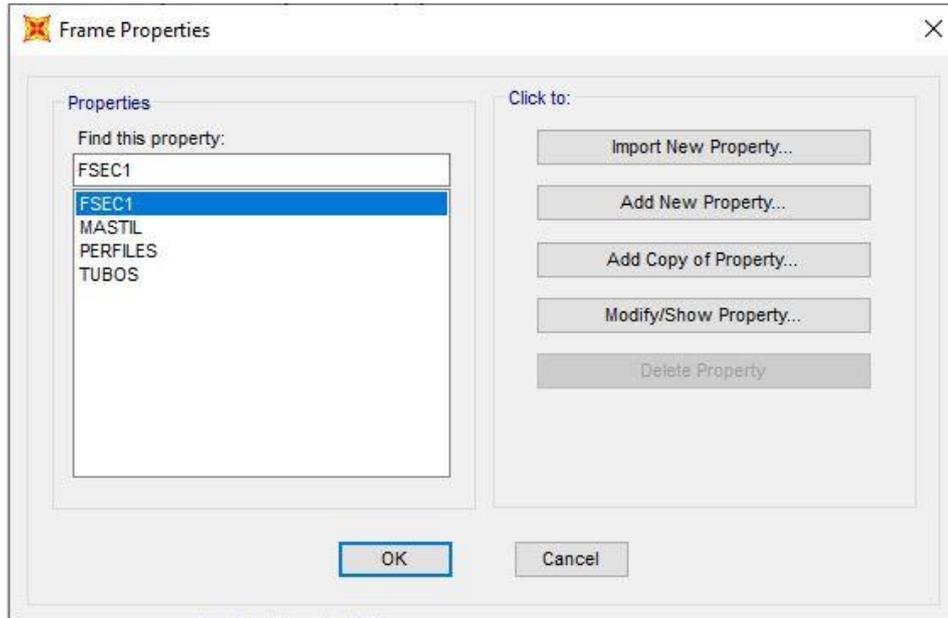


Figura 5.45 Secciones

Una vez creadas (cada una con sus características dimensionales y mecánicas) las asignaremos, seleccionando los grupos de elementos (tubos, perfiles y mástil) con la misma sección.

Mediante la opción “View-Set Display Options-Extrude” podemos cambiar el tipo de vista a un modelo con volumen (figura 5.46) que nos permite ver la orientación y el tamaño de cada sección para poder comparar con la realidad.

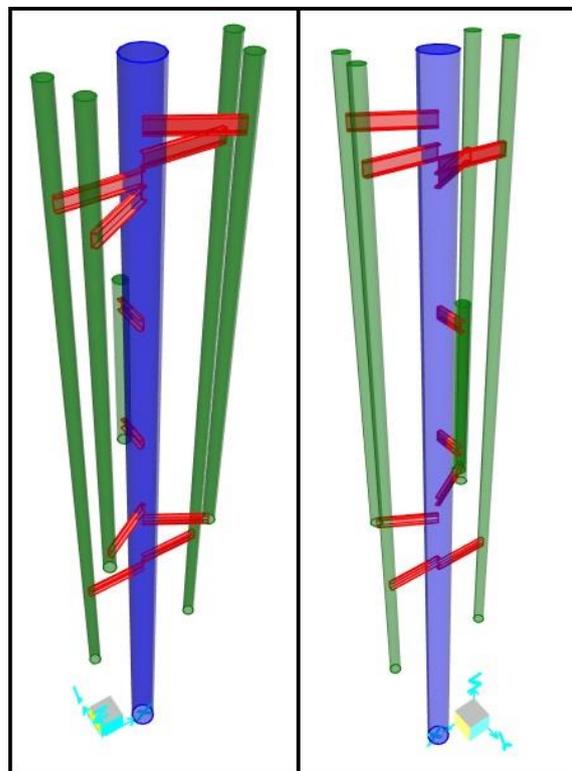


Figura 5.46 Estructura final

Podemos apreciar que, al igual que en CYPE, el programa automáticamente asigna la misma orientación en el espacio a todas las secciones similares. Únicamente nos generan problemas los perfiles.

Para reorganizar las secciones de dichos perfiles en función de su orientación real utilizamos el comando “Asign-Frame-Local Axes”, seleccionamos el perfil e introducimos el ángulo que queremos girarlo.

El resultado se muestra en la figura 5.47.

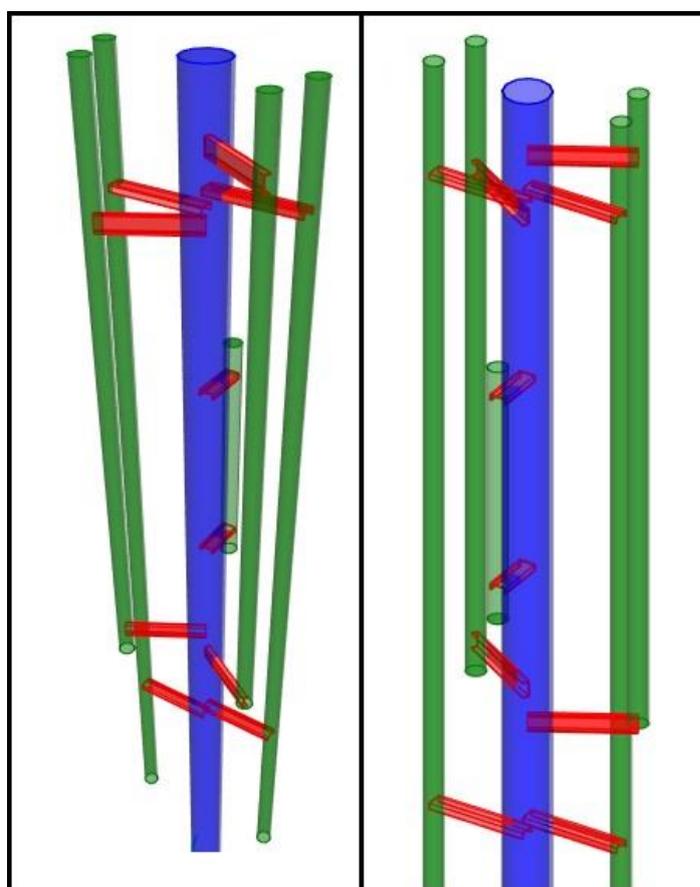


Figura 5.47 Detalle estructura

Una vez finalizada la estructura en cuanto a geometría, dimensiones y características, introduciremos las cargas que sufrirán los elementos.

Igual que en CYPE, comenzamos por las cargas puntuales. El comando mediante el cual realizamos este proceso, es el denominado “Assign-Joint Loads-Forces”.

En primer lugar, definiremos las cargas que afectan al punto mas alto de la estructura, introduciendo tanto la carga de mantenimiento (1470 N) como la carga accidental (9800 N).

El resultado se muestra en la figura 5.48.

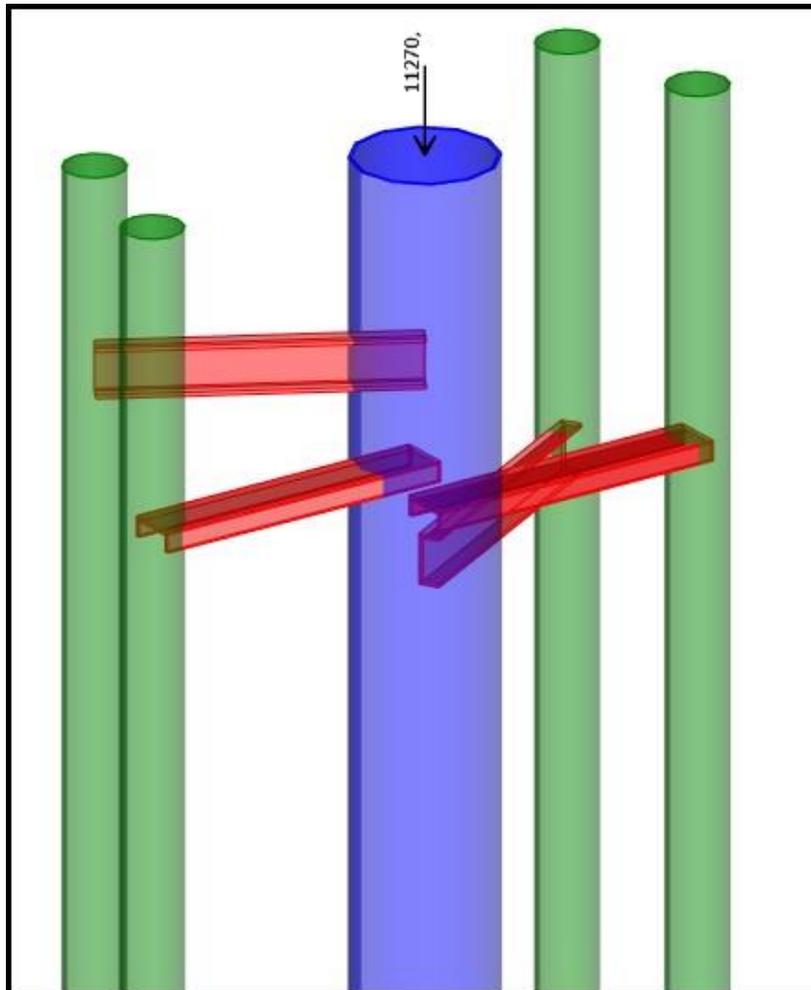


Figura 5.48 Cargas en punta de mástil (2)

En segundo lugar, añadimos las cargas puntuales que genera el radioenlace sobre el punto superior del tubo que lo soporta, las cuales serán de 300,56 N, 96,64 N y 147 N.

Por último, asignamos los pesos propios de los equipos y de la estructura. En el caso de los equipos, los colocaremos sobre los puntos medios, entre los anclajes.

Tendremos para los tubos traseros de 3 metros, fuerzas puntuales (hacia abajo) de 490 N. En el caso de los tubos delanteros de 2 metros, las fuerzas puntuales serán de 343 N al sumar antena y RRU.

El resultado se muestra en la figura 5.49.

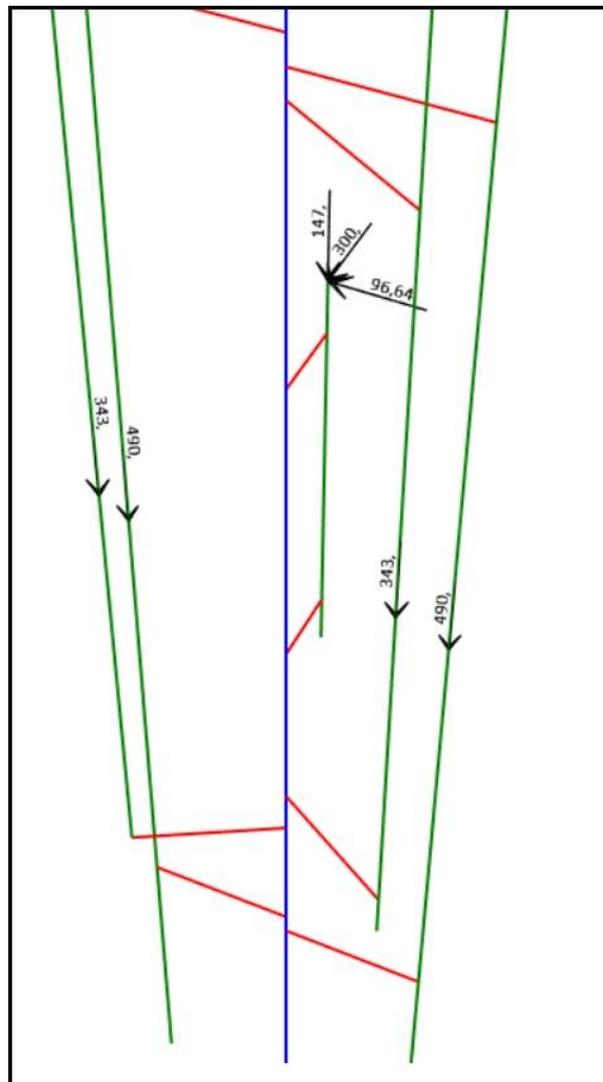


Figura 5.49 Pesos de equipos (2)

Para el peso propio de la estructura, colocaremos las cargas en los puntos medios de los elementos.

Realizamos los cálculos previos:

$$\text{Peso específico acero S275} = \rho \cdot g = 7850 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \cdot 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 76440 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}$$

Peso propio mástil:

$$\begin{aligned} Pp \text{ mástil} &= \text{Peso específico} \cdot \text{Volumen} = \\ &76440 \frac{\text{N}}{\text{m}^3} \cdot 101.4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 = \\ Pp \text{ mástil} &= 775 \text{ N} \end{aligned}$$

Peso propio tubo de 2 m:

$$\begin{aligned} Pp \text{ tubo 2 m} &= \text{Peso específico} \cdot \text{Volumen} = \\ &76440 \frac{\text{N}}{\text{m}^3} \cdot 7.3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 = \\ Pp \text{ tubo 2 m} &= 55.8 \text{ N} \end{aligned}$$

Peso propio tubo de 3 m:

$$\begin{aligned} Pp \text{ tubo 3 m} &= \text{Peso específico} \cdot \text{Volumen} = \\ &76440 \frac{\text{N}}{\text{m}^3} \cdot 10.95 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 = \\ Pp \text{ tubo 3 m} &= 83.7 \text{ N} \end{aligned}$$

Peso propio tubo de 0,8 m:

$$\begin{aligned} Pp \text{ tubo 0,8 m} &= \text{Peso específico} \cdot \text{Volumen} = \\ &76440 \frac{\text{N}}{\text{m}^3} \cdot 2.92 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 = \\ Pp \text{ tubo 0,8 m} &= 22.32 \text{ N} \end{aligned}$$

Una vez calculados y definidos todos los pesos, tendremos un resultado como el que muestra la figura 5.50.

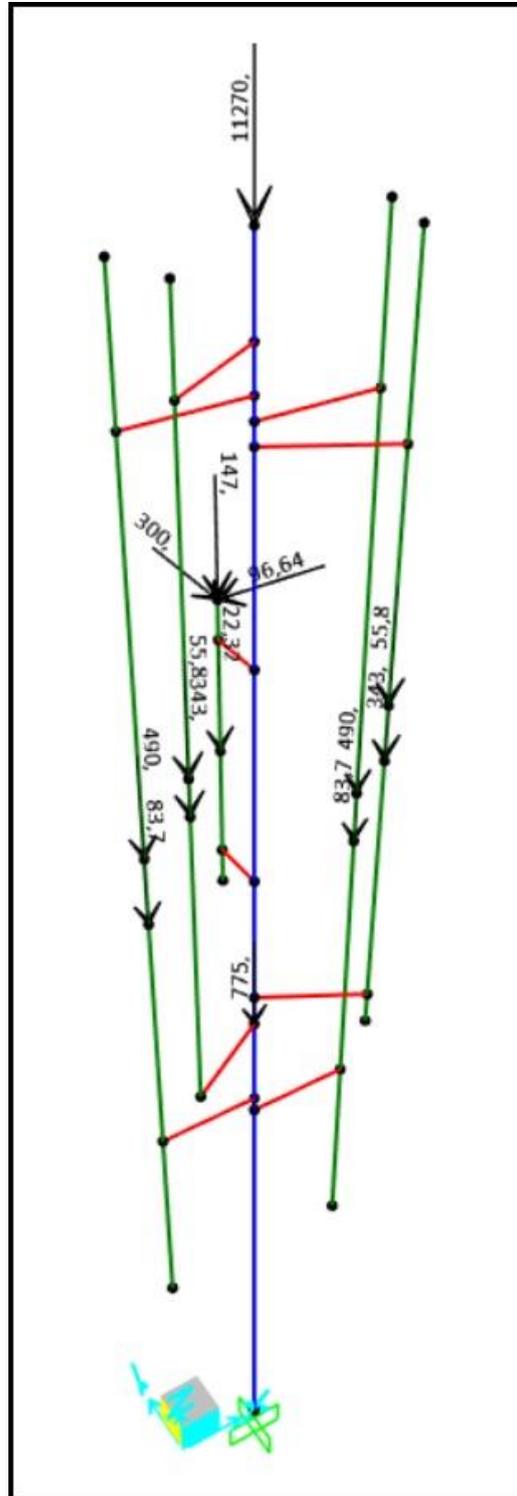


Figura 5.50 Pesos propios

El siguiente paso será la asignación de las cargas producidas por el viento sobre los equipos. Esta parte es un poco más compleja debido a que son fuerzas distribuidas y en ciertas partes de la estructura, variables.

Como explicamos previamente, son las cargas mas preocupantes ya que producen el tan temido “momento flector” sobre la base de la estructura, responsable en gran medida de que se produzca la plastificación.

Para el modelo hemos elegido el caso mas desfavorable, suponiendo que el viento sopla en 2 direcciones a la vez (cosa que en realidad es imposible) para comprobar la resistencia de la estructura.

Introducimos las cargas mediante el comando “Assign-Frame Loads-Distributed”. En las antenas de mayores dimensiones y la dirección frontal (eje X), tendremos una carga distribuida de 540,17 N/m.

Una vez definida la carga, la figura 5.51 nos muestra el resultado.

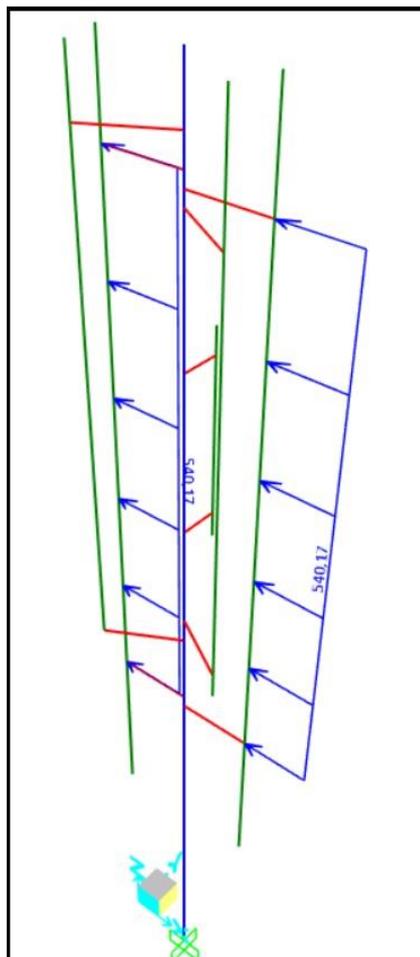


Figura 5.51 Viento frontal en antenas de 2 m (2)

Para completar las cargas sobre dichas antenas de mayor tamaño añadimos la carga distribuida lateral (eje y), en este caso de 186 N/m perpendicular a la anterior (figura 5.52).

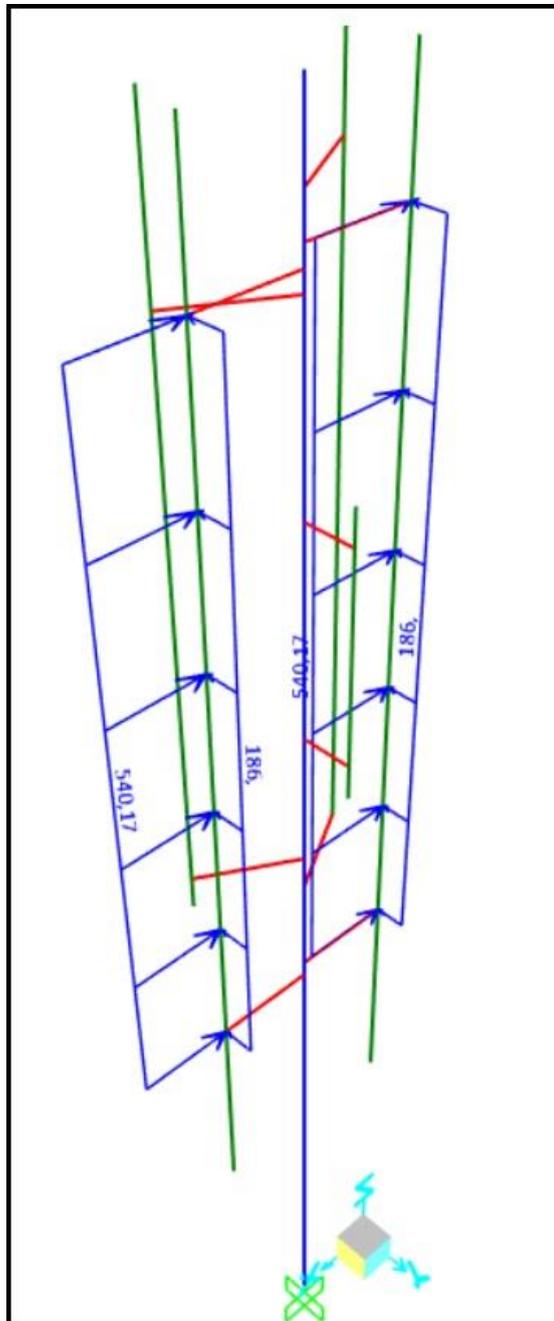


Figura 5.52 Viento lateral en antenas de 2 m (2)

Continuamos estableciendo las cargas que sufren las antenas de 1,5 m. Estas antenas tienen una superficie expuesta al viento menor, por lo que su aportación en cuestión de esfuerzos es también menor.

Hay que tener en cuenta que los tubos que soportan estas antenas tienen instaladas también las RRUS, por lo que tendremos que sumar a la anchura de antena, la aportación de éstas.

En consecuencia, para el viento en la dirección frontal (eje x) tendremos 2 tramos con un valor de 163,6 N/m y un tramo intermedio en el que tendremos que sumar la anchura de las RRUS. El resultado en este tramo intermedio será una carga con un valor de 499,7 N/m.

La figura 5.53 muestra la combinación de cargas en ambos ejes y nos permite ver la diferenciación en los tramos en los que contribuye la RRU.

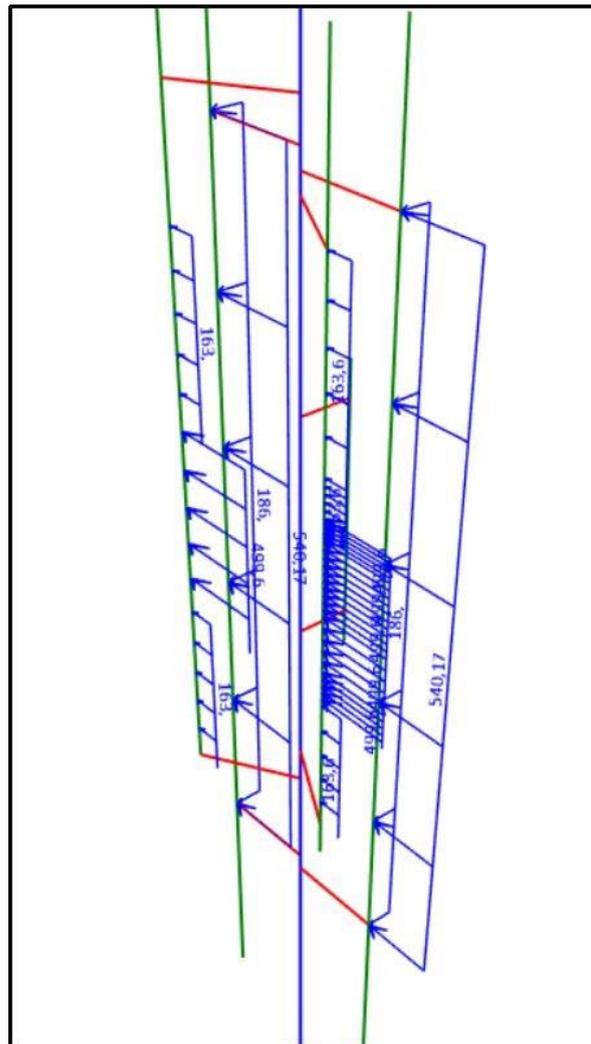


Figura 5.53 Viento frontal en antenas de 1.5 m (2)

5.3.2 Análisis de axiles

Comenzaremos el análisis de los resultados con el diagrama de axiles.

Podemos observar que el único elemento preocupante es el mástil.
De hecho, los esfuerzos que sufren el resto de elementos es despreciable en comparación con el.

El punto más crítico vuelve a ser (como podemos observar en la figura 5.56) el punto de anclaje con la base.

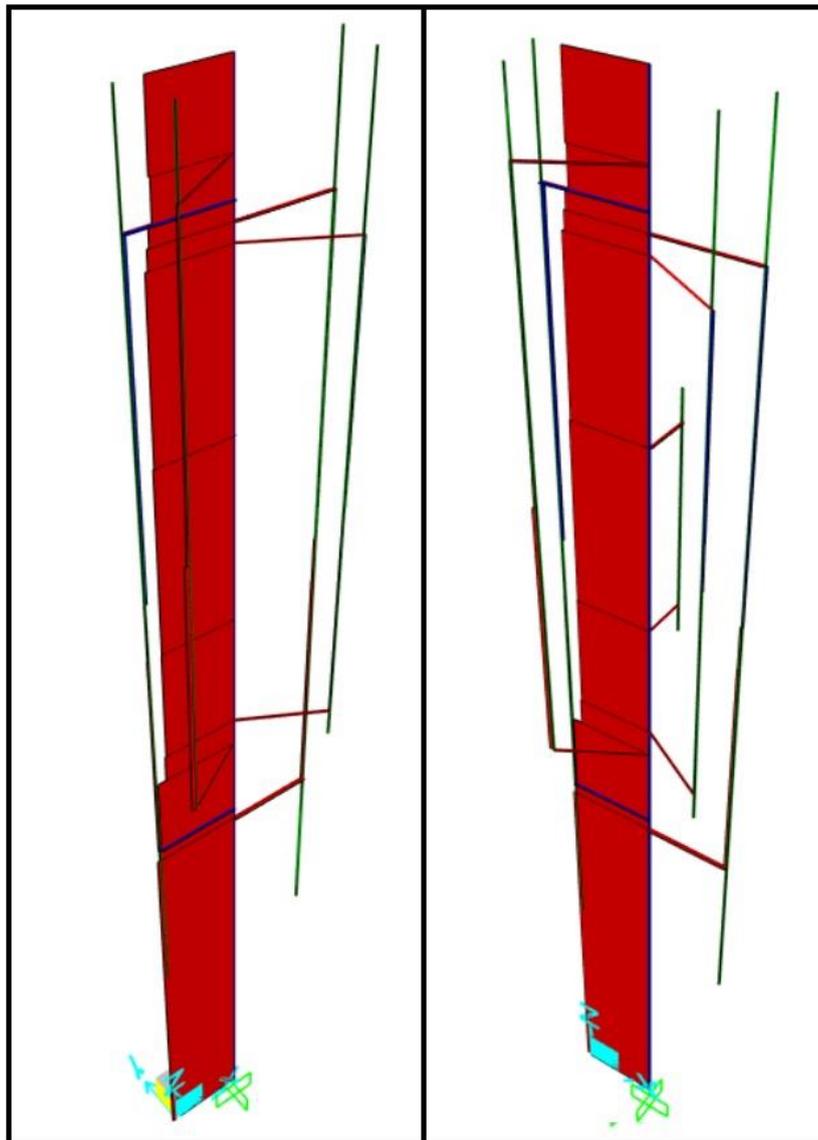


Figura 5.56 Esfuerzos axiles (2)

Mediante el análisis que nos proporciona el programa (figura 5.57) podemos observar la evolución del esfuerzo axial a lo largo de toda la longitud del mástil.

Seleccionamos la opción que nos permite observar el máximo y su magnitud es de 15821,36 N en la cota cero, es decir, en la base del mástil.

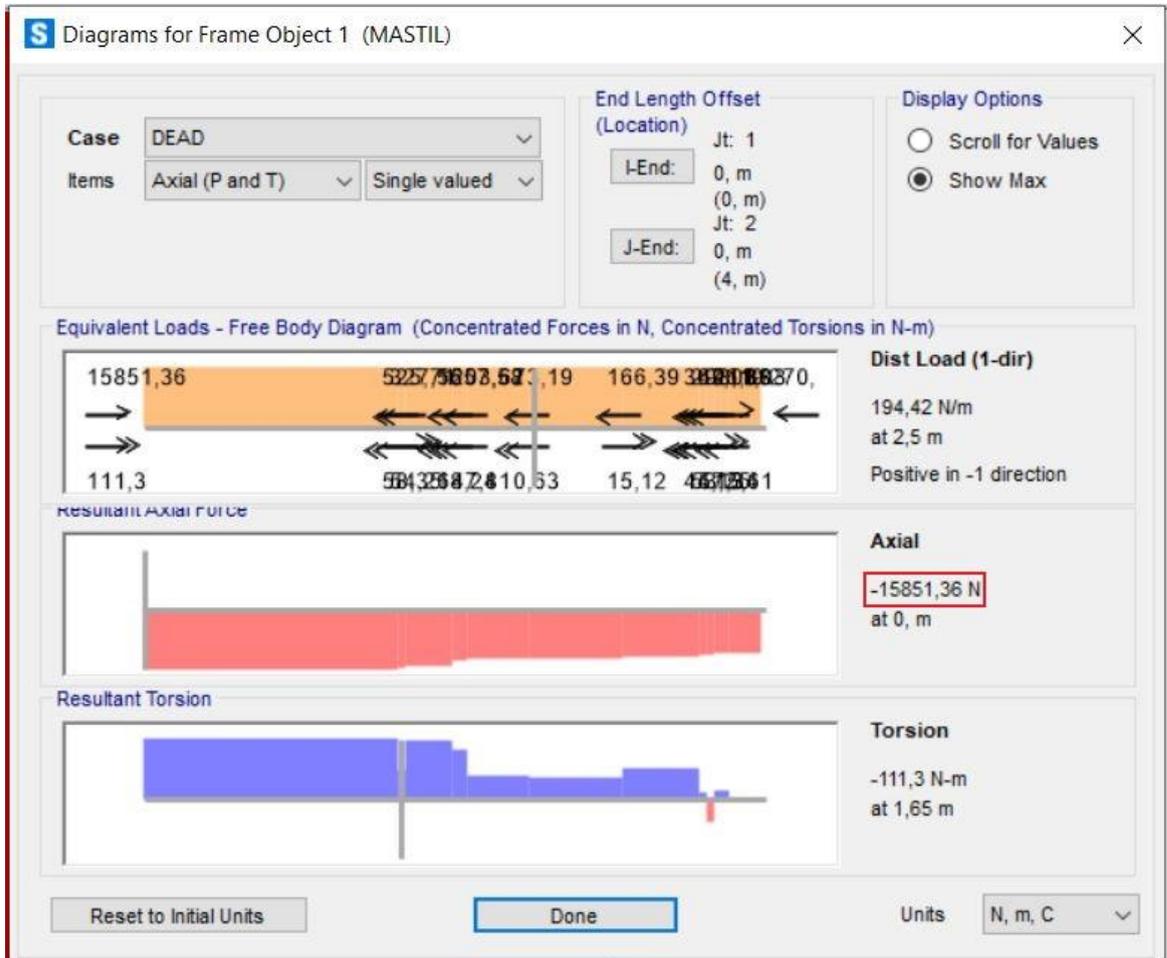


Figura 5.57 Resultado axiles

5.3.3 Análisis de cortantes

En segundo lugar, será objeto de nuestro estudio el diagrama de cortantes de toda la estructura.

Tenemos que tener en cuenta que habrá 2 esfuerzos cortantes (V_z y V_y) que analizar, por lo que habrá que compararlos y determinar cual es más crítico.

Exactamente igual que en el análisis de axiles, el elemento más preocupante sigue siendo el mástil.

Ello se debe a que a medida que disminuimos la cota, se van acumulando las contribuciones de los distintos elementos que sufren cargas.

Compararemos ambos mediante las figuras 5.58 y 5.59 para ver cuál tiene una magnitud mayor:

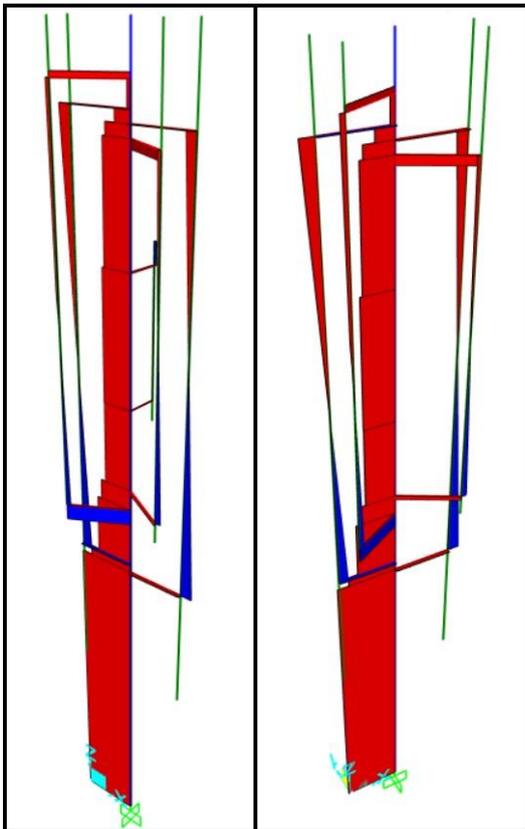
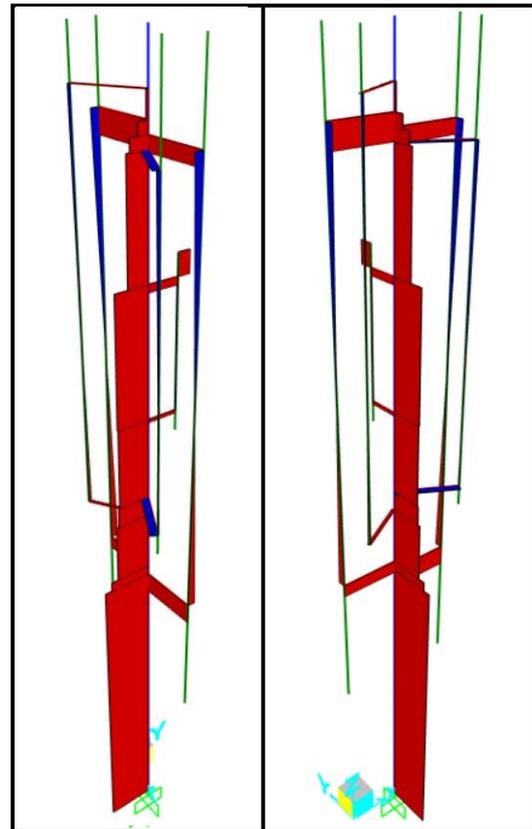


Figura 5.58 Esfuerzo cortante (V_z) (2)



5.59 Esfuerzo cortante (V_y) (2)

Podemos concluir a simple vista que el esfuerzo cortante V_z (al igual que en el caso de análisis mediante CYPE) es mayor, pero comprobaremos los resultados de forma analítica para confirmarlo.

Utilizamos la herramienta que nos permite estudiar la evolución del esfuerzo a lo largo de todo el mástil.

En la siguiente página (figura 5.60 y figura 5.61) tendremos los resultados, en primer lugar para el caso del cortante V_z , y en segundo lugar para el caso del cortante V_y .

ESTUDIO DE VIABILIDAD ESTRUCTURAL EN MÁSTIL DE TELECOMUNICACIONES Y ANÁLISIS MEDIANTE SOFTWARE

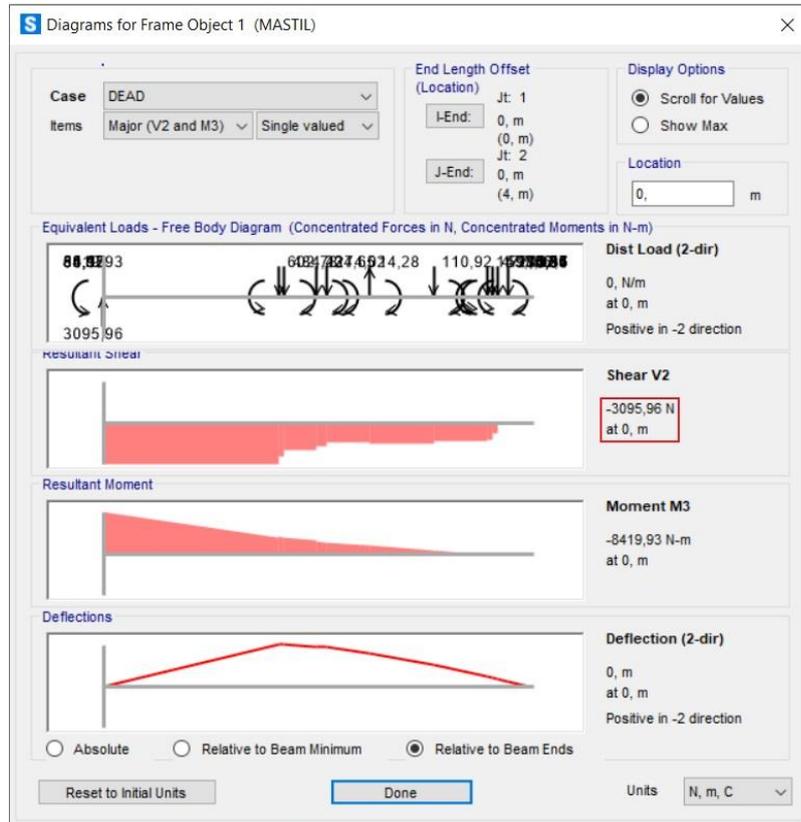


Figura 5.60 Resultado cortante Vz

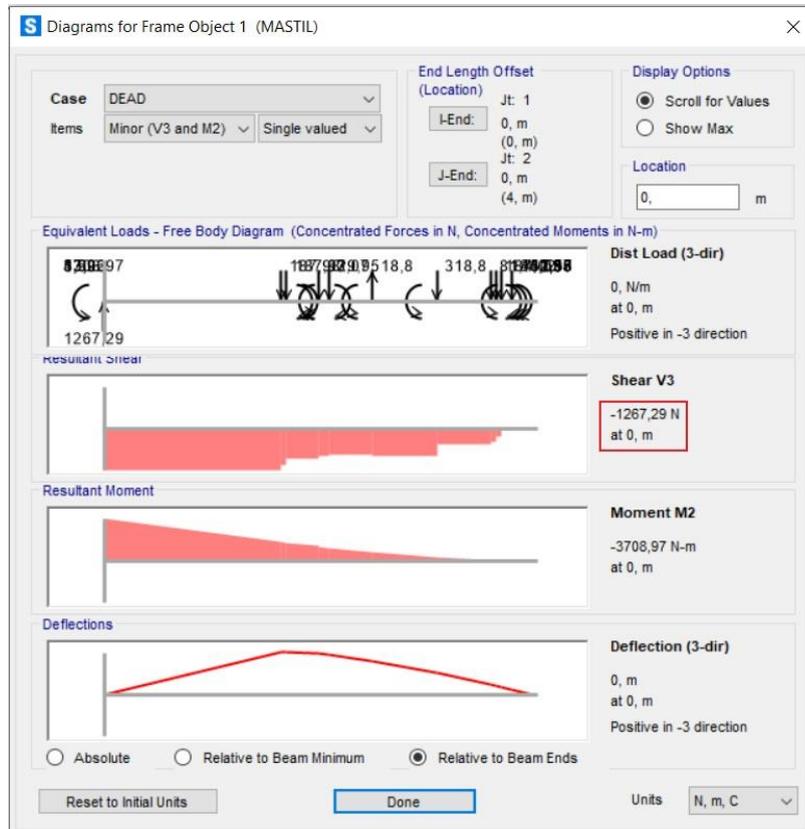


Figura 5.61 Resultado cortante Vy

Si comparamos el resultado:

$$V_z = 3095 \text{ N}$$

$$V_y = 1267 \text{ N}$$

Podemos confirmar que el cortante V_z es mayor que el cortante V_y .

5.3.4 Análisis de flectores

Analizaremos en último lugar el diagrama de flectores de la estructura.

Tendremos en este caso 2 esfuerzos flectores que estudiar: M_y y M_z .

Se repite el mismo patrón que en el caso de los cortantes, ya que de nuevo tendremos como punto más crítico la base del mástil.

Comparamos ambos esfuerzos mediante sus diagramas y hojas de resultado representados en las figuras 5.62, 5.63, 5.64, 5.65.

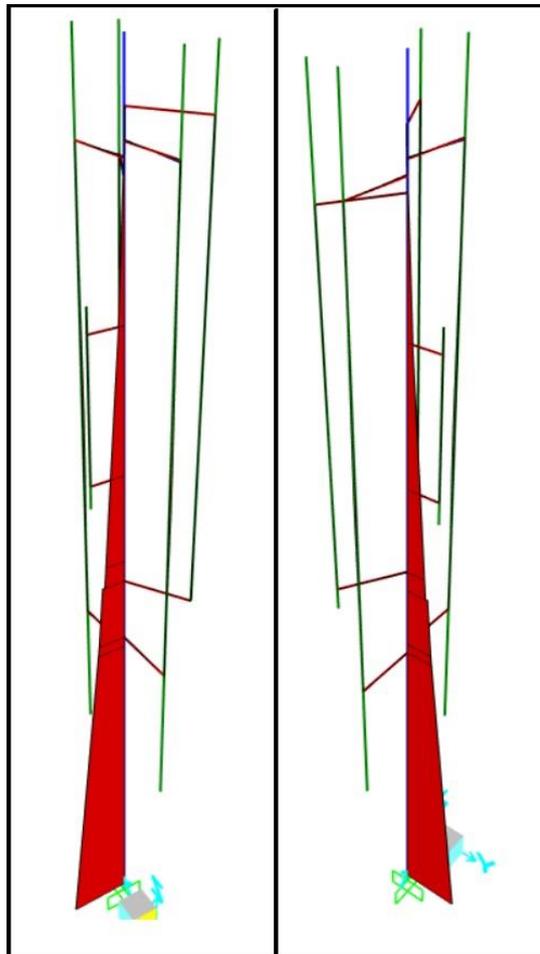


Figura 5.62 Momento flector (M_y) (2)

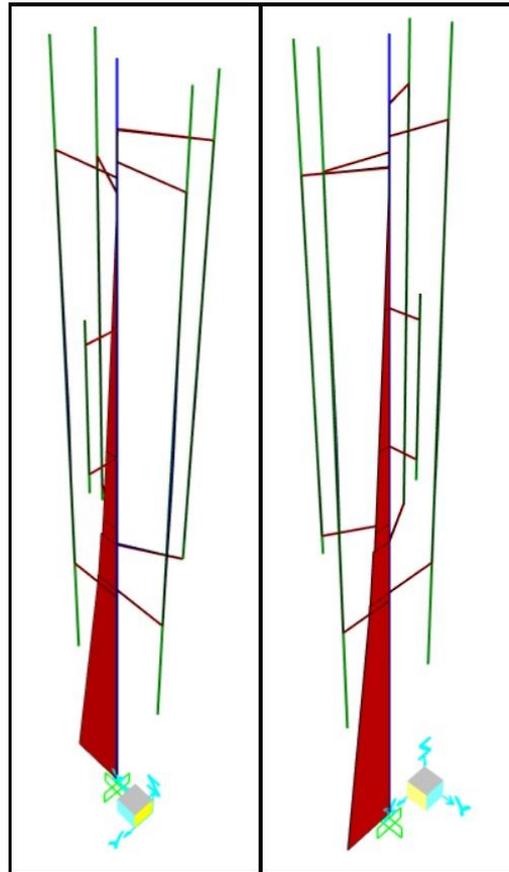


Figura 5.63 Momento flector (M_y) (2)

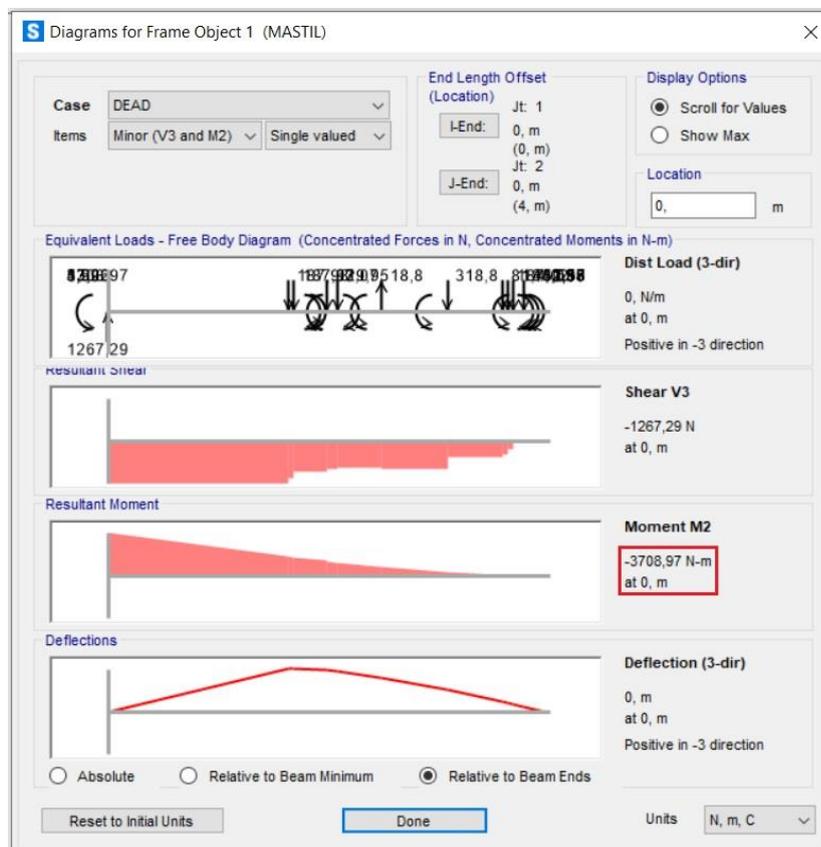


Figura 5.64 Resultado flector M_y

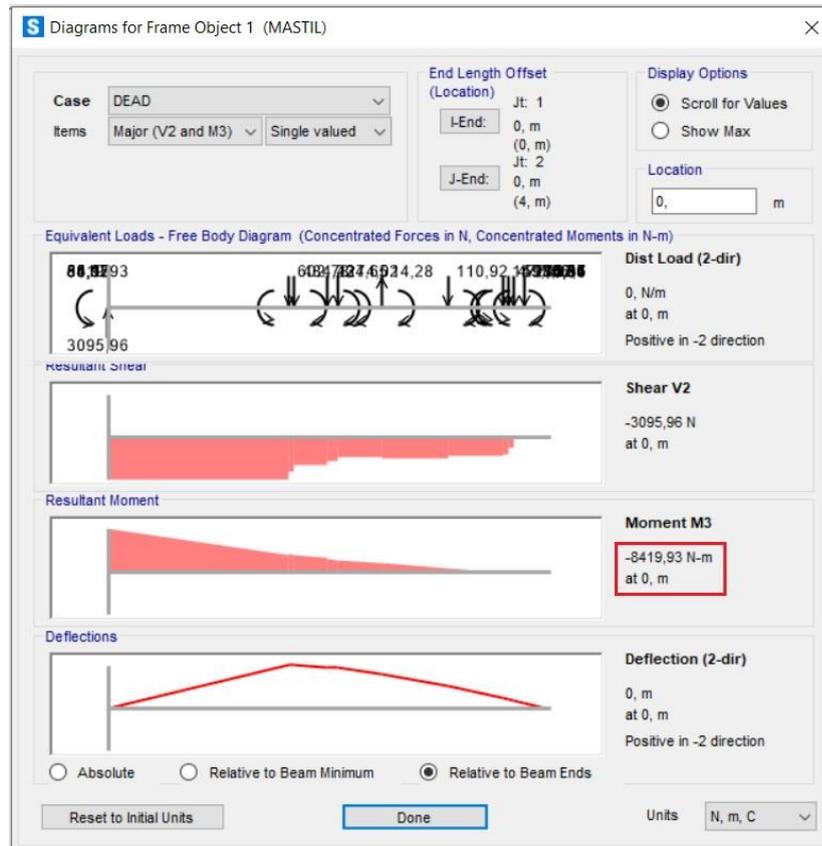


Figura 5.65 Resultado flector Mz

Podemos concluir que el momento flector Mz es de mayor magnitud (más del doble) debido a que las cargas producidas sobre el frontal de las antenas son mayores.

5.3.5 Análisis de desplazamientos

Pasaremos a analizar tanto los desplazamientos máximos en los distintos puntos de la estructura como la flecha máxima.

El programa nos da la opción de visualizar la deformada de la estructura (figura 5.66):

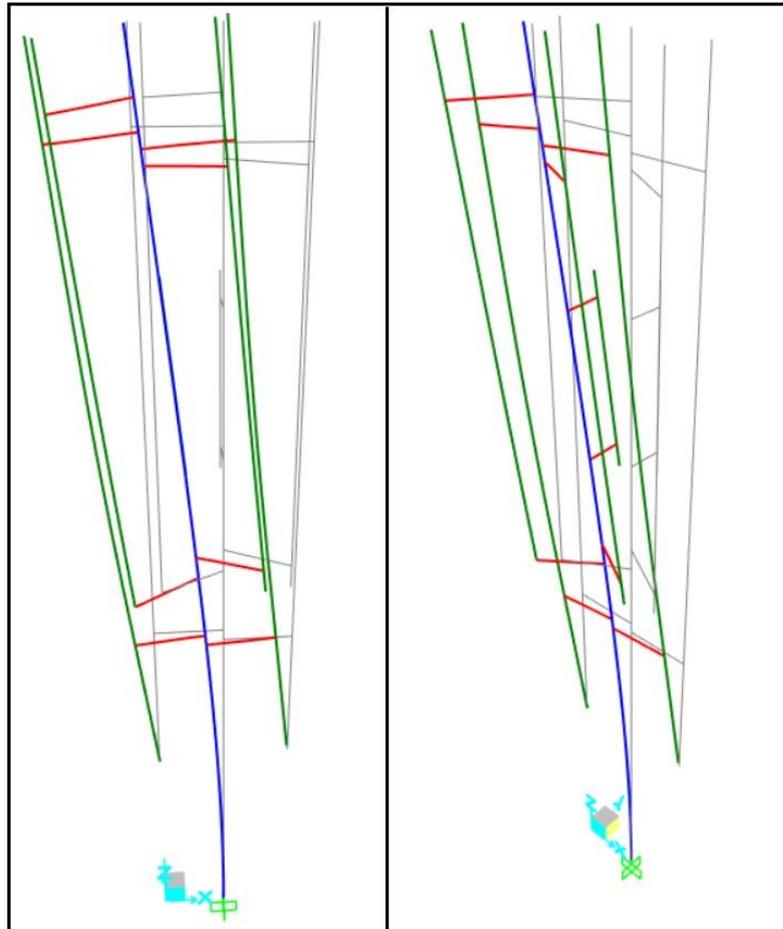


Figura 5.66 Deformada

Además de la deformada, podemos exportar hojas de Excel con los resultados tanto de esfuerzos como de desplazamientos, lo que nos permite analizar todos los datos de forma rápida y precisa.

Para el caso de los desplazamientos, la tabla de la figura 5.67 nos muestra los siguientes valores máximos en el eje X:

ESTUDIO DE VIABILIDAD ESTRUCTURAL EN MÁSTIL DE
TELECOMUNICACIONES Y ANÁLISIS MEDIANTE SOFTWARE

TABLE: Joint Displacements								
Joint	OutputCase	CaseType	U1	U2	U3	R1	R2	R3
Text	Text	Text	m	m	m	Radian	Radian	Radian
30	DEAD	LinStatic	-0,030901	-0,01457	0,001767	0,004416	-0,009602	-0,003313
2	DEAD	LinStatic	-0,030898	-0,014139	-0,000105	0,004833	-0,010453	-0,000323
29	DEAD	LinStatic	-0,03086	-0,013836	-0,003377	0,004653	-0,00949	-0,001392
25	DEAD	LinStatic	-0,030228	-0,013803	-0,0034	0,003734	-0,008215	0,000067
27	DEAD	LinStatic	-0,029939	-0,013934	0,002329	0,003735	-0,007712	-0,000658
22	DEAD	LinStatic	-0,028962	-0,012906	-0,003376	0,004653	-0,00949	-0,001392
21	DEAD	LinStatic	-0,028807	-0,013172	-0,000101	0,004833	-0,010453	-0,000323
20	DEAD	LinStatic	-0,027764	-0,012683	-0,0034	0,003734	-0,008215	0,000067
19	DEAD	LinStatic	-0,027761	-0,012689	-0,000099	0,004837	-0,01046	-0,000321
18	DEAD	LinStatic	-0,02724	-0,012626	0,002329	0,003735	-0,007712	-0,000658
17	DEAD	LinStatic	-0,027238	-0,012447	-0,000098	0,004839	-0,010459	-0,000323
16	DEAD	LinStatic	-0,02706	-0,012803	0,001767	0,004416	-0,009602	-0,003313
15	DEAD	LinStatic	-0,026714	-0,012204	-0,000097	0,00484	-0,01046	-0,000323
23	DEAD	LinStatic	-0,022475	-0,01027	0,000605	0,004746	-0,010153	-0,000248
13	DEAD	LinStatic	-0,021496	-0,009795	-0,000085	0,004772	-0,010336	-0,000292
14	DEAD	LinStatic	-0,02146	-0,009795	0,000605	0,004727	-0,010147	-0,000248
36	DEAD	LinStatic	-0,021308	-0,009218	-0,003375	0,004619	-0,009871	-0,001399
38	DEAD	LinStatic	-0,021214	-0,010131	0,001766	0,004538	-0,009962	-0,003324
35	DEAD	LinStatic	-0,020315	-0,008756	-0,003375	0,004631	-0,009997	-0,0014

Figura 5.67 Tabla de desplazamientos (Eje x)

Dichos valores máximos (mayores de 30 mm o muy próximos) se dan en los nudos 30, 2, 29, 25 y 27, que coinciden con los nudos de mayor cota, es decir, el extremo superior tanto del mástil como de los tubos de 2 m y 3 m.

Los valores máximos para el eje y podemos analizarlos en la figura 5.68:

TABLE: Joint Displacements								
Joint	OutputCase	CaseType	U1	U2	U3	R1	R2	R3
Text	Text	Text	m	m	m	Radian	Radian	Radian
30	DEAD	LinStatic	-0,030901	-0,01457	0,001767	0,004416	-0,009602	-0,003313
2	DEAD	LinStatic	-0,030898	-0,014139	-0,000105	0,004833	-0,010453	-0,000323
27	DEAD	LinStatic	-0,029939	-0,013934	0,002329	0,003735	-0,007712	-0,000658
29	DEAD	LinStatic	-0,03086	-0,013836	-0,003377	0,004653	-0,00949	-0,001392
25	DEAD	LinStatic	-0,030228	-0,013803	-0,0034	0,003734	-0,008215	0,000067
21	DEAD	LinStatic	-0,028807	-0,013172	-0,000101	0,004833	-0,010453	-0,000323
22	DEAD	LinStatic	-0,028962	-0,012906	-0,003376	0,004653	-0,00949	-0,001392
16	DEAD	LinStatic	-0,02706	-0,012803	0,001767	0,004416	-0,009602	-0,003313
19	DEAD	LinStatic	-0,027761	-0,012689	-0,000099	0,004837	-0,01046	-0,000321
20	DEAD	LinStatic	-0,027764	-0,012683	-0,0034	0,003734	-0,008215	0,000067
18	DEAD	LinStatic	-0,02724	-0,012626	0,002329	0,003735	-0,007712	-0,000658
17	DEAD	LinStatic	-0,027238	-0,012447	-0,000098	0,004839	-0,010459	-0,000323
15	DEAD	LinStatic	-0,026714	-0,012204	-0,000097	0,00484	-0,01046	-0,000323
23	DEAD	LinStatic	-0,022475	-0,01027	0,000605	0,004746	-0,010153	-0,000248
38	DEAD	LinStatic	-0,021214	-0,010131	0,001766	0,004538	-0,009962	-0,003324

Figura 5.68 Tabla de desplazamientos (Eje y)

ESTUDIO DE VIABILIDAD ESTRUCTURAL EN MÁSTIL DE TELECOMUNICACIONES Y ANÁLISIS MEDIANTE SOFTWARE

Como podemos observar en la figura 5.69, los puntos de desplazamiento máximo en este eje coinciden con los del eje X.

Dichos puntos serán de nuevo los nodos 30, 2, 29, 25 y 27.

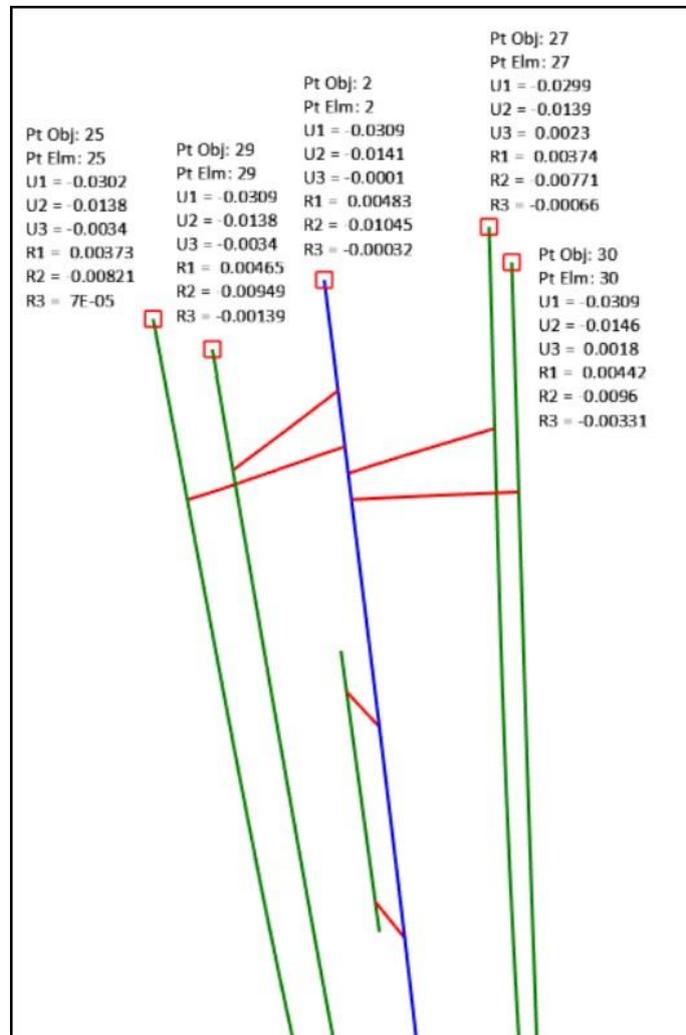


Figura 5.69 Desplazamientos

5.3.6 Análisis de tensiones

Finalizaremos realizando el análisis de las tensiones máximas que soporta la sección más crítica.

Utilizando los datos recogidos anteriormente en cuanto a esfuerzos axil y flector, observamos que parte mas cargada es la base del mástil.

Para dicha sección, el axil y el flector tienen los siguientes valores:

- ◆ $N_{max} = 15851 \text{ N}$
- ◆ $M_{zmax} = 8419 \text{ N}\cdot\text{m}$

Los datos que emplearemos para realizar el cálculo son los siguientes:

- ◆ $Area = 25.26 \text{ cm}^2$
- ◆ $I_y = 568.06 \text{ cm}^4$
- ◆ $I_z = 568.06 \text{ cm}^4$
- ◆ $I_t = 1136.12 \text{ cm}^4$

Repetimos la misma operación que para el cálculo con CYPE (ecuación 4):

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{I_z} \cdot h_{max} + \frac{N_{max}}{A} \quad [4]$$

Sustituyendo los datos:

$$\sigma_{max} = \frac{8419 \text{ (N}\cdot\text{m)}}{568.06 \cdot 10^{-8} \text{ (m}^4\text{)}} \cdot 70 \cdot 10^{-3} \text{ (m)} + \frac{15851 \text{ (N)}}{25.26 \cdot 10^{-4} \text{ (m}^2\text{)}}$$

$$\sigma_{max} = 110019461 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \text{ (Pa)} = 110,01 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \text{ (MPa)}$$

Comprobamos que no plastifica según la ecuación 5:

$$\sigma_{max} = 110,01 \text{ MPa} \leq \sigma_e = 275 \text{ MPa} \quad [5]$$

5.3.7 Análisis de inestabilidad

SAP nos ofrece además una herramienta que permite analizar la inestabilidad y el pandeo que generan las cargas.

Creamos un *Load Case* al que llamamos “Pandeo” de tipo *Buckling* tal y como vemos en la figura 5.70:

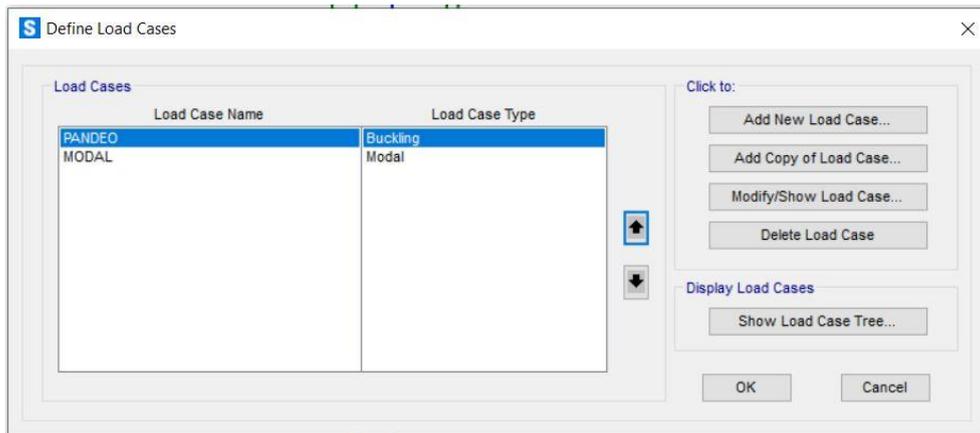


Figura 5.70 Definición de caso de carga

Lo nombramos como “Pandeo”, seleccionamos las cargas incluidas en el patrón de cargas “*DEAD*” y añadimos un factor de escala de 1.35 (figura 5.71):

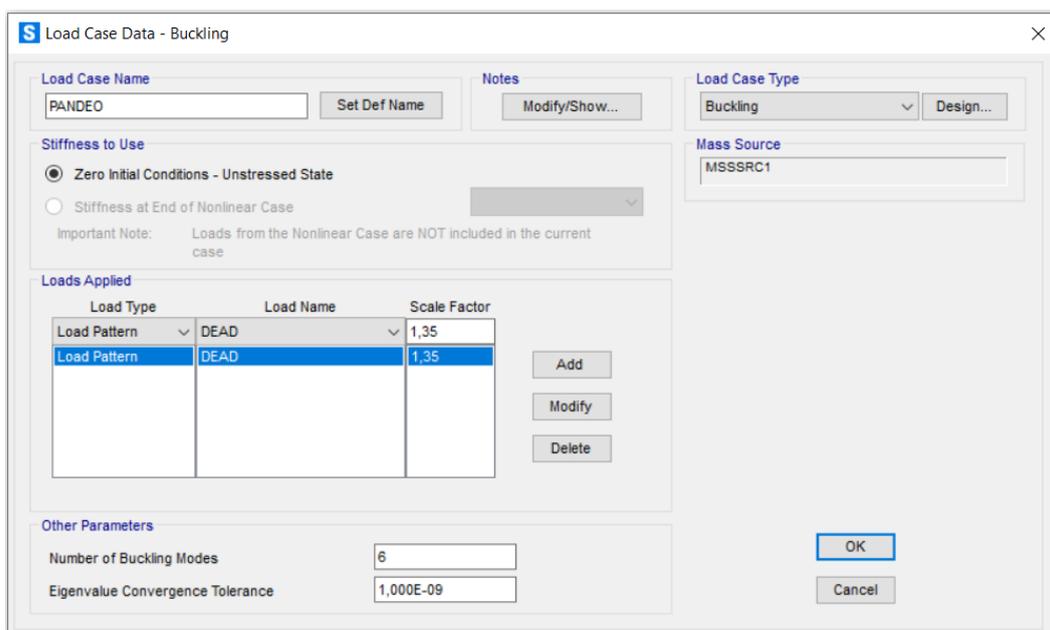


Figura 5.71 Condiciones caso de carga

Ejecutamos el análisis y el valor que nos arroja el programa es 10,43135.

Dicho valor es el factor por el que tendríamos que multiplicar nuestro estado de cargas actual para que comenzasen a darse fenómenos de inestabilidad o pandeo.

Por lo tanto, podemos concluir que nuestra estructura soporta perfectamente las cargas a las que esta sometida.

Capítulo 6. Comparación y conclusiones

Como punto final del estudio llevado a cabo en este documento, compararemos los resultados obtenidos con ambos software y explicaremos las conclusiones obtenidas.

Iremos punto por punto, comenzando por los valores obtenidos para los esfuerzos axiales y terminando por los desplazamientos.

De esta forma, podremos ver las diferencias entre ambos, cuál es más permisivo en cuanto a cargas, cuál es más preciso, etc.

◆ COMPARACIÓN DE AXILES

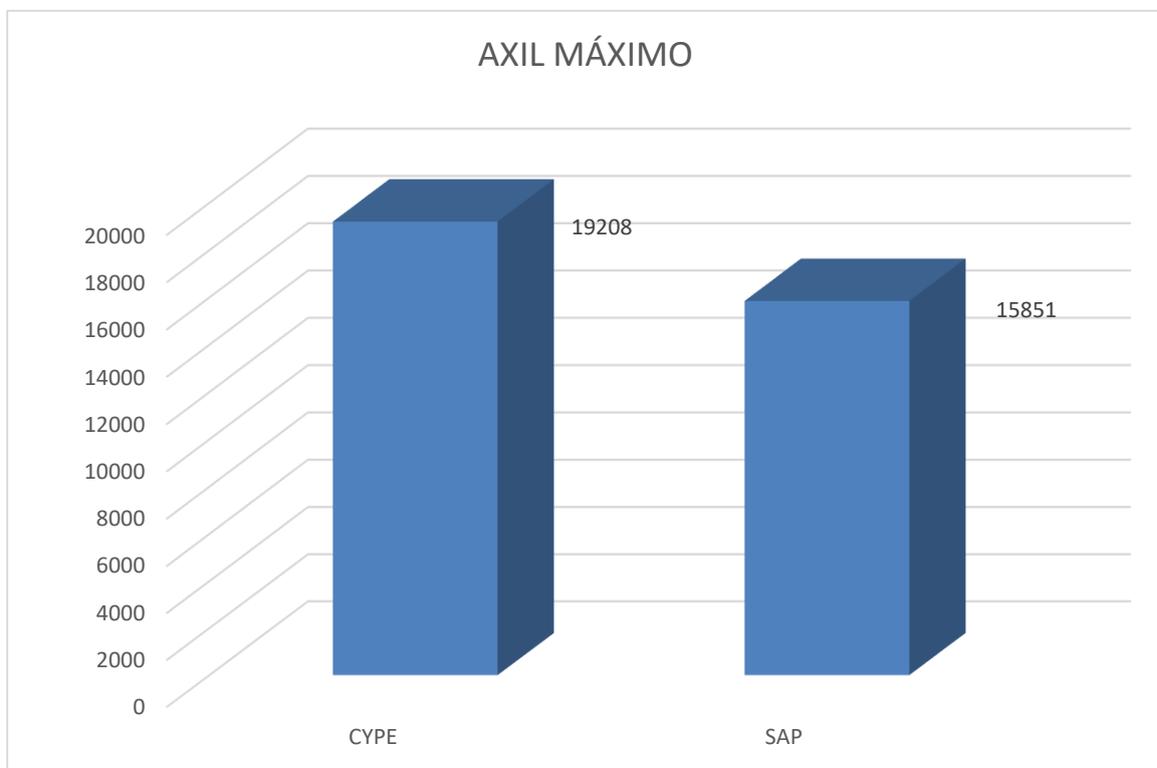


Figura 5.72 Comparación de axiles

Podemos observar en la figura 5.70 que el valor obtenido en CYPE es 1,21 veces mayor que el obtenido mediante SAP.

Son bastante similares, ya que una diferencia de esa magnitud en el estado real no es muy significativa.

Respecto al análisis general, podemos ver que CYPE nos aporta valores mas “críticos” para el mismo estado de cargas.

◆ COMPARACIÓN DE CORTANTES

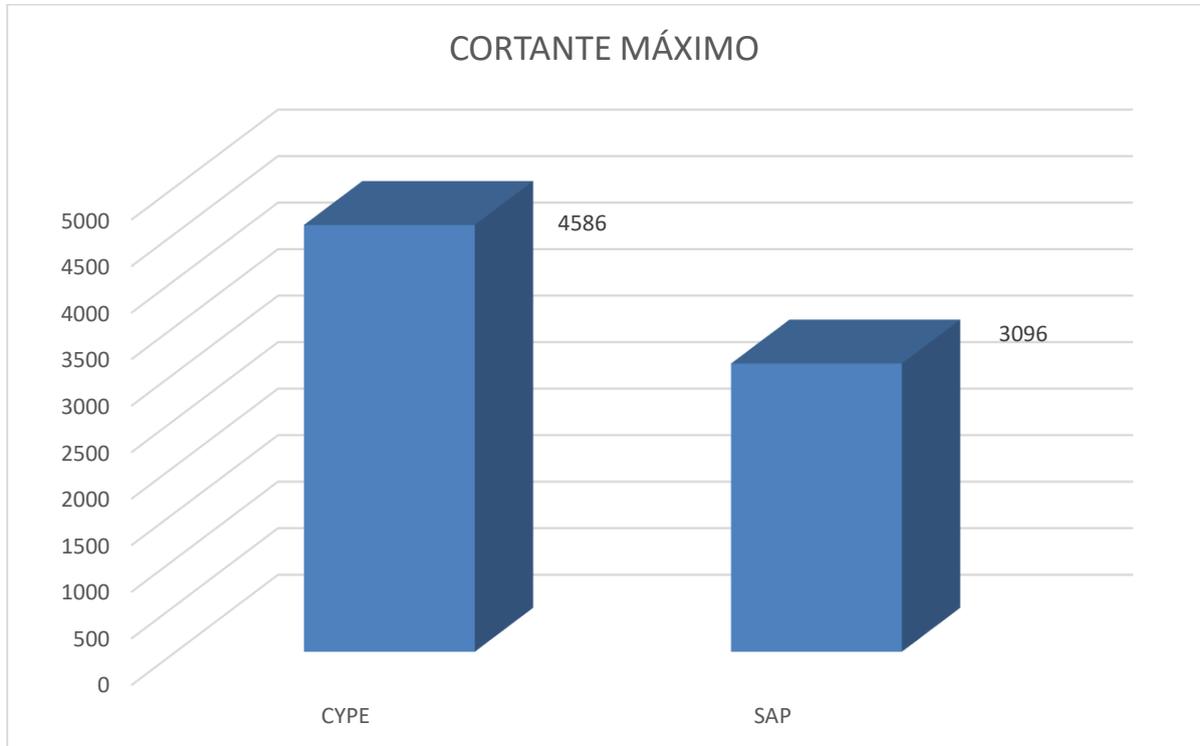


Figura 5.73 Comparación de cortantes

En el caso de los cortantes, según la figura 5.71, el valor obtenido en CYPE es 1,48 veces mayor que el obtenido mediante SAP.

La magnitud de los esfuerzos cortantes es menor que la de los axiles, por lo que su contribución al posible fallo de la estructura es menor (hasta 4 veces) en el caso de que se diese.

Observamos que CYPE sigue aportándonos unos valores más críticos respecto de la estructura que SAP.

◆ COMPARACIÓN DE FLECTORES

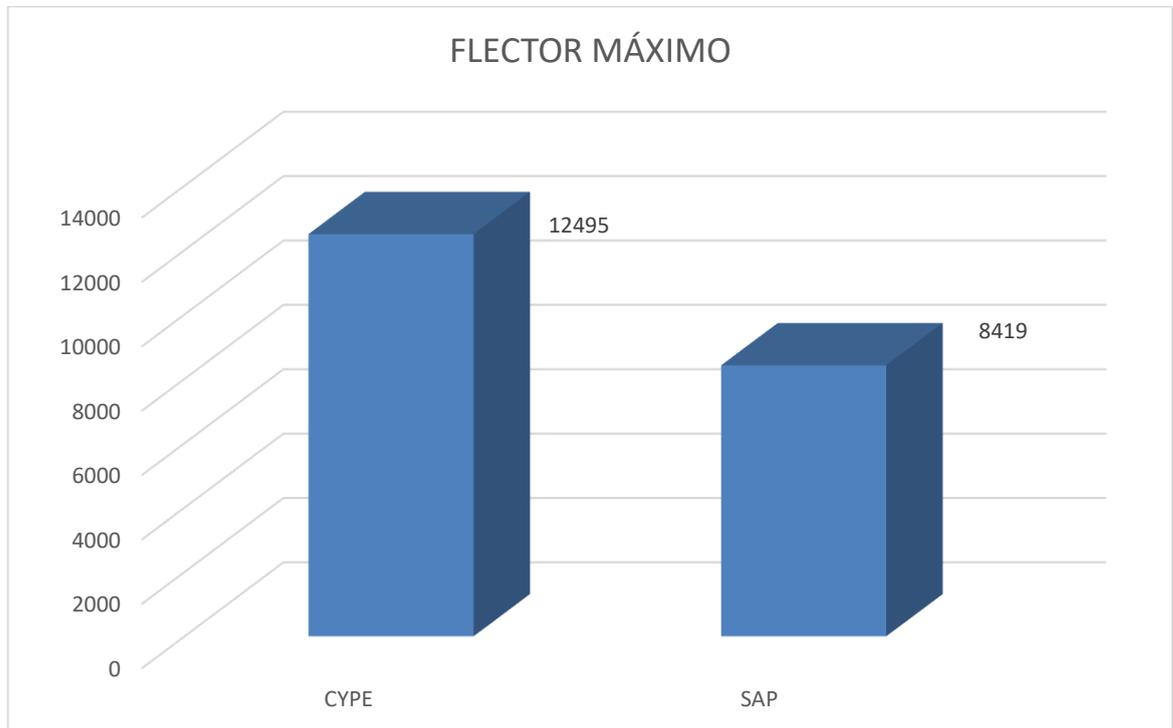


Figura 5.74 Comparación de flectores

En tercer lugar, analizaremos los flectores (figura 5.72).

El valor que arroja CYPE es en este caso 1,48 (prácticamente igual que en el caso de los cortantes) veces superior al de CYPE.

En este caso sí que es un valor teóricamente más preocupante, ya que es el principal factor que puede llegar a producir plastificación.

Pese a todo, como pudimos observar al realizar el cálculo de las tensiones, no se llega a producir plastificación de la base en ninguno de los casos.

◆ COMPARACIÓN DE DESPLAZAMIENTOS

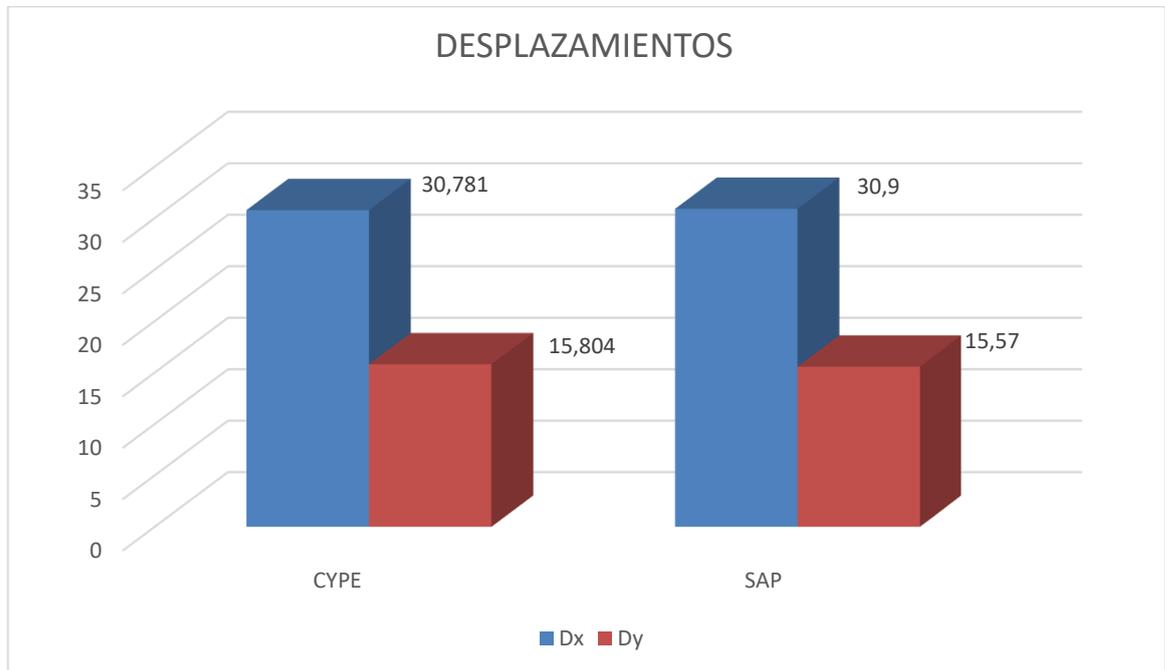


Figura 5.75 Comparación de desplazamientos

En último lugar y para finalizar, analizaremos los desplazamientos máximos de la estructura (figura 5.73).

Podemos ver que los resultados que arrojan ambos programas son prácticamente iguales (las diferencias no llegan al milímetro) y coinciden en los puntos de mayor cota del mástil y los 4 tubos que soportan las antenas

La magnitud máxima se da en el eje X y tiene un valor de unos 30 mm, es decir, unos 3 cm.

Teniendo en cuenta la velocidad del viento que hemos supuesto y que este sopla en 2 direcciones, se trata de unos valores muy asequibles y que no suponen problema alguno para la estabilidad de la estructura.

Como conclusión final, al ser los desplazamientos prácticamente iguales en ambos casos, podemos afirmar que las diferencias que hemos observado en los esfuerzos se deben a las ponderaciones y distintos coeficientes de seguridad que tiene en cuenta CYPE a la hora de realizar los cálculos.

Capítulo 7. Consideraciones adicionales

Para finalizar, en este último apartado, analizaremos temas tan importantes como la seguridad, el aspecto medioambiental o el aspecto económico.

7.1 Seguridad

La seguridad en el sector de las telecomunicaciones es una parte esencial y se tiene muy en cuenta debido a que la mayoría de actuaciones que se realizan (cambios de equipos, antenas, levantamiento de nuevos emplazamientos, etc) tanto en ámbitos urbanos como rurales implican lo que se denomina “trabajos en altura”.

Trabajo en altura se considera aquel que se realiza a más de 2 metros de altura y que por lo tanto, conlleva riesgo potencial de caída desde una altura tal que puede poner en peligro la vida del trabajador.

Para disminuir el riesgo que existe derivado de este tipo de trabajo se dota a las infraestructuras y a los trabajadores de equipos de protección tanto individuales como colectivos.

Todas las torres y mástiles por ley, disponen de un sistema de seguridad similar a un raíl, que se basa en el funcionamiento de las líneas de vida.

De esta forma, el trabajador, mediante un dispositivo que va unido al arnés, se ancla a dicha línea de vida y en el caso de que se produzca un resbalón, tropiezo, etc, el dispositivo se bloquea impidiendo que el trabajador caiga.

Por otro lado, el propio operario dispone de EPIS (casco, guantes, arnés, botas de seguridad) que buscan minimizar el riesgo y protegerlo.

7.2 Aspecto medioambiental

El tema medioambiental en cuanto a las redes móviles es objeto de controversia.

El desconocimiento general y la gran cantidad de bulos y “leyendas urbanas” que se han extendido a lo largo de los años provocan que la población sea reticente a instalar mástiles en edificios de comunidades o en fincas privadas.

Si bien es cierto que se producen radiaciones electromagnéticas, no son perjudiciales para la salud.

La magnitud de dichas radiaciones suele ser inferior a 1 V/m (aunque puede variar en función de la estación) cuando el límite determinado por el Ministerio de Sanidad es de 6 V/m.

Otro punto a tener en cuenta sería el impacto visual que provocan sobre todo las antenas dentro de la estética de la ciudad.

Respecto a este tema hay legislaciones particulares en función del municipio.

En primer lugar, se suele establecer una distancia mínima (unos 2 metros) respecto de las cornisas de los edificios que se debe respetar.

En segundo lugar, el mástil no puede superar los 8m de alto, o la altura que marca la proyección de una línea recta con un Angulo de 45° respecto de la cornisa.

Con ello se busca ocultar las antenas lo máximo posible para evitar el impacto visual.

7.3 Aspecto Económico

Por ultimo, nos centraremos en la parte económica.

Los trabajos de este tipo se dividen en 2 partes, por un lado ingeniería (que suelen subcontratar las empresas instaladoras) y por otro lado instalación.

Respecto a la ingeniería, el trabajo consiste en una primera visita al emplazamiento para recabar datos tales como la forma del mástil, su altura, los tipos de anclaje, distancias, etc

Dicha visita suele estar valorada aproximadamente en unos 80 € y su duración es de unas 2 horas.

Con los datos recabados se modela la instalación por ordenador (tál y como se ha realizado en este documento) y se realiza un informe posterior que se envía al cliente.

Todo este proceso llevado a cabo en oficina por norma general se puede realizar en una jornada laboral (8 horas) y su facturación es de unos 250 €.

En cuanto al TFG propiamente dicho, me ha supuesto aproximadamente un total de 190 horas.

Tomando un promedio de los honorarios de un ingeniero “junior” de unos 20.000 €/año con un coste horario de 11,2 €/h:

$$190 \text{ horas} \cdot 11,2 \frac{\text{€}}{\text{h}} = 2128 \text{ €}$$

Referencias

- [W1] Evolución de la red de comunicación móvil, del 1G al 5G (abril, 2020)
<https://www.universidadviu.es/evolucion-la-red-comunicacion-movil-del-1g-al-5g/>
- [W2] Qué es el 5G y cómo nos cambiará la vida (abril, 2020)
https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/que-es-5g-y-como-nos-cambiara-vida_14449
- [W3] Todo lo que debes saber sobre el 5G, qué es, ventajas y despliegue
<https://www.adslzone.net/reportajes/telefonía/5g/>
- [W4] <https://elandroidelibre.lespanol.com/2015/08/4-timos-de-las-grandes-operadoras-moviles-que-no-deberiamos-aceptar.html>
- [W5] Porcentaje de hogares equipados con teléfono móvil en España de 2005 a 2019
<https://es.statista.com/estadisticas/718350/porcentaje-de-viviendas-con-telefono-movil-espana/>
- [W6] Evolución de las líneas móviles en España (en miles) 2000-2013
<https://aquitucronicadiaria.blogspot.com/2014/04/telefono-movil-espana.html>
- [W7] Evolución de la facturación entre los años 2000-2017
<https://es.statista.com/estadisticas/475347/evolucion-ingresos-industria-telecomunicaciones-espana/>
- [W8] Qué es el espectro radioeléctrico
<https://www.redeszone.net/reportajes/tecnologías/que-es-espectro-radioelectrico/>
- [W9] ¿Cómo funciona una red móvil?
<https://radio-waves.orange.com/es/como-funciona-una-red-movil/>
- [W10] Representación esquemática del funcionamiento de una red de telefonía Móvil

<https://blogs.publico.es/ignacio-martil/2017/02/24/como-funcionan-las-redes-inalambricas-de-telefonía-movil/>

