



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

PROYECTO INTEGRADOR PROFESIONAL

DETERMINACIÓN DEL CAUSAL DE FALLA
DE LA LÍNEA DE ALTA TENSIÓN LAT - 132 KV
TRAMO CUTRAL CO - ZAPALA

Autores: Aramburu Massacese Juan Lucas
Hernandez Padró Agustina

Director: Ing. Sergio Paganini

Carrera: Ingeniería Civil

Neuquén - Argentina - 2022

RESUMEN

Durante el invierno del 2018, la línea de alta tensión LAT-132 KV, que abastece de energía eléctrica el noroeste de la provincia del Neuquén, se encontró fuera de servicio durante algunas semanas producto del colapso en “cascada” del tramo superior de ocho torres de suspensión en el trayecto del recorrido Cutral Co - Zapala.

El Ente Provincial de Energía del Neuquén (EPEN), incorporó una serie de estructuras provisionarias para restablecer rápidamente el servicio y encargó a la empresa CIMALCO la fabricación de las nuevas torres para su posterior reemplazo.

Debido a la magnitud del evento ocurrido y la cantidad de años que la línea lleva en servicio, se celebró un convenio técnico profesional con la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue para determinar las causas del colapso y evaluar la posibilidad de su reiteración en el futuro. Para el cumplimiento de dicho convenio se conformó un grupo de trabajo en la cual participaron tanto profesores como alumnos y particularmente quienes elaboran este Proyecto Integrador Profesional. El propósito de este proyecto es realizar un análisis exhaustivo de la línea, los materiales de las estructuras colapsadas y las condiciones climáticas que tuvieron lugar durante el evento ocurrido para obtener los causales de falla y recomendar las acciones pertinentes.

La metodología consistirá en la reelaboración del trabajo utilizando de guía los informes ya presentados, pero profundizando aún más en los temas tratados y abordando otros nuevos por completo.

De esta manera, el objetivo final es determinar, mediante las actividades de: análisis de antecedentes, trabajos de campo, extracción de muestras, ensayos de laboratorio, evaluación de resistencia de los postes y modelado estructural, los causales del colapso y recomendar acciones para prevenir eventos similares futuros.

Palabras claves: Línea de alta tensión, LAT-132 KV, Torres, Colapso en cascada, EPEN, Causal de Falla, Antecedentes, Trabajos de campo, Muestras, Ensayos de laboratorio, Evaluación de resistencia, Modelado estructural.

ABSTRACT

During the winter of 2018 the LAT-132 KV high-voltage line, which supplies electricity to the northwest of Neuquén province, went out of service for several weeks due to the "cascading" collapse of the upper section of eight suspension towers on the highway that connects Cutral Co with Zapala.

The Provincial Energy Entity of Neuquén incorporated a series of temporary structures to quickly re-establish service and commissioned the company CIMALCO to manufacture new towers for their subsequent replacement.

Due to the magnitude of the event and the number of years that the line has been in service, a professional technical agreement was signed with the Faculty of Engineering of the National University of Comahue to determine the causes of the collapse and evaluate the possibility of its repetition in the future. In order to comply with this agreement, a commission was set up with the participation of both teachers and students, particularly those presenting this Professional Integrator Project.

The purpose of this project is to carry out a comprehensive analysis of the line, the materials of the collapsed structures and the climatic conditions that occurred during the event in order to obtain the causes of failure and recommend appropriate actions.

The methodology will consist of developing the work from the start, using the already submitted reports as a guide, but going even deeper into the topics covered and tackling others completely from the scratch.

Thus, the ultimate objective is to determine, through background analysis, field work, sample extraction, laboratory testing, pole strength assessment and structural modelling, the causes of the collapse and to recommend actions to prevent similar events in the future.

Keywords: High voltage line, LAT-132 KV, Towers, Cascade collapse, EPEN, Cause of Failure, Background, Field work, Samples, Laboratory tests, Resistance evaluation, Structural modeling.

AGRADECIMIENTOS

A nuestras familias, por el sustento económico y el apoyo incondicional a lo largo de esta carrera y toda la vida.

A nuestros amigos y compañeros, por compartir, acompañar e impulsarnos en este desafiante camino por la Universidad.

A nuestro director del PIP Sergio Paganini, por su buena atención y el apoyo brindado para resolver ciertos aspectos técnicos y prácticos de este trabajo.

Al Ing. Javier Buraschi, Ing. Sergio Paganini, Ing. Renato Enei y la Dra. Ing. Rossana Jaca, por la oportunidad de trabajar junto a ellos y hacer posible este proceso de aprendizaje.

Al EPEN, por depositar su confianza en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue para la realización de este trabajo.

A la Universidad Nacional del Comahue, por proporcionar la infraestructura necesaria y el equipo docente para formarnos como futuros profesionales.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Descripción.....	1
1.2. Metodología.....	3
1.3. Estructura del trabajo	3
2. OBJETIVOS	5
2.1. Objetivo general.....	5
2.2. Objetivos específicos	5
3. ALCANCE	6
4. MARCO TEÓRICO	7
4.1. Cargas actuantes sobre la estructura	7
4.1.1. <i>Cargas muertas</i>	7
4.1.2. <i>Cargas relacionadas con el clima</i>	7
4.1.3. <i>Cargas de construcción y mantenimiento</i>	15
4.1.4. <i>Carga sísmica</i>	16
4.1.5. <i>Cargas de contención de fallas o “condiciones de seguridad”</i>	16
4.2. Categorías de formación de hielo/nieve sobre estructuras	17
4.2.1. <i>Formación de hielo por precipitación</i>	17
4.2.2. <i>Formación de hielo en la nube</i>	18
4.2.3. <i>Formación por precipitación de nieve</i>	19
4.2.4. <i>Formación por escarcha</i>	20
4.3. Teoría de catenarias.....	20
4.4. Análisis lineal y no lineal	23
4.4.1. <i>Análisis no lineal en estructuras de cables</i>	24
4.5. Cálculo de resistencia de las torres.....	25
4.5.1. <i>Flexo - compresión</i>	25
4.5.2. <i>Torsión</i>	27
4.5.3. <i>Corte</i>	29
4.5.4. <i>Corte y torsión simultánea</i>	31
5. CONTEXTUALIZACIÓN DEL ANÁLISIS	32
6. DESARROLLO	37
6.1. Análisis de antecedentes y recopilación de información.....	37
6.2. Relevamiento de campo y extracción de muestras	51
6.3. Ensayos de laboratorio	60
6.3.1. <i>Ensayos mecánicos de tracción sobre barras lisas de armadura longitudinal</i>	60

6.3.2.	<i>Ensayos mecánicos de tracción sobre cordones de pretensado</i>	62
6.3.3.	<i>Ensayos mecánicos de compresión sobre testigos de hormigón</i>	63
6.3.4.	<i>Ensayos mecánicos de tracción sobre cables conductores</i>	66
6.3.5.	<i>Ensayos de deslizamiento de grapa de suspensión</i>	70
6.4.	Determinación de cargas actuantes	72
6.5.	Evaluación de la resistencia estructural de las torres de suspensión	78
6.6.	Análisis estructural	96
6.6.1.	Descripción del modelo:	98
6.6.2.	Descripción del mecanismo de carga:	102
6.6.3.	Escenarios de verificación:	103
6.6.4.	Resultados obtenidos:	106
6.6.5.	Síntesis de resultados:	116
6.7.	Redimensionado del poste	117
6.7.1.	Resistencia a Corte:	118
6.7.2.	Resistencia a Torsión:	120
6.7.3.	Esquema de armado	122
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	124
7.1.	Conclusiones del análisis:	124
7.2.	Recomendaciones para futuros proyectos:	126
8.	ANEXOS	128
9.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	319

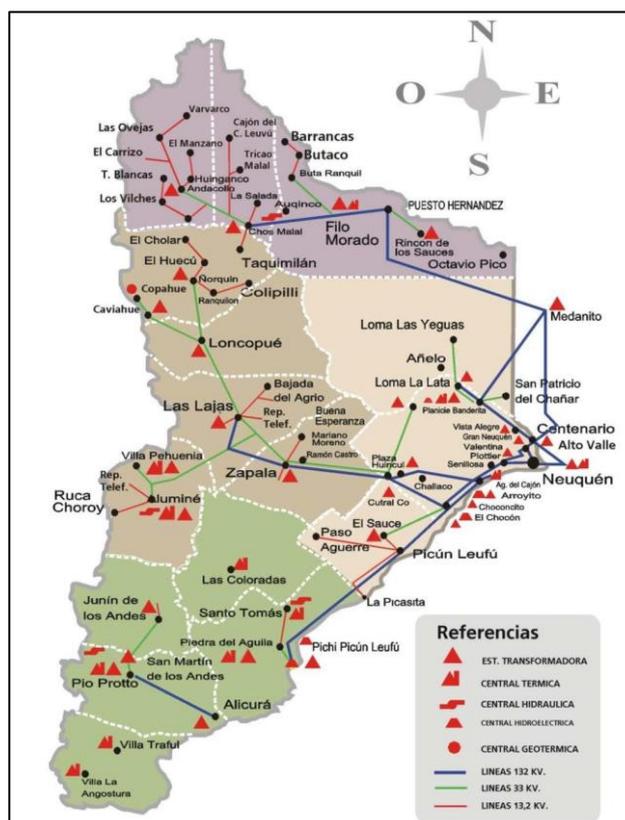
1. INTRODUCCIÓN

1.1. Descripción

El gélido invierno de 2018, más precisamente el día 19 de julio de ese año, el suministro de energía eléctrica a la localidad de Zapala y todo el oeste de la provincia neuquina se vió afectado al quedar fuera de servicio la línea de alta tensión de 132 kV Cutral Co - Zapala por razones, hasta aquel entonces, desconocidas.

El abastecimiento de energía eléctrica de las zonas norte y oeste de la provincia se realiza, como se puede observar en la Fig. 1, mediante líneas eléctricas radiales en alta tensión (132 kV) que llegan, pasando por una serie de estaciones transformadoras intermedias, a la estación transformadora Chos Malal y Las Lajas en sus dos extremos. Desde estos puntos se alimenta en distintos niveles de tensión (33 kV y 13,2 kV) a todas las localidades aledañas.

Fig. 1 - Abastecimiento eléctrico zona Norte y Oeste de la provincia



Como consecuencia de lo ocurrido, personal de mantenimiento de las líneas pertenecientes al EPEN, se presentó en el lugar donde se registraba la falla y relevó los daños severos en el tendido y el colapso de 8 torres de la línea en cuestión (Fig. 2 y Fig. 3). La línea fue rápidamente reparada con estructuras provisionarias y el 28 de julio entró nuevamente en servicio (Fig. 4). Posteriormente, se

realizaron los trabajos finales de conexión para poner en servicio la línea de manera definitiva a finales de diciembre de ese mismo año, la que implicó la incorporación de 10 nuevas estructuras, conductores y equipamiento general.

El día 22 de octubre de 2019, se llevó a cabo un convenio de asistencia técnico profesional entre el EPEN y la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue para analizar las causas que dieron origen al colapso y evitar o mitigar daños que eventos similares futuros pudieran originar sobre la línea.

Fig. 2 - Abastecimiento eléctrico zona Norte y Oeste de la provincia



Fig. 3 - Estructuras colapsadas de la línea LAT-132 KV



Fig. 4 - Reparación de la línea con estructuras provisionarias



1.2. Metodología

El trabajo realizado se llevó a cabo en el ámbito de la Facultad de Ingeniería, en el marco del convenio antes mencionado, conformando un equipo de trabajo integrado por cuatro profesores y tres alumnos, siendo dos de ellos quienes elaboraron el presente Proyecto Integrador Profesional (PIP). La metodología de trabajo consistió en la presentación de una serie de informes parciales de avance ante el EPEN y la presentación de un informe final que los reunía y comentaba las conclusiones obtenidas.

En este PIP, se reelabora el mismo profundizando aún más los temas tratados y desarrollando otros que no habían sido abordados. Se describen los aspectos teóricos y se desarrolla en profundidad el conjunto de actividades implementadas para tal fin, abarcando el análisis de la documentación existente, los trabajos de relevamiento, la toma de muestras, los ensayos de laboratorio, la verificación de resistencia, la modelación de estructuras, el análisis de los resultados, la determinación del causal de falla y el redimensionado de las estructuras en cuestión.

1.3. Estructura del trabajo

El trabajo se divide en siete capítulos, anexos y referencias bibliográficas que se encuentran al final del mismo.

El primer capítulo corresponde a la introducción del tema abordado, en la cual se describe el origen del trabajo, la motivación y metodología de desarrollo.

El segundo capítulo describe los objetivos perseguidos, el general y los específicos que conducen al cumplimiento del anterior.

El tercer capítulo plantea el alcance del trabajo y detalla cuáles actividades quedan fuera del análisis del mismo.

El cuarto capítulo abarca todos los conceptos teóricos y formulaciones necesarias para su desarrollo.

El quinto capítulo tiene como propósito contextualizar al lector, se presenta la empresa titular del servicio eléctrico, se muestra el emplazamiento de la línea, las estructuras colapsadas y se describe brevemente cómo está conformada la estructura.

El sexto capítulo describe en profundidad las actividades que permiten desarrollar el trabajo en cuestión: se realiza un análisis de la documentación disponible, se describe la toma de muestras y las actividades de laboratorio, se evalúa la resistencia de las torres buscando debilidades de diseño, se realiza un análisis estructural utilizando el software SAP 2000, se determina el mecanismo de falla y finalmente, se realiza un redimensionado del poste de las torres.

El séptimo y último capítulo presenta una síntesis de los resultados obtenidos, se plantean las conclusiones y se realizan las recomendaciones pertinentes.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Evaluar y determinar, mediante la ejecución de diversas actividades y ensayos, los posibles causales de falla de las 8 torres colapsadas de la línea de alta tensión LAT-132 KV que recorre el tramo Cutral Co – Zapala.

2.2. Objetivos específicos

Evaluar, mediante la ejecución de ensayos, la posibilidad de colapso de las torres asociado a una falla en los materiales que las conforman.

Obtener las cargas que producirían la rotura del poste de las torres mediante la evaluación de su resistencia a torsión, corte y flexo-compresión.

Determinar las cargas actuantes sobre las estructuras durante el fenómeno ocurrido.

Obtener las máximas sollicitaciones que pueden producirse sobre las ménsulas mediante un modelado preciso del sistema conductor-grapa-aislador.

Determinar el mecanismo de rotura y dar recomendaciones al respecto.

3. ALCANCE

Las actividades alcanzadas por el presente trabajo se limitan estrictamente a la información disponible, gráfica, escrita y verbal, al momento de su desarrollo. Queda fuera del alcance de este trabajo el estudio de las solicitaciones de tipo dinámicas sobre las estructuras como las originadas bajo los fenómenos de Galloping y Ice-jumping. Tampoco se presentan los cálculos de diseño realizados al momento de su ejecución, ni la verificación del cumplimiento o no de las normativas vigentes en aquel entonces.

4. MARCO TEÓRICO

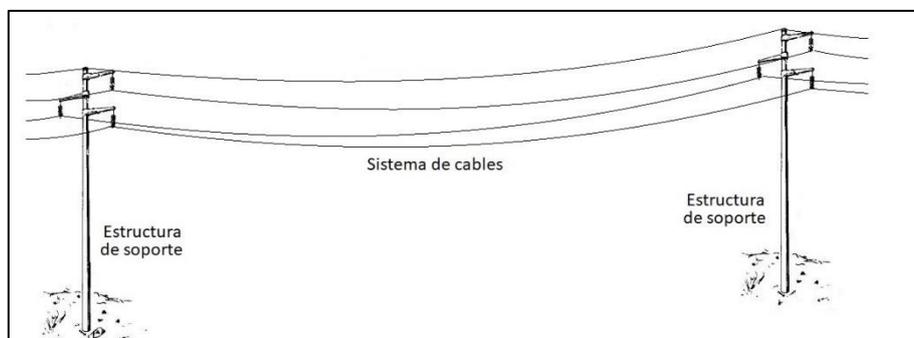
En el capítulo que se presenta a continuación se exponen las formulaciones teóricas y conceptos necesarios que dan sustento y rigen los procedimientos seguidos en el desarrollo de este trabajo.

4.1. Cargas actuantes sobre la estructura

Antes de comenzar a describir las cargas actuantes sobre una línea de transmisión, es importante mencionar que la misma consta de dos sistemas estructurales separados: el sistema de soporte estructural y el sistema de cables. Estos suelen considerarse por separado, aunque es evidente que actúan como un único sistema más grande (Fig. 5). El sistema de soporte estructural, que comprende torres y cimientos, tiene la tarea principal de soportar la carga del cable, los aisladores, los accesorios de unión (hardware) y las cargas climáticas transmitidas por el sistema de cables.

Gran parte del comportamiento inusual de estas estructuras se debe al sistema de cables, dado que aquí son generadas las principales cargas de la línea de transmisión. El sistema de cables consta de los cables conductores y los cables de guardia e incluye todos los componentes, como los aisladores y el hardware en serie con los cables.

Fig. 5 - Sistema estructural



A continuación, se describen las cargas actuantes sobre una línea de transmisión:

4.1.1. Cargas muertas

Corresponde a las cargas permanentes que pueden determinarse con gran exactitud y no sufren variaciones en el tiempo. Abarca el peso de los distintos elementos que componen la línea: cables conductores, cables de guardia, cadena de aisladores y elementos de unión.

4.1.2. Cargas relacionadas con el clima

Son cargas generadas por el viento, el hielo, la nieve, o una combinación de estas. La temperatura, la presión atmosférica y la topografía local influyen en la magnitud de las cargas relacionadas con el clima.

En lo que sigue, se presenta la fórmula estándar de presión de viento aplicable a las líneas de transmisión. Se describen las cargas de nieve/hielo y las cargas combinadas de nieve/hielo y viento. Se proporciona una base para estimar el espesor y densidades de hielo/nieve en los cables conductores.

4.1.2.1. Carga máxima de viento

La carga de viento sobre los cables de la línea de transmisión se puede determinar siguiendo el procedimiento de cálculo de la normativa de aplicación: “Reglamento de Líneas Aéreas Exteriores de Media Tensión y Alta Tensión - AEA 95301 - 2007”.

Fig. 6 - Expresión de cálculo de carga de viento sobre conductores

$$F = Q (Z_p \cdot V)^2 \cdot F_c \cdot G_w \cdot C_F \cdot A \cdot \cos^2 \psi$$

Donde:

ψ : Angulo del viento con el eje perpendicular de la línea

Para conductores y cables de guardia:

$C_F = 1,0$ para todos los diámetros.

G_w : Factor de ráfaga correspondiente al cable

F : Fuerza del viento, en daN

Q : $Q = 0,0613$ factor que depende de la densidad del aire

Z_p : Factor del terreno, por altura y exposición

F_c : Factor de Carga, definido en el punto 10.2.1

V : Velocidad básica del viento para una ráfaga de 10 minutos en m/seg., asociado con uno de los siguientes periodos de retorno:

- a) V_{pr} asociado con el Período de Retorno Anual, correspondiente a las condiciones de servicio de la línea (determinada cumpliendo el punto 10.2.2.3.1.)
- b) V_{50} asociado con el Período de Retorno de 50 años, es el viento que se obtiene del mapa de isotacas del Anexo C de la presente Reglamentación.

G : Factor de ráfaga para conductores, cable de guardia y estructuras.

C_F : Coeficiente de Presión Dinámica o de Forma

A : Área proyectada, en m^2

$(Z_p \cdot V)^2$: Es el viento máximo de diseño, en m/s

Se determina la clase de la línea según la siguiente clasificación.

Fig. 7 - Clases de líneas

5.2.	Clases de líneas
5.2.1.	Clase A - Baja Tensión $VN \leq 1 \text{ kV}$ Son las líneas para distribución de energía eléctrica, cuya tensión nominal es hasta 1 kV. Nota: Esta clase de línea aérea no es abarcada por esta reglamentación, solo se la define a los fines de referencia. Para sus requisitos ver AEA 95201.
5.2.2.	Clase B - Media Tensión ($1 \text{ kV} < VN < 66 \text{ kV}$) Son las líneas para transporte o distribución de energía eléctrica, cuya tensión nominal es superior a 1 kV e inferior a 66 kV.
5.2.3.	Clase BB- Media Tensión con Retorno por Tierra ($1 \text{ kV} < VN \leq 38 \text{ kV}$) Son las líneas para distribución rural de energía eléctrica, cuya tensión nominal es superior a 1 kV e inferior o igual a 38 kV. Ver punto N° 6.9.-
5.2.4.	Clase C - Alta Tensión ($66 \text{ kV} \leq VN \leq 220 \text{ kV}$) Son las líneas para transporte o distribución de energía eléctrica, cuya tensión nominal es igual o superior a 66 kV y menor o igual a 220 kV.
5.2.5.	Clase D - Extra Alta Tensión ($220 \text{ kV} < VN < 800 \text{ kV}$) Son las líneas para transporte de energía eléctrica, cuya tensión nominal es superior a 220 kV e inferior a 800 kV.
5.2.6.	Clase E - Ultra Alta Tensión $VN \geq 800 \text{ kV}$ Son las líneas para transporte de energía eléctrica, cuya tensión nominal es igual o superior a 800 kV.

Luego, con la clase de línea se obtiene el factor de carga (Fc).

Fig. 8 - Factores de carga

Clase de línea según punto 5.2.-	Factor de importancia	Factor de Carga	Periodo de recurrencia (en años)
"B" y "BB"	1	0.93	25
		1.00	50
"C"	2	1.15	100
"D"	4	1.30	200
"E"	8	1.40	400

Se determina la velocidad básica del viento (V).

Fig. 9 - Velocidad básica del viento

10.2.2.2. Densidad del aire

$\rho = 0,0613$

Se deberá tener en cuenta su variación para allitudes medias respecto al mar, mayores a las indicadas en el punto 10.2.1.-

10.2.2.3. Velocidad básica del viento

La velocidad básica del viento esta definida a una altura de 10 metros en un terreno abierto, de exposición C.

Nota : El mapa de isotacas de la República Argentina se encuentra en el Anexo C

10.2.2.3.1 Determinación de la velocidad básica del viento

Para determinarla, con datos de viento local, es necesario cumplir como mínimo con las siguientes condiciones:

- Un aceptable análisis de valor extremo estático empleado en la reducción de datos.
- El instrumental de toma de velocidad de viento, apto para la velocidad a medir, colocado en un área abierta y no obstruida. La altura histórica del anemómetro debe ser conocida.
- El viento básico utilizado no menor de 30 m/s.
- Un mínimo de 10 años de datos proporcionados por la estación.

Se obtiene el factor del terreno (Z_p) según la exposición de la línea y la altura sobre el nivel del terreno (Z).

Fig. 10 - Factor del terreno (Z_p)

Tabla 10.2-f – Factores de terreno

Altura sobre el nivel del terreno Z [m]	Exposición B	Exposición C	Exposición D
10	0.72	1.03	1.18
15	0.79	1.09	1.23
20	0.84	1.13	1.27
25	0.88	1.17	1.29
30	0.92	1.19	1.32
35	0.95	1.22	1.34
40	0.98	1.24	1.36
45	1.01	1.26	1.37
50	1.03	1.28	1.39
55	1.05	1.29	1.40
60	1.07	1.31	1.41

Nota 1: La interpolación lineal para valores intermedios de alturas Z mayores a 10 m es aceptable.

Nota 2: Para alturas mayores de 60 m puede usarse la siguiente ecuación para la determinación de los valores de Z_p

La exposición de la línea se determina según la siguiente clasificación:

Fig. 11 - Exposición de la línea

10.2.2.4. Factor del terreno

El factor Z_p modifica la velocidad del viento básico, teniendo en cuenta los efectos de la exposición al perfil del terreno y la altura de los objetos sobre el mismo, según tres categorías de exposición:

- **Exposición B**, zonas onduladas o forestadas, con numerosas obstrucciones de espacios cerrados, con la altura de las casas domésticas con promedio no superior a 10 m. Por ejemplo áreas industriales o suburbios de grandes ciudades. Es necesario que la línea este a menos de 500 m, o 10 veces la altura libre de la estructura, dentro de esta zona.
- **Exposición C**, zonas llanas, poco onduladas con obstrucciones dispersas tales como cercas, árboles o construcciones muy aisladas, con alturas entre 1,5 y 10 m. Por ejemplo: campo abierto, granjas o sembrados. Esta exposición es la representativa del terreno de aeropuertos donde son efectuadas las mediciones de la velocidad de viento.
- **Exposición D**, llanuras planas con pocas o ninguna obstrucción, con promedio de alturas de las posibles obstrucciones menor a 1,5 m. Es necesario que la línea este a no más de 100 m. Por ejemplo: fajas costeras, llanuras sin árboles, mesetas desérticas o pantanos.

La altura efectiva sobre el nivel del terreno (Z) se determina de la siguiente manera:

Fig. 12 - Altura efectiva (Z)

- b) La altura efectiva Z de estructuras de 60 m o menos, puede asumirse como dos tercios de su altura expuesta y aplicar un viento uniforme con el mismo factor de terreno. Para aquellas mayores de 60 m, se pueden variar las alturas para tener en cuenta los cambios del viento con la altitud.

Se determina el factor de ráfaga (G_w) con las siguientes expresiones:

Fig. 13 - Factor de ráfaga (G_w)

10.2.2.6. Factor de ráfaga

Los factores de ráfaga para conductor y cable de guardia (G_w) y la estructura (G_s) se calculan con las siguientes expresiones:

Nota: Se aplica a líneas aéreas de clase "C", "D", "E". A las de clase "B" se aplica solo en los casos de vanos de longitud similar a los típicos de líneas de clase "C" o mayores, o cuando por servicio se las considere como de transmisión o subtransmisión.

$$G_w = 1 + 2.7 \cdot E \cdot \sqrt{B_w} \quad [10.2-5]$$

siendo:

$$E = 4.9 \cdot \sqrt{k} \cdot \left(\frac{10}{Z}\right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad [10.2-7]$$

$$B_w = \frac{1}{1 + 0.8 \cdot \frac{L}{L_s}} \quad [10.2-8]$$

Z : altura efectiva

L : vano de diseño, en [m]

h: altura efectiva de la estructura de acuerdo al punto 10.2.2.5 b), en [m]

k y L_s : parámetros definidos en la tabla 10.2-g

Tabla 10.2-h – Parámetros

Exposición	α	k	L_N
B	4.5	0.010	52
C	7.5	0.005	67
D	10.0	0.003	76

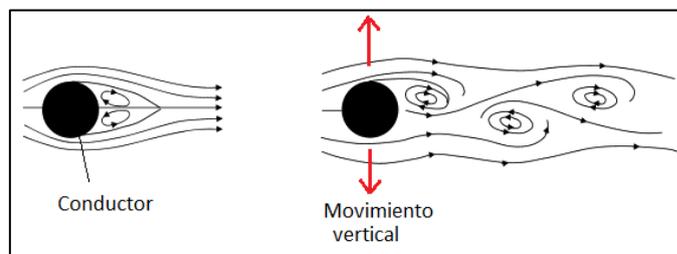
Por último, se determina el área proyectada (A), que corresponde al producto del diámetro del conductor (d) y la longitud del vano (L).

4.1.2.2. Cargas por vibraciones eólicas

Las vibraciones eólicas están asociadas a las fluctuaciones de presión que se produce en la superficie de los conductores por acción del viento a medida que los vórtices se desprenden. Se inician cuando la frecuencia de formación de vórtices, y por ende la frecuencia de la fuerza oscilante, se aproxima a la frecuencia natural del conductor.

En los conductores de líneas de transmisión, la vibración eólica toma la forma de múltiples ondas sinusoidales a lo largo del tramo. El rango de frecuencia puede variar de 3 a 150 Hz y la amplitud puede alcanzar la magnitud del diámetro del conductor. Bajo este fenómeno, el conductor comenzará a vibrar y la amplitud constante del movimiento dependerá del equilibrio de energía, entre la entrada de energía eólica de los vórtices de flujo y la capacidad de amortiguación de la línea, principalmente a través de la auto amortiguación del conductor y por cualquier amortiguador externo.

Fig. 14 - Formación de vórtices



En la mayoría de los casos, los sistemas de conductores pueden diseñarse utilizando amortiguadores y espaciadores para prevenir y/o reducir el efecto del comportamiento de vibración inducido por el viento. Aunque las vibraciones eólicas de los cables han causado, en casos aislados, fallas por fatiga de los elementos de sujeción o aflojamiento de las conexiones, no tiene el potencial de generar daños significativos sobre las estructuras.

4.1.2.3. Carga de nieve/hielo

La acumulación de nieve y hielo en una línea de transmisión, comúnmente denominado “manguito de hielo”, suele ser un criterio de carga determinante en el diseño. Las cuatro categorías

de formación de hielo, que se describen más adelante, cubren el espectro completo del fenómeno de acreción de nieve y formación de hielo sobre las estructuras.

Fig. 15 - Sobrecarga por manguito de hielo



Al especificar las cargas se realizan algunas simplificaciones, por ejemplo, la densidad de acreción, que es variable en el espesor debido a la compactación que genera la propia acumulación, se supone constante, y el espesor del hielo de diseño se especifica como un espesor radial uniforme equivalente a lo largo del cable a pesar que las acumulaciones pueden tener formas irregulares.

Aunque la principal combinación de carga de diseño es para el mismo espesor de hielo aplicado a todos los tramos, también se debe considerar en el diseño una carga de hielo desigual en vanos adyacentes, ya que por más que las solicitaciones en los conductores sean inferiores generan fuerzas no equilibradas sobre las torres que deben tenerse en consideración. En general, los estudios de carga de hielo se basan en modelos físico-matemáticos de los diversos tipos de formación de hielo y de los datos meteorológicos que se requieren como entrada para estos modelos. Existen varios modelos disponibles que utilizan datos meteorológicos para determinar las cargas de hielo: el modelo simple conservador (Jones 1996, 1998), el modelo Goodwin (Goodwin 1983), el US Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory (CRREL) (Jones 1996b), el modelo Makkonen (Makkonen 1996), el modelo de Admirat (Admirat 2008), el modelo del Instituto de Investigación Meteorológica (MRI) (MRI 1977) y el modelo Chaîné (Chaîné y Castonguay 1974).¹

¹ Los modelos de Makkonen y Admirat, utilizados para este trabajo, se encuentran desarrollados en los informes recibidos que fueron solicitados a expertos en el tema. Consultar el ANEXO I para ampliar información sobre este documento.

4.1.2.4. Cargas por efecto “ice jumping”

El desprendimiento de hielo y/o nieve de los conductores, conocido como “ice jumping” induce cargas dinámicas elevadas en las líneas que pueden provocar interrupciones temporales del servicio cuando el rebote el conductor lo acerca a otra fase, al cable de guardia, o partes de las torres. Además, en desprendimientos de mayores magnitudes, puede ser responsable de fallas en los aisladores, elementos de sujeción y brazos de las torres.

El desprendimiento es un fenómeno que puede tener consecuencias similares a las del efecto “Galloping” que se describe más adelante, aunque a diferencia de éste, el desprendimiento de hielo ocurre repentinamente y no es repetitivo.

4.1.2.5. Carga de hielo y viento

La acumulación de hielo en una línea de transmisión además de imponer cargas verticales sustanciales sobre el sistema estructural, genera una mayor área proyectada expuesta al viento y afecta el coeficiente de fuerza. La carga transversal debida a la presión del viento que actúa sobre los cables cubiertos de hielo actúa simultáneamente con la carga vertical debida al peso del hielo. Al calcular las fuerzas debidas al viento en cables cubiertos de hielo, se debe reemplazar, en las fórmulas vistas anteriormente, el diámetro del conductor por el diámetro exterior del “manguito” de hielo. El grosor del manguito y la velocidad del viento pueden diferir de un tramo a otro generando cargas desiguales en vanos adyacentes. Generalmente, en las estructuras de suspensión con cadenas de aisladores, los conductores longitudinales no experimentan cargas significativas debido a cargas de hielo desequilibradas, pero pueden transferir la mayor parte del desequilibrio a la estructura.

4.1.2.6. Cargas por efecto “galloping”

El galloping o “galope” (movimiento de gran amplitud o baile de los cables) es una condición dinámica que ocurre ocasionalmente en los cables de guardia y conductores de la línea de transmisión con vientos moderados que soplan a través de los cables cubiertos de hielo. Es de naturaleza aleatoria ya que solo una o varias de las fases y tramos pueden estar involucrados. Las amplitudes en gran parte verticales a veces alcanzan tanto o más que la altura de la catenaria. Las frecuencias de vibración del conductor para movimientos de galloping son de aproximadamente 0,08 a 3 Hertz.

El galloping suele causar problemas eléctricos y estructurales como:

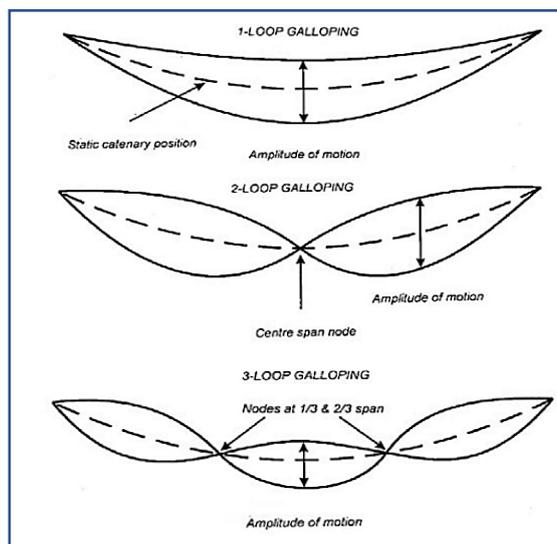
- Choques de cables que conducen a interrupciones temporales o permanentes debido a la reducción del espacio entre fases o una fase y un cable de guardia.
- Caídas permanentes del conductor y del cable de guardia causadas por tensiones dinámicas del cable en el rango inelástico.

- Desgaste excesivo, fatiga y falla de los cables de tierra, conductores, aisladores y accesorios de los conjuntos de suspensión.
- El colapso de componentes y sistemas estructurales.

El galloping puede producir grandes cargas verticales y longitudinales en los apoyos. Los estudios teóricos indican que las tensiones en los conductores en las estructuras de retención pueden variar según $\pm 60\%$ y las cargas verticales en los puntos de apoyo por $\pm 30\%$, las magnitudes dependen de numerosos factores. Las mediciones en casos reales han encontrado cambios de tensión en los conductores de estructuras de retención, oscilando entre el 80% y el 140% de la tensión estática. En los puntos de suspensión, las fluctuaciones de carga vertical pueden resultar en golpes violentos y crear efectos de acoplamiento en los vanos adyacentes.

El movimiento galopante de los cables es peligroso cuando encuentra una frecuencia resonante, ya que genera movimientos amplificados que pueden destruir elementos estructurales como los postes o torres. En casos menores, el golpeteo con el tiempo puede destruir los elementos de sujeción y los aisladores.

Fig. 16 - Efecto galloping



4.1.3. Cargas de construcción y mantenimiento

Las cargas de construcción y mantenimiento, a diferencia de las cargas relacionadas con el clima, son controlables en gran medida y están directamente relacionadas con los métodos de construcción ya que actúan sobre las estructuras debido al ensamblaje y montaje de las estructuras. Las cargas de mantenimiento de la estructura consisten en los efectos de los trabajadores sobre la estructura y los efectos sobre las estructuras adyacentes debido a modificaciones temporales como arriostamientos para reparación o reemplazo de la estructura que se está manteniendo. El descenso

de los cables al suelo en una estructura puede llegar a provocar un aumento en la tensión en los cables del doble del valor original si no hubiera un movimiento longitudinal o un giro del aislador.

4.1.4. Carga sísmica

La superestructura de transmisión, a diferencia de la fundación, no requiere ser diseñada para resistir cargas sísmicas dado que, el orden de valor de estas solicitaciones es considerablemente inferior al de las originadas por combinaciones de viento/hielo y/o cables cortados. Para el caso de la fundación, ésta podría fallar por la fractura o licuefacción del suelo.

Las estructuras de transmisión están diseñadas para resistir grandes cargas horizontales de viento que soplan sobre los cables y las estructuras. Estas cargas y las fuerzas resultantes proporcionan una amplia resistencia a los movimientos transversales de la mayoría de los eventos sísmicos. Décadas de experiencia con líneas de todos los tamaños han demostrado que los daños en las líneas son muy poco frecuentes debido a la licuefacción del suelo.

4.1.5. Cargas de contención de fallas o "condiciones de seguridad"

La rotura de conductores, aisladores, herrajes y componentes estructurales pueden crear graves desequilibrios de carga en el sistema de cables capaces de causar la falla parcial o total de los soportes adyacentes. Si una falla es desencadenada, no debe propagarse sin control más allá de la zona inicial de falla.

El riesgo de falla en cascada de una línea de transmisión se puede reducir mediante varios métodos:

- *Diseñar todas las estructuras para cargas longitudinales:*

Existen métodos para calcular factores de carga longitudinal que multiplicados por la tensión del cable predicen la tensión residual final en el cable después de que hayan desaparecido todos los efectos dinámicos de la rotura del cable. Constituyen las cargas "estáticas" mínimas requeridas que deben resistir las estructuras para evitar fallas (es decir, los factores no consideran los efectos dinámicos). Otros, proporcionan los factores de carga longitudinal en función de la relación luz/gálibo y la rigidez de las estructuras de soporte, que multiplicados por la tensión del cable establecen cargas de diseño aproximadas que incluyen efectos dinámicos, rigidez estructural y longitudes de aisladores.

Cabe señalar que los factores de carga longitudinal sugeridos se basan en la suposición de que la pérdida de una o dos estructuras en cada dirección debido al evento iniciador es aceptable para evitar una falla en cascada. Sin embargo, con frecuencia no es económico diseñar una línea de transmisión de manera que cada estructura proporcione la resistencia suficiente para soportar este tipo de cargas. Un diseño exitoso y económico requiere que la falla de un número limitado de

estructuras sea aceptable y debe determinarse en función de la filosofía de diseño y los niveles de confiabilidad previstos.

- *Instalar estructuras de contención de fallas en intervalos específicos:*

Las estructuras de suspensión tienen poca capacidad para soportar las cargas longitudinales generadas en una falla en cascada por lo que es conveniente la instalación de estructuras de retención en intervalos regulares a lo largo de la línea para limitar la extensión del daño causado por la falla de algún componente. Estos intervalos se determinan considerando la longitud e importancia de la línea.

- *Instalar mecanismos de liberación:*

La protección contra fallas en cascada también se ha logrado con éxito evidente mediante el uso de abrazaderas de suspensión que permiten el deslizamiento o liberación y limitan las cargas longitudinales de eventos extremos que pueden transferirse a las estructuras adyacentes. Es importante que el diseño del mecanismo asegure un desempeño consistente bajo cualquier condición climática y operativa a lo largo de la vida útil esperada de la línea de transmisión. El desempeño de los mecanismos de liberación debe calibrarse y verificarse en pruebas representativas.

4.2. Categorías de formación de hielo/nieve sobre estructuras

Las condiciones de formación de hielo y nieve a lo largo de una línea de transmisión determinan la magnitud de las cargas que se pueden generar. Así, por ejemplo, las acumulaciones de hielo producidas por la lluvia helada rara vez superan un espesor de unos pocos centímetros, mientras que las acumulaciones de menor densidad, debido a la formación de hielo en las nubes y la nieve húmeda pueden llegar hasta un grosor de 30 cm o más. Las propiedades del hielo están determinadas por la temperatura del aire, la velocidad del viento, el tamaño de la gota, el contenido de agua líquida superenfriada de las nubes o la niebla, la intensidad y el tipo de precipitación. El fenómeno de formación se clasifica tanto por las condiciones meteorológicas que lo producen como por las características físicas del manguito resultante.

A continuación, se describen los diversos mecanismos de formación.

4.2.1. Formación de hielo por precipitación

La lluvia o llovizna helada es un mecanismo de formación de hielo común. Ocurre cuando el aire cálido y húmedo es forzado a circular dentro de una capa de aire a temperaturas bajo cero en la superficie de la Tierra. La precipitación generalmente comienza como nieve que se derrite a medida que cae a través de la capa de aire cálido en lo alto. Las gotas se enfrían a medida que caen a través de la capa de aire frío y se congelan al entrar en contacto con las estructuras o el suelo para formar

“hielo glaseado”. La precipitación puede alternar entre nieve y lluvia helada para formar una acumulación compuesta de nieve y hielo en las estructuras. Por lo general, se supone que la densidad del hielo glaseado es de 900 kg/m³.

En lluvia helada, la tasa de impacto del agua suele ser mayor que la tasa de congelación. El exceso de agua comienza a gotear y puede congelarse en forma de carámbanos, dando lugar a una variedad de formas de acreción que van desde una vaina cilíndrica lisa, pasando por una media luna en el lado de barlovento con carámbanos colgando en el fondo, hasta grandes protuberancias irregulares. La forma depende de los diversos factores meteorológicos y de la forma de la sección transversal del componente estructural, su orientación espacial y flexibilidad

Fig. 17 - Formación de hielo glaseado



4.2.2. Formación de hielo en la nube

Esta condición de formación de hielo se produce cuando las gotas de agua de niebla o nubes sobre enfriadas, chocan con una estructura. Pueden producirse acumulaciones significativas de hielo. Las grandes concentraciones de gotitas sobre enfriadas no son comunes a temperaturas del aire por debajo de -18°C . La formación de hielo en la nube forma “escarcha blanda” o “hielo glaseado” con una densidad entre aproximadamente 150 a 900 kg/m³. El grado en que las gotas se esparcen cuando chocan y luego se congelan determina la cantidad de aire que se incorpora en la acumulación y, por lo tanto, su densidad. Si la tasa de enfriamiento es relativamente baja, no todas las gotas que chocan se congelan. La acumulación resultante será hielo opaco, posiblemente con carámbanos adheridos.

Fig. 18 - Formación de escarcha blanda “soft rime”



La eficiencia de colisión aumenta con la velocidad del viento y el diámetro de las gotas y disminuye a medida que aumenta el diámetro del cilindro. La cantidad de hielo acumulado depende de la duración de la condición de formación de hielo, la velocidad del viento, el contenido de agua líquida y tamaño de las gotitas en las nubes o niebla sobre enfriadas. La forma de acumulación depende de la flexibilidad del componente estructural. Si puede girar libremente, como es el caso de cables de varios metros de longitud, el hielo se acumula con una sección transversal aproximadamente circular. En miembros y componentes estructurales más rígidos, el hielo se forma en forma de banderines que se extienden en el viento.

4.2.3. Formación por precipitación de nieve

La “nieve húmeda” que cae sobre un componente estructural de sección transversal redonda (como un alambre, un cable, un conductor o un tirante) puede deformarse y/o deslizarse a su alrededor, como resultado de su peso propio o de la sustentación aerodinámica. Debido a la resistencia a la tracción y al corte de la nieve producto de las fuerzas capilares, es posible que la nieve acumulada no se caiga del miembro estructural durante este proceso. En última instancia, la nieve forma una manga cilíndrica, incluso alrededor de conductores y cables atados. La formación del manto de nieve se ve reforzada por la rotación torsional de elementos o componentes estructurales flexibles debido al peso excéntrico de la nieve. La densidad de la nieve acumulada depende de la velocidad del viento y de su contenido de humedad, variando desde menos de 80 a 800 kg/m³.

Fig. 19 - Formación por acreción de nieve húmeda



Se han observado acumulaciones de nieve dañinas a temperaturas del aire que oscilan entre los $-5^{\circ}\text{a } 2^{\circ}\text{C}$. La nieve con un alto contenido de humedad puede adherirse más fácilmente que la nieve seca. La nieve que cae a una temperatura del aire superficial superior a 0°C puede acumularse incluso a velocidades del viento superiores a 35 km/h, produciendo densas acumulaciones (600 a 800 kg/m³). La nieve con un contenido de humedad más bajo no es tan pegajosa y se desprende de la estructura con vientos fuertes, produciendo acumulaciones menos densas (40 y 250 kg/m³). La “nieve seca”

también puede acumularse sobre las estructuras, pero por la débil unión que tienen los copos, estas acumulaciones pueden formarse sólo con vientos muy bajos y presentan densidades muy bajas (80 a 150 kg/m³).

4.2.4. Formación por escarcha

La “escarcha” es una acumulación de cristales de hielo sobre una estructura formados por la deposición directa del vapor de agua contenido en el aire. Se forma cuando el aire, con el punto de rocío por debajo del punto de congelación, se satura por enfriamiento. Es de apariencia plumosa y se acumula hasta aproximadamente 25 mm de espesor con muy poco peso.

Fig. 20 - Formación por escarcha dura “hard rime”



Se puede afirmar entonces, que en la “formación de hielo en la nube” pueden generarse diferencias significativas en la carga de hielo de un tramo al siguiente debido a que la densidad y el espesor de la manga de hielo aumentan con la velocidad del viento. En la “formación de hielo por precipitación”, las variaciones de carga de hielo suelen ser graduales a lo largo de la línea de transmisión por lo que la formación de hielo desigual de tramos adyacentes no resulta significativa. En la “formación por precipitación de nieve”, cuando la nieve se desprende en algunos tramos pero en otros no, los aún cargados aumentarán su catenaria mientras que los descargados la disminuyen, resultando en grandes desequilibrios de carga en la línea. Y en la “formación por escarcha” la carga no constituye un problema significativo.

Las fuerzas longitudinales no equilibradas, asociadas con la caída de hielo o la formación desigual en tramos adyacentes, dependen de la holgura disponible, la longitud de la cadena de aisladores y la posibilidad de deslizamiento del cable en las grapas de sujeción.

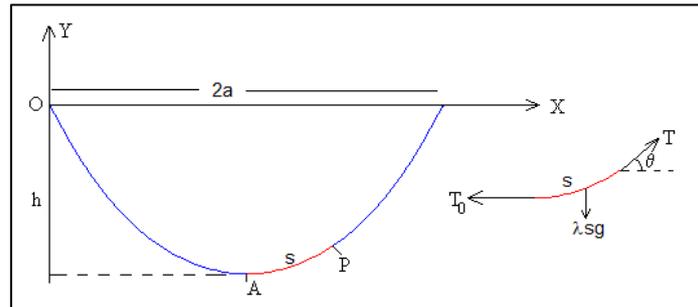
4.3. Teoría de catenarias

Una catenaria es una curva ideal que representa físicamente la forma que adquiere una cadena, cuerda o cable perfectamente flexible (sin rigidez flexional), suspendida de sus dos extremos y sometida a un campo gravitatorio uniforme. En sentido estricto no se trata de una curva sino una

familia de curvas, en la que cada una de ellas viene determinada por las coordenadas de sus extremos y por su longitud.

Consideremos un cable de longitud (L) sujeto por sus dos extremos que están situados a la misma altura y separados una distancia (2a) uno del otro. Sea (λ) la densidad del cable (masa por unidad de longitud). En la Fig. 21, se representa las fuerzas que actúan sobre una porción (s) de cable que tiene como extremo el punto más bajo (A)

Fig. 21 - Fuerzas actuantes en un tramo de la catenaria



Donde:

- el peso, $\lambda \cdot g \cdot s$, producto de la densidad lineal, por la gravedad, por la longitud del cable.
- la fuerza T_0 , que ejerce la parte izquierda del cable sobre el extremo izquierdo (A) de dicho segmento.
- La fuerza T, que ejerce la parte derecha del cable sobre el extremo derecho (P).

La condición de equilibrio establece que:

- Horizontal: $T \cdot \cos\theta = T_0 = T_H$
- Vertical: $T \cdot \sin\theta = \lambda g s$

Dividiendo el segundo por el primero tenemos:

$$\tan \theta = \frac{dy}{dx} = \frac{\lambda g s}{T_0}$$

Derivando con respecto de (x) y teniendo en cuenta que la longitud del arco diferencial es $ds^2 = dx^2 + dy^2$:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{\lambda g}{T_0} \frac{ds}{dx} \quad \frac{d^2y}{dx^2} = \frac{\lambda g}{T_0} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}$$

De la condición de equilibrio local de cada punto se desprende la ecuación diferencial anterior para la pendiente de la catenaria, que relaciona las tensiones en los extremos de un tramo y el peso del mismo.

La solución general está dada por:

$$y(x) = \frac{T_H}{\lambda} \cosh\left(\frac{\lambda}{T_H}(x - C_1)\right) + C_2 = a \cosh\left(\frac{x - C_1}{a}\right) + C_2$$

Donde, (C1) y (C2) son las distancias del origen de la catenaria a un sistema de ejes coordenados (X) e (Y) respectivamente.

Y el valor ($a = T_H / \lambda$) es el parámetro de la catenaria.

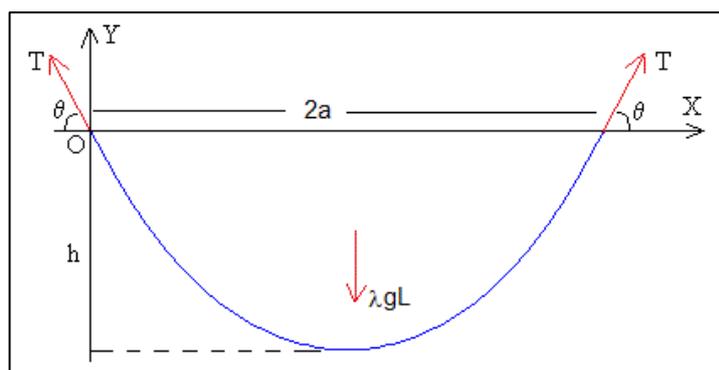
La solución para el caso de un cable suspendido de dos puntos a la misma altura y cuyo punto mínimo es el punto (0;a) resulta ser:

$$\begin{cases} y = a \cosh\left(\frac{x}{a}\right) = \frac{a}{2} (e^{x/a} + e^{-x/a}) \\ a = \left(\frac{T_H}{\lambda}\right) \end{cases}$$

Tensión del cable:

En la figura 22 se muestran las fuerzas sobre el cable de longitud (L), densidad (λ) y cuyos extremos están a la misma altura separados una distancia (2a):

Fig. 22 - Fuerzas actuantes en una catenaria



La fuerza (T) que ejercen los apoyos sobre los extremos del cable forman un ángulo (θ) con la horizontal. La componente horizontal de la fuerza ($T_0 = T \cos \theta$) es constante en todos los puntos de la catenaria. La componente vertical, por simetría, es la mitad del peso del cable. Luego, el valor de la tensión es:

$$T = \sqrt{T_0^2 + \left(\frac{\lambda g L}{2}\right)^2}$$

Longitud de la catenaria:

En el caso de un cable suspendido de dos puntos a la misma altura, la longitud del arco, con el origen de la catenaria en el mínimo (0;a) es:

$$l = a \sinh\left(\frac{x}{a}\right)$$

4.4. Análisis lineal y no lineal

El cálculo de estructuras consiste en resolver un sistema de ecuaciones, donde se tiene como incógnitas los desplazamientos y giros de determinados puntos, denominados nodos, originados luego de ser aplicadas las acciones sobre una estructura. El análisis que se aplica puede ser de dos clases, lineal o no lineal, dependiendo del tipo de estructura.

En las estructuras con comportamiento lineal se cumple que entre acciones y efectos existe una relación lineal. Para esto, se asumen válidas las siguientes hipótesis: que el material es elástico lineal (material hookeano) y los desplazamientos y giros de la estructura son pequeños (pequeños giros y deformaciones específicas); lo cual permite obtener las ecuaciones de equilibrio a partir de la geometría no deformada, es decir, en su estado inicial. Esto también se conoce como análisis "de primer orden".

Cuando no se cumple alguna de las premisas anteriores, se dice que la estructura presenta un comportamiento no lineal y por lo tanto ya no existe una relación lineal entre las acciones y los efectos. Dependiendo del problema, estas relaciones pueden resultar polinómicas, trigonométricas, exponenciales, radicales, hiperbólicas, etc. Las ecuaciones de equilibrio en este caso se obtienen a partir de una geometría deformada inicial y luego se aplican incrementos de carga, obteniendo una nueva geometría deformada que servirá de base para la siguiente y así sucesivamente hasta llegar al valor final de carga. Esto también se conoce como análisis "de segundo orden" y resulta ser un proceso de cálculo más lento.

Si se analiza el conjunto de deformaciones y desplazamientos se puede hacer las siguientes consideraciones:

- Caso 1: Las deformaciones específicas y los desplazamientos son pequeños. Este es el caso del análisis de estructuras lineales donde los desplazamientos son pequeños y el equilibrio se analiza sin tenerlos en cuenta.
- Caso 2: Las deformaciones específicas no son pequeñas y los desplazamientos son pequeños. Este es el caso del análisis de estructuras en régimen anelástico (cálculo plástico), donde en ciertas zonas de la estructura se alcanza deformaciones muy importantes que se traducen en la formación de articulaciones plásticas, a pesar de las cuales los desplazamientos de la estructura se mantienen pequeños y el equilibrio puede seguir siendo analizando sin tenerlos en cuenta. Esta es una no-linealidad física.
- Caso 3: Las deformaciones específicas son pequeñas y los desplazamientos no son pequeños. En este caso de un comportamiento no lineal de estructura debido a la no-linealidad geométrica.

- Caso 4: Las deformaciones específicas y los desplazamientos no son pequeños. En este caso corresponde a un comportamiento no-lineal geométrico y físico.

4.4.1. Análisis no lineal en estructuras de cables

La clase de no linealidad que se presenta en estos elementos es la no linealidad geométrica, debida a los grandes desplazamientos y a la catenaria. No linealidad debida a grandes desplazamientos: a medida que se aplican las cargas, las grandes deflexiones generan cambios de dirección en las cargas actuantes. No linealidad por efecto de la catenaria: el peso propio del cable introduce no linealidades en la fuerza axial, debido a que las tensiones y deflexiones se encuentran interrelacionadas.

Como se mencionó anteriormente, cuando se producen grandes desplazamientos las ecuaciones de equilibrio deben plantearse en la geometría deformada, lo que significa que la relación matricial comúnmente conocida en el análisis lineal como $[F] = [K] * [U]$ ya no se cumple, siendo $[F]$ las fuerzas en el elemento, $[K]$ la matriz de rigidez y $[U]$ los desplazamientos.

Para tener en cuenta los cambios en la geometría de los elementos a medida que se incrementa la carga, se pueden obtener expresiones para los desplazamientos $[U]$ tratando el problema que es de naturaleza no lineal, como una secuencia de pasos lineales en los que se aplica pequeños incrementos de carga hasta alcanzar la carga total. Los términos no lineales en las ecuaciones cinemáticas (deformación - desplazamiento) modifican los elementos de la matriz de rigidez $[K]$ de tal modo que la nueva matriz de rigidez de la estructura sea $[K] = [Ke] + [Kg]$.

La expresión anterior indica que la matriz de rigidez de la estructura se ve afectada por un término $[Kg]$ (matriz de rigidez geométrica) que depende tanto de la geometría de los elementos como de las fuerzas presentes en estos.

La matriz $[Ke]$ es la matriz elástica del elemento, calculada para la geometría inicial y la cual cambia en función de la geometría del elemento. El cálculo de este tipo de estructuras se hace de manera incremental. El proceso de análisis se puede representar mediante el esquema de la tabla 1.

Tabla 1 - Esquema de cálculo por incrementos de carga

Paso	Rigidez	Desplazamiento	Fuerza incremental
1	$Ke(0)+Kg(0)$	U1	$\Delta F1$
2	$Ke(U1)+Kg(U1)$	U2	$\Delta F2$
3	$Ke(U2)+Kg(U2)$	U3	$\Delta F3$
...
n	$Ke(Un)+Kg(Un)$	Un	ΔFn

4.5. Cálculo de resistencia de las torres

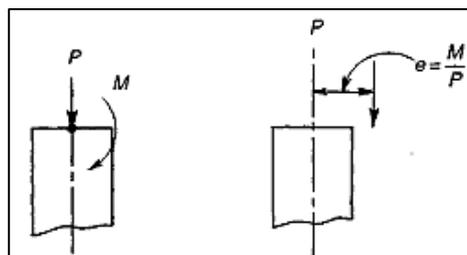
4.5.1. Flexo - compresión

Los elementos sometidos a compresión, por lo general, no se encuentran sometidos únicamente a esfuerzos axiales puros, sino que, están acompañados por momentos flectores simultáneos, ya sea por pequeñas excentricidades de las cargas verticales (accidentales o no), por fuerzas horizontales, o momentos externos.

Cuando un elemento está sometido a una compresión axial P combinada con un momento flector M , se puede reemplazar la carga axial y el momento flector por una carga equivalente de igual magnitud P aplicada con una excentricidad $e = M/P$. Las dos situaciones de carga son estáticamente equivalentes (Fig. 23).

Todas las columnas pueden entonces clasificarse en términos de la excentricidad equivalente. Aquéllas con un valor de e relativamente pequeño, fallan por aplastamiento del concreto junto con fluencia del acero a compresión en el lado más cargado. Las columnas con e grandes tendrán tracción al menos en una parte de la sección y, cuando se sobrecargan, pueden fallar por fluencia del acero a tracción en el lado más alejado de la carga.

Fig. 23 - Situaciones estáticamente equivalentes



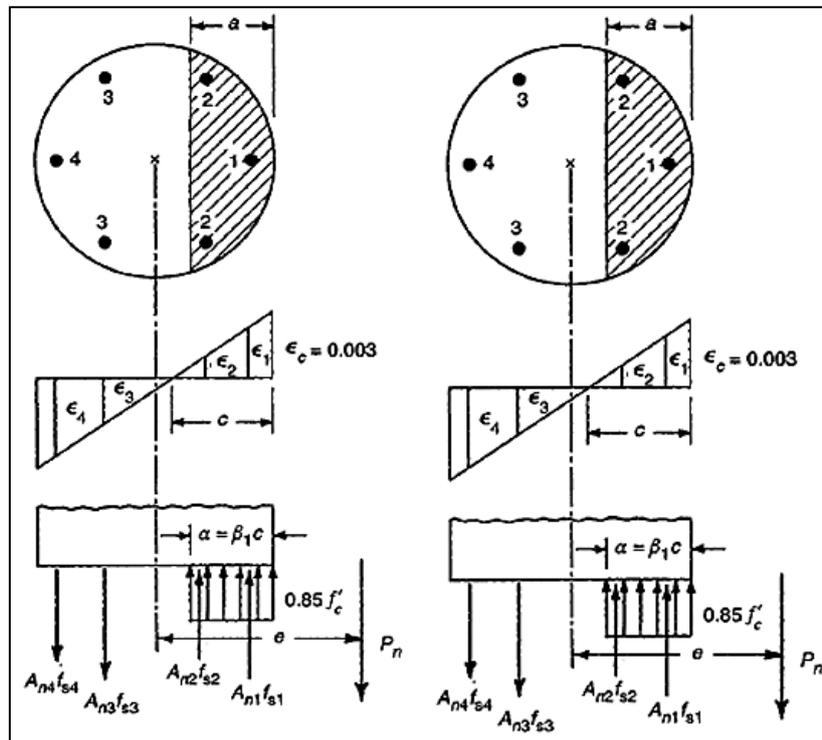
El diseño de columnas se basa en la mayoración de cargas en el cual la resistencia requerida no debe exceder la resistencia de diseño:

$$\phi M_n \geq M_u$$

$$\phi P_n \geq P_u$$

Para una excentricidad determinada e , se puede resolver las ecuaciones que resultan de plantear el equilibrio de fuerzas en la sección para la carga P y para el momento M que producirán la falla.

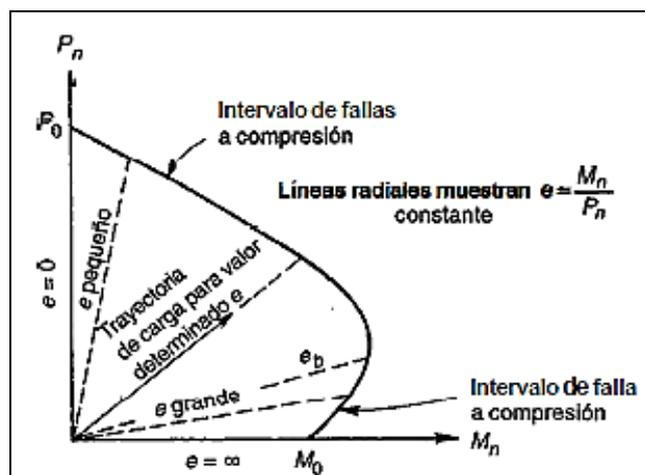
Fig. 24 - Equilibrio de fuerzas en la sección a flexo-compresión



Una manera más práctica, consiste en construir un diagrama de interacción de resistencia que defina la carga P y el momento M de falla para determinada columna en el intervalo completo de excentricidades, desde cero hasta el infinito. Para cualquier excentricidad e , existe un solo par de valores de P y M , que producirán un estado inminente de falla.

Este par de valores puede dibujarse como un punto en un gráfico que relacione P , y M . Una serie de cálculos similares, cada uno correspondiente a una excentricidad diferente, generará una curva que tiene la forma típica que aparece en la figura (Fig. 25). En este diagrama, cualquier línea radial representa una excentricidad particular $e = M/P$. Para esta excentricidad, al aumentar gradualmente la carga se definirá una trayectoria de carga como se ilustra, y cuando esta trayectoria de carga alcance la curva límite se presentará la falla. Observe que el eje vertical corresponde a $e = 0$, y P_o es la capacidad de la columna para carga concéntrica. El eje horizontal corresponde a un valor infinito de e , es decir, flexión pura con una capacidad a momento de M_o .

Fig. 25 - Diagrama de interacción de resistencia



La resistencia a la flexo - compresión se evaluará considerando las dimensiones de la sección y la existencia de armaduras convencionales y de pretensado. El modelo de cálculo es similar al utilizado en elementos no pretensados con la consideración de la armadura de pretensado sometida a un estado tensional previo.

Dado que en el estado límite se consideran los dos tipos de armaduras, cada una con su estado tensional, se verificará la resistencia considerando una armadura equivalente para la determinación del diagrama de interacción correspondiente.

4.5.2. Torsión

El diseño a torsión está basado en la analogía de un reticulado espacial para un tubo de pared delgada. Un elemento sometido a torsión se idealiza como un tubo de pared delgada en el que se desprecia el núcleo de la sección transversal. Una vez que el elemento de hormigón reforzado se ha fisurado en torsión, su resistencia torsional es provista básicamente por estribos cerrados y barras longitudinales ubicados cerca de la superficie.

El hormigón se fisura, bajo torsión pura, cuando se alcanza el momento torsor de fisuración T_{cr} que, según la norma, para elementos pretensados se estima mediante la siguiente expresión:

$$T_{cr} = \frac{1}{3} \sqrt{f'_c} \frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \sqrt{1 + 3 \frac{f_{pc}}{\sqrt{f'_c}}}$$

Dónde:

f'_c : es la resistencia a la compresión del hormigón.

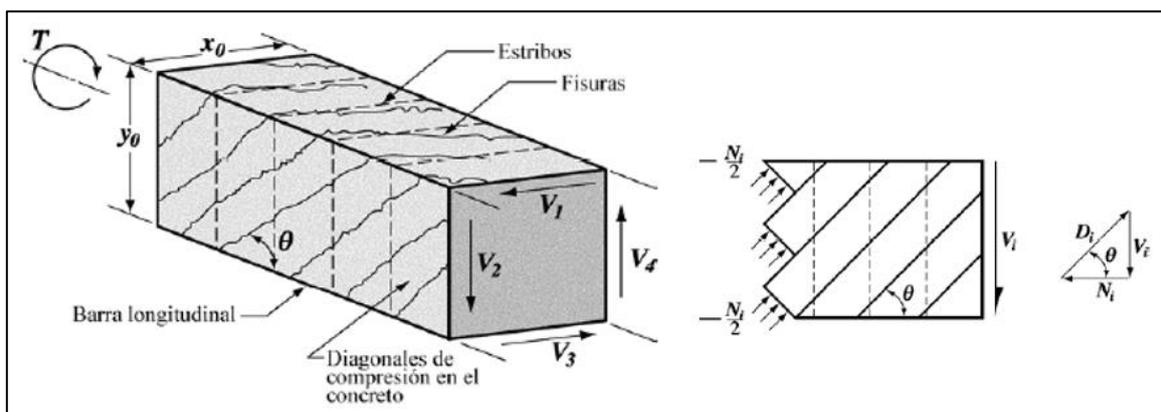
A_{cp} : es el área encerrada por el perímetro exterior de la sección transversal de hormigón.

P_{cp} : es el perímetro exterior de la sección transversal de hormigón.

f_{pc} : es la tensión de compresión en el hormigón, después de que han ocurrido todas las pérdidas de pretensado, en el centroide de la sección transversal.

Alcanzado este valor se generan fisuras diagonales en el elemento y el mecanismo de resistencia puede entenderse mediante una analogía con un reticulado espacial: un conjunto de puntales diagonales de hormigón que toman la carga paralela a las fisuras, la armadura transversal (estribos) que toman la carga transversal de tracción y la armadura longitudinal que toma la carga longitudinal de tracción.

Fig. 26 - Analogía con reticulado espacial



Entonces, la armadura cumple la función de “cocer” las fisuras evitando que éstas se abran, es decir, es la encargada de resistir los esfuerzos que dejan de ser resistidos por el hormigón una vez que este se ha fisurado.

Teniendo en cuenta que las tensiones generadas por la torsión son máximas en los puntos más alejados del centro de la sección, el mayor aporte de resistencia lo otorga el hormigón y las armaduras ubicadas cerca de la superficie del elemento. De lo anterior se deduce que las secciones óptimas son tubulares.

En el caso de las columnas inspeccionadas se pudo observar la inexistencia de armaduras transversales (Ver sección 6.4) por lo tanto no es posible que se desarrolle el mecanismo resistente antes mencionado.

De esta manera, la totalidad de la resistencia a torsión de las columnas es la que proporciona la resistencia a tracción diagonal del hormigón pretensado y esta se anula una vez que se producen las fisuras.

En la expresión anterior se señala que:

$\frac{1}{3} \sqrt{f'_c}$: es la tensión principal de tracción a la que ocurre la fisuración. Este valor es levemente sobreestimado para cuando actúan conjuntamente con el momento torsor esfuerzos de flexión y corte.

$\frac{A_{cp}^2}{P_{cp}}$: es el módulo de torsión de la sección. Los modelos de cálculo que se utilizan son los elásticos dado que el hormigón no fisurado en el rango de bajas tensiones se comporta como un material cuasi - elástico.

$\sqrt{1 + 3 \frac{f_{pc}}{\sqrt{f'_c}}}$: es el factor que amplifica al momento torsor necesario para producir la tensión principal de tracción a la que ocurre la fisuración, debido a las tensiones de compresión producidas por el pretensado.

Por otro lado, es necesario tener en cuenta que parte de la resistencia a tracción diagonal del hormigón va a ser consumida por las tensiones tangenciales que genera el corte. Es decir que el valor de (T_{cr}) obtenido con la expresión anterior es un límite superior y por lo tanto el valor real se obtendrá cuando se tenga en cuenta la acción simultánea del corte y la torsión. Además, la normativa específica que cuando se considere la acción simultánea de tensiones tangenciales debidas a corte y torsión el momento torsor de fisuración (T_{cr}) debe ser disminuido al multiplicarlo por el factor (A_g/A_{cp}) para que la adición lineal de las tensiones sea válida.

4.5.3. Corte

En el caso del esfuerzo de corte ocurre algo similar a la torsión. En un elemento de hormigón armado, la resistencia nominal al corte (V_n) es provista por la resistencia que aporta el hormigón (V_c) y la resistencia que aportan los estribos (V_s):

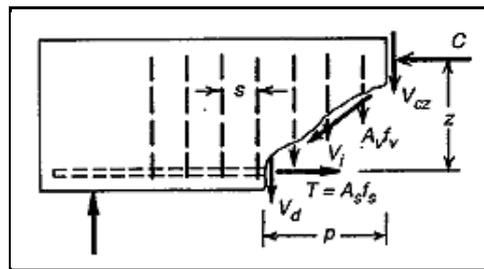
$$V_n = V_c + V_s$$

Una vez que se ha superado la resistencia al corte proporcionada por el hormigón, este se fisura y puede entenderse el mecanismo de resistencia de la siguiente manera: la resistencia nominal al corte proporcionada por el hormigón (V_c) es el resultado de la suma de tres factores:

$$V_c = V_{cz} + V_d + V_{iy}$$

La resistencia al corte debido al bloque de compresión (V_{cz}), el aporte debido a la fricción en las caras de la fisura (V_{iy}) y el aporte debido al efecto dovela (V_d) generado por la armadura longitudinal, que es muy pequeño y el primero en desaparecer.

Fig. 27 - Diagrama de cuerpo libre para equilibrio vertical



De la misma manera que en la torsión, la inexistencia de armaduras transversales hace que no sea posible que se desarrolle el mecanismo descrito.

Por lo tanto, la totalidad de la resistencia al corte de las columnas es la que proporciona la resistencia a tracción diagonal del hormigón y esta resistencia se anula una vez que se producen las fisuras ya que no existen armaduras adecuadas que proporcionen resistencia adicional.

Las tensiones tangenciales T a una altura y y respecto del eje baricéntrico z , están dadas por la siguiente expresión general:

$$\tau_{yx} = \frac{Q_y S_z}{b(y) J_z}$$

Donde:

- Q_y : Esfuerzo de corte en la dirección y
- $b(y)$: Ancho de la sección a la altura y y considerada
- S_z : Momento estático de la sección a la altura y y considerada
- J_z : Momento de inercia de la sección respecto del eje baricéntrico z

La expresión anterior es válida tanto para secciones rectangulares y circulares macizas, como circulares huecas.

El cálculo de las tensiones tangenciales por corte se hará mediante la siguiente expresión, que resulta del reemplazo, en la expresión anterior, del momento de inercia y momento estático para una sección circular hueca:

$$\tau_{\text{máx}} = \frac{2Q_y}{A}$$

Dónde:

Q_y : es el esfuerzo de corte actuante sobre la sección

A : es el área bruta de la sección de hormigón.

Como se indicó anteriormente estas tensiones tangenciales disminuirán la resistencia a la tracción diagonal disponible del hormigón y por lo tanto el momento torsor crítico de fisuración (T_{cr}) será menor que en el caso ideal de torsión pura.

4.5.4. Corte y torsión simultánea

El torque de fisuración bajo una combinación de corte y torsión corresponde a un esfuerzo principal de tracción inferior al valor de $\frac{1}{3} \sqrt{f'_c}$, debido a que parte de esta tracción ya fue tomada por la tracción diagonal que provoca el corte. Esto se tiene en cuenta en la expresión de cálculo restando a este término la tensión tangencial máxima provocada por el esfuerzo de corte. La interacción entre la fisuración por torsión y la fisuración por corte para las secciones huecas varía desde una relación elíptica para los miembros con vacíos pequeños hasta una relación lineal para las secciones con grandes vacíos. Para una interacción lineal, la torsión provoca una reducción en el corte por fisuración inclinada de alrededor del 25%. Por lo tanto, las expresiones para para las secciones sólidas son multiplicadas por el factor $(A_g/A_{cp})^2$.

Ensayos de vigas sólidas y huecas indican que el torque de fisuración de una sección hueca es aproximadamente (A_g/A_{cp}) veces el torque de fisuración de una sección sólida con las mismas dimensiones externas. El multiplicador adicional de (A_g/A_{cp}) refleja la transición desde la interacción circular entre las cargas de fisuración por cortante y las cargas de fisuración por torsión para los miembros sólidos, hasta la interacción aproximadamente lineal para el caso de las secciones huecas de pared delgada.

Al actuar simultáneamente ambos esfuerzos, el momento torsor de fisuración (T_{cr}) para una sección circular hueca será calculado con la siguiente expresión:

$$T_{cr} = \left(\frac{1}{3} \sqrt{f'_c} - \tau_{max} \right) \frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \sqrt{1 + 3 \frac{f_{pc}}{\sqrt{f'_c}}} \left(\frac{A_g}{A_{cp}} \right)$$

5. CONTEXTUALIZACIÓN DEL ANÁLISIS

El Ente Provincial de Energía del Neuquén (EPEN), es una empresa de servicio público del Estado creada en 1981 que realiza la prestación del servicio de transporte, distribución y generación de energía eléctrica en la provincia. El transporte de energía lo realiza a través de líneas de alta tensión en 132 kV y 33 kV y la distribución a través de líneas de media tensión en 13,2 kV.

Fig. 28 - Infraestructura actual del EPEN



La línea LAT-132 kV, que comprende el tramo colapsado, fue construida hace más de 40 años por la empresa Agua y Energía Eléctrica del Estado (AyEE) y recepcionada por el EPEN en 1981. Recorre aproximadamente 180 km desde su origen en la estación transformadora Chocón hasta su punto final en la estación transformadora Las Lajas y pasa por dos estaciones transformadoras intermedias, Cutral Co y Zapala.

Saliendo de la ET Cutral Co, la línea LAT–132 kV recorre 71 km y abastece la ET Zapala. El colapso de las torres ocurrió en este tramo de la línea, a unos 5 km de la localidad de Cutral Co. Paralela a ésta, se desarrolla la línea LAT-33 kV que también se vio afectada y el mismo día quedó fuera de servicio debido a las condiciones climáticas de ese 19 de julio de 2018.

Fig. 29 - Ubicación geográfica LAT-132 KV tramo Cutral Co-Zapala

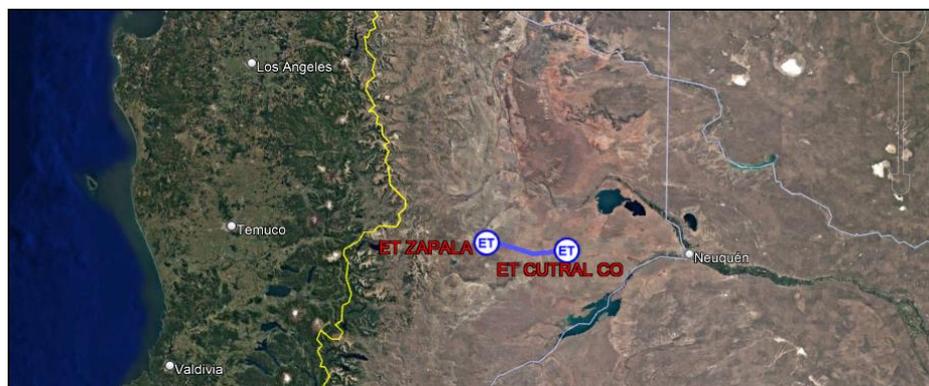


Fig. 30 - Recorrido LAT-132 KV y LAT-33 KV tramo Cutral Co-Zapala



La salida de servicio de la línea LAT-132 kV en el tramo Cutral Co - Zapala se debió al colapso de 8 torres, denominadas por el EPEN piquetes N° 23, 24, 25, 26, 27, 28, 30 y 31 con una extensión de aproximadamente 2,5 km. El piquete N°29 corresponde a una estructura doble de retención, la cual no sufrió daños estructurales.

Fig. 31 - Ubicación de las torres colapsadas

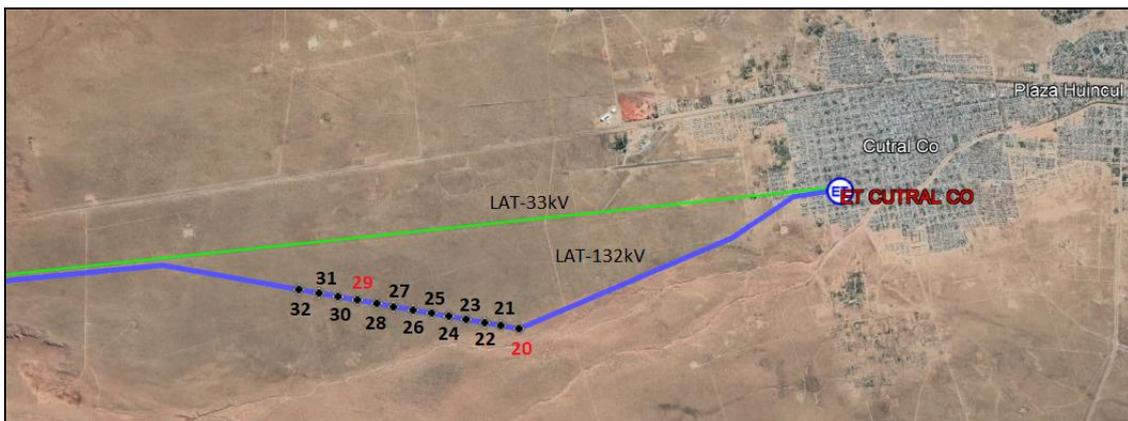


Fig. 32 - Nomenclatura de los piquetes según el EPEN



Con el propósito de familiarizar al lector con el fenómeno climático y dar una idea de la magnitud del evento mencionado, se exhiben a continuación algunas de las fotografías que fueron tomadas instantes después del colapso:

Fig. 33 - Torres colapsadas LAT-132 KV tramo Cutral Co-Zapala



Fig. 34 - Torres colapsadas LAT-132 KV tramo Cutral Co-Zapala



Fig. 35 - Torres colapsadas LAT-33 KV tramo Cutral Co-Zapala



Fig. 36 - Torres colapsadas LAT-132 KV tramo Cutral Co-Zapala



La línea LAT-132 kV está conformada por estructuras de hormigón armado que mediante cadenas de aisladores mantienen suspendidos los cables conductores denominados fases. Las estructuras están formadas por postes cónicos de hormigón armado que en su parte superior poseen ménsulas, también de hormigón, de las cuáles cuelgan los aisladores. La separación entre estructuras es de 260 metros y la disposición de conductores es de simple terna en triángulo. Por el punto más alto de las torres pasa un cable de acero denominado cable de guardia que actúa como protección contra descargas.

Se tienen dos clases diferentes de estructuras, las torres de suspensión, cuya función es mantener suspendida la línea; y las torres de retención, cuya función es la de generar puntos fijos para evitar colapsos en cadena. Estas últimas se ubican cada cierta cantidad de estructuras de suspensión, en los cambios de dirección del tendido eléctrico y en el inicio y fin de la línea.

Es importante mencionar que el análisis que se lleva a cabo a lo largo de este trabajo se centra en el tramo de 3 km donde se originó la falla. Las actividades que se desarrollan en los apartados siguientes persiguen el objetivo de determinar el mecanismo de falla de las torres y cuáles fueron las condiciones que dieron lugar a que el colapso se manifieste de la manera en que lo hizo. Se pretende entender si se debió a un fenómeno local extraordinario producto de las condiciones climáticas presentes o, de no ser así, por qué ocurrió en este tramo en particular de la línea y no en otros de su recorrido, como así también por qué nunca antes ocurrió algo similar en los casi 50 años que la línea lleva en servicio. El hecho de comprender este tipo de cuestiones permitirá conocer cuán probable es su reiteración en el futuro y la mejor manera de enfrentarlo en caso de repetirse.

El estudio de los causales del colapso de las 8 torres de la línea LAT-132 kV se aborda a partir de la ejecución de las siguientes actividades:

- Análisis de antecedentes: abarca la recopilación y estudio de toda la información disponible que resulte relevante. Planos conforme a obra, fotografías y descripción del evento, información meteorológica, metodologías y análisis recomendados en bibliografía especializada, normas de referencia, etc.
- Relevamiento de campo y extracción de muestras: recorrida de conocimiento del lugar de emplazamiento de las estructuras, inspección de las torres colapsadas, relevamiento del armado estructural, toma de medidas, extracción de muestras, evaluación de la forma de rotura e identificación de posibles mecanismos y secuencias de colapso.
- Ensayos de laboratorio: determinación de las propiedades mecánicas y características de los materiales que forman parte del sistema estructural. Ensayos de compresión sobre muestras de hormigón, ensayos de tracción sobre elementos de armadura y cables conductores, prueba de deslizamiento de grapas de sujeción.
- Análisis de condiciones meteorológicas y determinación de cargas: estudio del fenómeno meteorológico ocurrido desarrollado por expertos en el tema y estimación de las cargas actuantes de hielo y viento sobre la línea al momento de la falla. Aplicación de la reglamentación vigente y normas de referencia.
- Evaluación de la resistencia estructural de las torres de suspensión: determinación de la capacidad resistente de los postes a partir de la geometría, propiedades de los materiales y armaduras relevadas en actividades anteriores.
- Análisis estructural: evaluación del comportamiento estructural del sistema conductores - aisladores mediante la simulación de vanos contiguos cargados bajo la combinación de acciones de viento y hielo. Estudio de cargas longitudinales desbalanceadas
- Determinación de los mecanismos de colapso: evaluación de la secuencia de eventos y mecanismos que produjeron el efecto del colapso en cascada.

6. DESARROLLO

6.1. Análisis de antecedentes y recopilación de información

La primera etapa de este trabajo consistió en recopilar los antecedentes disponibles suministrados por el EPEN como referencia directa del evento ocurrido y de las características de los diferentes elementos que componen la línea, solicitar a fuentes externas información complementaria acerca de las condiciones meteorológicas en el entorno de las líneas afectadas, y analizar de manera crítica toda la documentación recibida resaltando aquellas cuestiones consideradas relevantes para los análisis siguientes. A continuación, se resume la documentación en la tabla 2 y la información recibida se adjunta en los ANEXOS A al I.

Tabla 2 - Cuadro resumen de la información recibida

Cuadro resumen de la información recibida						
Ref.	Descripción	Nombre del archivo	Fuente	Elaborador	Fecha	Obs.
I	Posición geo-referenciada línea de 132 Kv -33Kv afectadas.	Emergencia Zapala.kmz	EPEN	s/ datos	s/ fecha	No figura en el kmz en que parte de la línea de 33kv fue la falla
II	Conforme a obra de la Línea 132 Kv Cutral Co - Zapala	CAO LAT 132 kv CuCo Zapala - 1.pdf/ CAO LAT 132 kv CuCo Zapala -2.pdf/CAO LAT 132 kv CuCo Zapala -4.pdf/CAO LAT 132 kv CuCo Zapala - 7.pdf/CAO LAT 132 kv CuCo Zapala - 8.pdf/PLANIALTIMETRÍA VANO EMERGEN.pdf	EPEN	Agua y Energía Eléctrica Sociedad del Estado TEYMA S.A.I.C.F.A – ABENGOA ARGENTINA	s/ fecha	No menciona con qué torque se ajustan las grapas, ni la carga de deslizamiento
III	Solicitud Datos meteorológicos y estimación del manguito	19-07-2018 L.A.T. Cutral Co Zapala.pdf	EPEN	Cesar Horacio Cedrón Ingeniero Electricista en EPEN	s/ fecha	Habla de la zona donde ocurrió la falla de la línea LMT 33 kv
IV	Acta escribana	Acta 329 - Escribana Sylvia Ines Lopez Alaniz. Emergencia Energética Zona Centro-Oeste - Zapala – 2.pdf	EPEN	Escribana Sylvia Ines Lopez Alaniz	27/07/18	Describe el colapso de las estructuras de la LAT 132
V	Comunicación interna EPEN - LAT 132 KV	EMERGENCIA 132-kv CUTRAL CO - ZAPALA.doc	EPEN	Cesar Horacio Cedrón Ing. Electricista en EPEN	15/08/18	Describe el primer vistazo del evento en LAT 132
VI	Comunicación interna EPEN - LAT 33 KV	EMERGENCIA 33-kv CUTRAL CO - ZAPALA.DOC	EPEN	Cesar Horacio Cedrón Ing. Electricista en EPEN	15/08/18	Describe el primer vistazo del evento en LMT 33

VII	INFORME TÉCNICO TORMENTA - GRC	INFORME tormenta_19072018.PDF	EPEN	GRC GRUPO RADAR CÓRDOBA	S/ FECHA	Información no utilizada
VIII	Documentación Técnica de CIMALCO	Esfuerzos torsores Cimalco .docx/ Suspensión dimensional.pdf/ Fotografías	CIMALCO	CIMALCO	25/07/18	Documentación Técnica de CIMALCO sobre las nuevas torres instaladas
IX	REG. DE LÍNEAS AÉREAS EXT. DE MEDIA Y ALTA TENSIÓN. AEA 95301. 2007	AEA 95304_2007.pdf	EPEN	AEA 95301 2007	2007	
X	INFORMACIÓN VERBAL DE REUNIONES CON PERSONAL DEL EPEN					
XI	ESTUDIO CONDICIONES METEOROLÓGICAS - LASSIG	Diagnóstico condiciones meteorológicas LASSIG.pdf	LASSIG	LaDiFA Laboratorio de Dinámica de Fluidos Ambientales	4/9/19	Describe la tormenta durante el evento del colapso
XII	SIMULACIÓN DE CRECIMIENTO DEL MANGUITO - LASSIG	SIMULACIÓN MANGUITO DE HIELO.pdf	LASSIG	LaDiFA Laboratorio de Dinámica de Fluidos Ambientales	4/9/19	Establece las dimensiones probables del manguito

Ref. I: POSICIÓN GEO-REFERENCIADA LÍNEA 132 KV - 33 KV AFECTADAS

Se recibió del EPEN el archivo “Emergencia Zapala.kmz” con la posición georreferenciada de la línea de 132 Kv y la de 33 Kv, ambas afectadas por el fenómeno meteorológico (Fig. 37). El mismo fue completado con la ubicación de otros puntos indicativos de accesos y el lugar de depósito de los elementos colapsados, cuya posición fue relevada durante las diferentes visitas realizadas al sitio. En la tabla y figura siguientes se detalla la ubicación del conjunto de puntos relevados.

Tabla 3 - Ubicación de puntos relevados

Coordenadas Puntos de Referencia Sistema Posgar 94, Gauss Krugger zona 2			
Nombre	X	Y	Descripción
P1	2469681.401	5689493.986	Picada para acceder al depósito de postes
P2	2473397.764	5690050.116	Entrada que lleva al sector de la línea colapsada
P3	2468718.923	5688900.380	Depósito de postes colapsados
P4	2469262.489	5689464.614	Desvío hacia el casco del campo
P5	2468732.580	5690100.880	Camino hacia el casco del campo
P6	2468647.519	5690166.324	Casco del campo
20	2475041.506	5687867.353	Piquete de poste colapsado número 20
21	2474801.456	5687907.115	Piquete de poste colapsado número 21
22	2474588.378	5687942.509	Piquete de poste colapsado número 22
23	2474342.081	5687984.898	Piquete de poste colapsado número 23
24	2474112.420	5688026.776	Piquete de poste colapsado número 24
25	2473885.456	5688065.446	Piquete de poste colapsado número 25
26	2473639.164	5688101.812	Piquete de poste colapsado número 26
27	2473379.945	5688142.137	Piquete de poste colapsado número 27
28	2473159.629	5688187.127	Piquete de poste colapsado número 28
29	2472902.554	5688232.097	Piquete de poste colapsado número 29
30	2472645.401	5688273.838	Piquete de poste colapsado número 30
31	2472393.002	5688317.811	Piquete de poste colapsado número 31
32	2472126.471	5688363.504	Piquete de poste colapsado número 32

Fig. 37- Posición georreferenciada LAT-132 KV y LAT-33 KV (KMZ)



Ref. II: CONFORME A OBRA DE LÍNEA 132 KV CUTRAL CO - ZAPALA

Esta documentación corresponde a la memoria descriptiva, cómputo de materiales, planilla de cálculo de fundaciones y planos típicos de las estructuras de la obra “Línea de transmisión de 132 kV Cutral Có – Zapala”, donde se destacan los siguientes elementos significativos:

Memoria Descriptiva:

- Características generales:

El recorrido de la línea es de 71 km atravesando casi exclusivamente zonas rurales. La disposición de conductores es de simple terna en triángulo para zonas rurales y verticales para zona urbana. En ambos casos cuentan con protección contra descargas por medio de cable de guardia. La altura libre mínima respecto al suelo es de 7 m en zona rural y de 8 m en zona urbana.

- Cables

Los cables conductores son de aluminio-acero, de sección nominal 150/25 mm² (IRAM 2187/70). El cable de guardia es de acero galvanizado de 50 mm² de sección (IRAM 722) con formación de 19 hilos.

- Estructura

Los apoyos de las líneas son de hormigón armado, formados por postes de igual resistencia en todos los planos diametrales, con ménsulas del mismo material. El distanciamiento promedio entre estructuras es de 260 m en zona rural y 155 m en zona urbana.

- Aislación

Se utilizaron aisladores de porcelana de unión a rótula, según IRAM 2095 clase 451. Las cadenas de aisladores están formadas por 9 elementos en las suspensiones simples y 2 x 10 en las suspensiones y retenciones dobles.

- Grapería

La morsetería para cadenas responde a la norma VDE 0210/5-69. Los elementos de protección son raquetas en ambos extremos. El cable conductor está protegido por Armor-Rods del tipo preformado en todos los puntos de suspensión.

- Puesta a tierra

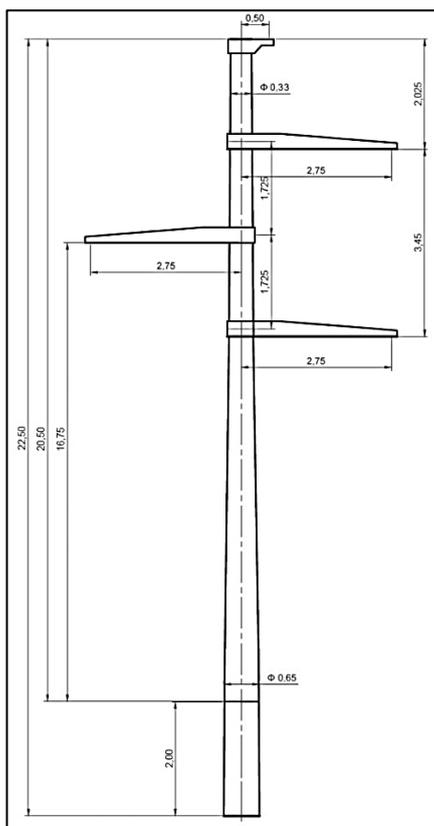
Todos los extremos de las cadenas de aisladores y el cable de guardia han sido conectados a la armadura metálica de las estructuras de soporte. A su vez, dicha armadura metálica ha sido puesta a tierra por medio de una jabalina de hierro galvanizado de 2 metros de longitud.

- Fundaciones

Las fundaciones para estructuras se constituyen de hormigón simple, y han sido calculadas por el método de Sulzberger. En las zonas con presencia de salitre y suelos agresivos, el hormigón se preparó con cemento especial de alta resistencia a los sulfatos.

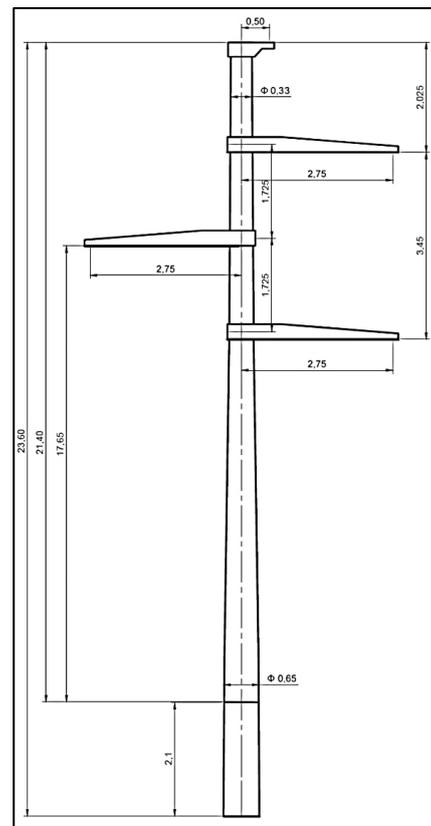
Típicos de las estructuras colapsadas - elevación:

Fig. 38 - Estructura de suspensión normal "S1-1"



Corresponde a los piquetes N° 23, 26 - 28 y 31.

Fig. 39 - Estructura de suspensión normal "S1"



Corresponde a los piquetes N° 24, 25 y 30.

Fundaciones:

Se toma nota de la información antecedente de las dimensiones, tipo y criterios de cálculo de fundaciones consideradas en cada piquete, pero se entiende que estos parámetros no impactan sobre el presente análisis dado que el colapso ocurrido no guarda relación con la rigidez/resistencia de las fundaciones.

Planialtimetría:

Presenta la información del trazado de la línea en planta (planimetría) y en corte (altimetría), donde se indica el tipo de estructura y número de piquete, cota del terreno natural, las progresivas y longitudes de los vanos.

Observaciones²:

No coincide el perfil topográfico de la altimetría del conforme a obra con el perfil extraído de Google Earth, en particular la diferencia de altura entre piquetes N° 23 y 24 que según el conforme a obra es aprox. 10 m pero según el perfil de Google Earth es de aprox. 6 m.

Las dos estructuras de suspensión (S1 y S1-1) son prácticamente idénticas, su única diferencia radica en que la “S1” es 1 m más alta que la “S1-1”.

No se menciona en ningún lugar el torque de ajuste de los bulones de las grapas de sujeción.

Ref. III: SOLICITUD DATOS METEOROLÓGICOS Y ESTIMACIÓN DEL MANGUITO

Este documento corresponde a una solicitud en carácter de ayuda emitido por el EPEN con destinatario desconocido, donde se consulta si es posible relacionar la acumulación de hielo sobre las estructuras con el espesor del manguito de hielo sobre el conductor para estimar su magnitud. En el mismo, se describe el fenómeno ocurrido, se anexan fotografías del evento y los datos meteorológicos del aeropuerto de Cutral Co, los cuales no tienen valor en el análisis de las condiciones que desencadenaron la falla debido a la interrupción en horario del evento (de 20hs a 8hs).

Quien redacta el documento menciona los siguientes datos que resultan de interés³:

- El día 19/7/18 se produce la rotura de 8 columnas de hormigón armado de la línea de 132 kV LAT.
- A las 9:41 hs de ese día las protecciones del sistema actuaron indicando falla bifásica a 49 km de Cutral Co. Se menciona que se encontraron en el sector importantes manguitos de hielo sobre los conductores provocando su acercamiento, pero no se menciona el espesor, ni hay imágenes.

² Consultar el ANEXO A para ampliar información sobre este documento.

³ Consultar el ANEXO B para ampliar información sobre este documento.

- 14:25 hs finalizados los trabajos de mantenimiento, se intenta restaurar el servicio pero nuevamente se enciende la señalización pero esta vez a 6,9 km de Cutral Co indicando falla trifásica. Al llegar al sitio, encuentran las columnas colapsadas.

- Del material fotográfico no se pudo observar directamente el espesor del manguito de hielo, solo la acumulación lateral de nieve en ciertas columnas y el rastro de los manguitos en la nieve.

- Se menciona que en la misma franja donde sucede el evento de mayor envergadura sobre la línea de 132 kV, sufre daños la línea paralela de 33 kV. Se cortan los conductores de las 3 fases, desprendimiento de las ataduras en más de 20 vanos, rotura de crucetas de hormigón y pernos centrales.

Ref. IV: ACTA ESCRIBANA

Corresponde al Acta 329, formalizada por la escribana Sylvia Inés López Alanís el día 27/7/18 a las 11:00 hs, en donde a requisitoria del Presidente del Directorio del EPEN y en compañía de un ingeniero delegado para tal fin, deja constancia del estado en que se encontraban las estructuras de hormigón armado denominadas piquetes N° 23, 24, 25, 26, 27, 28, 30 y 31 de la línea de Alta Tensión de 132 KV.

En el escrito se describen cuestiones técnicas y la secuencia detallada de la toma de fotografías de los piquetes N° 23, 24, 25, 26, 27, 28, 30 y 31 adjuntas al final del mismo. Se explica que la línea fue construida en el año 1975, antes de la creación del EPEN, y desde esa fecha permaneció en servicio hasta el día jueves 21 de julio de 2018, donde cerca del mediodía se produjo la rotura de las estructuras mencionadas (dato erróneo, el colapso ocurrió el 19/7/18). Aclara que los daños observados se produjeron luego de haberse registrado en la zona temperaturas muy bajas y una importante nevada, por lo que se presume que sobre los conductores se depositó una carga de hielo extraordinaria (manguitos de hielo). El organismo no cuenta con registros de daños similares en dicha línea durante las cuatro décadas que lleva en servicio.

Según se documenta, los piquetes N° 23, 24, 25, 26, 27, 28 y 31 sufrieron daños de distinto grado en la parte superior de la columna, en conjunto con los elementos de soporte de los conductores, pero aún se encontraban en pie al momento de la inspección visual. Las partes desprendidas no cayeron al suelo, sino que fueron depositadas mediante grúa al pie de cada estructura luego de cortar los hierros que la sostenían. La torre denominada piquete N° 30 debió demolerse por completo para montar una estructura provisoria en su lugar debido a los daños que presentaba. Menciona que el piquete N° 30 corresponde a la última estructura dañada, pero se entiende que es un error en el escrito. La última dañada es la 31.

El ingeniero delegado por EPEN para la inspección explica que la apariencia en las zonas de rotura evidencia que el colapso se habría producido debido a esfuerzos que agotaron su capacidad resistente, pero no presentan disgregaciones ni evidencias visibles de daños ocasionados por la acción de elementos agresivos. Las armaduras no presentan signos de corrosión ni de falta de adherencia con el hormigón y que éste no presenta signos de desprendimientos ni manchas de óxido.

Al final del escrito, la Sra. Escribana da por constatada las roturas de las torres denominadas piquetes N° 23, 24, 25, 26, 27, 28, y 31 de la Línea de Alta Tensión y certifica que las fotografías son copia fiel de lo observado.

Observaciones⁴:

Las fotos del documento son de las torres ya reparadas y de los elementos colapsados al pie de cada una luego de haberlos bajado con grúas.

La torre doble de retención, denominada piquete 29, no fue fotografiada en el proceso aparentemente por no haber sufrido daños estructurales.

En el escrito no se menciona el estado de las torres denominadas piquetes N° 20 (retención angular), 21, 22, 29 (retención doble) ni 32.

Tampoco se menciona que se corten los conductores, que se descuelguen los aisladores, o cables de la línea.

Ref. V: COMUNICACIÓN INTERNA EPEN - LAT 132 KV

Corresponde a un documento de comunicación interna (Sistema de Control Interno Permanente) del EPEN, emitido el día 15/08/2018 por Pincheira Nelson del sector Mat. Línea Zapala y dirigido a Cedrón César del área de mantenimiento, con la referencia “LAT 132 KV CUTRAL CO - ZAPALA”. Comunica que el día 19/07/2018 la línea de alta tensión LAT 132 KV tramo Cutral Co - Zapala sale de servicio por razones climáticas, al quebrarse ocho columnas de hormigón armado de Suspensión Simple y cortarse los conductores en otra columna de Retención Doble. En el mismo, se adjuntan fotografías de las columnas, los conductores y evidencias de depósitos de hielo.

Observaciones⁵:

Las fotografías adjuntas presentan muy mala calidad de imagen. En algunas se alcanzan a identificar los manguitos de hielo sobre las líneas, pero no lo suficiente como para determinar su magnitud.

No se aclara si las fotos son del primer vistazo del evento, es decir, del día que actuaron las protecciones 19/7/18, o si personal del EPEN ya había realizado alguna tarea de mantenimiento.

⁴ Consultar el ANEXO C para ampliar información sobre este documento.

⁵ Consultar el ANEXO D para ampliar información sobre este documento.

La octava imagen corresponde al piquete N° 29 (torre doble de retención) y si bien es borrosa, permite ver que en 2 ménsulas (las que están del mismo lado) los aisladores están fuera de su posición normal de trabajo (están colgando). El otro aislador se observa en su posición normal y se distinguen 3 cables que llegan a la torre. En el escrito se expresa que los conductores se cortan en esta columna, pero por la nitidez no es posible corroborarlo.

Ref. VI: COMUNICACIÓN INTERNA EPEN - LAT 33 KV

Corresponde a un documento de comunicación interna (Sistema de Control Interno Permanente) del EPEN, emitido el día 15/08/2018 por Pincheira Nelson del sector Mat. Línea Zapala y dirigido a Cedrón César del área de mantenimiento, con la referencia “LMT 33 KV CUTRAL CO - ZAPALA”. Comunica que el día 19/07/2018 la línea de media tensión LMT 33 KV tramo Cutral Co - Zapala sale de servicio por razones climáticas, notificando el corte de los conductores en la fase-S, fase-T y fase-R, el desprendimiento de las ataduras en más de 20 piquetes, la rotura y giro de algunas crucetas de hormigón y destrucción de pernos centrales. En el mismo, se adjuntan fotografías de las columnas, los conductores y evidencias de depósitos de hielo.

Observaciones⁶:

Las fotografías adjuntas presentan muy mala calidad de imagen y no es posible identificar los manguitos de hielo sobre las líneas.

Al igual que antes, no se aclara si las fotos corresponden a la primera visita al lugar, o si personal del EPEN ya había realizado tareas de mantenimiento como muestran algunas imágenes.

En la cuarta foto se observa una torre de retención con 3 fases cortadas, pero se desconoce si fue producto del evento o de tareas de mantenimiento.

Ref. VII: INFORME TÉCNICO TORMENTA - GRC

Consiste en un análisis que se realizó con datos del radar meteorológico RMA7 con los productos DOPPLER y FACTOR DE REFLECTIVIDAD HORIZONTAL, con datos satelitales y con datos de modelado numérico obtenido a través de la aplicación WRF (Weather Research and Forecasting) implementada por el Grupo Radar Córdoba (GRC) y el Laboratorio de Hidráulica (LH) de la Universidad Nacional de Córdoba.

El análisis de datos de radar muestra una componente importante de vientos en dirección norte-oeste desde la madrugada del día 19 hasta pasado el mediodía. Según la información del radar, la velocidad radial del viento respecto del radar supera los 20 m/s (72 km/h). Esta información queda respaldada por el folding que muestran los datos Doppler analizados.

⁶ Consultar el ANEXO E para ampliar información sobre este documento.

Observación⁷:

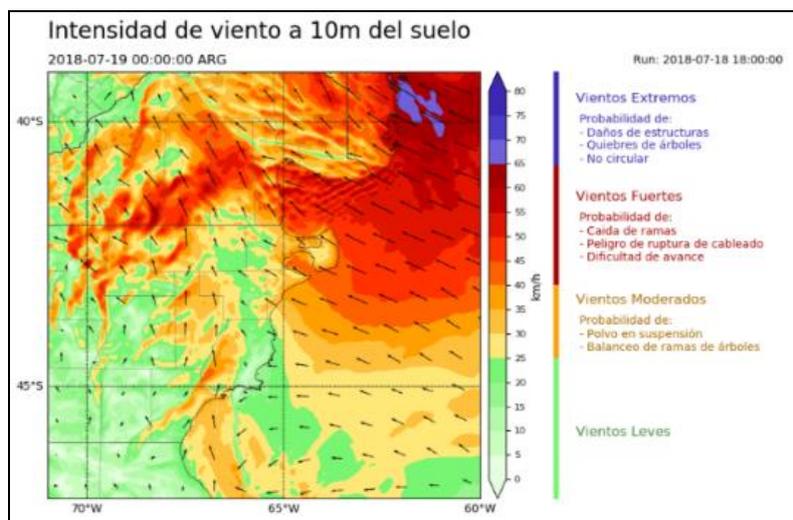
La información que se presenta en este documento, tampoco tiene valor en el análisis de las condiciones que desencadenaron las fallas puesto que el radar meteorológico se encuentra emplazado en la ciudad de Neuquén y considerando la curvatura de la Tierra, los datos obtenidos corresponden a valores de viento a una altura superior a 1000 metros (Fig. 40).

Fig. 40 - Ubicación del radar meteorológico Neuquén



Por otra parte, el borde superior izquierdo del mapa “intensidad del viento a 10 metros del suelo” (Fig. 41) no alcanza la zona de emplazamiento de la línea LAT-132 kV (queda fuera del mapa), en consecuencia, no se pueden utilizar las velocidades diagnosticadas por el modelo WRF⁸.

Fig. 41 - Mapa de intensidad del viento



Ref. VIII: DOCUMENTACIÓN TÉCNICA CIMALCO

Este documento contiene los planos de las columnas tipo, ménsulas y vínculos de las torres de retención y suspensión elaboradas por la empresa CIMALCO. También se incluye en el mismo un detalle con valores de solicitaciones por momento torsor generado por el sector de Ingeniería de la empresa y enviado por correo electrónico a personal del EPEN. Además, se incluyen fotografías de

⁷ Consultar el ANEXO F para ampliar información sobre este documento.

⁸ Por lo mencionado en las referencias III y VII, se debe recurrir a otras fuentes de información meteorológica que más adelante se detallan (Referencias XI y XII).

los elementos en la etapa de colado y de instalación en la línea, reemplazando las estructuras provisionarias que habían sido colocadas luego del colapso.

Observaciones⁹:

Planos: Los planos no contienen información sobre las armaduras de refuerzo dispuestas en los elementos. Abarcan principalmente dimensiones de los mismos. Las dimensiones de las columnas especificadas en los planos se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 4 - Especificaciones de planos CIMALCO

Estructura	Código	Altura	Hormigón	Diám. ext. base	Diám. int. base	Diám. ext. cima	Diám. int. cima
Retención	23-R-4050	23 m	H30	70,5 cm	45 cm	36 cm	22 cm
Suspensión	24-R-4350	24 m		72 cm	46 cm	36 cm	22 cm

Fotografías:

- Postes: Se observa como armadura longitudinal la disposición de barras nervadas de diversos diámetros. Probablemente, según lo divisado en las fotografías, el mayor diámetro es 20 mm. Asimismo, se advierte la presencia de cordones longitudinales como armadura de pretensado.

En cuanto a armadura transversal (Fig. 42 y 43), se dispone de barras lisas formando estribos circulares con una separación aproximada de 60 cm que se disponen por dentro de las barras longitudinales. Se observa que algunos de estos estribos se encuentran soldados a sí mismos en sus extremos y a una de las barras longitudinales. Por la disposición y separación de los mismos se entiende que esta armadura transversal tiene funciones meramente constructivas para posicionar las barras longitudinales.

Fig. 42 - Armadura longitudinal en postes de CIMALCO



⁹ Consultar el ANEXO G para ampliar información sobre este documento.

Fig. 43 - Armadura longitudinal en postes de CIMALCO



- Ménsulas: En las fotografías se observa la distribución de armaduras longitudinal y transversal, pero como las ménsulas de la línea analizada (LAT 132 kV) no sufrieron daños durante el evento no se considera información relevante.

Detalle de solicitaciones:

Valores de momento torsor informados al EPEN por parte de CIMALCO. La altura (h) es medida desde arriba hacia abajo. Se entiende que se trata de momentos resistentes, aunque no se informa sobre la metodología para su determinación.

Tabla 5 - Detalle resistencia a torsión estructuras CIMALCO

Retención		Suspensión	
h [m]	Mt [tm]	h [m]	Mt [tm]
0,00	28,36	0,00	28,36
2,00	34,19	2,00	34,19
3,55	39,08	3,75	39,74
5,05	44,13	5,50	45,70
6,60	49,67	6,00	47,49
9,00	47,11	9,00	47,11
12,00	57,22	12,00	57,22
15,00	68,31	15,00	68,31
18,00	80,37	18,00	80,37
21,00	93,42	21,00	93,42
23,00	102,67	23,00	107,45

Ref. IX: REGLAMENTACIÓN DE LÍNEAS AÉREAS EXTERIORES DE MEDIA Y ALTA TENSIÓN

Corresponde al documento ““REGLAMENTACIÓN DE LÍNEAS AÉREAS EXTERIORES DE MEDIA Y ALTA TENSIÓN. AEA 95301. 2007” que rige los requerimientos actuales respecto del diseño de Líneas de Transmisión. En particular resultan destacables los siguientes ítems:

- CAPÍTULO 10: SOLICITACIONES EXTERIORES: establece la metodología para incorporar las acciones de viento y hielo sobre las estructuras.

- CAPÍTULO 11: DIMENSIONADO DE LAS ESTRUCTURAS: generalidades y materiales empleados. En particular:

- Método de Proyecto: LRFD
- Normas de Referencia para postes de H° Pretensado: IRAM 1605 y 1586.

- CAPÍTULO 12: HIPÓTESIS DE CARGA: Este capítulo resulta particularmente relevante para las verificaciones a realizar, en particular las siguientes especificaciones:

- Casos de Carga, Acciones últimas y criterios de serviciabilidad.
- Valores límites para las verificaciones.
- Consideraciones constructivas generales.

Ref. X: INFORMACIÓN VERBAL - REUNIONES CON PERSONAL DEL EPEN

Si bien la información suministrada es extensa, ciertos datos considerados cuestiones claves para el análisis no se encontraban documentados y se debió recurrir a reuniones eventuales con personal del EPEN para obtenerlos.

La información que surgió a partir de esto se detalla a continuación:

- Grapas de sujeción: Las grapas de sujeción son los elementos que permiten la vinculación entre las cadenas de aisladores y los cables conductores en las torres de suspensión. Estos elementos cumplen la función de mantener suspendidos los cables y a la vez permiten un deslizamiento relativo conductor-grapa al superarse un determinado valor de tiro no equilibrado a ambos lados de la torre.

Para que lo anterior ocurra, los pernos de las grapas se deben ajustar con un torque determinado por el fabricante. En este caso la carga de inicio de deslizamiento corresponde a un 25% de la carga de rotura del cable.

Este procedimiento no siempre se respetaba y las grapas se ajustaban más de lo debido para evitar el deslizamiento constante de los conductores sobre las mismas, ya que se generaba un desgaste prematuro de la protección anticorrosiva aumentando la velocidad de oxidación de ciertos elementos y provocando un mantenimiento excesivo.

- Rotura de conductores: Los cables conductores no se cortaron durante el evento del colapso.
- Peso del paquete de aisladores: $P_{aisl} = 0,55 \text{ KN}$.

Ref. XI: ESTUDIO CONDICIONES METEOROLÓGICAS - LASSIG

Dado que la información recibida por parte del EPEN (Referencia III y VII) no representaban con suficiente precisión las condiciones meteorológicas en el entorno de las líneas colapsadas, se recurrió a esta fuente externa para su evaluación.

En este informe se evalúan las condiciones meteorológicas ocurridas desde las 15 horas del día 18/07/2018 y 24 horas posteriores, haciendo énfasis en el tipo de nubosidad, la precipitación de nieve y los vientos que condujeron a la acreción de nieve sobre las líneas del tendido eléctrico y las estructuras.

Respecto a la metodología resulta importante destacar:

- Los mapas regionales son de Argentina y de la Provincia del Neuquén, y los datos o mapas locales corresponden a la ubicación entre los piquetes 31 y 23.
- Todos los datos analizados corresponden al período comprendido entre las 15 horas del día 18 hasta las 15 horas del día 19 de Julio de 2018.
- Los datos de los campos meteorológicos provienen del Reanálisis del National Center of Environmental Prediction (NCEP/NCAR Reanalysis; Kalnay y otros, 1996), tienen resolución espacial horizontal de 0,5° x 0,5° y resolución temporal de 6 horas.

Los siguientes datos resultan de interés:

- Los sistemas de presión de gran escala tuvieron una configuración que produjo un patrón de bloqueo a la circulación de los vientos oestes típicos en la Patagonia.
- Se produjo una persistencia anómala de las condiciones meteorológicas.
- Las nevadas fueron entre moderadas y fuertes desde la tarde del día 18 a la mañana del 19. El tipo de nieve caída fue nieve húmeda.
- La profundidad máxima de la nieve acumulada sobre el suelo alcanzó 13 cm a las 9 horas del día 19.
- La velocidad del viento se fue incrementando en el transcurso de la noche del día 18 llegando al máximo a la mañana del día 19 cuando estructura y cables estaban cubiertos de nieve depositada por el proceso de acreción.
- El valor máximo estimado por el modelo fue de 32 km/h acompañado con ráfagas de 53 km/h.
- La visibilidad se vio fuertemente reducida por la nevada llegando a un valor mínimo de 500 metros.

- Los datos meteorológicos utilizados tienen una resolución temporal de 6 horas. No se puede asegurar que entre los dos horarios analizados haya habido una intensificación tanto de la cantidad de nieve caída como de la velocidad del viento.

Observaciones¹⁰:

- Según se aprecia en los gráficos, los vientos tuvieron una dirección predominante desde el sur (perpendicular a la línea).

Ref. XII: SIMULACIÓN DE CRECIMIENTO DEL MANGUITO - LASSIG

En este documento se realiza la simulación del crecimiento del manguito de hielo durante la tormenta del día 19/7/18 analizada en los párrafos anteriores (Referencia XI). Se aplican dos modelos diferentes en función de los datos disponibles, el de Makkonen (1984) y el de Admirat (2008). El de Makkonen se basa en un modelo en el que la visibilidad observada es el parámetro clave para modelar el contenido de nieve en el aire y la consiguiente carga de nieve en un conductor eléctrico. En el modelo de Admirat, el equilibrio termodinámico se simplifica a solo dos intercambios de calor: entre el calor convectivo que genera el flujo de aire a temperatura positiva y el calor de fusión resultante de parte de la nieve acrecida. Estos dos intercambios de calor están estrictamente localizados en la interfaz del manguito de aire y nieve.

Ambos modelos se aplican con los datos meteorológicos obtenidos desde la reanálisis NCEP/NCAR (Referencia XI).

Observaciones¹¹:

- La precipitación de nieve húmeda en el área de los daños a las torres, entre los Piquetes 23 y 31 no fue excesiva puesto que se acumularon 13 cm.
- La velocidad máxima de la tormenta de viento en el área de estudio no fue extrema puesto que llegó a 32 km/h con ráfagas de 53 km/h, habiendo registros de eventos más intensos.
- El tamaño posible del manguito según el modelo de Makkonen arrojó un diámetro de 7,7 cm a las 9 hs con una masa de 1,034 kg/m. Según Admirat “manguitos de nieve de menos de 5–8 cm de diámetro y menos de 1 kg/m en sobrecarga de nieve, causan poco o ningún daño a las líneas aéreas”.
- El tamaño posible del manguito según el modelo de Admirat arrojó un diámetro de 20,1 cm a las 9 hs con una masa de 3,212 Kg/m, que según el mismo autor podrían producir daños en las líneas aéreas.

¹⁰ Consultar el ANEXO H para ampliar información sobre este documento.

¹¹ Consultar el ANEXO I para ampliar información sobre este documento.

6.2. Relevamiento de campo y extracción de muestras

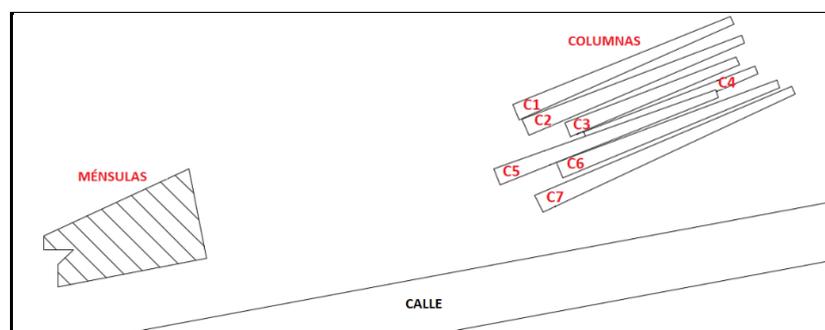
Una vez analizada la documentación, se programó un viaje al lugar de emplazamiento de la línea con el objetivo de completar la información requerida para este trabajo.

Utilizando las referencias del archivo kmz suministrado por el EPEN (Fig. 44), se arriba al sitio exacto donde transcurrió el evento para realizar una recorrida de conocimiento del lugar y constatar algunos datos del conforme a obra. En el lugar se observa el nuevo tramo de la línea de 132kv desplazada de su posición original debido a su reparación como describen los planos de referencia y la línea de 33kv. Luego, se procede a ingresar al predio donde se encontraban depositadas las torres colapsadas. Las mismas yacían apiladas en el interior de un campo de propiedad privada, a 11,3 km de la localidad de Cutral Co en dirección oeste, a unos 300m de la casa del cuidador y expuestas a la intemperie. Tal como se muestra en el croquis (Fig. 45), por un lado, se encontraron 7 de las 8 torres colapsadas y por otro sus respectivas ménsulas.

Fig. 44 - Referencias del archivo KMZ



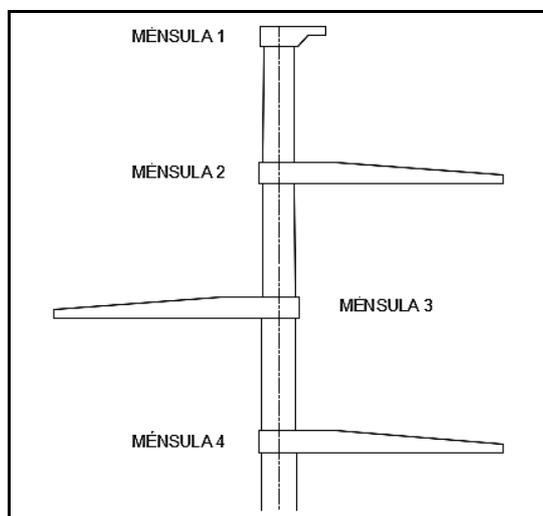
Fig. 45 - Croquis del depósito de las torres colapsadas



Con la finalidad de organizar los datos relevados, la toma de muestras y demás información, se enumeraron las columnas del 1 al 7. (Fig. 45 y 50). En adelante se hace referencia a las ménsulas de

la siguiente manera: ménsula 1: la superior que sujeta el cable de guardia, ménsula 2, 3 y 4 las siguientes de arriba hacia abajo que sujetan los cables conductores (Fig. 46).

Fig. 46 - Nomenclatura de ménsulas



Se observó que, de las 7 columnas dispuestas en el sitio, 4 fallaron entre la segunda y tercera ménsula (C1, C2, C5 y C6), inmediatamente por encima de la tercera ménsula, 2 entre la tercer y cuarta ménsula (C3 y C4), inmediatamente por encima de la cuarta ménsula, mientras que la restante (C7) se encuentra completa, y debe corresponder a alguna torre que por algún motivo en particular decidieron reemplazar. (Fig. 47 a 49).

Fig. 47 - Ubicación aproximada de las secciones de rotura

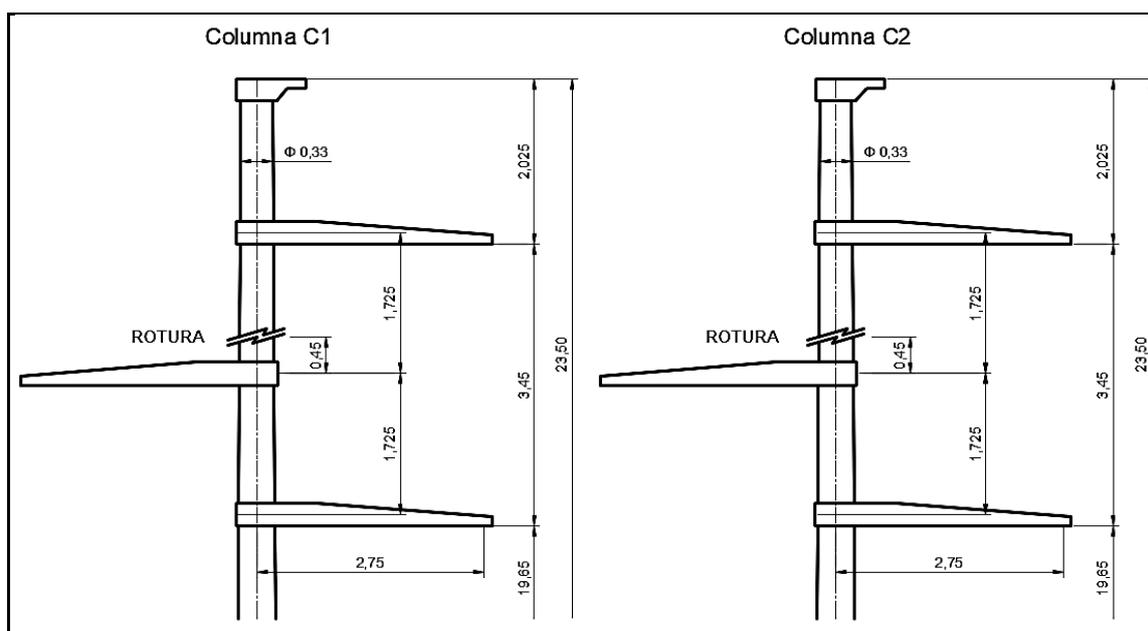


Fig. 48 - Ubicación aproximada de las secciones de rotura

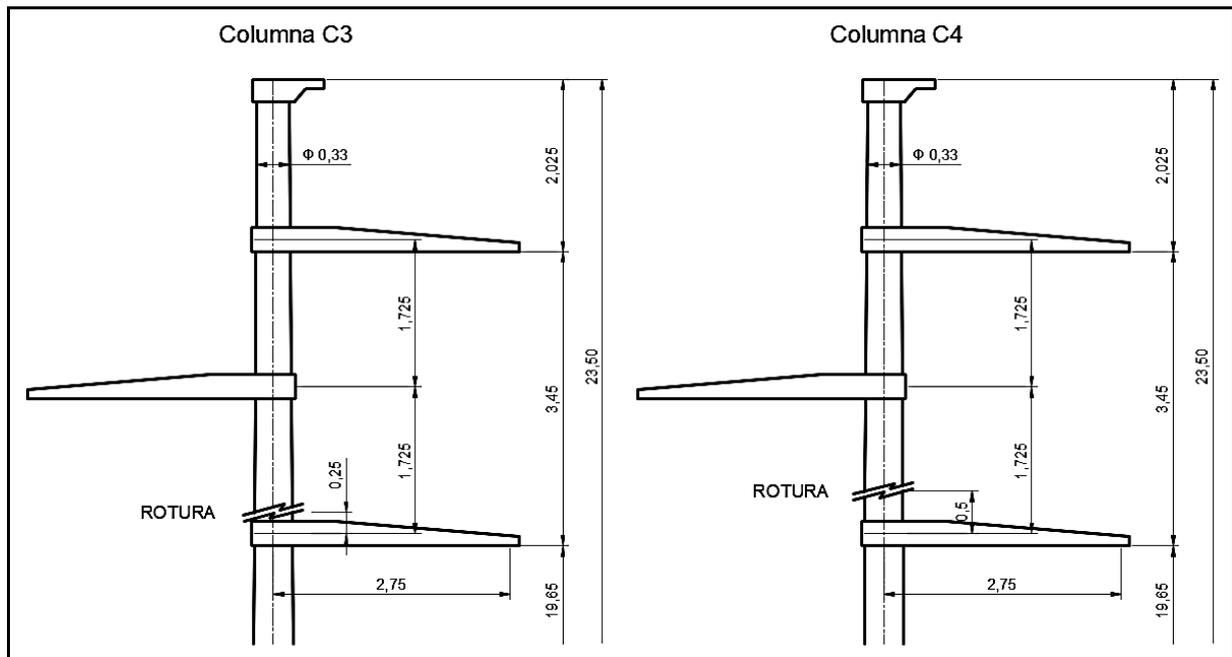


Fig. 49 - Ubicación aproximada de las secciones de rotura

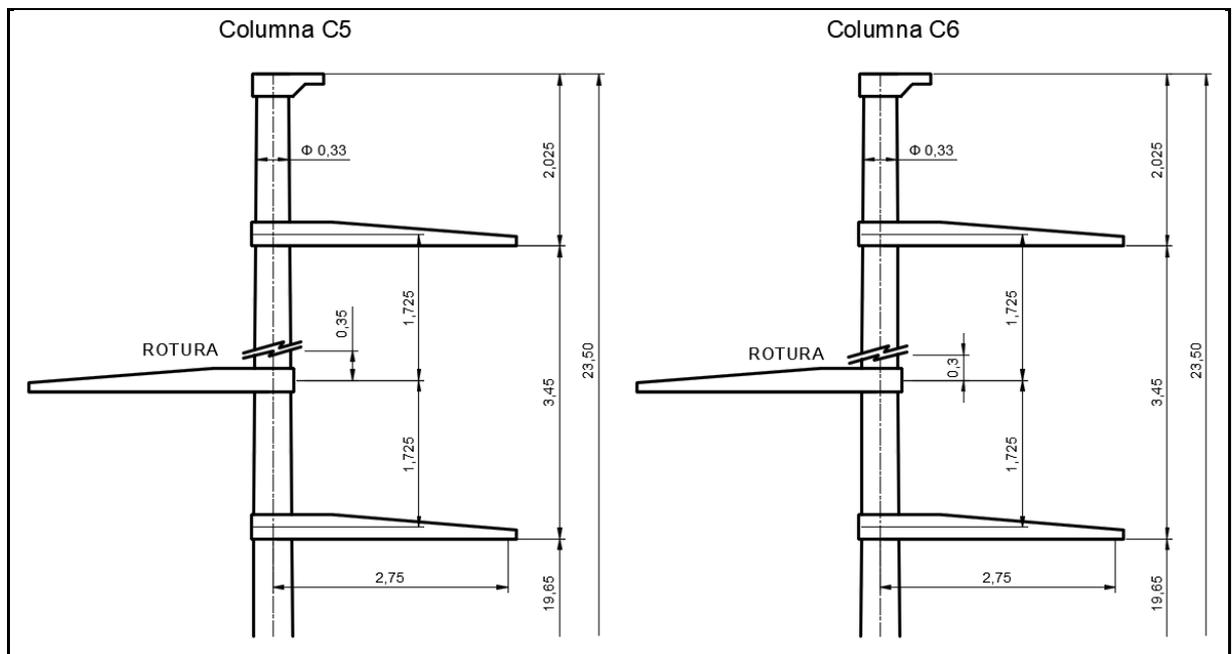


Fig. 50 - Marca de las ménsulas sobre las columnas



Lo anterior resulta coherente con la información presentada en el acta de la escribana (Referencia IV), en particular las fotografías de cada piquete en donde es posible advertir que las columnas de los piquetes 23, 24, 25, 28 y 31 fallaron en el tramo entre la 2da y 3er cruceta, las de los piquetes 26 y 27 entre la tercer y cuarta cruceta, mientras que la columna del piquete 30 había sido retirada al momento de labrada el acta por lo cual no pudo constatar su situación de colapso (corresponde a la que demolieron entera para poner otra en su lugar).

La cantidad de columnas colapsadas (8) se completa con los restos de una columna rota ubicada en el predio de la Estación Transformadora de Cutral Co.

No fue posible identificar a qué piquete correspondía cada una de las columnas depositadas en el predio.

Para cada una se determinó las medidas de diámetro interior, diámetro exterior y longitud de los restos de cada columna (Tabla 7). Los valores obtenidos se adjuntan en la tabla 6.2.1.

Tabla 6 - Dimensiones de las columnas colapsadas

Columna	Largo [m]	Sección superior		Sección inferior	
		Diámetro Ext [cm]	Diámetro Int [cm]	Diámetro Ext [cm]	Diámetro Int [cm]
C1	17,20	38	20	-	-
C2	17,50	40	20	-	-
C3	15,20	40	20	64	35
C4	15,36	42	22	60	-
C5	18,06	38	21	65	41
C6	17,02	38	20	58	38
C7	20,40	32	19	60	39

Se observó que, en la sección inferior, las columnas poseen una armadura longitudinal conformada por 20 barras lisas de 20 mm de diámetro y 20 cordones de pretensado en trenzas de 3 cables de acero de 3 mm de diámetro, cada uno (Fig. 51). Esta configuración se mantiene en todas las columnas, aunque con cierta irregularidad ya que en una de ellas se observó sólo 18 barras lisas y en otra, 19.

Fig. 51 - Armadura longitudinal de las columnas relevadas



En el extremo superior de la columna que se encontraba entera (C7) se observó únicamente 20 cordones de pretensado. En las columnas restantes, en las secciones de rotura, se observó los 20 cordones de pretensado y 5 barras de refuerzo de diámetro 20 mm.

Tabla 7 - Secciones de las columnas 6 y 7

<p>Sección superior columna Nº 7 Diámetro exterior = 32 cm Diámetro interior = 19 cm Armadura: $\Phi 20 = 0$ Trenzas = 20</p>	<p>Sección inferior columna Nº 7 Diámetro exterior = 60 cm Diámetro interior = 39 cm Armadura: $\Phi 20 = 20$ Trenzas = 20</p>
<p>Sección superior columna Nº 6 Diámetro exterior= 38 cm Diámetro interior= 20 cm Armadura: $\Phi 20= 5$ Trenzado=20</p>	<p>Sección inferior columna Nº 6 Diámetro exterior= 58 cm Diámetro interior= 38 cm Armadura: $\Phi 20= 20$ Trenzado=20</p>

Debido a esta variabilidad en la armadura longitudinal, mediante el uso de martillos percutores eléctricos (Fig. 52 y 53), se procedió a picar la columna C7 en diversos lugares a lo largo de la columna con el objeto de relevar la armadura dispuesta y obtener el esquema de armado.

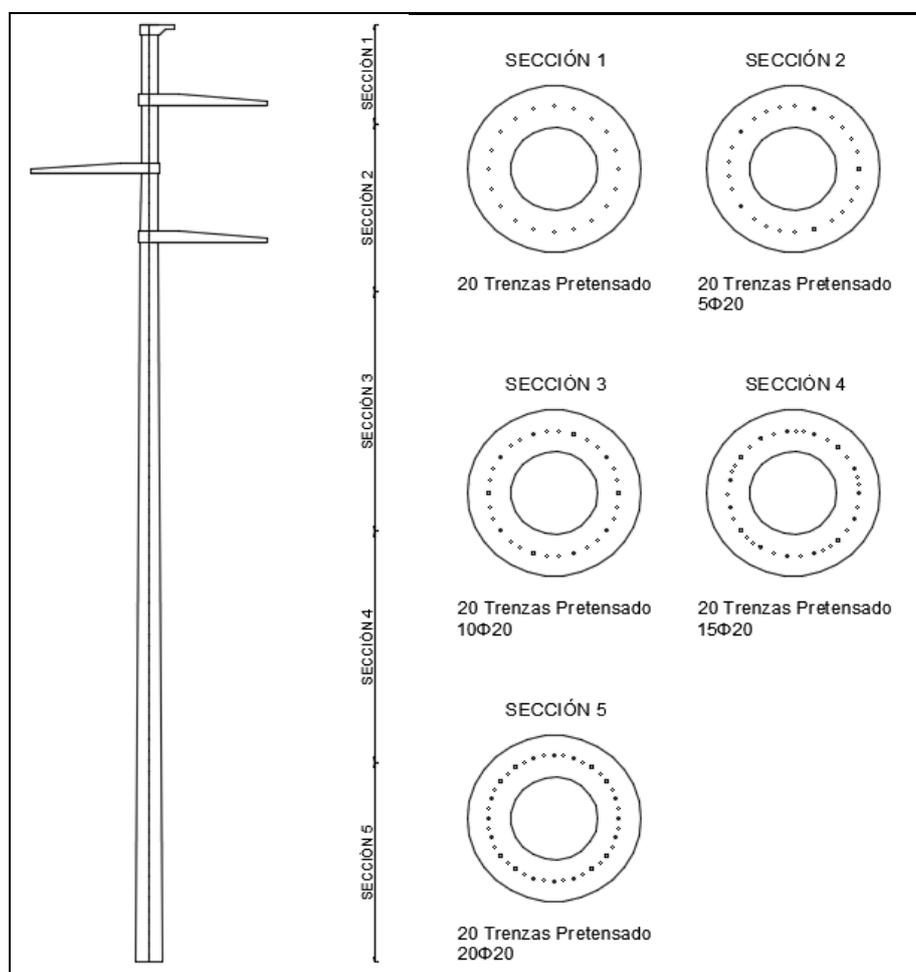
Fig. 52 - Rotura de columna C7 mediante martillos rotopercutores



Las columnas mantienen los 20 cordones de pretensado en toda su longitud (armadura tesa). En cuanto a la armadura longitudinal convencional, ésta se va incrementando desde la cima a la base de acuerdo a la siguiente distribución (Fig. 53):

- Sección 1: 0,00 m a 2,50 m: 20 cordones de pretensado
- Sección 2: 2,50 m a 6,70 m: 5 Φ 20 y 20 cordones de pretensado
- Sección 3: 6,70 m a 12,70 m: 10 Φ 20 y 20 cordones de pretensado
- Sección 4: 12,70 m a 18,50 m: 15 Φ 20 y 20 cordones de pretensado
- Sección 5: 18,50 m a 23,50 m: 20 Φ 20 y 20 cordones de pretensado

Fig. 53 - Distribución de la armadura longitudinal



Además, se observó que las torres no poseen armadura transversal resistente (de corte y torsión), sólo presentan estribos lisos de 8mm de diámetro cada 65 cm con fines meramente constructivos, es decir, con el objetivo de mantener en su lugar la armadura longitudinal al momento del colado del hormigón (Fig. 54).

Fig. 54 - Separación de la armadura transversal



Por último, se realizó la toma de muestras de los materiales componentes de las columnas con el objetivo de ensayarlos posteriormente en el laboratorio. Se ejecutó la extracción de tres testigos de hormigón en ubicaciones y columnas distintas, y se extrajo muestras de las barras que integran la armadura de refuerzo y de los cordones pretensados.

Para la extracción de los testigos se utilizó como marco de referencia la Norma IRAM 1551: “Extracción, preparación y ensayo de testigos de hormigón endurecido” y como herramienta la máquina saca testigos con broca de 70 mm de diámetro (Fig. 55).

Fig. 55 - Máquina extractora de testigos de hormigón



Se extrajo las siguientes muestras:

- Testigo C1 de la columna N°1: Dimensiones 70 mm x 98 mm (Fig. 56 izq.)
- Testigo C2 de la columna N°2: Dimensiones 70 mm x 85 mm (Fig. 56 cent.)
- Testigo C7 de la columna N°7: Dimensiones 70 mm x 70 mm (Fig. 56 der.)

Fig. 56 - Testigos de hormigón extraídos



Para la extracción de las barras y cables de pretensado que componen la armadura de las torres se utilizó martillo percutor eléctrico para eliminar el recubrimiento y amoladoras de mano para los cortes. Las muestras fueron extraídas únicamente de la columna N°7 (Fig. 52), consistiendo en dos tramos de barras lisas y seis tramos de cordones de pretensado, según el siguiente detalle:

- Cordón de pretensado 3x3mm de diámetro por 0,59 m de longitud. (Fig. 57-1)
- Cordón de pretensado 3x3mm de diámetro por 0,68 m de longitud. (Fig. 57-2)
- Cordón de pretensado 3x3mm de diámetro por 1,30 m de longitud. (Fig. 57-3)
- Cordón de pretensado 3x3mm de diámetro por 1,40 m de longitud. (Fig. 57-4)
- Cordón de pretensado 3x3mm de diámetro por 1,70 m de longitud. (Fig. 57-5)
- Cordón de pretensado 3x3mm de diámetro por 2,40 m de longitud. (Fig. 57-6)
- Barra lisa 20mm de diámetro por 2,46 m de longitud. (Fig. 57-7)
- Barra lisa 20mm de diámetro por 1,87 m de longitud. (Fig. 57-8)

Fig. 57 - Muestras extraídas de la armadura longitudinal



6.3. Ensayos de laboratorio

Este apartado está íntegramente dedicado a comentar las actividades de laboratorio llevadas a cabo con el objetivo de caracterizar los materiales constitutivos de las torres colapsadas y los elementos de vinculación entre las mismas.

A partir de las muestras extraídas se solicitó una serie de ensayos de laboratorio e informes técnicos al personal especializado del Departamento de Mecánica Aplicada de la Facultad de Ingeniería - UN, donde se debió presenciar los mismos para dar fé del cumplimiento de las normas. A continuación, se detallan:

Actividades de laboratorio para caracterizar los materiales constitutivos de las torres:

- Ensayos mecánicos de tracción sobre barras lisas de armadura longitudinal
- Ensayos mecánicos de tracción sobre cordones de pretensado
- Ensayos mecánicos de compresión sobre testigos de hormigón
- Informe técnico de caracterización metalográfica de soldadura
- Ensayo mecánico de tracción sobre barra lisa con unión soldada

Actividades de laboratorio para caracterizar los mecanismos de vinculación entre torres:

- Ensayos mecánicos de tracción sobre cables conductores
- Ensayos de deslizamiento de grapa de suspensión

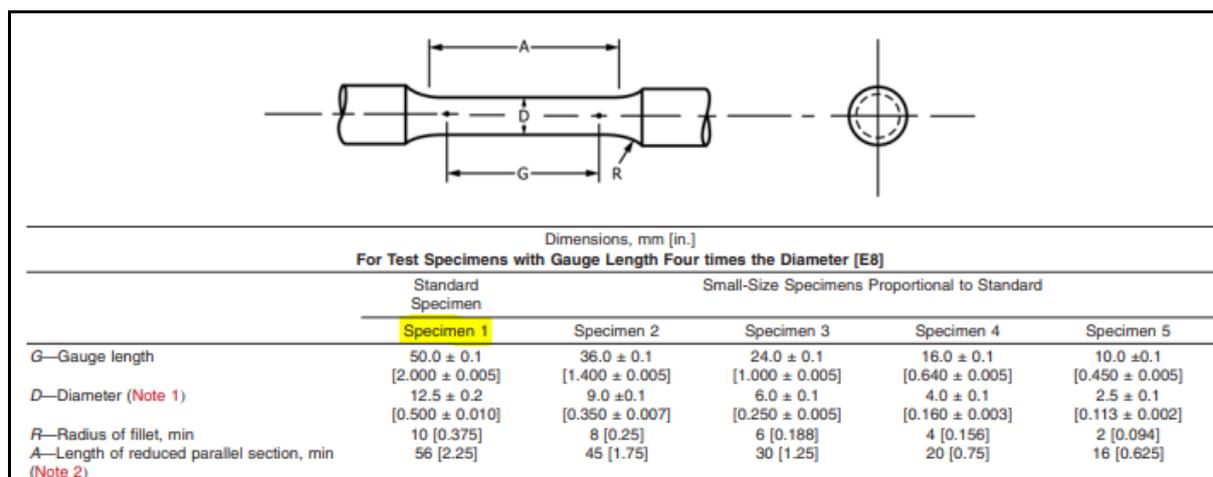
En lo que sigue, se desarrolla cada uno, se comenta bajo qué normas fueron realizados y se destacan los resultados obtenidos.

6.3.1. *Ensayos mecánicos de tracción sobre barras lisas de armadura longitudinal*

Los días 26 y 29 de noviembre de 2019 se realizaron los ensayos de tracción sobre muestras de barras de refuerzo¹², extraídos de las columnas colapsadas. El objeto de los ensayos realizados fue obtener las tensiones de fluencia y rotura de las barras que conforman la armadura longitudinal de las columnas. El ensayo fue realizado en el Dpto. de Mecánica Aplicada de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue, bajo la dirección técnica del Ing. Edgardo L. Santarelli. De las muestras de barras lisas de 20 mm (3/4") se confeccionaron 4 probetas de tracción cilíndrica estándar, tipo de probeta 1 según norma ASTM E8M - 2013.

¹² Consultar el ANEXO J para ver el informe completo "Ensayos Mecánicos: Tracción - Barras 3/4" y cordones de tres alambres de columnas de LAT 132 Cutral Co - Zapala".

Fig. 58 - Tipos de probeta según ASTM E8M - 2013



Los ensayos de las probetas se realizaron según norma ASTM E8M - 2013 en la Máquina Universal Wolpert (capacidad 400 kN) utilizando la escala de 200 kN.

Los resultados obtenidos se resumen en la tabla 8.

Tabla 8 - Resultados de ensayos sobre barras lisas

Probeta	Diámetro [mm]	Tensión de fluencia [MPa]	Tensión de rotura [Mpa]	Alargamiento [%]	Estricción [%]
TR-1	12,6	461,1	762,4	22,6	45,05
TR-2	12,6	456,5	764,6	25,6	45,99
TR-3	12,55	459,8	762,7	24	46,61
Promedio		459,13	763,23	24,07	45,88
Desvío estándar		2,371	1,193	1,501	0,785

Los resultados de la probeta TR-4 no se tuvieron en cuenta por presentar valores muy apartados de las demás.

En las dos barras de las que se extrajo las probetas se observó la presencia de uniones soldadas (Fig. 59), por lo que se solicitó un estudio metalográfico para caracterizar la soldadura¹³ y un ensayo de tracción sobre la barra con unión soldada¹⁴.

¹³ Consultar el ANEXO K para ver el informe completo “INFORME TÉCNICO: CARACTERIZACIÓN METALGRÁFICA DE LA SOLDADURA PRESENTE EN UNA MUESTRA DE LAS COLUMNAS COLAPSADA DE LA LINEA 132KV – CUTRAL CO- ZAPALA”.

¹⁴ Consultar el ANEXO L para ver el informe completo “Evaluación estructural y de comportamiento mecánico - Soldadura en Barras ¾” de columnas de LAT 132 Cutral Co - Zapala”.

Fig. 59 - Unión soldada en barra lisa de armadura longitudinal



6.3.2. Ensayos mecánicos de tracción sobre cordones de pretensado

Los días 26 y 29 de noviembre de 2019 se realizaron los ensayos de tracción sobre muestras de cordones de pretensado¹⁵, extraídos de las columnas colapsadas. El objeto de los ensayos realizados fue obtener la resistencia a la tracción de los cordones que conforman la armadura tesa de las columnas. El ensayo fue realizado en el Dpto. de Mecánica Aplicada de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue, bajo la dirección técnica del Ing. Edgardo L. Santarelli. De las muestras de cordones de tres alambres de acero (3x3mm) tipo C1750, se extrajeron 7 probetas de entre 550 y 600 mm de longitud, 2 se utilizaron para la puesta a punto del sistema de amarre y las restantes 5 para la ejecución de los ensayos.

Los ensayos de las probetas se realizaron en la Máquina Universal Wolpert (capacidad 400 kN) en términos de la norma IRAM IAS U500 - 246, pero sólo se determinó la carga máxima o de rotura. La fijación de los cordones a la máquina de ensayos se realizó mediante un sistema de conos partidos dentados que ajustan sobre la muestra.

Los resultados obtenidos se resumen en la tabla 9.

Tabla 9 - Resultados de ensayos sobre cordones

Probeta	Masa unitaria [kg/m]	Resistencia a la tracción [MPa]	Alargamiento (L0=200mm)	Sección nominal [mm ²]	Observaciones
Referencia	0,1665	1749 (mín)	2,50%	21,21	IRAM IAS U500-7
Cr-2	0,1700	1821,31	ND	ND	FZM(1)
Cr-3	0,1696	1796,32	ND	ND	FZM
Cr-4	0,1698	1806,22	ND	ND	FZM
Cr-5	0,1696	1777,46	ND	ND	FPZM (2)
Promedio	0,1698	1800,33	-	-	-
Des. estándar	0,0002	18,38	-	-	-

¹⁵ Consultar el Anexo B I. para ver el informe completo “Ensayos Mecánicos: Tracción - Barras ¾” y cordones de tres alambres de columnas de LAT 132 Cutral Co - Zapala”.

- (1) FZM: Fractura en zona de mordaza
- (2) FPZM: Fractura parcial en zona de mordazas

La norma IRAM IAS U500-07:2005 presenta valores de referencia para estos cordones.

6.3.3. Ensayos mecánicos de compresión sobre testigos de hormigón

Los días 26 y 29 de noviembre de 2019 se realizaron los ensayos de compresión sobre los testigos de hormigón, extraídos de las columnas colapsadas. El objeto de los ensayos realizados fue obtener la carga máxima de rotura del material constitutivo de las columnas, para luego hallar mediante correcciones la resistencia del hormigón al momento de la falla. El ensayo fue realizado en el Dpto. de Mecánica Aplicada de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue, bajo la dirección técnica del Ing. Edgardo L. Santarelli. Se ensayaron 3 testigos de hormigón¹⁶ que contenían en su interior al menos un hierro de manera transversal a su altura. Los ensayos se realizaron según norma IRAM 1551-83: Extracción, preparación y ensayo de testigos de hormigón endurecido” en la Máquina Universal Wolpert (capacidad 400 kN) utilizando la escala de 200 kN.

La resistencia a compresión del hormigón, obtenida de las probetas testigo, fue corregida mediante la aplicación de diversos factores de corrección a fin de llevar estos valores a condiciones normalizadas tanto en lo referido a las dimensiones de la probeta, como a las condiciones del ensayo, edad de la muestra, etc. Para esto se utilizó como base teórica el siguiente documento: “Relación entre la resistencia a compresión de probetas testigo y probetas normalizadas” por MARIANO PÉREZ SÁNCHEZ, Lcdo. en Ciencias Químicas, Laboratorio Central de Materiales de la Confederación Hidrográfica del Duero. VALLADOLID¹⁷.

La Resistencia a Compresión de un Hormigón (R_c) es la que se obtiene sobre Probetas Normalizadas (PN), es decir, cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura (Esbeltez $E = 2$) y ensayadas a los 28 días de edad, tal como prescriben las Normas; ello supone que tales probetas se confeccionarán, conservarán y romperán a compresión en condiciones estandarizadas lo que implica, entre otras consideraciones, que en el momento de su ensayo estén prácticamente saturadas de agua.

El objetivo perseguido es establecer la relación entre la resistencia a compresión de probetas normalizadas (R_{cn}) y la resistencia a compresión de probetas testigo (R_{ct}), mediante la aplicación, a estas últimas, de los correspondientes factores de corrección (F_x). Se entiende que el hormigón constituyente de una PT no ha seguido el mismo proceso evolutivo que el de una PN, ni la obtención

¹⁶Consultar el Anexo M para ver el informe completo “Ensayos mecánicos: Compresión - Testigos de hormigón extraídos de columnas de LAT 132 Cutral Co - Zapala”.

¹⁷Consultar bibliografía: “Relación entre la resistencia a compresión de probetas testigo y probetas normalizadas” por MARIANO PÉREZ SÁNCHEZ para ver la teoría completa sobre los factores de corrección.

de ambas es semejante, por lo que sus respectivas R_c no son, en principio, comparables; para que lo sean deberán de aplicarse a las R_{ct} los referidos F_x de donde resultará: $R_{ct} * F_x = R_{cn}$

A continuación, se comentan los distintos factores de corrección:

- Por condiciones de ejecución normalizada (F1): Las circunstancias inherentes a las PN (ejecución, homogeneidad, curado, etc.), son favorables respecto a las del mismo hormigón colocado en obra; como consecuencia, las PT extraídas de éste darán una R_c más baja que la correspondiente a aquellas. En general, la bibliografía consultada, recomienda exigir a las PT sólo el 90% de la R_e de las PN.

- Por condiciones intrínsecas (F2): Considera todas aquellas particularidades inherentes a las PT, a las que denominaremos INTRÍNSECAS a ellas, y que influyen en la relación de su R_c respecto a la de las probetas moldeadas (PM) y, consecuentemente, a las de las PN puesto que éstas también lo son. Abarca, por ejemplo, microfisuración por extracción, irregularidades en la superficie, relación entre diámetro y tamaño máximo del árido, etc.

Las recomendaciones de algunas normas establecen que la R_c de la PT es del orden del 10% al 15% menor que la de la PM y por extensión que la de la PN.

- Por esbeltez normalizada (F3): Las normativas actuales refieren la R_c del hormigón al ensayo sobre especímenes de altura del doble que el diámetro ($E=2$) ya que este parámetro influye decisivamente en el valor obtenido para la R_c en el sentido de que, a igualdad de condiciones restantes, disminuye cuando E aumenta y viceversa.

- Por dimensiones normalizadas (F4): Tiene como fundamento corregir la R_c de especímenes que siendo su $E=2$ tengan, sin embargo, distinto volumen y, en definitiva, distintas dimensiones.

- Por edad normalizada (F5): Es sabido que la R_c del hormigón varía con su edad en el sentido de que, ambas están en razón directa, por tanto, a edades distintas corresponderá diferentes R_c .

- Por estado de saturación normalizado (F6): Los estudios experimentales demuestran que la R_c de un espécimen varía en sentido inverso de su grado de saturación.

- Por influencia de barras/armaduras (F7): No se aprecia prácticamente influencia en la R_c de la PT por el hecho de que incluya barras transversales de armadura o porque se haya extraído en zona en que ésta sea densa siempre que tales circunstancias no sobrepasen los límites que indican los repetidos autores.

- Por influencia de la dirección de extracción (F8.1): Independientemente de la zona considerada, si una PT se extrae perpendicular a la dirección del hormigonado se obtiene una R_c menor que si se extrae paralelamente a ella.

- Por influencia de la zona de extracción (F8.2): Estudios experimentales demuestran que, en las zonas relativamente próximas a la superior de elementos hormigonados verticalmente, la R_c

del hormigón es menor que en las inferiores; aunque su puesta en obra sea correcta, fenómenos tales como exudación, segregación, incremento de densidad con la profundidad como consecuencia del propio peso acumulado, etc., se aceptan como causa fundamental de ello.

Se presenta un cuadro resumen sobre los factores de corrección tratados, extraído del documento original.

Tabla 10 - Resumen de los factores de corrección

FACTORES DE CORRECCIÓN. CUADRO RESUMEN					
Denominación	Valor	Tipo de Aplicación	Para Relacionar AR	Objeto de la Aplicación	Ver Apartado
F1	1,1	Directa-Obligada	Rct con Rcn	Para referir a Condiciones de Ejecución Normalizadas.	2.1
F2	1,125	Id.	Id.	Para compensar Condiciones Intrínsecas.	2.2
F3	Tabla. 1	Directa-Circunstancial	Id.	Para referir a Esbeltez Normalizada.	2.3
F4	Id. 2	Id	Id.	Para referir a Dimensiones Normalizadas.	2.4
F5	Id. 3	Id	Id	Para referir a Edad Normalizada	2.5
F6	(a) 1 0,87	Id.	Id.	Para referir a Saturación Normalizada.	2.6
F7	(b) -----	Id.	Id.	Por influencia de Barras / Armaduras.	2.7
F8.1	(c) 1,05 0,95	Restringida	Rct entre si.	Por efecto de Dirección de Extracción.	2.8.1.
F8.2	Gráfico 1	Id	Id.	Por efecto de la Zona de Extracción.	2.8.2.

(a) Según la PT se ensaye en estado SATURADO o SECO.
 (b) Se desecha su aplicación.
 (c.) Según la DIRECCIÓN de extracción a considerar

Los resultados obtenidos se resumen en las siguientes tablas:

Tabla 11 - Resultados de ensayos sobre probetas testigo

Probeta	Diámetro [mm]	Altura [mm]	Peso [g]	Carga máxima [kN]	Resistencia [Mpa]
C1	70	105	1050	142,5	37,03
C2	70	94	930	115	29,88
C7	70	77	740	126,5	32,87
Promedio				128	33,26
Desvío				19,4	5,06

Tabla 12 - Estimación de la resistencia del hormigón utilizado en la fabricación (resistencia a compresión de probeta normalizada a los 28 días)

Probeta	Altura [mm]	Diám. [mm]	Su [Mpa]	Esbeltez	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8.1	F8.2	f'c [Mpa]
C1	105	70	37.03	1.50	1	1.13	0.96	0.95	0.79	0.87	1	1	1	26.08
C2	94	70	29.88	1.34			0.95							20.76
C7	77	70	32.87	1.10			0.9							21.70
Promedio														22.85

Tabla 13 - Estimación de la resistencia del hormigón al momento de la falla

Probeta	Altura [mm]	Diám. [mm]	Su [Mpa]	Esbeltez	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8.1	F8.2	f'c [Mpa]
C1	105	70	37.03	1.50	1	1.13	0.96	0.95	1	0.87	1	1	1	33.12
C2	94	70	29.88	1.34			0.95							26.37
C7	77	70	32.87	1.10			0.9							27.56
Promedio														29.02

6.3.4. Ensayos mecánicos de tracción sobre cables conductores

El día 10 de septiembre del 2020 se realizaron los ensayos de resistencia a la tracción sobre muestras de tramos del cable conductor¹⁸ pertenecientes al tramo en el cual colapsaron las columnas de la Línea de Alta Tensión. El objeto de los ensayos realizados fue obtener la carga de rotura de cada material constitutivo de los cables y una estimación de la carga última del conjunto. El ensayo fue realizado en el Dpto. de Mecánica Aplicada de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue, bajo la dirección técnica del Ing. Edgardo L. Santarelli.

Los ensayos fueron realizados sobre 3 muestras (A, B y C) obtenidas en campo de varios metros de longitud cada uno, de un conductor tipificado como 150/25 (Fig. 60) compuesto por dos capas de alambres de aluminio con un total de 26 hilos de 2,65 mm de diámetro y un alma de acero de 7 hilos de 2,05 mm de diámetro cada uno. De estas muestras se obtuvieron probetas del cable completo, del alma completa, y de hilos individuales tanto del alma de acero como de los hilos de aluminio.

Se intentó ensayar el conjunto completo en el equipo AMSLER con dos metodologías diferentes, pero ninguna de las dos permitió obtener resultados válidos debido a que los hilos de aluminio externos se deformaban y generaban deslizamientos en el sistema de sujeción. Debido a ello

¹⁸Consultar el Anexo N para ver el informe completo “Tracción a carga máxima - Conductor de aluminio con alma de acero LAT 132 Cutral Co – Zapala”.

se optó por la evaluación del alma de acero completa, de los hilos que la integran y, finalmente, de los hilos de aluminio que completan el conjunto.

Fig. 60 - Conductor 150/25 y ensayo del conjunto completo



Se ensayaron 2 probetas del alma completa en la Máquina Universal Wolpert en escala de 100 kN (Fig. 61). Para la sujeción de las muestras a la máquina se utilizó un sistema de construcción propio, tipo cabrestante, que trabaja por el principio de freno de prony.

Fig. 61 - Ensayo de alma completa



También se ensayaron hilos individuales tanto del alma de acero como de los conductores de aluminio en un equipo INSTRON – EMIC 23-30. Para el montaje de los hilos en el marco de carga se utilizó también un dispositivo tipo cabrestante que trabaja por principio de freno de prony (“UNCO D200 mm”).

A continuación, se presentan los resultados obtenidos:

- Ensayos sobre el alma de acero:

Se determinó una carga última de rotura de 34 KN. $P_u^{ALMA} = 34 \text{ KN}$

- Ensayos sobre hilos del alma de acero:

En la Tabla 14 se resumen los resultados del ensayo:

Tabla 14 - Resultados de ensayos sobre el alma

Probeta	Diámetro interno	Diámetro externo	Carga máxima
T1A	2,05	ND	2,01
T2A	2,05	ND	3,14
T3A	2,05	1,53	4,85
T4A	2,00	1,45	4,85
T5A	2,08	1,44	4,85
T6A	2,00	1,40	4,82
T1B	2,05	1,45	4,87
T2B	2,05	1,49	4,81
T3B	2,05	1,54	4,67
T1C	2,05	1,56	4,72
T2C	2,05	1,53	4,79
T3C	2,05	1,51	4,77
Promedio			4,80

Se obtuvo un valor promedio de rotura de 4,80 KN. $P_u^{HAC} = 4,80 \text{ KN}$.

- Ensayos sobre hilos de aluminio:

En la Tabla 15 se resumen los resultados del ensayo:

Tabla 15 - Resultados de ensayos sobre hilos de aluminio

Probeta	Diámetro inicial	Diámetro final	Carga máxima
1	2,67	1,25	1,02
2	2,66	0,99	1,00
3	2,65	1,07	0,87
4	2,65	1,27	0,86
5	2,66	0,99	0,97
6	2,65	1,15	0,91
7	2,66	0,98	0,95
8	2,65	0,93	0,95
9	2,67	1,03	0,87
10	2,64	0,97	0,85
11	2,65	0,98	0,92
12	2,65	1,04	0,88
13	2,65	0,94	0,87
14	2,64	0,88	0,90
15	2,65	0,95	0,84
16	2,62	1,09	0,83
17	2,65	0,95	1,03
18	2,67	1,25	0,96
Promedio			0,92

Se obtuvo un valor promedio de rotura de 0,92 KN. $P_u^{HAL} = 0,92 \text{ KN}$.

Conclusiones:

La carga última del conductor es aproximada como la sumatoria de las resistencias individuales, lo que resulta en una carga $P_u^{MINIMA} = 53 \text{ KN}$, valor ligeramente inferior al especificado para este tipo de cable $P_u^{NOMINAL} = 53,6 \text{ KN}$. Se entiende que la resistencia real del cable no presenta apartamientos significativos de la resistencia nominal especificada para un conductor del tipo 150/25 según la norma de referencia IRAM 2187/86.

Tabla 16 - Tabla I IRAM 2187/86

RELACIONES USUALES DE SECCIONES: ALUMINIO-ACERO Y ALEACIÓN DE ALUMINIO-ACERO								
Secciones nominales de aluminio-acero y aleación de aluminio-acero (mm ²)	Sección total calculada (mm ²)	Relación de secciones aluminio-acero	Diámetro exterior nominal del cable (mm)	Masa total aproximada * (kg/ka)	Resistencia eléctrica en c.c. a 20°C (Ω/ka) **		Carga de rotura calculada (kN)	
					Alumi-nio-acero	Aleación de aluminio-acero	Aluminio-acero	Aleación de aluminio-acero
16/2,5	17,85	6	5,4	61,70	1,08	2,19	5,8	7,6
25/4	27,8	6	6,8	96,40	1,20	1,40	9,0	11,8
35/6	40	6	8,1	138,8	0,835	0,970	12,3	16,0
50/8	56,3	6	9,6	195,0	0,595	0,691	16,8	23,5
70/12	81,3	6	11,7	282,1	0,413	0,468	26,3	34,4
95/15	109,7	6	13,6	380,5	0,306	0,355	34,9	46,3
120/20	141,4	6	15,5	490,8	0,237	0,276	44,4	59,6
150/25	173,1	6	17,1	600,6	0,194	0,225	53,6	73,1
185/30	213,6	6	19	740,8	0,157	0,182	65,2	89,4

Tabla 17 - Tabla II IRAM 2187/86

CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVOS PARA CABLES DE ALUMINIO Y DE ALEACIÓN DE ALUMINIO CON ALMA DE ACERO								
Sección nominal (mm ²)	Parte de aluminio o aleación de aluminio				Alma de acero			
	Número de alambres	Diámetro de cada alambre (mm)	Número de capas	Sección calculada (mm ²)	Número de alambres	Diámetro de cada alambre (mm)	Diámetro nominal del alma (mm)	Sección calculada (mm ²)
16/2,5	6	1,8	1	15,3	1	1,6	-	2,55
25/4	6	2,25	1	23,8	1	2,25	-	4
35/6	6	2,7	1	34,3	1	2,7	-	5,7
50/8	6	3,2	1	48,3	1	3,2	-	8
70/12	26	1,85	2	69,9	7	1,44	4,32	11,4
95/15	26	2,15	2	94,4	7	1,67	5,01	15,3
120/20	26	2,44	2	121,6	7	1,9	5,7	19,8
150/25	26	2,7	2	146,9	7	2,1	6,31	24,2
185/30	26	3	2	183,8	7	2,33	6,99	29,8

6.3.5. Ensayos de deslizamiento de grapa de suspensión

El día 25 de octubre de 2019 se realizó el ensayo de deslizamiento de grapas¹⁹ con el fin de verificar el esfuerzo de tracción para el cual se genera un deslizamiento relativo entre los cables y las mismas. Los responsables de la ejecución del ensayo son los Ings. Germán Keill y Damián Campos, pertenecientes al Departamento de Mecánica Aplicada de la Universidad Nacional del Comahue.

Se ensayaron 3 muestras de cable conductor - grapa pertenecientes a la línea de transmisión colapsada. El sistema cable - grapa se ensayó tal cual fue recibido, es decir, no se modificó el ajuste de los pernos de sujeción de la grapa. Para la ejecución del ensayo solicitado, se fabricó un sistema de retención de la grapa (Fig. 62).

Fig. 62 - Dispositivo de retención de grapa



La fuerza de tiro del cable se realiza mediante un tornillo de tracción (Fig. 63) dispuesto en el laboratorio de ensayos de conductores (LEC) y se determina su valor mediante una celda de carga monitorizada (Fig. 64).

Fig. 63 - Torillo de tracción



Fig. 64 - Celda de carga



¹⁹Consultar el Anexo O para ver el informe completo “INFORME TÉCNICO FI-MA-AD-IT-154-19 - Ensayo deslizamiento grapa de suspensión”.

Para registrar la fuerza aplicada al momento del deslizamiento relativo del conjunto se utilizó una cámara de video (Fig. 65) que permitía la visualización simultánea de ambos.

Fig. 65 - Cámara de video y monitoreo de celda de carga



Fig. 66 - Monitor de celda de carga



Las imágenes que se presentan a continuación permiten entender mejor el sistema de vinculación entre la cadena de aisladores y el cable conductor generado por la grapa de sujeción. No pertenecen al sistema ensayado, pero son muy similares.

Fig. 67 - Grapa de sujeción



Los resultados obtenidos en los ensayos se resumen en la siguiente tabla:

Fig. 68 - Resultados

Muestra	Carga de inicio de deslizamiento [kg]
1	1464
2	1405
3	1200
Promedio	1357

Los resultados obtenidos permiten concluir que, bajo un sistema de cargas desiguales en vanos contiguos, en caso de existir una fuerza de tiro no equilibrada (fuerza resultante) de aproximadamente 1357 Kg (13,3 kN), se produce un deslizamiento del conductor sobre la grapa aumentando la catenaria del vano más cargado a costa de los menos cargados hasta llegar a un nuevo equilibrio.

6.4. Determinación de cargas actuantes

Como se mencionó anteriormente la línea de transmisión está conformada por dos sistemas estructurales separados que actúan como un único sistema más grande, el sistema de soporte que corresponde a las torres y el sistema de cables. Si bien las torres también están sujetas a cargas de peso propio, viento, nieve y demás, las mayores solicitaciones provienen del sistema de cables. Es por esto que el apartado está especialmente dedicado a la determinación de las cargas actuantes sobre los cables, que luego servirán para cargar los modelos de cálculo correspondientes.

A partir del análisis de los cables conductores, los informes de la tormenta y la simulación del crecimiento del “manguito” surgen las siguientes cargas de peso propio, viento y nieve actuantes sobre el sistema de cables:

- Carga de peso propio:

Los cables conductores poseen una masa por unidad de longitud de 600 gr/m.

Tabla 18 - Carga de peso propio

Conformación	26 hilos Aluminio (exterior)
Diámetro exterior [cm]	1,71
Masa por unidad de longitud [gr/m]	600

- Carga de viento:

Para determinar la carga de viento sobre los cables se sigue el procedimiento especificado por la norma de aplicación: “Reglamento de líneas aéreas de media tensión y alta tensión - AEA 95301 - 2007”. Cabe aclarar que podría haberse seguido el procedimiento de cálculo indicado en el Reglamento CIRSOC 306: “REGLAMENTO ARGENTINO DE ESTRUCTURAS DE ACERO PARA ANTENAS”. Su metodología es análoga ya que se basa en los mismos principios, pero conduce a valores inferiores. Se realizó una comparación entre ambos, término a término, y se pudo apreciar que la diferencia radica en el valor del coeficiente de ráfaga, siendo en CIRSOC aproximadamente la mitad que en el otro reglamento.

La velocidad del viento se obtiene de la información presentada en el informe recibido sobre el análisis de la tormenta. El mismo fue analizado en el apartado 6.1 (XI) de este documento. La velocidad máxima de la tormenta de viento en el área de estudio llegó a 32 km/h con ráfagas de 53 km/h (14,7 m/s).

A continuación, se presenta la metodología seguida para la obtención de la carga de viento:

$$F = Q (Z_p \cdot V)^2 \cdot F_c \cdot G_w \cdot C_F \cdot A \cdot \cos^2 \psi$$

Donde:

- Ψ : Angulo del viento con el eje perpendicular de la linea
- Q: Factor que depende de la densidad del aire (= 0,613)
- Z_p : Factor del terreno, por altura y exposición
- V: Velocidad básica del viento
- F_c : Factor de carga
- G_w : Factor de ráfaga correspondiente al cable
- C_f : Coeficiente de presión dinámica o de forma (= 1 para todos los diámetros)
- A: Área proyectada (diámetro x longitud del vano)
- F_i : Ángulo del viento con el eje perpendicular a la línea

Factor del terreno, por altura y exposición (Z_p):

Tabla 19 - Tabla de Factor de terreno (Z_p)

Altura sobre el nivel del terreno Z [m]	Exposición B	Exposición C	Exposición D
10	0.72	1.03	1.18
15	0.79	1.09	1.23
20	0.84	1.13	1.27
25	0.88	1.17	1.29
30	0.92	1.19	1.32
35	0.95	1.22	1.34
40	0.98	1.24	1.36
45	1.01	1.26	1.37
50	1.03	1.28	1.39
55	1.05	1.29	1.40
60	1.07	1.31	1.41

Fig. 69 - Exposición de la estructura

10.2.2.4. Factor del terreno

El factor Z_p modifica la velocidad del viento básico, teniendo en cuenta los efectos de la exposición al perfil del terreno y la altura de los objetos sobre el mismo, según tres categorías de exposición:

- **Exposición B**, zonas onduladas o forestadas, con numerosas obstrucciones de espacios cerrados, con la altura de las casas domésticas con promedio no superior a 10 m. Por ejemplo áreas industriales o suburbios de grandes ciudades. Es necesario que la línea este a menos de 500 m, o 10 veces la altura libre de la estructura, dentro de esta zona.
- **Exposición C**, zonas llanas, poco onduladas con obstrucciones dispersas tales como cercas, árboles o construcciones muy aisladas, con alturas entre 1,5 y 10 m. Por ejemplo: campo abierto, granjas o sembrados. Esta exposición es la representativa del terreno de aeropuertos donde son efectuadas las mediciones de la velocidad de viento.
- **Exposición D**, llanuras planas con pocas o ninguna obstrucción, con promedio de alturas de las posibles obstrucciones menor a 1,5 m. Es necesario que la línea este a no más de 100 m. Por ejemplo: fajas costeras, llanuras sin árboles, mesetas desérticas o pantanos.

Para la fase de la ménsula superior, la altura sobre el nivel del terreno (Z) corresponde aproximadamente a 15 m (para el vano promedio el punto más bajo de la catenaria es 12,4 m y el más alto 18 m, siendo la flecha 5,6 m).

$$Z_p = 1,09$$

Velocidad básica del viento (V):

$$V = 14,7 \text{ m/s}$$

Factor de carga (Fc):

Tabla 20 - Tabla de Factor de carga (Fc)

Clase de línea según punto 5.2.-	Factor de importancia	Factor de Carga	Periodo de recurrencia (en años)
"B" y "BB"	1	0.93	25
		1.00	50
"C"	2	1.15	100
"D"	4	1.30	200
"E"	8	1.40	400

Fig. 70 - Clase de la línea

5.2. Clases de líneas

5.2.1. Clase A - Baja Tensión $VN \leq 1 \text{ kV}$

Son las líneas para distribución de energía eléctrica, cuya tensión nominal es hasta 1 kV.

Nota: Esta clase de línea aérea no es abarcada por esta reglamentación, solo se la define a los fines de referencia. Para sus requisitos ver AEA 95201.

5.2.2. Clase B - Media Tensión ($1 \text{ kV} < VN < 66 \text{ kV}$)

Son las líneas para transporte o distribución de energía eléctrica, cuya tensión nominal es superior a 1 kV e inferior a 66 kV.

5.2.3. Clase BB- Media Tensión con Retorno por Tierra ($1 \text{ kV} < VN \leq 38 \text{ kV}$)

Son las líneas para distribución rural de energía eléctrica, cuya tensión nominal es superior a 1 kV e inferior o igual a 38 kV. Ver punto N° 6.9.-

5.2.4. Clase C - Alta Tensión ($66 \text{ kV} \leq VN \leq 220 \text{ kV}$)

Son las líneas para transporte o distribución de energía eléctrica, cuya tensión nominal es igual o superior a 66 kV y menor o igual a 220 kV.

5.2.5. Clase D - Extra Alta Tensión ($220 \text{ kV} < VN < 800 \text{ kV}$)

Son las líneas para transporte de energía eléctrica, cuya tensión nominal es superior a 220 kV e inferior a 800 kV.

5.2.6. Clase E - Ultra Alta Tensión $VN \geq 800 \text{ kV}$

Son las líneas para transporte de energía eléctrica, cuya tensión nominal es igual o superior a 800 kV.

$$F_c = 1,15$$

Factor de ráfaga (Gw):

Fig. 71 - Obtención del Factor de ráfaga

$$G_w = 1 + 2.7 \cdot E \cdot \sqrt{B_w}$$

siendo:

$$E = 4.9 \cdot \sqrt{k} \cdot \left(\frac{10}{Z}\right)^{\frac{1}{\alpha}}$$

$$B_w = \frac{1}{1 + 0.8 \cdot \frac{L}{L_s}}$$

Donde:

Z : altura efectiva

L : vano de diseño, en [m]

h : altura efectiva de la estructura de acuerdo al punto 10.2.2.5 b), en [m]

k y L_s : parámetros definidos en la tabla 10.2-g

Fig. 72 - Parámetros a, k y L_s

Exposición	α	k	L _s
B	4.5	0.010	52
C	7.5	0.005	67
D	10.0	0.003	76

Tabla 21 - Resumen de parámetros para la obtención de Gw

Z	L	a	k	L _s	E	Bw
15 m	260 m	7,5	0,005	67	0,3282	0,2436

$$G_w = 1,44$$

Luego, la fuerza (F) sobre los conductores es:

$$F = Q (Z_p \cdot V)^2 \cdot F_c \cdot G_w \cdot C_f \cdot A \cdot \cos^2 \psi$$

Tabla 22 - Cálculo de la carga de viento sobre el conductor

Q	Z _p	V [m/s]	F _c	G _w	C _f	Diámetro [cm]	L [m]	A [m ²]	F [N]	F [N/m]
0,613	1,09	14,7	1,15	1,44	1	1,71	260	4,45	1158,7	4,46

Para calcular la carga de viento²⁰ sobre el conductor cubierto de nieve, lo único que cambia es el área proyectada debido al aumento del diámetro. Los valores obtenidos se resumen en la tabla 23.

Tabla 23 - Carga de viento sobre los conductores para distintos espesores de manguito

Esesor Manguito [cm]	Diámetro Manguito [cm]	F [N/m]
1	3,71	9,67
2	5,71	14,88
3	7,71	20,09
4	9,71	25,31
5	11,71	30,52
6	13,71	35,73
7	15,71	40,94
8	17,71	46,16

- Carga de nieve:

La carga de nieve sobre los cables conductores se determina a partir de la información presentada en los informes que se analizaron en el apartado 6.1 (XI y XII) que fueron solicitados a expertos en el tema.

El primer documento establece que el tipo de precipitación durante la tormenta fue “nieve húmeda” y describe el conjunto de las condiciones meteorológicas que estuvieron presentes y dieron lugar a ese fenómeno. Esta información permite definir que el “manguito” formado sobre los conductores es el correspondiente al fenómeno de acreción por precipitación de nieve húmeda y descartar las restantes categorías de formación de hielo y tipos de “manguitos” resultantes en cada proceso.

El segundo documento plantea dos modelos de acreción distintos aplicables en los casos de precipitación de nieve húmeda, el de Makkonen y el de Admirat. Estos modelos se aplican en intervalos de tiempo durante los cuales se puede asumir que las condiciones climáticas son constantes y permiten obtener una simulación del crecimiento del “manguito” estableciendo el diámetro y carga por unidad de longitud resultante en cada intervalo especificado (Tabla 24 y 25).

²⁰Se contempló únicamente el efecto del viento sobre los cables, despreciando el efecto sobre aisladores y medios de unión.

Tabla 24 - Evolución del “manguito” durante el evento según el modelo de Makkonen

Hora	D [cm]	M [kg/m]
15:00	1,71	0,000
21:00	3,05	0,084
03:00	6,04	0,540
09:00	7,70	1,034

El modelo de Makkonen, partiendo del diámetro del conductor (1,71 cm), establece un diámetro máximo de casi 8 cm con una masa de 1 kg/m. Según refiere Admirat en su trabajo “Wet snow accretion on overhead lines with French report of experience (Journal Cold Regions Science and Technology, 65 (2011) 43–51, Ed. Elsevier)”, “manguitos de nieve de menos de 5 – 8 cm de diámetro y menos de 1 kg/m en sobrecarga de nieve, causan poco o ningún daño a las líneas aéreas”.

Tabla 25 - Evolución del “manguito” durante el evento según el modelo de Admirat

Hora	D [cm]	M [kg/m]
15:00	1,71	0,000
21:00	1,92	0,001
03:00	6,63	0,348
09:00	20,13	3,212

El modelo de Admirat establece un diámetro máximo de 20 cm con una masa de 3,2 Kg/m que, según el mismo autor, podrían producir daños en las líneas aéreas. A medida que aumenta el diámetro del manguito también aumenta su densidad debido a la compactación que sufren las primeras capas durante el proceso de acreción. Según Admirat, para el último diámetro probable, la densidad resultante es de 101,66 Kg/m³.

$$d = \frac{3,212 \text{ kg/m}}{0,020132 - 0,01712} = 101,66 \text{ Kg/m}^3$$

Si bien estos modelos permiten estimar la magnitud del manguito que pudo haberse formado durante la tormenta, no son en absoluto precisos y deben tomarse sólo como valores de referencia. De lo que sí se tiene certeza es que el tipo de nieve caída fue húmeda y hubo una fuerte tendencia a la formación de manguitos por acreción de nieve húmeda sobre los conductores, cuya densidad va desde los 80 a 800 kg/m³, llegando a tamaños considerables.

Por lo anterior, se procede a trabajar con un valor de densidad promedio de 300 kg/m³ coherente con el tipo de formación, solo con el objeto de poder relacionar, más adelante cuando se carguen los modelos, el valor de la sobrecarga que genera la falla de las torres con un tamaño de

manguito y así, tener una idea de si el manguito que genera la rotura, cae dentro de los valores que se entienden como probables.

Tabla 26 - Carga de nieve sobre los conductores

Espesor Manguito [cm]	Diámetro Manguito [cm]	Peso [Kg/m]	Peso [N/m]
1	3,71	0,26	2,51
2	5,71	0,70	6,86
3	7,71	1,33	13,06
4	9,71	2,15	21,12
5	11,71	3,16	31,02
6	13,71	4,36	42,77
7	15,71	5,75	56,37
8	17,71	7,32	71,81

6.5. Evaluación de la resistencia estructural de las torres de suspensión

El desarrollo de cálculos que se presenta en este apartado tiene como finalidad obtener la resistencia nominal del poste de las torres de suspensión en las secciones donde se produjo la rotura. Para esto, se siguen los procedimientos admitidos por el Reglamento CIRSOC 201 y su norma madre, el Reglamento ACI - 318.

A continuación, se detallan las geometrías, dimensiones, armaduras y materiales necesarios para tal fin.

Geometría:

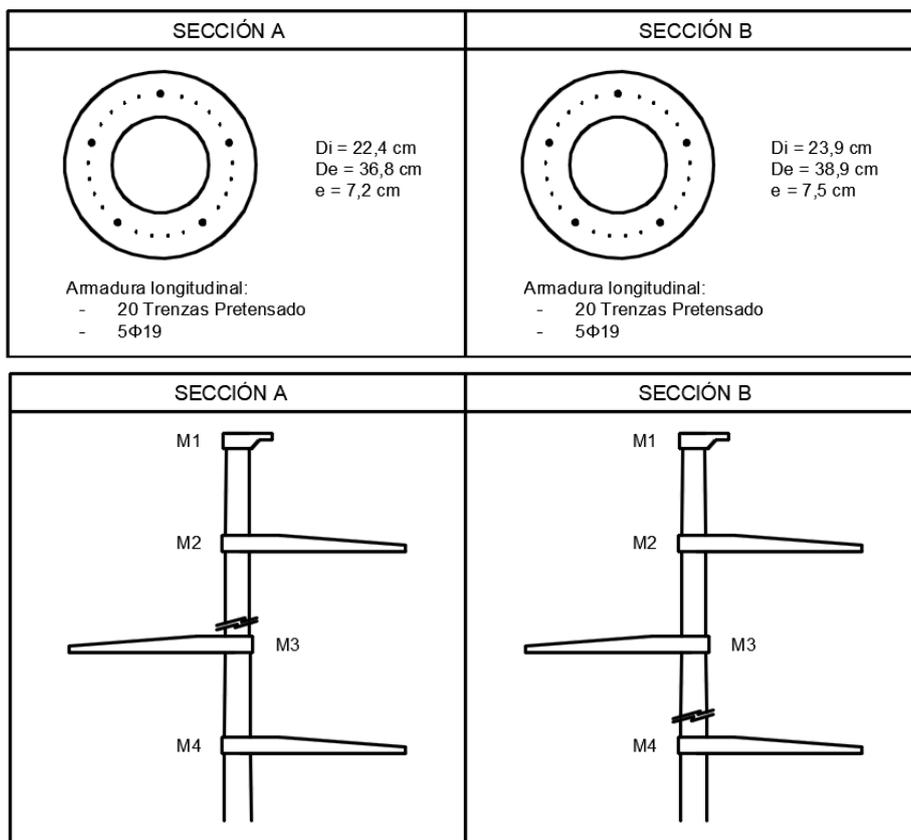
Los postes de las torres son cónicos, presentan una sección circular hueca que va disminuyendo con su altura, como así también lo hace la armadura longitudinal. (Ver sección “tal”).

Teniendo en cuenta que, de las 8 columnas colapsadas,

- 1 sola rompió inmediatamente por debajo de la 4ta ménsula. (la que demolieron entera)
- 5 rompieron entre 0,30 y 0,45 cm por encima de la 3er ménsula. (las 4 relevadas + la faltante depositada en la ET de Cutral Co)
- 2 rompieron entre 0,25 y 0,50 cm por encima de la 4ta ménsula. (las 2 relevadas)

Se procede entonces a determinar la resistencia estructural en la sección A y B (Fig. 73).

Fig. 73 - Secciones donde se evalúa la resistencia



Materiales:

Las propiedades de los materiales que conforman las columnas fueron determinadas mediante los ensayos de laboratorio realizados.

Tabla 27 - Propiedades de los materiales que conforman las torres

Hormigón	Resistencia a compresión simple	$f'c = 29,02 \text{ MPa}$
	Módulo de elasticidad	$Ec = 25319 \text{ MPa}$
Barras de Acero liso (3/4" = 19mm)	Área	$A = 2,84 \text{ cm}^2$
	Tensión de fluencia	$Fy = 459,13 \text{ MPa}$
Trenzas de pretensado (3x3mm)	Área	$A = 0,212 \text{ cm}^2$
	Tensión de rotura	$Fr = 1800,33 \text{ MPa}$
	Carga de rotura	$Pr = 38,19 \text{ kN}$

En lo que sigue, se presentan los cálculos para la evaluación de la resistencia.

SECCIÓN A:

- *Resistencia a Torsión*

Se calcula el momento torsor crítico mediante la expresión:

$$T_{cr} = \frac{1}{3} \sqrt{f'_c} \frac{A_{ep}^2}{P_{cp}} \sqrt{1 + 3 \frac{f_{pc}}{\sqrt{f'_c}}}$$

Para el cálculo de la tensión de compresión en el hormigón debida al pretensado (f_{pc}) se consideró que la tensión inicial de las trenzas en el momento que fueron pretensadas fue:

$$f_i = 0,74 f_{pu}$$

Esta tensión es el límite de lo indicado por la normativa en la actualidad y se asume que fue adoptada por el proyectista en su oportunidad. Entonces la carga de pretensada inicial aplicada sobre la columna, considerando las 20 trenzas, es:

$$P_i = 20 \times 0,74 \times P_{ot} = 20 \times 0,74 \times 38,19 \text{ KN} = 565,21 \text{ KN}$$

Por otro lado, mediante un cálculo aproximado de las pérdidas totales de pretensado se obtuvo que el valor efectivo de pretensado es de alrededor del 76% del valor inicial. Este cálculo es una aproximación confiable considerando que se desconocen las condiciones de fabricación y puesta en servicio hace 4 décadas aproximadamente. Por lo tanto:

$$P_e = 0,76 \times P_i = 0,76 \times 565,21 \text{ KN} = 429,6 \text{ KN}$$

Las trenzas están distribuidas de manera uniforme por lo que la tensión f_{pc} en el baricentro de la sección puede ser calculada como:

$$f_{pc} = P_e / A_g$$

En la tabla 28 se muestra el cálculo del momento torsor de fisuración sin considerar la actuación simultánea del corte:

Tabla 28 - Momento torsor de fisuración (T_{cr})

SECCIÓN A				
GEOMETRÍA				
De [m]	Di [m]	Ag [m2]	Acp [m2]	Pcp [m]
0,368	0,224	0,067	0,106	1,156
MOMENTO TORSOR DE FISURACIÓN				
f'c [Mpa]	Pe [KN]	fpc [Mpa]	Tcr [KNm]	
29,02	429,60	6,42	37,58	

- *Resistencia a Corte*

Se calcula la tensión tangencial de corte mediante la expresión:

$$\tau = 2 \frac{V}{A_g}$$

En la siguiente tabla se muestra el cálculo de la tensión tangencial máxima τ_{max} considerando distintos valores de corte V. La sollicitación de corte V proviene de cargas asimétricas sobre el cable en vanos adyacentes y se considera que se transmiten a la columna, a través de la ménsula, llegando hasta un valor máximo promedio de 13,3 KN que corresponden al valor de comienzo de deslizamiento del cable sobre la grapa de suspensión.

Tabla 29 - Tensiones de corte (T_{max})

SECCIÓN A		
GEOMETRÍA		
De [m]	Di [m]	Ag [m]
0,368	0,224	0,067

CORTE	
V [KN]	Tmax [Mpa]
2	0,060
4	0,119
6	0,179
8	0,239
10	0,299
12	0,358
14	0,418

Estas posibles tensiones tangenciales se utilizan para evaluar el efecto combinado de torsión y corte, teniendo en cuenta que ambas producen tensiones de tracción diagonal y siempre que la columna sea solicitada por torsión existirá corte sobre la misma disminuyendo su capacidad de resistir torsión.

- *Corte y Torsión actuando simultáneamente*

Al actuar simultáneamente ambos esfuerzos el momento torsor de fisuración T_{cr} será calculado ahora con la expresión:

$$T_{cr} = \left(\frac{1}{3} \sqrt{f'_c} - \tau_{max} \right) \frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \sqrt{1 + 3 \frac{f_{pc}}{\sqrt{f'_c}}} \left(\frac{A_g}{A_{cp}} \right)$$

Como en principio se desconoce el valor de la tensión tangencial máxima (T_{max}) que actúa en simultáneo con el torsor de fisuración, debido a que ambos valores provienen de la fuerza de tiro sobre el extremo de la ménsula, se resuelve la expresión anterior por tanteos. Lo que se hace es encontrar para qué valor de corte, y por lo tanto para qué valor de T_{max} (calculados en el punto

anterior), el resultado del cálculo coincide con el valor de torsión calculado como la fuerza que genera el corte por su brazo de palanca (longitud de la ménsula).

Tabla 30 - Momento torsor de fisuración (T_{cr}) para corte y torsión en simultáneo

CORTE		TORSIÓN + CORTE	
V [KN]	Tmax [Mpa]	Tcr [KNm]	Tcr = V * z [KNm]
1	0,030	23,26	2,8
2	0,060	22,87	5,5
3	0,090	22,47	8,3
4	0,119	22,08	11,0
5	0,149	21,69	13,8
6	0,179	21,29	16,5
7	0,209	20,90	19,3
7,5	0,224	20,70	20,6
7,51	0,224	20,70	20,7
7,52	0,225	20,69	20,7
8	0,239	20,51	22,0
9	0,269	20,11	24,8
10	0,299	19,72	27,5
11	0,329	19,33	30,3
12	0,358	18,93	33,0

Luego de algunas iteraciones resulta:

$$\tau_{max} = 2 \frac{V}{A_g} = 2 \frac{7,51 \times 10^{-3} MN}{0,067 m^2} = 0,224 MPa$$

Entonces:

$$T_{cr} = \left(\frac{1}{3} \sqrt{29,02 MPa} - 0,224 MPa \right) \frac{(0,1064 m^2)^2}{1,1561 m} \sqrt{1 + 3 \frac{6,42 MPa}{\sqrt{29,02 MPa}} \left(\frac{0,067 m^2}{0,1064 m^2} \right)}$$

$$T_{cr} = 20,70 \text{ KNm}$$

Dado que la distancia entre la posición del tensor y el eje de la columna es de $z = 2,75 \text{ m}$, la fuerza horizontal (H) que llevaría a la situación en la que se produciría la fisuración es de:

$$H = T_{cr} / z = 20,70 \text{ KNm} / 2,75 \text{ m} = 7,52 \text{ KN}$$

- Resistencia a flexo-compresión

El procedimiento seguido para determinar la resistencia a flexo-compresión de las torres pretensadas consiste en encontrar primero un área de acero equivalente en términos del acero convencional (barras lisas de 19 mm), es decir, obtener un área de acero con la tensión de fluencia de las barras lisas que equivalga al efecto combinado que producen las 20 trenzas de pretensado con su respectiva tensión de rotura, y las 5 barras lisas con su respectiva tensión de fluencia.

Luego, utilizar un diagrama de interacción para sección circular hueca con distribución uniforme de armadura (la equivalente calculada) y determinar el par de valores “Mu” y “Pu” que producen la rotura, para luego, compararlos con los valores de momento y axil que se cree ocurrieron al momento del colapso.

Dicho esto, el primer paso es calcular las sollicitaciones de momento flector y fuerza axil sobre la sección de rotura para cargas permanentes:

Fuerza axil:

- Peso de la ménsula, $P_m = 5,30 \text{ KN}$
- Peso del paquete de aisladores, $P_a = 0,55 \text{ KN}$
- Peso del cable para un vano de 260 m, $P_c = 1,53 \text{ KN}$ ($0,6\text{kg} \cdot 260\text{m} \cdot 9,8$)
- Peso de la columna por encima de la sección de rotura, $P_{col} = 5,75 \text{ KN}$

$$P = 5,30 \text{ KN} + 0,55 \text{ KN} + 1,53 \text{ KN} + 5,75 \text{ KN} \approx \mathbf{13,2 \text{ KN}}$$

Momento flector:

- Distancia desde el baricentro de la ménsula al eje de la columna, $Z_m = 0,82 \text{ m}$
- Distancia desde el punto de suspensión del paquete de aisladores y cable al eje de la columna, $Z_c = 2,75 \text{ m}$

$$M = 5,30 \text{ KN} \times 0,82 \text{ m} + (0,55 \text{ KN} + 1,53 \text{ KN}) \times 2,75 \text{ m} \approx \mathbf{10,1 \text{ KNm}}$$

El peso y baricentro de la ménsula se obtuvo a partir de un diseño 3d de la misma respetando las medidas de los planos de Cimalco. El peso del paquete de aisladores se obtuvo por medio de comunicación oral con gente del EPEN. Luego, se procedió a determinar el diagrama de interacción mediante la planilla de Excel de CIRSOC:

Se consideran los siguientes valores:

- Diámetro exterior, $D_e = 0,368 \text{ m}$
- Diámetro interior, $D_i = 0,224 \text{ m}$
- Área de cada trenza, $A = 0,212 \text{ cm}^2$
- Tensión de rotura, $f_{pu} = 1800,33 \text{ MPa}$
- Tensión de trabajo, $f_p = 1012,51 \text{ MPa}$ ($f_i = 0,74 f_{pu}$ y $f_p = 0,76 f_i$)
- Área de cada barra, $A = 2,84 \text{ cm}^2$

- Tensión de fluencia, $f_y = 459,13 \text{ MPa}$

A los efectos de la determinación del diagrama de interacción se calcula un área de acero equivalente para la tensión de fluencia del acero convencional:

$$A_{eq} = (20 \times 0,212 \text{ cm}^2 \times 1012,51 \text{ MPa} + 5 \times 2,84 \text{ cm}^2 \times 459,13 \text{ MPa}) / 459,13 \text{ MPa}$$

$$A_{eq} \approx 23,6 \text{ cm}^2$$

Para la determinación de la resistencia a flexo compresión se utilizó como herramienta la planilla de diagramas de interacción del INTI – CIRSOC.

A continuación, se presentan las tablas que resumen los datos de la sección.

Tabla 31 - Datos generales

REGLAMENTO DE REFERENCIA: CIRSOC 201-05			
Resistencia especificada a compresión del hormigón =	$f_c =$	29	MPa
Tensión de fluencia especificada de la armadura =	$f_y =$	459	MPa
Tipo de Estriado : 1 = estribos cerrados ; 2 = zunchos		2	
$\therefore P_n (\text{max}) =$		0,85 P_o	
		$P_o = 0,85 f_c (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}$	
Módulo de elasticidad del acero =	$E_s =$	200000	MPa
Deformación de fluencia del acero =	$\epsilon_y =$	2,296	‰
Factor que relaciona la altura del bloque de tensiones de compresión rectangular equivalente con la profundidad del eje neutro =	$\beta_1 =$	0,850	
Cuantía mínima de la armadura traccionada =	$\rho_{min} =$	0,0030	
Factor de reducción de la resistencia. Secciones controladas por compresión =	$\phi =$	0,70	
Factor de reducción de la resistencia. Secciones controladas por tracción =	$\phi =$	0,90	

Tabla 32 - Datos de la sección transversal

Diámetro exterior del elemento =	$D =$	0,37	m
Diámetro interior del elemento =	$D_{int} =$	0,22	m
Recubrimiento efectivo a eje de barra =	$d'_s =$	0,04	m
Relación de diámetros =	$\chi =$	0,61	
Espesor =		0,07	m

Tabla 33 – Distribución de armaduras

Área de acero individual =	$A_{s,i} =$	1,18	cm ²
Número de barras (máx. 48) =	$N^{\circ} =$	20	
Area total de la armadura longitudinal no tesa =	$A_{s,t} =$	23,60	cm ²
Cuantía geométrica total =	$\rho =$	0,03525	
Ubicación de armadura : favorable = 1 ; desfavorable = 0		1	

Fig. 74 – Diagrama de interacción de diseño

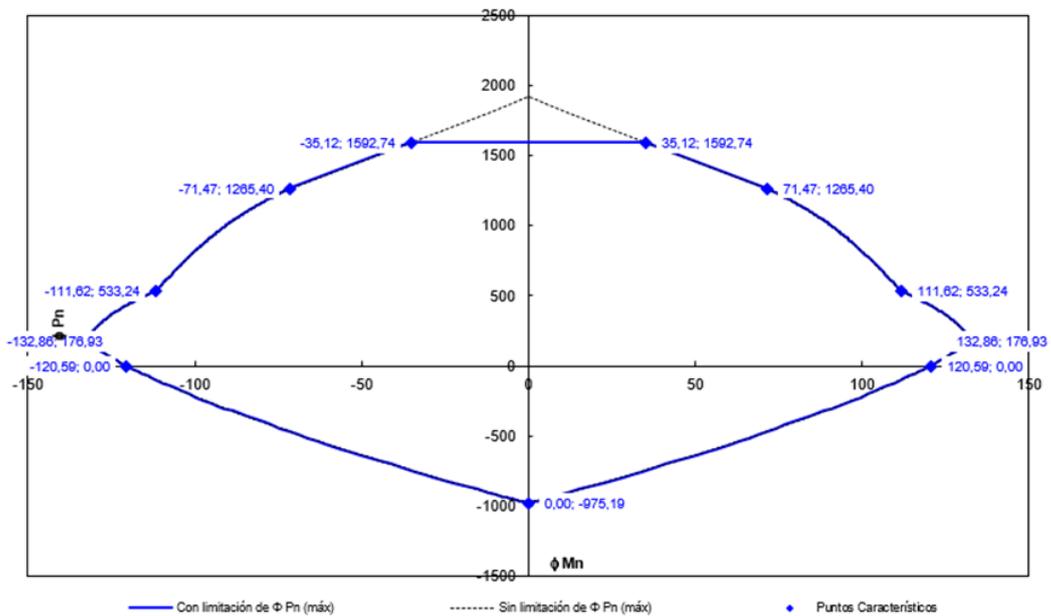
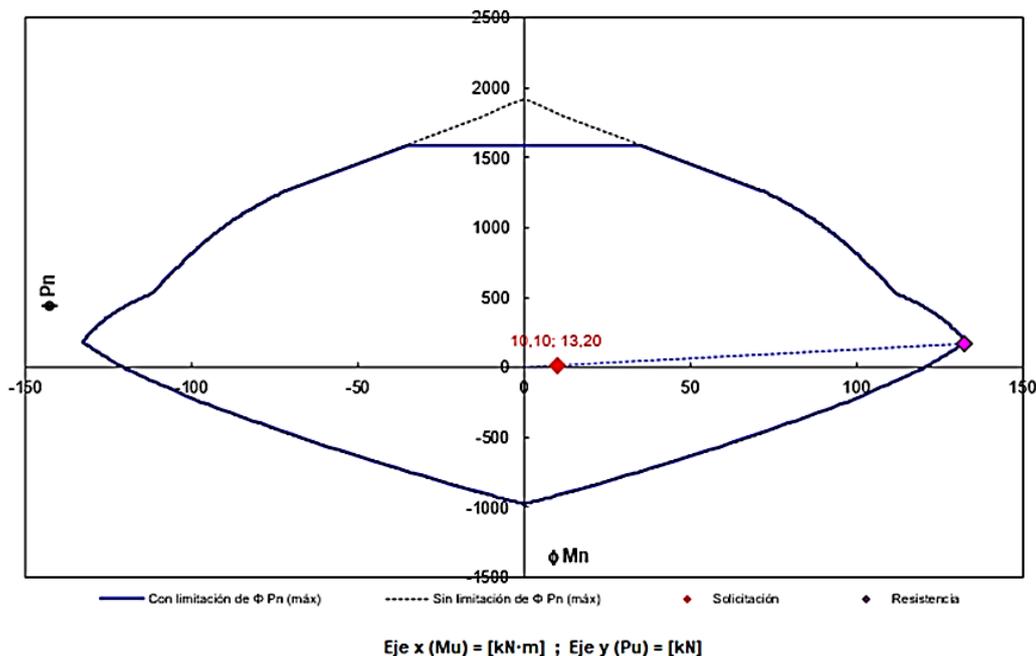


Fig. 75 – Condición de seguridad para una sollicitación dada

Esfuerzo axial mayorado; se debe considerar positivo para compresión y negativo para tracción =	$P_u =$	13,20	kN
Momento mayorado =	$M_u =$	10,10	kN·m
	$M_u / P_u =$	0,765	m

Fig. 76 – Diagrama de interacción / Condición de seguridad para solicitaciones existentes



En el diagrama anterior el rombo rojo representa la sollicitación de la sección (13,20 kN de compresión axial y 10,10 kNm de momento flector) y el rombo magenta la resistencia de diseño correspondiente a una excentricidad ($e = M_u/P_u$) igual a la de la sollicitación.

Tabla 34 – Resumen de la condición de seguridad

$P_{u, res} =$	173,32	kN
$M_{u, res} =$	132,62	kN·m
$MV sol = [(P_{u, sol})^2 + (M_{u, sol})^2]^{1/2} =$	16,62	= Módulo vector solicitante
$MV res = [(P_{u, res})^2 + (M_{u, res})^2]^{1/2} =$	218,24	= Módulo vector resistente
$MV res / MV sol =$	13,13	Debe ser mayor o igual que 1 para cumplir con la condición de seguridad.

Los valores de la tabla anterior se calcularon asumiendo que para los valores límites de diseño se mantiene la misma excentricidad que tienen las sollicitaciones de servicio para cargas permanentes. Como puede observarse, para las cargas permanentes el factor de seguridad global respecto a la resistencia de diseño es de 13,13. Si se considera que para la excentricidad de las cargas permanentes el factor de minoración de resistencia es $\phi = 0,90$, entonces resulta que el coeficiente de seguridad global de las cargas permanentes respecto de la resistencia nominal de la sección es de $13,13 / 0,90 = 14,60$.

Se procede a continuación a realizar una estimación de la sobrecarga equivalente que llevaría a la sección al límite de su resistencia nominal por flexión considerando que la misma aplica en una sola de las fases.

A continuación, se presenta la manera de encontrar este valor.

Se pretende encontrar un valor de carga (Q) que aplicado en el extremo de la ménsula y sumado a las cargas permanentes lleve a la sección al límite de su resistencia nominal.

$$P = 5,75 + 5,3 + 0,5 + 1,53 + Q \quad [KN]$$

$$M = 5,3 * 0,82 + (0,55 + 1,53 + Q) * 2,75 \quad [KNm]$$

Iterando en Excel (Fig. 77), se encuentra el valor de (Q) que produce un par de valores (P y M) que al ingresarlos como solicitación en la plantilla de diagrama de interacción de CIRSOC (Fig. 78), conducen a un valor del factor de seguridad global de 0,90 (Tabla 36).

Fig. 77 – Iteración en Excel

Pu res	53,94				
Mu res	124,66				
e	2,31			Q [KN]	46,5
Pu sol	59,7			Q eq [KN/m]	0,179
Mu sol	137,98				
e	2,31			Peso cable [KN/m]	0,00588
				Q/Peso cable	30,42
MV sol	150,34				
MV res	135,83			Aprox. 30 veces el peso del cable	
MV r/MV s	0,90				

Tabla 35 – Condición de seguridad para una solicitación dada

Esfuerzo axial mayorado; se debe considerar positivo para compresión y negativo para tracción =	$P_u =$	59,70	kN
Momento mayorado =	$M_u =$	137,98	kN·m
	$M_u / P_u =$	2,311	m

Fig. 78 – Diagrama de interacción / Condición de seguridad límite

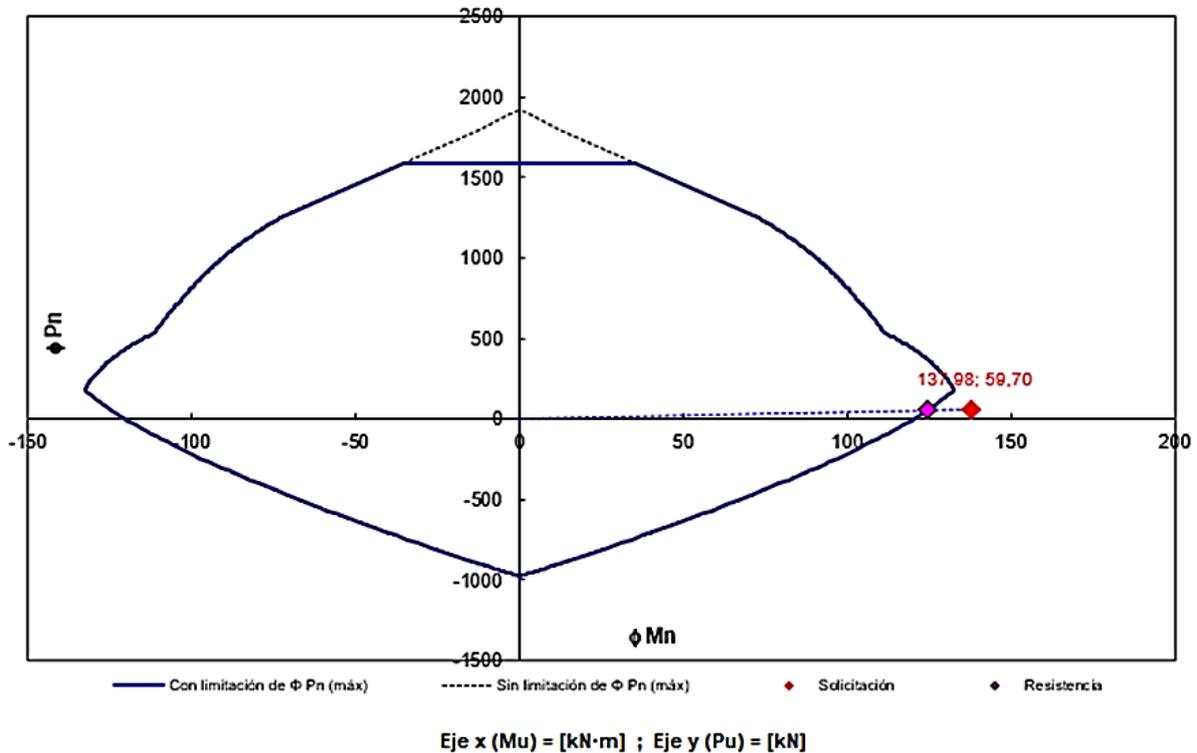


Tabla 36 – Resumen de la condición de seguridad

$P_{u, res} =$	53,85	kN
$M_{u, res} =$	124,46	kN·m
$MV_{sol} = [(P_{u, sol})^2 + (M_{u, sol})^2]^{1/2} =$	150,34	= Módulo vector solicitante
$MV_{res} = [(P_{u, res})^2 + (M_{u, res})^2]^{1/2} =$	135,61	= Módulo vector resistente
$MV_{res} / MV_{sol} =$	0,90	Debe ser mayor o igual que 1 para cumplir con la condición de seguridad

Enfatizando el hecho de que el diagrama de interacción graficado es el de diseño y lo que se pretende comparar es la sollicitación límite con la resistencia nominal de la sección (que para la excentricidad de las cargas totales el factor de minoración de resistencia es $\phi=0,90$, resulta que el coeficiente de seguridad global de las cargas totales respecto de la resistencia nominal de la sección es de $0,90 / 0,90 = 1$.

Este valor límite se obtuvo considerando que se aplicó una sobrecarga uniformemente distribuida únicamente sobre una de las fases de 260 m de longitud, igual a:

$$Q_{eq}=0,179 \text{ KN/m}$$

Valor aproximadamente igual a 30 veces el peso propio del cable.

SECCIÓN B:

- Resistencia a Torsión

En la siguiente tabla se muestra el cálculo del momento torsor de fisuración sin considerar la actuación simultánea del corte:

Tabla 37 - Momento torsor de fisuración (Tcr)

SECCIÓN B				
GEOMETRÍA				
De [m]	Di [m]	Ag [m ²]	Acp [m ²]	Pcp [m]
0,389	0,239	0,074	0,119	1,222
MOMENTO TORSOR DE FISURACIÓN				
f'c [Mpa]	Pe [kN]	fpc [Mpa]	Tcr [kNm]	
29,02	429,60	5,81	42,70	

- Resistencia a Corte

Se calcula la tensión tangencial de corte mediante la expresión:

$$\tau = 2 \frac{V}{A_g}$$

En la siguiente tabla se muestra el cálculo de la tensión tangencial máxima τ_{max} considerando distintos valores de corte V. La sollicitación de corte V proviene de cargas asimétricas sobre el cable en vanos adyacentes y se considera que se transmiten a la columna, a través de la ménsula, llegando hasta un valor máximo de 13,3 kN en promedio que corresponden al valor de comienzo de deslizamiento del cable sobre la grapa de suspensión.

Tabla 38 - Tensiones de corte (Tmax)

SECCIÓN B		
GEOMETRÍA		
De [m]	Di [m]	Ag [m ²]
0,389	0,239	0,074
CORTE		
V [kN]	Tmax [Mpa]	
2	0,054	
4	0,108	
6	0,162	
8	0,216	
10	0,270	
12	0,324	
14	0,378	

Estas posibles tensiones tangenciales se utilizan para evaluar el efecto combinado de torsión y corte, teniendo en cuenta que ambas producen tensiones de tracción diagonal y siempre que la columna sea solicitada por torsión existirá corte sobre la misma disminuyendo su capacidad de resistir torsión.

- *Corte y Torsión actuando simultáneamente*

Al actuar simultáneamente ambos esfuerzos el momento torsor de fisuración T_{cr} será calculado ahora con la expresión:

$$T_{cr} = \left(\frac{1}{3} \sqrt{f'_c} - \tau_{max} \right) \frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \sqrt{1 + 3 \frac{f_{pc}}{\sqrt{f'_c}}} \left(\frac{A_g}{A_{cp}} \right)$$

Como en principio se desconoce el valor de la tensión tangencial máxima (T_{max}) que actúa en simultáneo con el torsor de fisuración, debido a que ambos valores provienen de la fuerza de tiro sobre el extremo de la ménsula, se resuelve la expresión anterior por tanteos. Lo que se hace es encontrar para qué valor de corte, y por lo tanto para qué valor de T_{max} (calculados en el punto anterior), el resultado del cálculo coincide con el valor de torsión calculado como la fuerza que genera el corte por su brazo de palanca (longitud de la ménsula).

Tabla 39 - Momento torsor de fisuración (T_{cr}) para corte y torsión en simultáneo

CORTE		TORSIÓN + CORTE	
V [KN]	T_{max} [Mpa]	T_{cr} [KNm]	$T_{cr} = V * z$ [KNm]
1	0,027	26,18	2,75
2	0,054	25,78	5,50
3	0,081	25,38	8,25
4	0,108	24,98	11,00
5	0,135	24,58	13,75
6	0,162	24,18	16,50
7	0,189	23,78	19,25
8	0,216	23,38	22,00
8,4	0,227	23,22	23,10
8,41	0,227	23,22	23,13
8,42	0,228	23,21	23,16
8,43	0,228	23,21	23,18
8,44	0,228	23,21	23,21
8,45	0,228	23,20	23,24
9	0,243	22,98	24,75
10	0,270	22,58	27,50
11	0,297	22,18	30,25
12	0,324	21,78	33,00
13	0,351	21,38	35,75
14	0,378	20,98	38,50

Luego de algunas iteraciones resulta:

$$\tau_{max} = 2 \frac{V}{A_g} = 2 \frac{8,44 \times 10^{-3} MN}{0,074 m^2} = 0,228 MPa$$

Entonces:

$$T_{cr} = \left(\frac{1}{3} \sqrt{29,02 MPa} - 0,228 MPa \right) \frac{(0,1188 m^2)^2}{1,2221 m} \sqrt{1 + 3 \frac{5,81 MPa}{\sqrt{29,02 MPa}} \left(\frac{0,074 m^2}{0,1188 m^2} \right)}$$

$$T_{cr} = 23,21 \text{ KNm}$$

Dado que la distancia entre la posición del tensor y el eje de la columna es de $z = 2,75 \text{ m}$, la fuerza horizontal H que llevaría a la situación en la que se produce la fisuración es de:

$$H = T_{cr} / z = 23,21 \text{ KNm} / 2,75 \text{ m} = \mathbf{8,44 \text{ KN}}$$

- *Resistencia a flexo-compresión*

Cálculo de las solicitaciones de momento flector y fuerza axil sobre la sección de rotura para cargas permanentes: En este caso, por encima de la sección de rotura la torre posee 2 fases, por lo tanto, se tiene 2 ménsulas, 2 paquetes de aisladores y 2 conductores. Además, como se encuentra una ménsula de cada lado formando un ángulo de 180° , el momento flector es nulo.

Fuerza axil:

- Peso de la ménsula, $P_m = 5,30 \text{ KN}$
- Peso del paquete de aisladores, $P_a = 0,55 \text{ KN}$
- Peso del cable para un vano de 260 m , $P_c = 1,53 \text{ KN}$ ($0,6 \text{ kg} \cdot 260 \text{ m} \cdot 9,8$)
- Peso de la columna por encima de la sección de rotura, $P_{col} = 9,02 \text{ KN}$

$$P = 2 \cdot 5,30 \text{ KN} + 2 \cdot 0,55 \text{ KN} + 2 \cdot 1,53 \text{ KN} + 9,02 \text{ KN} \approx \mathbf{23,8 \text{ KN}}$$

Momento flector:

$$M = \mathbf{0 \text{ KNm}}$$

Para la determinación del diagrama de interacción correspondiente a la Sección B se consideran los siguientes valores:

Diámetro exterior, $D_e = 0,389 \text{ m}$

Diámetro interior, $D_i = 0,239 \text{ m}$

Las armaduras longitudinales presentes son exactamente las mismas que en la Sección A y se realizan las mismas consideraciones.

A continuación, se presentan las tablas que resumen los datos de la sección.

Tabla 40 - Datos generales

REGLAMENTO DE REFERENCIA: CIRSOC 201-05			
Resistencia especificada a compresión del hormigón =	$f_c =$	29	MPa
Tensión de fluencia especificada de la armadura =	$f_y =$	459	MPa
Tipo de Estribado : 1 = estribos cerrados ; 2 = zunchos		2	
P_n (max) =	$0,85 P_o$		
	$P_o = 0,85 f_c (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}$		
Módulo de elasticidad del acero =	$E_s =$	200000	MPa
Deformación de fluencia del acero =	$\epsilon_y =$	2,296	%o
Factor que relaciona la altura del bloque de tensiones de compresión rectangular equivalente con la profundidad del eje neutro =	$\beta_1 =$	0,850	
Cuantía mínima de la armadura traccionada =	$\rho_{min} =$	0,0030	

Factor de reducción de la resistencia. Secciones controladas por compresión =	$\phi =$	0,70	
Factor de reducción de la resistencia. Secciones controladas por tracción =	$\phi =$	0,90	

Tabla 41 - Datos de la sección transversal

Diámetro exterior del elemento =	$D =$	0,39	m
Diámetro interior del elemento =	$D_{int} =$	0,24	m
Recubrimiento efectivo a eje de barra =	$d'_s =$	0,04	m
Relación de diámetros =	$\chi =$	0,61	
Espesor =		0,08	m

Tabla 42 – Distribución de armaduras

Área de acero individual =	$A_{st} =$	1,18	cm ²
Número de barras (máx. 48) =	$N^{\circ} =$	20	
Area total de la armadura longitudinal no tesa =	$A_{st} =$	23,60	cm ²
Cuantía geométrica total =	$\rho =$	0,03190	
Ubicación de armadura : favorable = 1 ; desfavorable = 0		1	

Fig. 79 – Diagrama de interacción de diseño

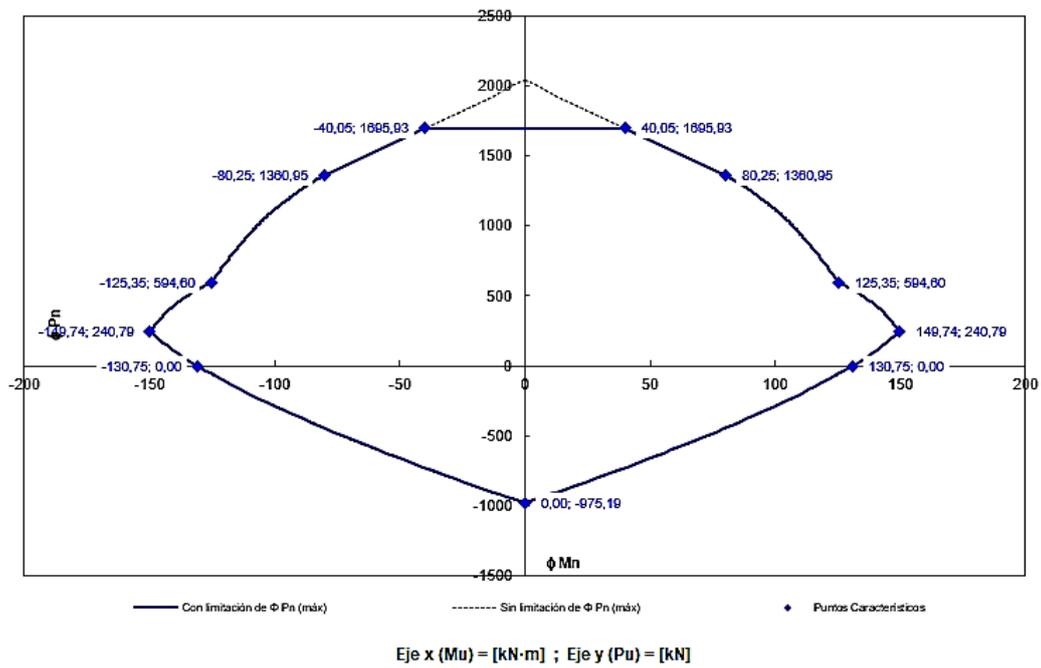
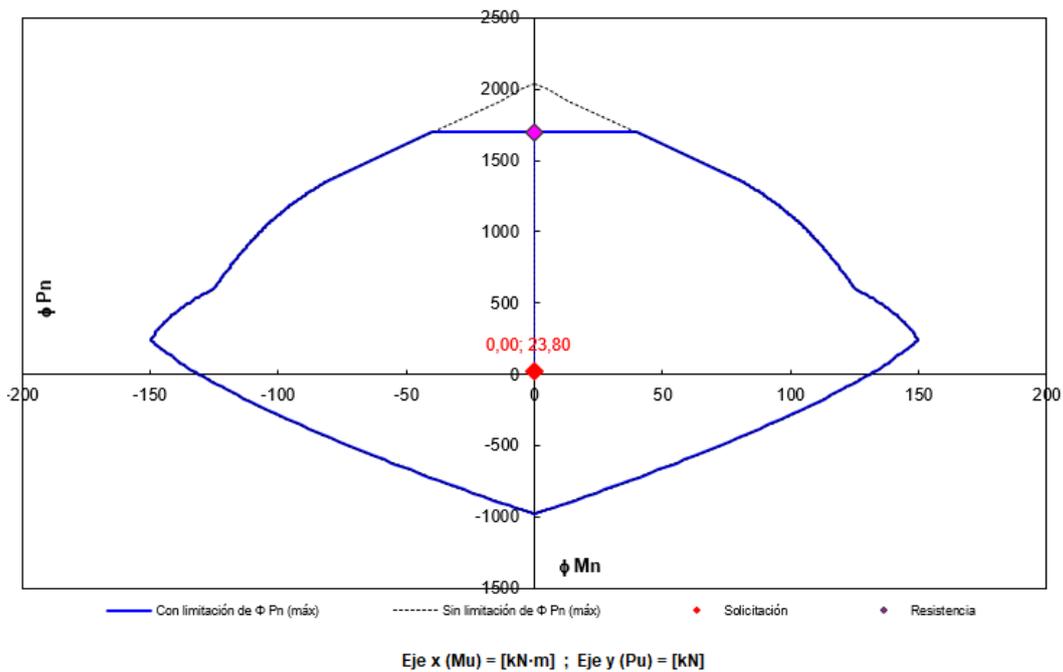


Tabla 43 – Condición de seguridad para una sollicitación dada

Esfuerzo axial mayorado; se debe considerar positivo para compresión y negativo para tracción =	$P_u =$	23,80	kN
Momento mayorado =	$M_u =$	0,00	kN·m
	$M_u / P_u =$	0,000	m

Fig. 80 – Diagrama de interacción – Condición de seguridad para sollicitaciones existentes



En el diagrama anterior el rombo rojo representa la sollicitación de la sección (23,80 kN de compresión axial y 0 kNm de momento flector) y el rombo magenta la resistencia de diseño correspondiente a una excentricidad ($e = M_u/P_u$) igual a la de la sollicitación.

Tabla 44 – Resumen de la condición de seguridad

$P_{u, res} =$	1695,93	kN
$M_{u, res} =$	0,00	kN·m
$MV_{sol} = [(P_{u, sol})^2 + (M_{u, sol})^2]^{1/2} =$	23,80	= Módulo vector solitante
$MV_{res} = [(P_{u, res})^2 + (M_{u, res})^2]^{1/2} =$	1695,93	= Módulo vector resistente
$MV_{res} / MV_{sol} =$	71,26	Debe ser mayor o igual que 1 para cumplir con la condición de seguridad.

Los valores de la tabla anterior se calcularon asumiendo que para los valores límites de diseño se mantiene la misma excentricidad que tienen las sollicitaciones de servicio para cargas permanentes. Como puede observarse, para las cargas permanentes el factor de seguridad global respecto a la resistencia de diseño es de 71,26. Si se considera que para la excentricidad de las cargas permanentes el factor de minoración de resistencia es $\phi = 0,70$, entonces resulta que el coeficiente de seguridad global de las cargas permanentes respecto de la resistencia nominal de la sección es de $71,26 / 0,70 = 101,80$.

Se procede a continuación a realizar una estimación de la sobrecarga equivalente que llevaría a la sección al límite de su resistencia nominal por flexión. Para esto, se considera la sobrecarga aplicada sobre una sola de las fases, ya que si no se anulan los momentos (por simetría) y solo se tiene compresión.

A continuación, se presenta la manera de encontrar este valor. Se pretende encontrar un valor de carga (Q) que aplicado en el extremo de la ménsula y sumado a las cargas permanentes lleve a la sección al límite de su resistencia nominal.

$$P = 9,02 + 2 * (5,30 + 0,55 + 1,53) + Q \quad [KN]$$

$$M = Q * 2,75 \quad [KNm]$$

Iterando en Excel (Fig. 81), se encuentra el valor de (Q) que produce un par de valores (P y M) que al ingresarlos como sollicitación en la planilla de diagramas de interacción de CIRSOC (Fig. 82), conducen a un valor del factor de seguridad global de 0,90 (Tabla 46).

Fig. 81 – Iteración en Excel

Pu res	71,34		
Mu res	137,31		
e	1,92	Q [KN]	55,5
Pu sol	79,3	Q eq [KN/m]	0,213
Mu sol	152,63	Peso cable [KN/m]	0,00588
e	1,92	Q/Peso cable	36,30
MV sol	172,00	Aprox. 36 veces el peso del cable	
MV res	154,74		
MV r/MV s	0,90		

Tabla 45 – Condición de seguridad para una sollicitación dada

Esfuerzo axial mayorado; se debe considerar positivo para compresión y negativo para tracción =	$P_u =$	79,30	kN
Momento mayorado =	$M_u =$	152,63	kN·m
	$M_u / P_u =$	1,925	m

Fig. 82 – Diagrama de interacción – Condición de seguridad límite

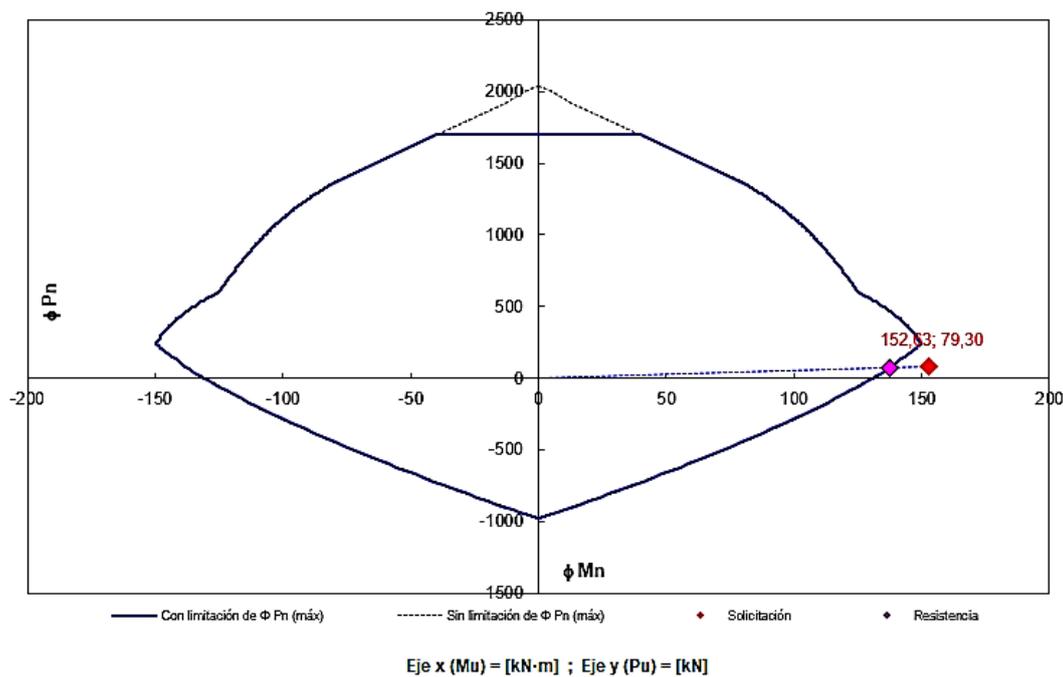


Tabla 46 – Resumen de la condición de seguridad

$P_{u,res}$	71,34	kN
$M_{u,res}$	137,31	kN·m
$MV\ sol = [(P_{u,sol})^2 + (M_{u,sol})^2]^{1/2}$	172,00	= Módulo vector solicitante
$MV\ res = [(P_{u,res})^2 + (M_{u,res})^2]^{1/2}$	154,74	= Módulo vector resistente
$MV\ res / MV\ sol =$	0,90	Debe ser mayor o igual que 1 para cumplir con la condición de seguridad

Enfatizando el hecho de que el diagrama de interacción graficado es el de diseño y lo que se pretende comparar es la sollicitación límite con la resistencia nominal de la sección (que para la excentricidad de las cargas totales el factor de minoración de resistencia es $\phi=0,90$, resulta que el coeficiente de seguridad global de las cargas totales respecto de la resistencia nominal de la sección es de $0,90 / 0,90 = 1$. Este valor límite se obtuvo considerando que se aplicó una sobrecarga uniformemente distribuida únicamente sobre una de las fases de 260 m de longitud, igual a:

$$Q_{eq}=0,213 \text{ KN/m}$$

Valor aproximadamente igual a 36 veces el peso propio del cable.

A partir de la verificación estructural realizada se concluye lo siguiente:

- *Torsión*: los postes de las torres de suspensión no poseen armadura transversal para resistir esfuerzos de torsión y corte, presentando en su diseño una debilidad estructural en este sentido. Los valores últimos de resistencia serían superados en caso de existir una fuerza de tiro no equilibrada sobre la ménsula igual o superior a 7,52 kN. Según los ensayos de deslizamiento (Ver sección "tal"), la fuerza requerida para que se produzca el deslizamiento del cable en la morseta es del orden de 13,3 KN.
- *Flexo-Compresión*: Para producir la falla por flexo compresión se requiere una sobrecarga por manguito de hielo del orden de 30 veces el propio peso del cable (0,179 KN/m) aplicado en forma continua sobre uno de los conductores.

La factibilidad de ocurrencia de estos esfuerzos se analiza en el apartado siguiente, comparando estos valores con las sollicitaciones que aparecen en el extremo de la ménsula al cargar el modelo estructural en SAP2000.

6.6. Análisis estructural

En este apartado, con toda la información anterior como base, se desarrolla la actividad central de este trabajo que consiste en realizar el análisis estructural de la línea y evaluar el comportamiento del sistema conductor-aislador, tratando de simular los distintos escenarios de carga que podrían haberse presentado durante el evento del colapso.

Se detalla el análisis estructural realizado y los resultados obtenidos en relación al nivel de demanda generado sobre las torres de suspensión ante una sobrecarga por formación de manguito y viento.

Lo que se busca es determinar bajo qué condiciones de acumulación de nieve y viento sobre los conductores se alcanzaría el esfuerzo de tiro que provoca:

- la rotura del conductor
- el deslizamiento del cable en la grapa de suspensión
- la fuerza horizontal en el extremo de la ménsula que produce la rotura por torsión

Para el análisis se consideraron las siguientes premisas:

- La formación de manguitos por acreción de nieve húmeda, es decir, la generación de una sobrecarga adicional sobre la traza del conductor.
- La condición de que la sobrecarga sea localizada, consecuencia inmediata de observaciones sobre la línea aledaña de 33 KV.
- Las condiciones climáticas no fueron excepcionales, depósitos de nieve de 13 cm y vientos medios de 32 Km/h con ráfagas de 53 Km/h.

Sobre la traza del conductor se consideraron las siguientes acciones:

- Peso propio del conductor, calculado en forma automática por el software en función de la sección del conductor y la densidad asignada.
- Carga de nieve: considerando un manguito cilíndrico de 1 cm a 9 cm de espesor, con las características que más adelante se detallan.
- Carga de Viento: en base a las velocidades máximas de ráfagas actuando sobre el conductor desnudo y sobre los distintos espesores de manguito.

A continuación, se resume la información obtenida en las secciones anteriores:

Tabla 47 - Datos del cable conductor

Cable conductor	
Diámetro externo	17,1 mm
Diámetro equivalente	14,84 mm
Sección resistente	173 mm ²
Módulo elástico	9.129.290 kg/cm ²
Tensión de rotura	53,6 KN
Masa por unidad de longitud	600 g/m

Tabla 48 - Datos de la grapa de suspensión

Grapa de suspensión	
Fuerza de inicio de deslizamiento	1200 Kg a 1464 Kg

Tabla 49 - Sobrecarga de Viento para $V = 14,7 \text{ m/s}$ (53 Km/h)

Sobrecarga de Viento		
Diámetro Conductor [cm]		F [N/m]
1,71		4,46
Espesor Manguito [cm]	Diámetro Manguito [cm]	F [N/m]
1	3,71	9,67
2	5,71	14,88
3	7,71	20,09
4	9,71	25,31
5	11,71	30,52
6	13,71	35,73
7	15,71	40,94
8	17,71	46,16

Tabla 50 - Sobrecarga de Nieve por acreción de nieve húmeda

Sobrecarga de Nieve			
Espesor Manguito [cm]	Diámetro Manguito [cm]	Peso [Kg/m]	Peso [N/m]
1	3,71	0,26	2,51
2	5,71	0,70	6,86
3	7,71	1,33	13,06
4	9,71	2,15	21,12
5	11,71	3,16	31,02
6	13,71	4,36	42,77
7	15,71	5,75	56,37
8	17,71	7,32	71,82

6.6.1. Descripción del modelo:

Se realizó un modelo estructural no-lineal mediante elementos finitos en el software SAP2000 que consiste en la simulación del comportamiento del conjunto cable conductor-aislador cuando el mismo es sometido a la acción de sobrecarga por nieve y viento. El modelo es del tipo no lineal

geométrico, que incluye una formulación de grandes deformaciones al efecto de poder contemplar los cambios geométricos del conjunto conductor-aislador al ser sometido a un incremento de carga.

Se consideró la longitud del vano promedio de 260 m y una flecha igual a 5,60 m coherente con los datos de diseño (Fig. 83). Teniendo en cuenta que la diferencia de altura existente entre las torres no implica cambios significativos en la tensión resultante en el cable, en el modelo se establecieron todos los vanos a la misma altura (en un plano horizontal).

El modelo final, como se explica más adelante, incluyó un total de 17 vanos (Fig. 84).

Fig. 83 - Vano típico

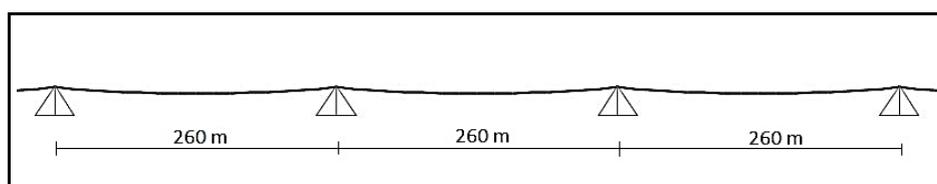
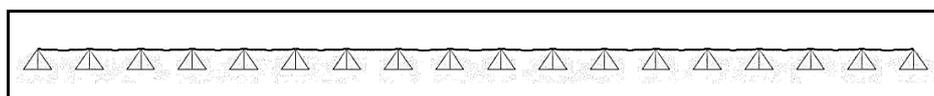


Fig. 84 - Modelo de 17 vanos

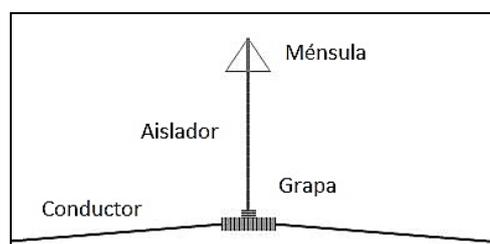


La estructura de suspensión es asumida como rígida entendiéndose que las principales variables a determinar (los esfuerzos y deformaciones generados en el conductor por efecto de la sobrecarga) no resultan afectadas por la posible deformación de la torre. Para esto, se modeló las ménsulas de la torre (punto de sujeción del aislador) como apoyos fijos (solo restringen el desplazamiento) de los cuales se encuentran suspendidos los aisladores.

Se modeló los aisladores como elementos tipo “cable”, siendo de esta manera bi-articulados y axialmente rígidos (a tracción), sin tener rigidez a la flexión, tal como ocurre realmente. Se respetó su longitud de 1,7 m. pero no así su diámetro, utilizando el mismo que el del conductor. Esta simplificación es válida ya que, el aislador está conformado por una serie de platos vinculados mediante articulaciones generando una cadena flexible pero inextensible.

La vinculación entre el aislador y el cable se realizó mediante 2 elementos tipo “frame” de sección circular unidos en forma de “T invertida” que simulan la grapa de suspensión, permitiendo la vinculación articulada entre el conductor y el aislador (Fig. 85). A este elemento se le otorgó una sección arbitraria y se le quitó el peso para que únicamente cumpliera la función mencionada.

Fig. 85 - Detalle de vinculación Conductor - Aislador



El conductor se modeló como un elemento tipo “cable” reflejando las propiedades del mismo. Se le asignó una sección de 173 mm² que corresponde a la sección resistente (suma de las áreas de los hilos de acero y aluminio que lo conforman) según la norma de referencia IRAM 2187/70, siendo ésta ligeramente superior a la obtenida en el informe de laboratorio (166,5 mm²). Esta sección resulta en un diámetro equivalente de 14,84 mm. El peso por unidad de volumen se ajustó según su masa por unidad de volumen, es decir, el valor corresponde al peso lineal (600 gr/m) dividido por la sección resistente (173 mm²) resultando un valor de 3,468 t/m³. El módulo elástico se estableció a partir de la ponderación entre el módulo elástico del acero y el del aluminio según las áreas respectivas de cada uno, resultando en 9.129.290 kg/cm².

A continuación, se detalla la obtención de este valor.

$$E_{\text{conductor}} = E_{\text{al}} \times A_{\text{al}} / A_{\text{tot}} + E_{\text{ac}} \times A_{\text{ac}} / A_{\text{tot}}$$

Siendo:

- *E_{al}*: módulo elástico del aluminio (7.200.000 kg/cm²)
- *E_{ac}*: módulo elástico del acero (21.000.000 kg/cm²)
- *A_{al}*: área resultante de la suma de hilos de aluminio (148,9 mm²)
- *A_{ac}*: área resultante de la suma de hilos de acero (24,2 mm²)
- *A_{tot}*: suma de las áreas anteriores (173,1 mm²)

Para obtener al modelo descrito se tuvo que pasar por una serie de modelos previos que fueron consecuencia de varios “prueba y error”. El primer modelo construido consistió en un único vano de 260 m en el cual el cable se configuró con las mismas características antes mencionadas, pero, los puntos de suspensión consistían en apoyos dobles. El único objetivo de este modelo fue contrastar los valores de deflexiones y tensiones obtenidos en SAP2000 con los obtenidos por un modelo de cálculo manual, realizado en Excel, bajo la teoría de catenarias. Se comparó los resultados obtenidos para las cargas de peso propio y luego algunas sobrecargas por manguito. Las pequeñas diferencias entre ambos modelos (debido al cálculo no lineal del software) fueron prueba suficiente para corroborar que el modelo cargado en SAP2000 era correcto, por lo menos, en lo que respecta al cable.

El segundo modelo realizado consistió en replicar el modelo anterior tres veces, logrando un modelo de 3 vanos contiguos en el que, el cable del vano central era suspendido en sus dos extremos por aisladores y los vanos externos en uno de sus extremos compartían el aislador mientras que en el otro suspendía directamente de un apoyo doble. Los aisladores fueron modelados, en primera instancia, como elementos cilíndricos tipo “frame”, bi-articulados y axialmente rígidos, lo cual se logró

aumentando los multiplicadores de área (pasando de 1 a 1000 por ej.). Estos se encontraban suspendidos de su punto superior mediante apoyos dobles.

Se observó que los puntos extremos de sujeción debían ser apoyos dobles ya que, si se colocaban aisladores, como en el vano central, la estructura resultaba hipostática y por ende el programa no encontraba solución. Lo que se buscó con este modelo fue comprender cuál era el efecto que tenían los aisladores sobre la deformada del tendido al estar sometidos los vanos a sobrecargas desbalanceadas; por ejemplo, tener una sobrecarga de nieve correspondiente a 1 cm de espesor de manguito en el vano central y nada en los laterales, o 3 cm en el central y 1 cm en los laterales, o 3 cm en el primer vano, 1cm en el segundo y 1 cm en tercero, etc.

Los resultados obtenidos permitieron dar cuenta de lo esperado, la sobrecarga localizada en un vano generaba la rotación de aisladores en dirección del vano más cargado y reducción de flechas en los vanos menos cargados a costa de los más cargados (Fig. 86 y 87).

Fig. 86 - Sobrecarga localizada en vano central

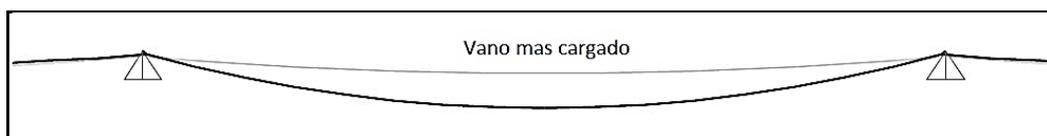
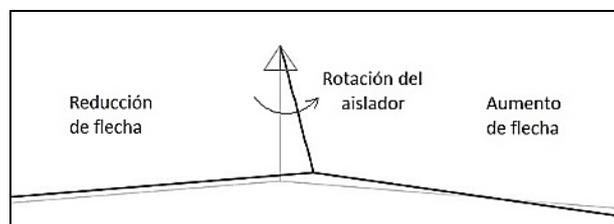


Fig. 87 - Rotación del aislador y modificación de flechas



Se quiso comprobar si este efecto tendía a “amortiguarse” o “disiparse” a medida que se alejaba del vano más cargado, para esto, se replicó el mismo modelo generando una configuración de 7 y 11 vanos. El número impar responde a lograr que el vano del centro esté cargado y el resto no.

Se pudo apreciar que el efecto era el mismo sin importar el número de vanos que contenía el modelo. Esto no parecía correcto y condujo a mirar las reacciones en los apoyos. Se encontró que toda la fuerza de tiro era transmitida íntegramente a los apoyos dobles de los dos extremos y los aisladores de los vanos intermedios solo rotaban sin transferir siquiera una parte de la tensión como fuerza horizontal al apoyo. Esto llevó a pensar que los aisladores de los tramos centrales, en lugar de cumplir la función esperada, estaban funcionando como apoyos móviles en la dirección horizontal, con lo cual, se replicó el modelo anterior y se reemplazó todos los aisladores de los vanos intermedios por apoyos móviles logrando el efecto que correspondía. Los errores anteriores, que no estaban permitiendo

llegar al modelo que se pretendía lograr, condujeron a una serie de modelos sucesivos en los cuales se modificó, entre otras cosas y en distinto grado, el peso de la cadena de aisladores, la rigidez axial y la rigidez flexional mediante multiplicadores, cambio del elemento de suspensión de tipo “frame” a tipo “cable”, etc, etc.

Luego de un arduo trabajo de modelado e investigación, se arribó al modelo final modificando el tipo de elemento del aislador a tipo “cable” y vinculándolo al cable conductor mediante el modelado de la grapa de suspensión con elementos tipo “frame”. Este modelo es con el que finalmente se trabajó y es el que se describió al comienzo de esta sección en “descripción del modelo”. Teniendo en cuenta que el efecto de sobrecarga localizada en un vano se propaga a los restantes, generando reducción de flechas y rotación de los aisladores, el modelo incluyó un total de 17 vanos bajo el esquema de carga que se menciona más adelante.

6.6.2. Descripción del mecanismo de carga:

Como se mencionó anteriormente, el modelo de cálculo es de tipo no lineal geométrico, por lo tanto, el proceso de carga tiene que consistir en pequeños incrementos permitiendo que la estructura se deforme y el incremento de carga siguiente actúe sobre la estructura deformada debida al incremento anterior. Para lograr esto de manera ordenada y entendible, se obtuvo de los cálculos de sobrecarga de nieve y viento los valores de sobrecarga correspondiente a manguitos de distintos espesores, partiendo de 1 cm y llegando al valor final de 10 cm. El valor final corresponde a la máxima formación probable de manguito según el modelo de Admirat. (Ver apartado 6.4). De esta forma, se logra discretizar las sobrecargas refiriéndose a espesores de manguito crecientes en incrementos de 1 cm.

Los incrementos de carga que se muestran en la tabla 51 corresponden a los valores de carga que, sumados al valor de carga anterior, generan la sobrecarga total para cada espesor de manguito establecido.

Tabla 51 - Incrementos de carga para la sobrecarga de nieve

Sobrecarga de Nieve			
Espesor	Diámetro	Peso	Incremento
1	3,71	2,51	2,51
2	5,71	6,86	4,35
3	7,71	13,06	6,20
4	9,71	21,12	8,05
5	11,71	31,02	9,90
6	13,71	42,77	11,75
7	15,71	56,37	13,60
8	17,71	71,82	15,45

A partir de lo anterior, si se desea obtener, por ejemplo, el efecto que genera sobre la estructura una sobrecarga debido a un manguito de 5 cm de espesor, se debe aplicar, a la estructura deformada por peso propio, la sobrecarga para un manguito de 1 cm de espesor, luego, sobre ésta nueva deformada, el incremento necesario para llegar a la sobrecarga que corresponde al espesor de 2 cm ($Q_{2cm}-Q_{1cm}$), sobre la nueva deformada el incremento necesario para llegar a la sobrecarga que corresponde al espesor de 3 cm ($Q_{3cm}-Q_{2cm}$) y así sucesivamente hasta llegar al manguito de 5 cm de espesor.

Para el caso de la sobrecarga de viento sobre los distintos espesores de manguito el procedimiento es análogo, se carga la estructura con los incrementos de sobrecarga por manguito y luego se aplica la carga de viento que corresponda según el diámetro final.

6.6.3. Escenarios de verificación:

Como se desconoce a cuántos vanos afectó el evento climático y de qué manera lo hizo en cada uno, se optó por analizar situaciones extremas, tratando de simular los distintos escenarios que pueden haberse presentado durante el evento del colapso, obteniendo valores “piso” y valores “techo” para el tiro del conductor.

- *E1: Peso Propio del conductor*

El primer caso es solo para establecer el estado tensional del conductor previo a la ocurrencia del evento climático. Se obtiene el mínimo valor de tiro, un valor “piso”.

- *E2: Peso Propio + manguito uniforme en todos los vanos*

Este escenario busca maximizar el esfuerzo de tiro sobre el propio conductor a fin de verificar su posible falla por efecto de la sobrecarga de nieve. Si bien se sabe que el evento fue localizado por lo observado en la línea de 33 KV, el mayor valor de tiro que el conductor puede tener, el valor “techo”, es para el caso en que todos los vanos hayan sido cargados con nieve.

- *E3: Peso Propio + manguito en 1 vano*

En este caso se obtiene la situación extrema y opuesta a la anterior, se considera que toda la línea está descargada, el evento ha sido localizado y sólo tenemos cargado un vano, el central. Esto genera el mayor desequilibrio posible entre uno de los vanos y los laterales. Se busca el efecto que produce la sobrecarga de nieve localizada para distintos espesores de manguito.

- *E4: Peso Propio + manguito en 3 vanos*

Este escenario contempla una acción localizada sobre un tramo más amplio de la línea, considera el efecto que generan tres vanos con sobrecarga por manguito y el resto de los vanos descargados.

- *E5: Peso Propio + manguito en 1 vano + Viento*

Finalmente, se evalúa el efecto del viento sobre la línea considerando la sobrecarga localizada por manguito en un único vano. El viento se supondrá aplicado en toda la extensión de la línea, contemplando el incremento de área producto de la formación del manguito.

Resulta importante destacar que se presentan únicamente estos escenarios porque representan con gran acierto los efectos posibles de sobrecarga, localizados, parcialmente localizados y uniformes. En todos los casos intermedios de sobrecarga desbalanceada (con 2, 4, 5, 6 vanos cargados, etc.), la variación de los parámetros analizados no resulta significativa.

Los escenarios de carga localizada sobre un tramo resultan coherentes con los daños observados en la línea de 33kV paralela a la línea bajo estudio. A continuación, se explica brevemente la manera en que se realiza la carga de la estructura en SAP2000.

Primero, se define los patrones de carga (Load Patterns) que vamos a usar:

- PP: carga de peso propio.
- NIEVE1: sobrecarga por manguito de 1 cm de espesor
- NIEVE2: sobrecarga por manguito de 2 cm de espesor
-
- NIEVE8: sobrecarga por manguito de 8 cm de espesor
- 010: sobrecarga por manguito 1 cm de espesor en vano central y 0 cm en los 16 restantes.
- 020: sobrecarga por manguito 2 cm de espesor en vano central y 0 cm en los 16 restantes.
-
- 080: sobrecarga por manguito 8 cm de espesor en vano central y 0 cm en los 16 restantes.
- 01110: sobrecarga por manguito 1 cm de espesor en los 3 vanos centrales y 0 cm en los 14 restantes.
- 02220: sobrecarga por manguito 2 cm de espesor en los 3 vanos centrales y 0 cm en los 14 restantes.
-
- 08880: sobrecarga por manguito 8 cm de espesor en los 3 vanos centrales y 0 cm en los 14 restantes.
- 01110 V: sobrecarga por manguito 1 cm de espesor en los 3 vanos centrales y 0 cm en los restantes, más la sobrecarga por viento lateral para 1 cm.
- 02220 V: sobrecarga por manguito 2 cm de espesor en los 3 vanos centrales y 0 cm en los restantes, más la sobrecarga por viento lateral para 2 cm.

- ...
- 08880 V: sobrecarga por manguito de 8 cm de espesor en los 3 vanos centrales y nada en los restantes, más la sobrecarga por viento lateral para 8 cm.

Segundo, se define los casos de carga (Load Cases). En este caso se utilizó los mismos nombres antes mencionados. La configuración es la siguiente:

- PP: se selecciona en “cargas aplicadas” el patrón de carga correspondiente, en este caso “PP”. En “tipo de caso de carga” se selecciona “Estático”. En “tipo de análisis” se selecciona “No lineal”. En “condiciones iniciales” se selecciona “Condiciones iniciales cero - Comenzar desde un estado sin tensión”.
- NIEVE1: se selecciona en “cargas aplicadas” el patrón de carga “NIEVE1”. En “tipo de caso de carga” se selecciona “Estático”. En “tipo de análisis” se selecciona “No lineal”. En “condiciones iniciales” se selecciona “Continuar desde el estado final del caso no lineal” y se selecciona el estado anterior, en este caso “PP”.
- NIEVE2: se selecciona en “cargas aplicadas” el patrón de carga “NIEVE2”. En “tipo de caso de carga” se selecciona “Estático”. En “tipo de análisis” se selecciona “No lineal”. En “condiciones iniciales” se selecciona “Continuar desde el estado final del caso no lineal” y se selecciona el estado anterior, en este caso “NIEVE1”.

Este procedimiento se repite para cada caso de carga. Para los casos de carga desbalanceada, por ejemplo “01110”, se indica que continúe desde el estado anterior “PP”, para el caso “02220” que comience desde “01110”, etc. Para los casos de carga desbalanceada con viento lateral, por ejemplo “01110 V”, el procedimiento es análogo.

Tercero, se asigna a los cables las cargas distribuidas correspondientes.

Para el caso de “PP” no se asigna ninguna carga ya que, en el patrón de carga correspondiente “PP”, el “tipo de carga” es “Dead” y el “multiplicador de peso propio” es “1”, es decir, el programa lo tiene en cuenta en función de la densidad asignada.

Para los casos restantes, el “tipo de carga” es “Snow/Wind/Other” y el “multiplicador de peso propio” es “0”. Entonces, se selecciona el/los cables a cargar bajo el estado de carga que se esté programando, se aplica el incremento de carga correspondiente y se selecciona el patrón de carga al que corresponde.

Para el caso de cargas desbalanceadas con viento, se aplican los incrementos de cargas verticales debido al peso del manguito y los incrementos de cargas horizontales debidas al viento

sobre el manguito en el mismo patrón de carga. Por ejemplo, para “01110 V”, se aplican las cargas verticales debido 1 cm de espesor sobre los 3 vanos centrales, luego se agrega a la anterior las cargas horizontales que correspondan por viento y se selecciona como “patrón de carga” “01110 V”

Las imágenes siguientes muestran, a modo de ejemplo, lo mencionado respecto a la configuración del caso de carga no lineal, para “PP” y para “NIEVE1”.

Fig. 88 - Configuración de caso de carga no lineal (PP)

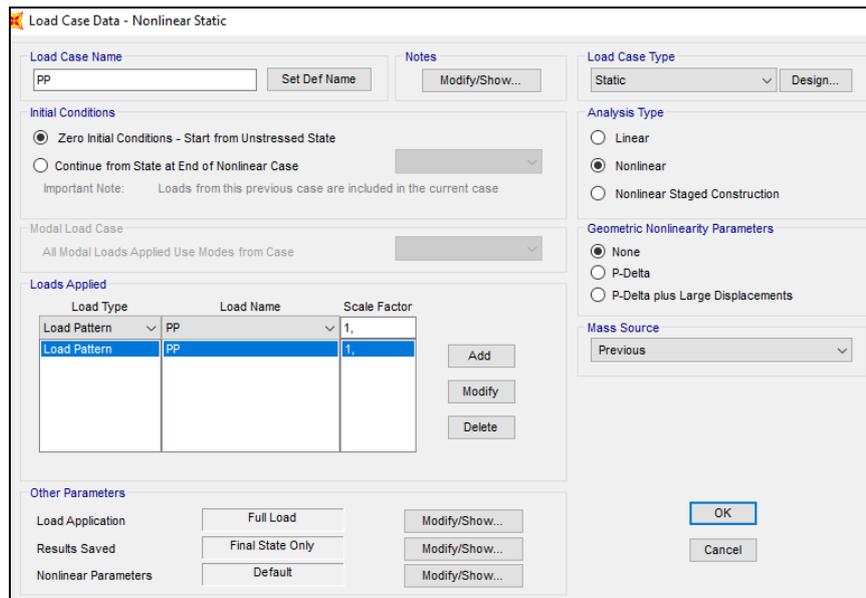
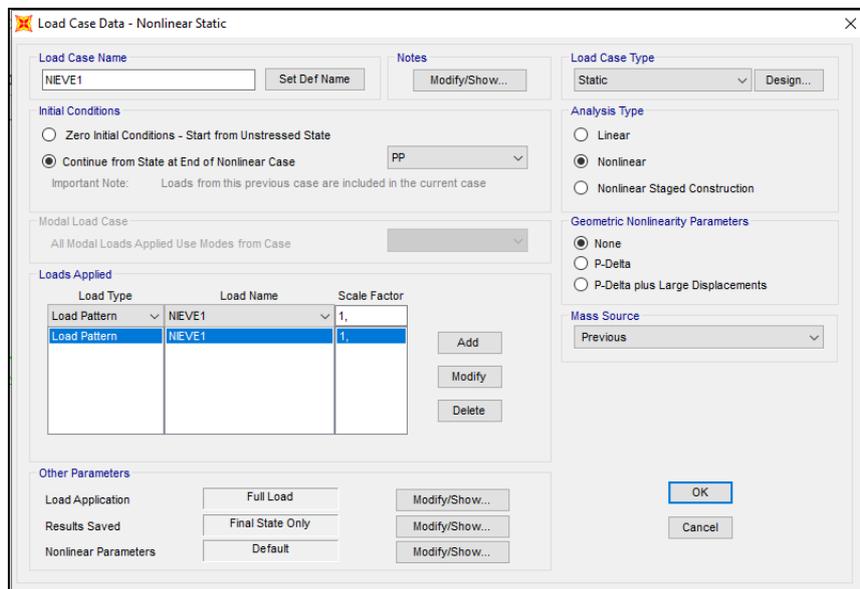


Fig. 89 - Configuración de caso de carga no lineal (NIEVE1)



6.6.4. Resultados obtenidos:

- Escenario E1:

Para tener una idea de los valores normales en ausencia del evento climático se plantea un escenario contemplando únicamente la acción del peso propio del cable, obteniendo una fuerza de tiro del conductor de 8,5 KN. Valor que resulta muy por debajo de los 53,6 KN correspondientes a la resistencia del cable.

En la Fig. 90 se representa la distribución de esfuerzos de tiro en el conductor suponiendo únicamente la acción del peso propio del mismo. Por otra parte, en la Fig. 91 se representan las reacciones de la ménsula sobre el conductor.

Fig. 90 - Esfuerzos sobre el conductor (F_t) para PP

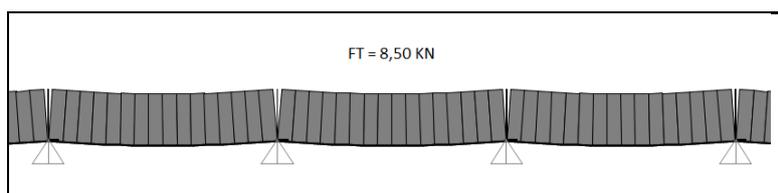
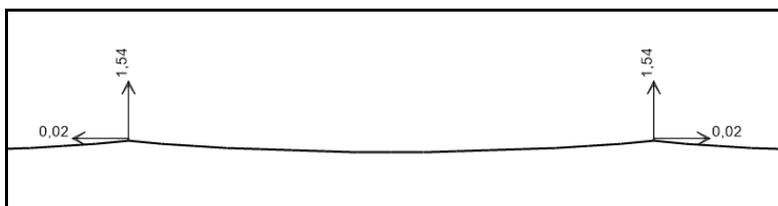


Fig. 91 - Reacciones en la ménsula (F_v) y (F_h) para PP



- **Escenario E2:**

Corresponde al escenario de nieve uniforme en todos los vanos, considerando que todos están cargados uniformemente con manguito. Se realizó un análisis para distintos espesores de manguito en incrementos de 1 cm y para cada espesor se obtuvo la fuerza de tiro que se genera sobre el conductor y las reacciones en la ménsula. Estando todos los vanos igual de cargados, las acciones sobre la ménsula son únicamente verticales, ya que no hay desequilibrio horizontal en esta situación.

Lo que se busca es maximizar el esfuerzo sobre el conductor. En definitiva, determinar qué tamaño de manguito haría que la línea se corte si estuviera toda la línea cargada con nieve. En la Fig. 92 se representa el esfuerzo de tiro en el conductor para un manguito uniforme en todos los vanos de 1 cm de espesor. En la Tabla 52 se detallan los esfuerzos sobre el conductor y las fuerzas verticales sobre las ménsulas para espesores de manguito de 1 a 8 cm.

Fig. 92 - Esfuerzos sobre el conductor (F_t) p/ Manguito uniforme en todos los vanos

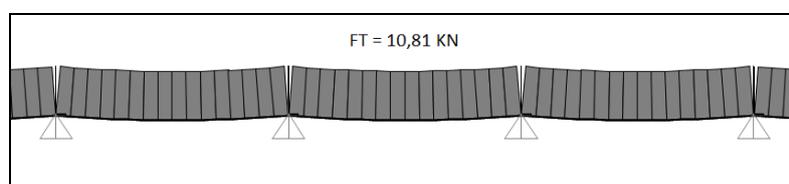


Fig. 93 - Reacciones en la ménsula (F_v) y (F_h) p/ Manguito uniforme en todos los vanos



Tabla 52 - Esfuerzos sobre el conductor (F_t) y sobre la ménsula (F_v)

Esp. de manguito	FT s/Conductor [KN]	FV s/Ménsula [KN]	FH s/Ménsula [KN]
0	8,50	1,53	0
1 cm	10,81	2,18	0
2 cm	15,31	3,31	0
3 cm	21,07	4,93	0
4 cm	27,77	7,03	0
5 cm	35,21	9,61	0
6 cm	43,26	12,67	0
7 cm	51,82	16,22	0
8 cm	60,83	20,26	0

En la Fig. 94 y 95 se representa la variación del esfuerzo de tiro en el conductor (FT) y de las fuerzas verticales sobre la ménsula (FV) en función de los distintos espesores del manguito. La línea horizontal en 53,6 KN representa la resistencia última del cable. Se observa que para manguitos del orden de 7 cm de espesor (15 cm de diámetro) distribuidos de manera uniforme en todos los vanos, la línea colapsaría por rotura del conductor.

Fig. 94- Esfuerzos sobre el conductor (F_t) p/ Manguito uniforme en todos los vanos

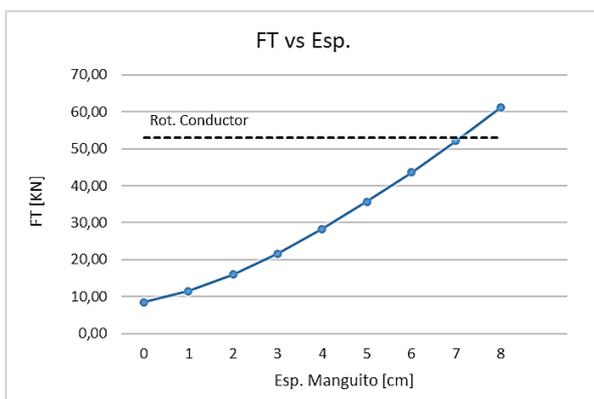
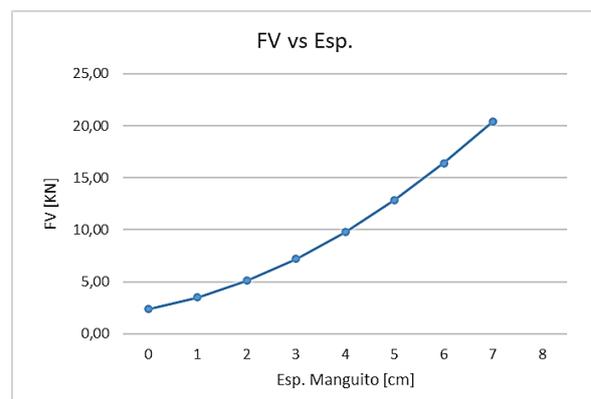


Fig. 95 - Esfuerzos sobre la ménsula (F_v) p/ Manguito uniforme en todos los vanos



Este escenario, además de maximizar el esfuerzo de tiro sobre el conductor, maximiza la reacción vertical sobre las ménsulas.

En la sección anterior (apartado 6.5) se determinó la sobrecarga equivalente que aplicada sobre una de las fases generaría la falla de las torres por flexo-compresión en las secciones analizadas (0,179 KN/m para la sección A y 0,213 KN/m para la sección B). Este mecanismo de rotura queda descartado ya que corresponde a manguitos del orden de 13 cm de espesor, mientras que la rotura del conductor se produce para manguitos de espesores de 7 cm aproximadamente (tabla 53).

Tabla 53 - Espesores de manguito p/ rotura del conductor y rotura por flexo-compresión

Espesor Manguito [cm]	Diámetro Manguito [cm]	Peso [Kg/m]	Peso [N/m]
1	3,71	0,26	2,51
2	5,71	0,70	6,86
3	7,71	1,33	13,06
4	9,71	2,15	21,12
5	11,71	3,16	31,02
6	13,71	4,36	42,77
7	15,71	5,75	56,37
8	17,71	7,32	71,82
9	19,71	9,08	89,12
10	21,71	11,04	108,27
11	23,71	13,18	129,26
12	25,71	15,51	152,11
13	27,71	18,02	176,81
14	29,71	20,73	203,35
15	31,71	23,62	231,74

- *Escenario E3:*

En este escenario se determinan los esfuerzos de tiro sobre el conductor y las fuerzas sobre la ménsula para el caso que uno de los vanos tuviera una sobrecarga por manguito respecto del resto de la línea, lo que genera como ya se dijo, el mayor desequilibrio posible. En la Fig. 96 se representan los esfuerzos de tiro en el conductor para el tramo con sobrecarga y los contiguos para un manguito de 1 cm de espesor. En la Fig. 97 se muestran las reacciones en el extremo de la ménsula. Como se observa, una sobrecarga localizada en un vano, además de incrementar la carga vertical sobre las torres genera fuerzas horizontales.

En este análisis se ve que para 1 cm de espesor ya aparece una fuerza horizontal de 0,81 kN sobre el extremo de la ménsula y con este valor hay un corrimiento del aislador de 50 cm hacia el interior del vano cargado (Fig. 98).

Fig. 96- Esfuerzos sobre el conductor (Ft) p/ Manguito en vano central: (e = 1 cm)

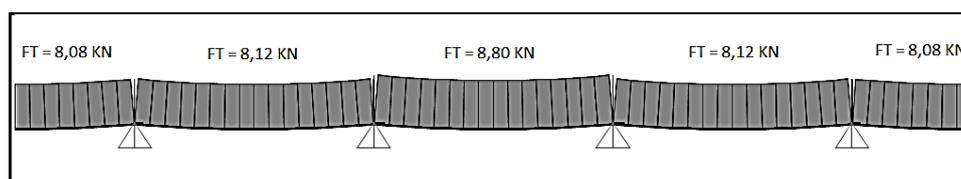


Fig. 97 - Reacciones en la ménsula (F_v) y (F_h) p/ Manguito en vano central:($e = 1 \text{ cm}$)

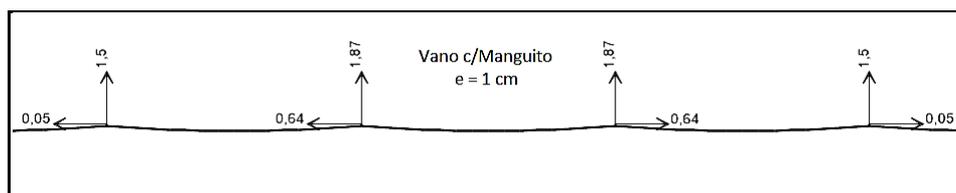
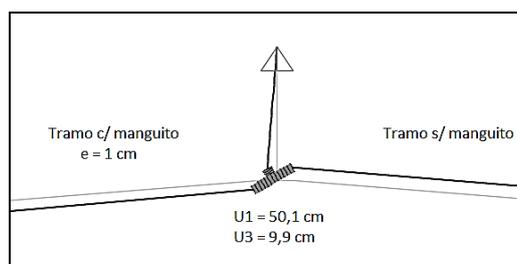


Fig. 98 - Rotación del aislador para $e = 1 \text{ cm}$



En la Tabla 54 se completan los resultados detallando los esfuerzos de tiro en el conductor para el tramo más solicitado (vano con sobrecarga) y las máximas fuerzas horizontales y verticales en el extremo de la ménsula para el conjunto de espesores de manguito analizados.

Tabla 54 - Esfuerzos sobre el conductor (F_t) y sobre la ménsula (F_v) y (F_h) p/ Manguito en vano central

Esp. de manguito	FT s/Conductor [KN]	FV s/Ménsula [KN]	FH s/Ménsula [KN]
0	8,50	1,53	0,00
1 cm	8,80	1,87	0,64
2 cm	10,34	2,44	1,76
3 cm	12,59	3,23	3,40
4 cm	15,48	4,25	5,53
5 cm	18,96	5,51	8,16
6 cm	23,01	7,01	11,27
7 cm	27,59	8,74	14,87
8 cm	32,69	10,72	18,94

En el gráfico de la Fig. 97 se representa la fuerza de tiro del conductor en el tramo más solicitado en función del espesor del manguito. Como se puede ver, si estuviera un solo vano cargado, se necesitaría un espesor bastante mayor a 8 cm para producir la rotura del cable. Es evidente que la situación de rotura del cable es más crítica (se da para espesores menores) si se encuentra toda la línea cargada que si solo lo está un vano. Por eso se dice que el valor hallado en el escenario dos, es un “valor techo” para el valor de la fuerza de tiro.

En el otro gráfico, Fig. 100, se representa la fuerza horizontal sobre la ménsula respecto al espesor del manguito y se indica el inicio de deslizamiento del cable en la grapa, entre los 12 y 14,6 KN. Esto muestra que, para un manguito del orden de 6,5 de espesor, al superar este valor de tiro, el

cable desliza y, por lo tanto, la fuerza de tiro no cambia (deja de aumentar), marcando un límite superior para las fuerzas transferidas a la ménsula.

Además, se indica la fuerza horizontal que provocaría la rotura de la torre por torsión, 7,5 KN (ver apartado 6.5). Como puede observarse, la torre rompe por torsión mucho antes de que la grapa libere el cable.

Fig. 99 - Esfuerzos sobre el conductor (Ft)

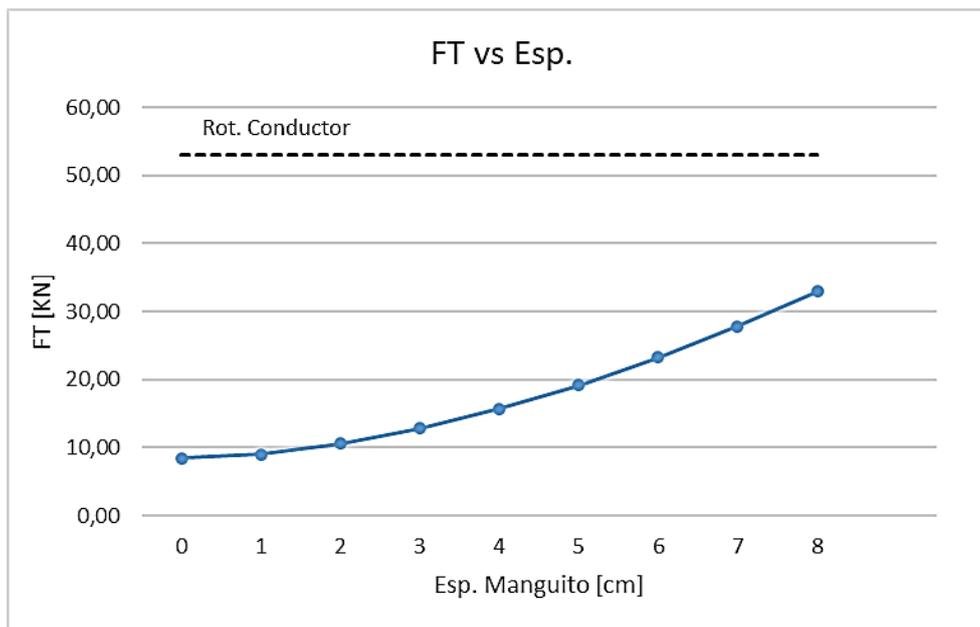
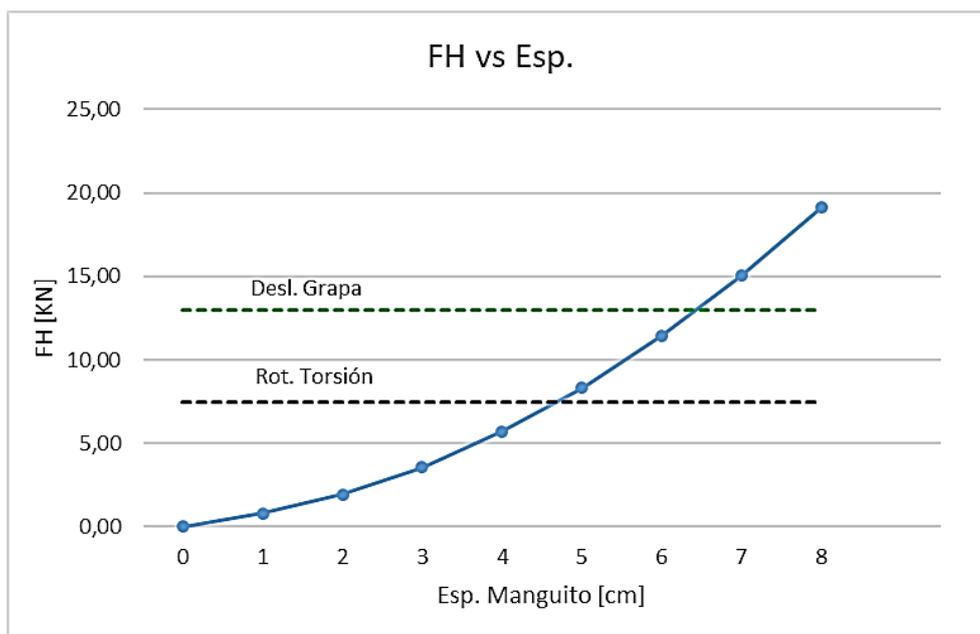


Fig. 100 - Esfuerzos sobre la ménsula (Fh)



En todos los modelos se consideró que no hay deslizamiento entre cable y grapa, simplemente para determinar cuál es la carga que se genera. Se entiende que hasta el valor de deslizamiento la fuerza puede aumentar y transmitirse a la ménsula, luego permanece constante producto del deslizamiento.

- *Escenario E4:*

En este escenario se determinan los esfuerzos de tiro en el conductor y fuerzas sobre ménsula para el caso en que tres vanos centrales reciben una sobrecarga por manguito respecto del resto de la línea, contemplando un efecto localizado un poco más amplio que el anterior. Respecto al anterior, los resultados no cambian considerablemente.

En la Fig. 101 se representan los esfuerzos de tiro en el conductor para los tramos con sobrecarga y los contiguos para una manguita de 1 cm de espesor. En la Fig. 102 se detallan las reacciones en el extremo de la ménsula. Al igual que antes, se observa que debido a la rotación del aislador (Fig. 103) el extremo de la ménsula soporta tanto cargas verticales como horizontales.

Fig. 101 - Esfuerzos sobre el conductor (Ft) p/ Manguito en 3 vanos (e = 1 cm)

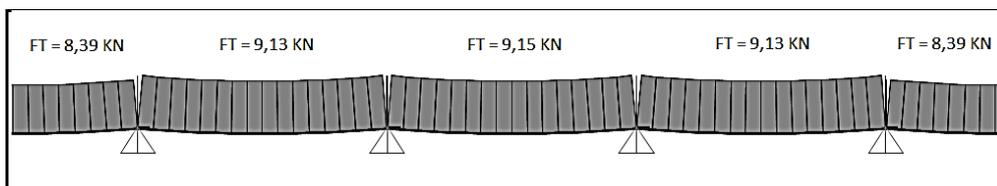


Fig. 102 - Reacciones en la ménsula (Fv) y (Fh) p/ Manguito en 3 vanos (e = 1 cm)

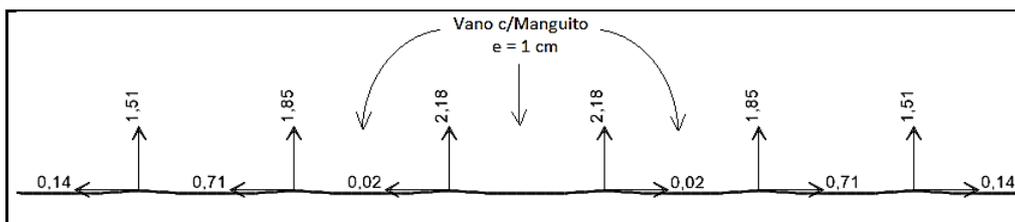
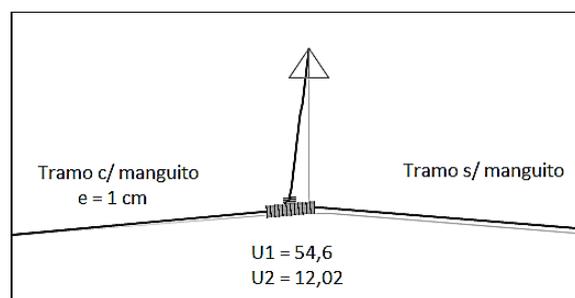


Fig. 103 - Rotación del aislador para e = 1 cm



En la Tabla 55 se completan los resultados detallando los esfuerzos de tiro en el tramo más solicitado del conductor y las máximas fuerzas horizontales y verticales en el extremo de la ménsula para el conjunto de espesores de manguito analizados.

Tabla 55 - Esfuerzos sobre el conductor (F_t) y sobre la ménsula (F_v) y (F_h) p/ Manguito en 3 vanos

Esp. de manguito	FT s/Conductor [KN]	FV s/Ménsula [KN]	FH s/Ménsula [KN]
0	8,50	1,53	0,00
1 cm	9,15	2,18	0,71
2 cm	11,35	3,29	1,94
3 cm	14,52	4,84	3,76
4 cm	18,56	6,85	6,16
5 cm	23,38	9,31	9,12
6 cm	28,93	12,22	12,63
7 cm	35,16	15,58	16,70
8 cm	42,02	19,40	21,31

En el gráfico de la Fig. 104 se representa la fuerza de tiro del conductor en el tramo más solicitado en función del espesor del manguito. Como se puede ver, si estuvieran tres vanos cargados, se necesitaría un espesor superior a 8 cm para producir la rotura del cable. La situación de rotura del cable es más crítica (se da para espesores menores) que para el caso anterior.

En el otro gráfico, Fig. 105, se representa la fuerza horizontal sobre la ménsula respecto al espesor del manguito, se indica el inicio de deslizamiento del cable en la grapa, entre los 12 y 14,6 KN, y la fuerza horizontal que provocaría la rotura de la torre por torsión, 7,5 KN. Esto muestra que, para un manguito del orden de 6 cm de espesor, el cable desliza marcando un límite superior para las fuerzas transferidas a la ménsula, pero la torre rompe por torsión mucho antes de que la grapa libere el cable.

Fig. 104 - Esfuerzos sobre el conductor (Ft) p/ Manguito en 3 vanos

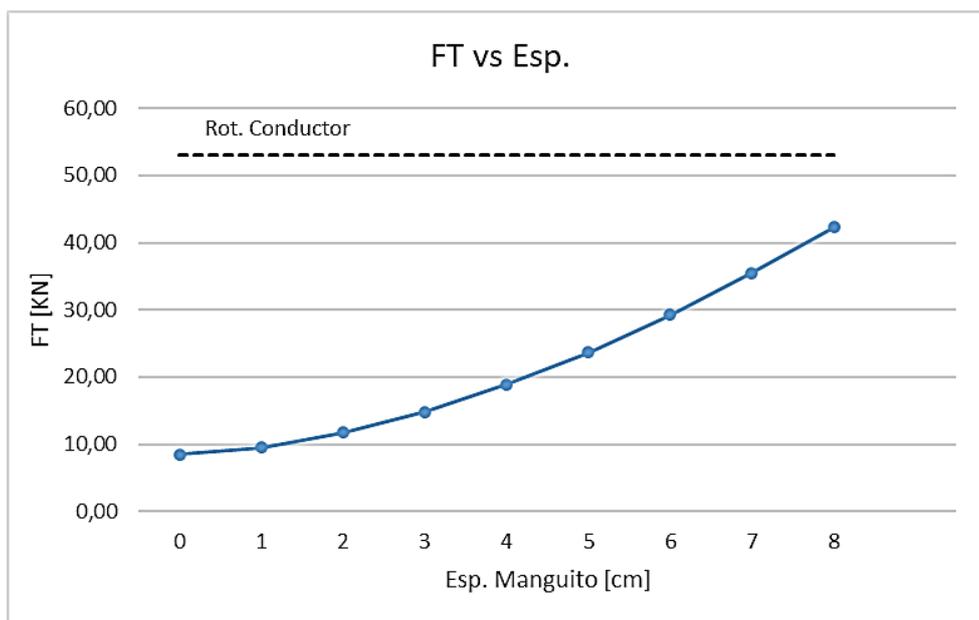
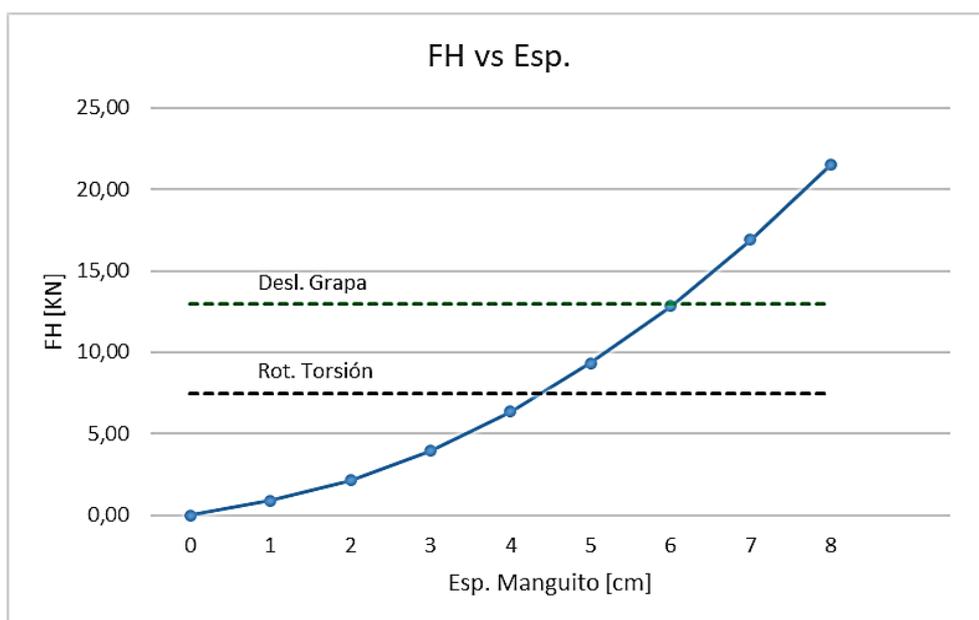


Fig. 105 - Esfuerzos sobre la ménsula (Fh) p/ Manguito en 3 vanos



- **Escenario E5:**

En este escenario se determinan los esfuerzos de tiro en el conductor y las fuerzas sobre la ménsula para el caso donde además de una sobrecarga con manguito, el conductor soporte la acción del viento. En la Tabla 56 se detallan los esfuerzos de tiro en el tramo más solicitado del conductor y las máximas fuerzas horizontales y verticales en el extremo de la ménsula para el conjunto de espesores de manguito analizados.

Tabla 56 - Esfuerzos sobre el conductor (F_t) y sobre la ménsula (F_v) y (F_h) p/ Manguito en 3 vanos + Viento

Esp. de manguito	FT s/Conductor [KN]	FV s/Ménsula [KN]	FH s/Ménsula [KN]
0	9,25	1,53	0,27
1 cm	11,52	2,18	0,89
2 cm	15,28	3,29	2,61
3 cm	19,57	4,84	5,07
4 cm	24,18	6,85	8,02
5 cm	29,15	9,31	11,37
6 cm	34,67	12,22	15,14
7 cm	40,80	15,58	19,38
8 cm	47,54	19,40	24,11

En el gráfico de la Fig. 106, se representa la fuerza de tiro del conductor respecto al espesor de manguito, la curva en azul indica los esfuerzos que aparecen cuando no hay viento (sólo sobrecarga por manguito) y la curva roja cuando además del manguito está la acción del viento. Como se aprecia, para el mismo espesor de manguito, el incremento de tiro que se genera debido al viento es del orden del 10 al 25 % según sea el espesor de manguito. Si bien es un número significativo, se entiende que este porcentaje no debería ser algo que lleva a la estructura del no colapso al colapso. Por lo tanto, el viento que hubo no sería un factor determinante en la rotura de las torres, es decir, contribuye a, pero no es la causa principal. Como se puede ver, si estuvieran tres vanos cargados, se necesitaría un espesor superior a 8 cm para producir la rotura del cable.

En el otro gráfico, Fig. 107, se representa la fuerza horizontal sobre la ménsula respecto al espesor del manguito, se indica el inicio de deslizamiento del cable en la grapa, entre los 12 y 14,6 KN, y la fuerza horizontal que provocaría la rotura de la torre por torsión, 7,5 KN.

Se observa que para que se produzca el deslizamiento del cable en la grapa se requiere de entre 5,5 y 6 cm de espesor de manguito, pero 3,5 - 4 cm de espesor ya lleva a la torre al límite de su resistencia a torsión. Dicho de otra manera, la torre va a romper por torsión antes que la grapa libere el cable.

Fig. 106 - Esfuerzos sobre el conductor (F_t), comparación Manguito en 3 vanos con y sin viento

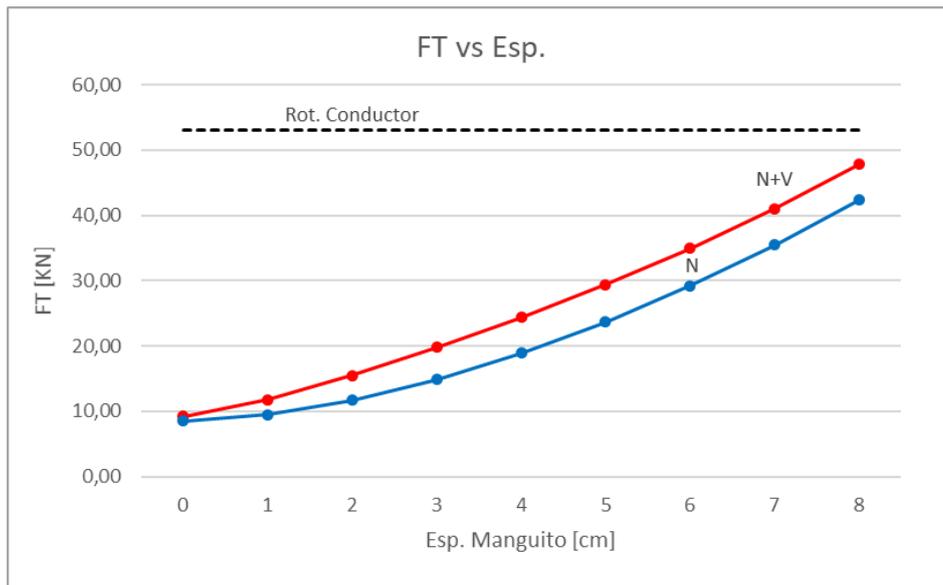
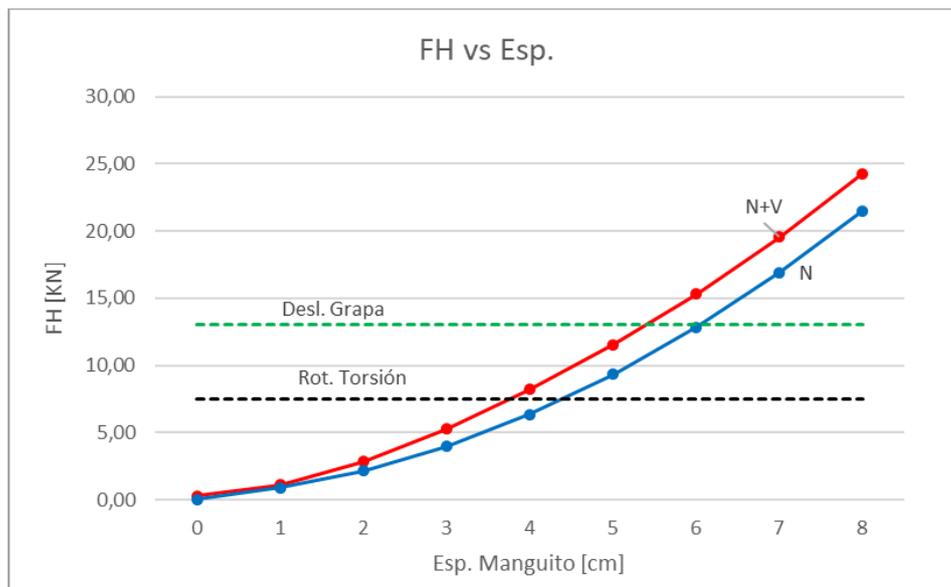


Fig. 107 - Esfuerzos sobre la ménsula (F_h), comparación Manguito en 3 vanos con y sin viento



6.6.5. Síntesis de resultados:

Del análisis del comportamiento estructural del sistema conductor-aislador sujeto a las acciones de peso propio, nieve continua, nieve concentrada en un tramo y viento, resultan las siguientes conclusiones:

- La formación de un manguito de aproximadamente 7 cm de espesor y continuo en toda la línea generaría esfuerzos de tiro en el conductor que superarían su carga de rotura, $P_u = 53,6$ kN.

- Para una distribución de nieve no uniforme en todos los vanos (sobrecargas localizadas) un manguito de espesor entre 5,5 y 6,5 cm produciría un esfuerzo de tiro igual al necesario para iniciar el deslizamiento del cable en grapa de sujeción.
- Para este último escenario, un manguito del orden de 3,5 a 4,5 cm de espesor generaría una fuerza horizontal sobre la ménsula que daría lugar a esfuerzos de torsión iguales a la resistencia última del poste en las secciones de rotura analizadas.
- Si bien el viento contribuye al aumento de esfuerzos de tiro en el conductor, no es un factor determinante en el colapso para el análisis realizado.

Es importante resaltar que la correlación de los esfuerzos alcanzados con los espesores de manguitos, se realizó para el fenómeno de acreción de nieve húmeda adoptando una densidad de 300 kg/m³. Para este tipo de formación las densidades varían entre los 80 y 800 kg/m³ dependiendo de las condiciones climáticas dadas y para los restantes tipos alcanzan los 900 kg/m³. De esta manera, los espesores que darían lugar al colapso serían aún menores.

6.7. Redimensionado del poste

A partir de los análisis realizados en las dos últimas secciones, se determinó como causal principal del colapso de las torres de suspensión la debilidad estructural que presentan ante esfuerzos de torsión, de hecho, la torre no está diseñada para resistir tal esfuerzo.

La evaluación de resistencia realizada indicó que la torre bajo una fuerza horizontal máxima de 7,5 KN sobre el extremo de la ménsula alcanza su resistencia nominal y falla por torsión. Valor muy por debajo de los probables teniendo en cuenta que, eventos como este en la zona de emplazamiento de la línea son totalmente probables y además, la resistencia obtenida, como ya se dijo, es un valor optimista.

Si bien la función de una torre de suspensión, es precisamente suspender la línea, quedó demostrado que, ante cargas desbalanceadas, ya sea por ráfagas de viento o acumulación de nieve desiguales en los vanos, aparecen fuerzas horizontales sobre las ménsulas cuyo valor tope es el de comienzo de deslizamiento de grapa, 12 a 14,6 KN. Teniendo en cuenta que el valor de comienzo de deslizamiento es el doble que el necesario para ocasionar la falla de la torre por torsión, es evidente que el mecanismo de protección ante cargas desequilibradas no cumple su función.

El valor de inicio de deslizamiento podría reducirse lo suficiente para garantizar la liberación antes de la rotura disminuyendo el torque de apriete de los pernos, pero el valor obtenido por el ensayo es coherente con los datos del fabricante (20% de T_u del cable). Además, como este valor es considerablemente menor, el conductor estaría sometido continuamente al deslizamiento y generaría

un desgaste prematuro de la protección anticorrosiva, generando otro tipo de inconvenientes con un costo elevado de mantenimiento.

Por lo anterior, es conveniente aumentar la resistencia a torsión del poste mediante la incorporación de armadura transversal hasta un valor superior al que ocurre la liberación de la grapa. Cabe aclarar que la resistencia que se obtuvo se debe a que se realizó una verificación. Si lo que se estuviese haciendo fuese un diseño, la resistencia sería cero ya que ésta la provee la armadura y en este caso no existe. Todo el esfuerzo fue transferido al hormigón pretensado y las barras longitudinales, por lo que es coherente que el colapso haya ocurrido en la parte superior, siendo que es allí donde la sección resistente es menor y las barras han disminuido en cantidad.

Se observa entonces que el poste de la torre presenta un déficit de diseño, no pudiendo afirmar que fuese un “error” ya que no se conoce para qué condiciones se diseñaron en su momento. Aparentemente, y según documentación técnica de CIMALCO (Ver apartado 6.1 “VIII DOCUMENTACIÓN TÉCNICA CIMALCO”), las torres se continúan fabricando en la actualidad bajo los mismos criterios.

Respecto a los ensayos a torsión que realiza el fabricante, es evidente que si la torre no cuenta con armadura transversal resistente no se puede garantizar que esa resistencia permanezca en el tiempo, porque cuando la torre comienza a fisurarse la resistencia inmediatamente disminuye. La única manera de garantizar una resistencia torsional permanente en el tiempo es con armadura a torsión.

Este apartado está destinado a obtener un diseño más seguro. Se busca obtener la armadura transversal necesaria para que el poste de la torre de suspensión sea capaz de resistir los esfuerzos de torsión generados al menos hasta que se produzca la liberación del cable en la grapa.

El diseño de armadura se realiza para la sección A que fue la que presentó la menor resistencia nominal a torsión. A continuación, se presentan los cálculos de resistencia a corte y torsión según los procedimientos admitidos por el Reglamento CIRSOC 201.

6.7.1. Resistencia a Corte:

El diseño de las secciones transversales sometidas a esfuerzos de corte se basa en la siguiente expresión:

$$\phi V_n \geq V_u$$

Siendo:

- V_u : el esfuerzo de corte mayorado en la sección considerada
- ϕ : factor de reducción de resistencia para corte (0,75)
- V_n : la resistencia nominal al corte determinada con la siguiente expresión:

$$V_n = V_c + V_s$$

Siendo:

- V_c : la resistencia nominal al corte proporcionada por el hormigón
- V_s : la resistencia nominal al corte proporcionada por la armadura de corte

Como valor de V_u se toma la fuerza de tiro máxima que puede ocurrir en el extremo de la ménsula bajo un esquema de cargas desbalanceadas. Este corresponde al máximo valor de inicio de deslizamiento obtenido en el ensayo de grasas:

$$V_u = 14,35 \text{ KN}$$

$$V_n = 19,13 \text{ KN}$$

La resistencia al corte proporcionada por el hormigón (V_c) en elementos pretensados se determina con la siguiente expresión:

$$V_c = \left(\frac{\sqrt{f'_c}}{20} + 5 \frac{V_u d_p}{M_u} \right) b_w d \begin{cases} \geq \frac{1}{6} \sqrt{f'_c} b_w d \\ \leq 0,4 \sqrt{f'_c} b_w d \text{ ó} \\ \text{el valor dado en los artículos 11.4.4. u 11.4.5} \end{cases}$$

En la expresión anterior se debe considerar el siguiente límite:

$$\frac{V_u d_p}{M_u} \leq 1,0$$

Siendo:

- d y d_p : distancia desde la fibra comprimida a baricentro armadura longitudinal traccionada tesa y no tesa ($d > 0,8 h$)
- b_w : 2 veces espesor de la sección de la columna
- M_u : momento mayorado en simultáneo con V_u

Cálculo de V_c :

Tabla 57 - Cálculo de V_c

$\sqrt{f'_c}$ [Mpa]	b_w [m]	d [m]	d_p [m]	V_u [KN]	M_u [KNm]	V_{c1} [KN]	V_{c2} [KN]	V_{c3} [KN]
5,39	0,07	0,29	0,29	14,35	24,75	47,60	38,08	91,40

La resistencia nominal al corte proporcionada por el hormigón es:

$$V_c = 47,60 \text{ KN}$$

En la tabla anterior:

- Vc2 corresponde al límite inferior:

$$\geq \frac{1}{6} \sqrt{f'_c} b_w d$$

- Vc3 corresponde al límite superior:

$$\leq 0,4 \sqrt{f'_c} b_w d$$

La resistencia al corte que debe ser tomada por la armadura (Vs) es:

$$V_s = V_n - V_c$$

La armadura de corte necesaria se determina mediante la siguiente expresión, siendo (Av/s) la cantidad de acero necesaria por unidad de longitud (cm²/m):

$$V_s = \frac{A_v f_{yt} d}{s}$$

Se debe considerar en todos los casos el siguiente límite superior:

$$V_s \leq \frac{2}{3} \sqrt{f'_c} b_w d$$

En este caso, como la resistencia nominal proporcionada por el hormigón (Vc) es mayor a la resistencia nominal (Vn), no se requiere armadura por corte. Debe colocarse la armadura mínima, pero ésta se verifica luego de determinar la armadura necesaria por torsión.

6.7.2. Resistencia a Torsión

El diseño de las secciones transversales sometidas a esfuerzos de torsión se basa en la siguiente expresión:

$$\phi T_n \geq T_u$$

Siendo:

- Tu: el esfuerzo de torsión mayorado en la sección considerada
- ϕ : factor de reducción de resistencia para torsión (0,75)
- Tn: la resistencia nominal a torsión

Como valor de (Tu) se toma la torsión máxima que puede ocurrir, calculada como la fuerza de tiro anterior (14,35 KN) multiplicada por el brazo de palanca que genera la longitud de la ménsula (2,75 m):

$$T_u = 39,46 \text{ KNm}$$

$$T_n = 52,62 \text{ KNm}$$

El reglamento permite ignorar el efecto de la torsión en elementos pretensado cuando el momento torsor mayorado (T_u) resulte menor que $\frac{1}{4}$ del torsor de fisuración:

$$T_u < \frac{1}{12} \phi \sqrt{f'_c} \frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \sqrt{1 + \frac{3 f_{pc}}{\sqrt{f'_c}}}$$

Siendo:

- A_{cp} : área encerrada por el perímetro de la sección transversal de hormigón
- P_{cp} : perímetro exterior de la sección transversal de hormigón
- f_{pc} : tensión de compresión en el hormigón en el baricentro de la sección transversal (luego de ocurridas todas las pérdidas de pretensado)

A continuación, se presenta dicha verificación:

Tabla 58 - Verificación para ignorar efectos de torsión

$\sqrt{f'_c}$ [Mpa]	A_{cp} [m ²]	P_{cp} [m]	f_{pc} [Mpa]	$1/4 T_{cr}$ [KNm]
5,39	0,106	1,156	6,42	7,05

Como $T_u \gg \frac{1}{4} T_{cr}$, no se puede despreciar el efecto de la torsión. Esto resulta totalmente lógico y coherente con las conclusiones que se obtuvieron al realizar la verificación de resistencia de los postes (Sección 6.5).

La armadura necesaria de torsión (A_t/s) se determina de acuerdo con la siguiente expresión:

$$T_n = \frac{2 A_o A_t f_{yt}}{s} \cot g \theta$$

Siendo:

- A_o : área encerrada por la trayectoria del flujo de corte (0,85 A_{oh})
- A_{oh} : área encerrada por el eje de la armadura transversal
- θ : ángulo de las diagonales comprimidas en la analogía del reticulado espacial para torsión (37,5° para elementos pretensados)

Cálculo de la armadura necesaria (A_t/s):

Tabla 59 - Cálculo de la armadura requerida por torsión

T_n [KNm]	A_o [m ²]	A_{oh} [m ²]	f_{yt} [Mpa]	[°]	$\cot g ()$	A_t/s [cm ² /m]
52,62	0,068	0,079	420	37,5	1,3	7,14

A la armadura requerida por torsión se le debe adicionar la armadura requerida para resistir el esfuerzo de corte (en este caso nula). Luego, la armadura transversal total en la sección es:

$$A_v/s = A_v + 2 A_t = 14,28 \text{ cm}^2/\text{m}$$

La armadura mínima por torsión y corte debe ser mayor o igual a los siguientes valores:

$$(A_v + 2 A_t) = \frac{1}{16} \sqrt{f'_c} \frac{b_w s}{f_{yt}} \geq \frac{0,33 b_w s}{f_{yt}}$$

Cálculo de la armadura mínima:

Tabla 60 - Verificación de armadura mínima

$v f'_c$ [MPa]	b_w [m]	f_{yt} [MPa]	d [m]	A_{ps} [cm ²]	f_{pu} [MPa]	A_v/s Min1 [cm ² /m]	A_v/s Min2
5,39	0,07	420	0,29	2,12	1800,33	1,16	1,13

La armadura necesaria es mayor a la mínima, por lo tanto, verifica.

6.7.3. Esquema de armado

La separación de la armadura de torsión (s) no debe exceder el menor de los valores indicados a continuación:

$$s \leq \begin{cases} \frac{p_h}{8} \\ 300 \text{ mm} \end{cases}$$

Siendo (Ph) el perímetro del eje de la armadura a torsión.

Además, la armadura transversal en los elementos solicitados a compresión debe cumplir con las siguientes condiciones:

- Separación vertical de estribos:

$$s \begin{cases} \leq 12 \text{ diámetros de la barra longitudinal,} \\ \leq 48 \text{ diámetros de la barra o alambre de los estribos,} \\ \leq \text{dimensión del lado menor de la columna.} \end{cases}$$

- Separación vertical de espiras del zuncho:

$$s \begin{cases} < 80 \text{ mm} \\ > 25 \text{ mm} \\ > 1,33 \text{ del tamaño máximo nominal del agregado grueso} \end{cases}$$

Para el caso de elementos pretensados a compresión, el diámetro mínimo de los estribos es 10 mm.

El cálculo de los límites anteriores se resume en las tablas 61, 62 y 63:

Tabla 61 - Límites por compresión para estribos

Estribos			
Condición	12 Db long.	48 Db estr.	D columna
S [mm] <	240	480	368

Tabla 62 - Límites por compresión para zuncho

Zuncho	
S [mm] <	80
S [mm] >	25

Tabla 63 - Límites por torsión para estribos y zunchos

S [mm] <	ph/8 =	125
	300	

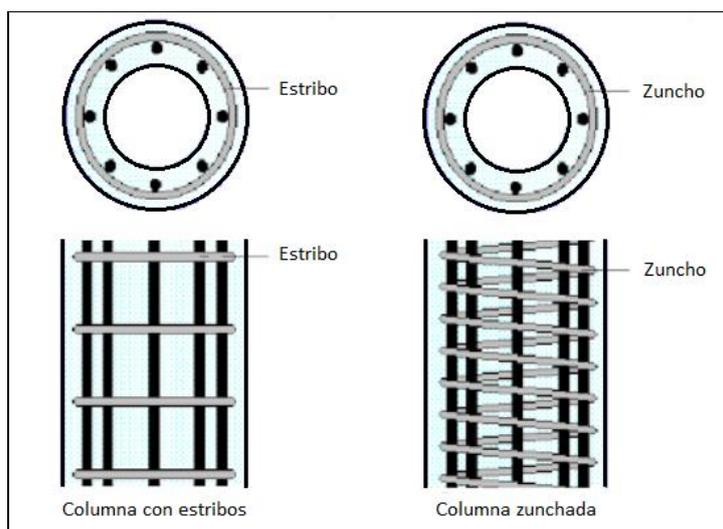
Luego, los esquemas posibles para la armadura transversal son los siguientes:

- Zuncho en espiral con barra de acero 10 mm de diámetro y paso de 5 cm.
- Estribos de 12 mm de diámetro cada 8 cm.

Tabla 64 - Esquemas posibles para la armadura transversal

Armadura	S [cm]	∅ [mm]	Sección [cm ²]	Av/s [cm ² /m]
Estribo	8	12	1,131	14,14
Zuncho	5	10	0,785	15,71

Fig. 108 - Esquemas posibles para la armadura transversal



7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones del análisis:

El colapso de las estructuras de suspensión de la línea analizada, no hay duda, fue originado por la acreción de nieve sobre los cables conductores.

Los estudios climáticos confirmaron una fuerte tendencia a la formación de manguitos cuyas dimensiones podrían haber sido significativas producto de la precipitación de nieve húmeda y un mantenimiento anómalo de las condiciones climáticas. Quizás no 20 cm como indican los modelos, pero sí formaciones de 12 - 13 cm hubieran sido totalmente razonables.

La formación del manguito tiene dos efectos fundamentales sobre la estructura, por un lado, un aumento en la fuerza de tiro del conductor y por otro, cuando se trata de depósitos no continuos, la aparición de fuerzas horizontales no equilibradas sobre el extremo de las ménsulas. Estas solicitaciones son máximas en los vanos más cargados y disminuyen a medida que se alejan de estos, se amortiguan los efectos.

El estudio de deslizamiento de grapa indicó que la liberación del cable se producía cuando la fuerza de tiro alcanzaba entre 12 y 14,6 KN estableciendo un valor máximo para las fuerzas horizontales no equilibradas sobre el extremo de las ménsulas, lo cual, resulta coherente con lo establecido por el fabricante de las mismas, un 25% de la carga de rotura del cable conductor (53,6 KN). Se determinó que tales valores eran alcanzados para manguitos de aproximadamente 6 cm de espesor en depósitos no continuos.

A partir de la evaluación de resistencia realizada para los postes de las torres, se observó que los valores últimos de resistencia a torsión serían superados al producirse una fuerza de tiro no equilibrada sobre el extremo de la ménsula mayor o igual a 7,52 KN, valores alcanzados para

manguitos de aproximadamente 4 cm de espesor en depósitos no continuos. Por lo anterior, se determinó como causal principal del colapso la debilidad estructural que presenta el poste de la torre ante esfuerzos de torsión, entendiendo que, aunque el mecanismo de protección ante cargas desequilibradas funcione perfectamente, la resistencia torsional de las torres no permite el correcto desempeño del conjunto. El tiro máximo que soportan es ampliamente superado por el necesario para producir el deslizamiento relativo entre el cable y la grapa.

Respecto a la acción del viento sobre la línea, se pudo observar que prácticamente no tuvo un efecto significativo sobre el colapso de las torres.

En el análisis realizado, la fuerza desequilibrada que sería causante del colapso, se debió únicamente a una diferencia de sobrecargas de nieve en vanos adyacentes. No se incluyó la posibilidad de desequilibrios por ráfagas de viento desiguales u otros efectos como el Galloping o Ice jumping, que podrían haberse generado, pero quedaron fuera del alcance de este trabajo. Claro está, que cualquier evento que genere un desequilibrio en las cargas de tales magnitudes produciría el mismo efecto sobre las torres.

Respecto a la posibilidad de rotura de los cables conductores por sobrecarga de nieve, ésta quedó descartada dado que el EPEN manifestó lo contrario. No obstante, resulta ser un factor a considerar ya que para que esto ocurra, se requiere la formación de un manguito continuo sobre gran parte de la línea de aproximadamente 7 cm de espesor, valor que se encuentra en el orden de los valores arrojados por los modelos empleados.

Resulta importante resaltar que, si bien las estructuras analizadas son torres de suspensión, cuya única función es suspender la línea y no retener, los valores obtenidos se encuentran muy por debajo de los valores de tiro probables ya que, eventos de esta naturaleza son totalmente factibles sobre todo por la ubicación geográfica de la línea. Además, la fuerza no equilibrada que produce la rotura por torsión es un valor optimista, se ha obtenido una resistencia “techo” al considerar la mejor situación para la evaluación, pero se entiende que, por el estado de fisuración previo que puede observarse en cualquiera de las torres, la resistencia probablemente sería menor.

Por otro lado, como ya se dijo, la correlación de los esfuerzos alcanzados con los espesores de manguitos, se realizó para el fenómeno de acreción de nieve húmeda adoptando una densidad de 300 kg/m³. Para este tipo de formación las densidades varían entre los 80 y 800 kg/m³ dependiendo de las condiciones climáticas dadas y para los restantes tipos alcanzan los 900 kg/m³. De esta manera, los espesores que podrían dar lugar al colapso serían aún menores.

En cuanto al relevamiento de las torres y los ensayos de los materiales componentes, de las 8 torres colapsadas, sólo 7 se encontraban disponibles para inspeccionarlas y todas mantenían en común la zona de rotura, siempre en el tramo superior, entre la segunda y cuarta ménsula. Los ensayos

realizados no indicaron apartamientos significativos de los valores especificados, descartando de esta manera cualquier falla en los mismos.

Cabe mencionar que todo el trabajo realizado fue para verificar el primer colapso, es decir, la rotura de la primera torre de suspensión e inferir el desencadenamiento del colapso en cascada, siendo imposible determinar de manera certera el mecanismo de propagación de la falla.

7.2. Recomendaciones para futuros proyectos:

Entendiendo que el poste de la torre de suspensión presenta un déficit de diseño a torsión y que, como se observó en la documentación técnica provista por CIMALCO, las torres se siguen fabricando actualmente bajo los mismos criterios, las recomendaciones apuntan básicamente a obtener un diseño más seguro, proveyendo la armadura transversal necesaria para resistir la torsión hasta el comienzo de deslizamiento del cable en la grapa, siendo ésta la única manera de garantizar la permanencia de la resistencia en el tiempo.

Por otro lado, en lo que respecta a la sobrecarga por manguito de nieve/hielo sobre las líneas eléctricas, actualmente no existe un procedimiento de cálculo que proporcione un marco de diseño seguro como si lo hay en otros lugares del mundo, o como si lo hay en nuestro país, pero para las cargas de viento y nieve sobre otras estructuras.

La normativa de aplicación para el diseño y cálculo de líneas eléctricas, actualmente vigente, corresponde a la "Reglamentación de Líneas Aéreas Exteriores de Media Tensión y Alta Tensión" (AEA 95301 Ed. 2007). Cuando se profundiza en los criterios de cálculo, se observa que las solicitaciones climáticas se contemplan a partir de una zonificación del territorio nacional y distintas combinaciones de temperatura, viento y eventuales sobrecargas de hielo, pero no se hace referencia a espesores de manguito estimativos, simplemente se aclara la siguiente nota: *"Para considerar el efecto actual del cambio climático que se va manifestando a nivel global, se recomienda la búsqueda local de antecedentes reales en cuanto a la formación de hielo sobre los conductores y/o estructuras. Ya sea por efecto del viento/humedad ambiente o por la compactación de nieve"*. En otras palabras, no habiendo valores, aunque sea de referencia, queda a criterio del proyectista que espesores y densidades tomar para el diseño.

Otro reglamento que, si bien no es el de aplicación, podría servir de referencia, es el "Reglamento Argentino de Estructuras de Acero para Antenas" (CIRSOC 306 Ed. 2018). Éste, tampoco establece una metodología para determinar las sobrecargas por hielo/nieve sobre las riendas o cables, simplemente toma la tabla de espesores de hielo del "Reglamento Argentino de Acción de la Nieve y Hielo sobre las Construcciones" (CIRSOC 104 Ed. 2005) para contemplar el aumento del área proyectada en los cálculos de viento y el incremento del peso de la estructura.

Resulta importante notar que existe un "vacío reglamentario" en cuanto a la determinación de este tipo de cargas, quedando sujeta al buen criterio del proyectista, quien debe iniciar en cualquier caso una investigación y búsqueda de antecedentes en paralelo para tal fin.

Como se pudo observar a lo largo de este trabajo, una correcta determinación de la sobrecarga de hielo/nieve sobre los cables conductores puede ser un factor crítico en el diseño de una línea de transmisión, y dada la envergadura técnica y económica de este tipo de obras, resulta imprescindible poder trabajar con mayor certeza respecto a las cargas climáticas que se esperan, sobre todo cuando se observa, como ocurrió en este caso, que el colapso se desencadenó con tamaños de manguito no excepcionales.

Finalmente, se concluye que para poder evaluar dicho efecto y arribar a diseños seguros en este tipo de estructuras, se requiere un entendimiento completo de este fenómeno complejo y de las causas que lo generan, dando lugar por un lado, a la posibilidad de un nuevo Proyecto Integrador Profesional que aborde este vacío normativo y proporcione un marco de diseño seguro para futuras estructuras de estas características, y por otro, a aquellas instituciones/organizaciones cuya competencia se vea involucrada, lo consideren necesario y quieran abordarlo.

8. ANEXOS

ANEXO A

Ref. II: Conforme a obra de la Línea 132 Kv Cutral Co – Zapala

Nombre del archivo: CAO LAT 132 kV CuCo Zapala -1.pdf

CONFORME A OBRA



1

AGUA Y ENERGIA ELECTRICA

LINEA DE TRANSMISION DE 132 kV

CUTRAL CO - ZAPALA

(Prov.de Neuquen)

MEMORIA DESCRIPTIVA

OBJETO DE LA OBRA

La línea de transmisión une las Estaciones Transformadoras de Cutral C6 y Zapala, operando con una tensión de 132 kV.

CARACTERISTICAS GENERALES

El recorrido de la línea es de 71 Km. atravesando casi exclusivamente zonas rurales, salvo un tramo de aproximadamente 600, en la llegada a S.E. CUTRAL CO, que se consideró zona urbana.

La disposición de conductores es de simple terna en triángulo, para zonas rurales y vertical en zona urbana, en ambos casos con protección contra descargas por medio de un cable de guardia.

La altura libre mínima respecto al suelo es de 7m. en zona rural y 8 m. en zona urbana.

CABLES

Los cables conductores son de aluminio-acero de sección nominal 150/25 mm². y responden a la norma IRAM 2187/70.

El cable de guardia es de acero galvanizado de 50 mm². de sección, según norma IRAM 722, con formación de 19 hilos.

ESTRUCTURAS

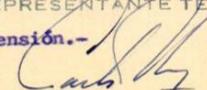
Los apoyos de la línea son de hormigon armado, formados por postes de igual resistencia en todos los planos diametrales, con ménsulas del mismo material. El distanciamiento promedio entre estructuras es de 260 m. en zona rural y 155 m. en zona urbana.

AISLACION

Se utilizaron aisladores de porcelana de unión a rótula, según Norma IRAM 2095, clase 45I.

Las cadenas de aisladores están formadas por nueve (9) elementos en las suspensiones simples y 2 x 10 elementos en las suspensiones y retenciones dobles.

Las chavetas son aptas para mantenimiento bajo tensión.


CARLOS ALVARO RODRIGUEZ
INGENIERO ELECTROMECANICO
ORIENTACION ELECTRICIDAD
MATRICULA N.º 417
JUNTA ELECTROTECNICA

CONFORME A OBRA



-2-

GRAPERIA

La morsetería para cadenas responde a la norma VDE 0210/5-69. Los elementos de protección son raquetas en ambos extremos. El cable conductor está protegido por Armor-Rods del tipo preformado, en todos los puntos de suspensión.

La grapería en general está diseñada para efectuar mantenimiento de la línea bajo tensión.

PUESTA A TIERRA

Todos los extremos de las cadenas de aisladores y el cable de guardia han sido conectados a la armadura metálica de las estructuras de soporte.

A su vez dicha armadura metálica ha sido puesta a tierra por medio de una jabalina de hierro galvanizado de dos (2) metros de longitud, de perfil ángulo de 65 x 65 x 7 mm.

La grapería utilizada para las conexiones es de hierro galvanizado.

En los puntos donde el terreno presentó una alta resistividad eléctrica, se colocó la cantidad necesaria de contrapeso de cable de H^oG^o de 50 mm².

FUNDACIONES

Las fundaciones para estructuras se construyeron de hormigon simple, y han sido calculadas por el método de Sulzberger para coeficientes de compresibilidad variables entre 4 y 8 Kg/cm³., según el caso.

En los puntos particulares se adoptó coeficiente de 2 Kg/cm³. En las zonas con presencia de salitre y suelos agresivos, el hormigon se preparó con cemento especial de alta resistencia a los sulfatos.

TRANSPOSICIONES

Utilizando postes de suspensión se efectuaron tres (3) transposiciones de los conductores, sobre los piquetes N^os. 48 - 49- 50, 142- 143- 144 y 236-237 y 238, con lo que se completó un ciclo.

CAMBIOS DE TRAZADO

La traza original prevista en el proyecto fué modificada en el tramo comprendido entre piquetes 9 y 39, en virtud de que el Aeropuerto de Cutral-Có sufrió un cambio de categoría que obligó a dejar más distancia entre el extremo de la pista y el eje de la Línea. Tal modificación se indica en el Plano N^o 6018-L1-102. También se modificó el trazado en el tramo entre piquetes 264 - 284 por problemas surgidos con los derechos de paso, lo que se indica en el Plano N^o 6018-L1-103.

REPRESENTANTE TECNICO

CARLOS ALVARO RODRIGUEZ
INGENIERO ELECTROMECANICO
ORIENTACION ELECTRICIDAD
MATRICULA N^o 4257
JURISDICCION NACIONAL

CONFORME A OBRA



AGUA Y ENERGIA ELECTRICA

REPRESENTANTE TECNICO

LINEA DE TRANSMISION DE 132 kV CUTRAL CO-

ZAPALA - (Peia.de Neuquen)

COMPUTO DE MATERIALES

CARLOS ALVARO RODRIGUEZ
INGENIERO ELECTROMECANICO
ORIENTACION ELECTRICIDAD
MATRICULA Nº. 4257
JURISDICCION NACIONAL

Item	Descripción	Unidad	Cantidad
1	Estructura de hormigon armado con ménsulas de igual material, de suspensión "S ₁ " - 23,50/1250/3 .	Nº	141
2	Idem, idem, "S ₁ - 1" 22,50/1250/3 .	Nº	79
3	Idem, idem, "S ₁ + 1" 24,50/1250/3.	Nº	29
4	Idem, idem "SU" 22,50/900/3.	Nº	3
5	Idem, idem, de retención "R" 2 x 22,50/300/3.	Nº	14
6	Idem, idem, "R-1" 2x 21,50/750/3	Nº	6
7	Idem, idem, "R + 1" 2 x 23,50/800/3.	Nº	1
8	Idem, idem de retención angular "RA 3°-11°" 2 x 22,50/1150/3.	Nº	3
9	Idem, idem, "RA 25°" 2 x 22,50/1850/3.	Nº	2
10	Idem, idem, "RA + 1-25°" 2 x x 24,50/1900/3	Nº	2
11	Idem, idem "RA 33°19°" 2 x 22,50/1850/3.	Nº	1
12	Idem, idem "RAU 24°" 2 x 26,00/1850/3.	Nº	1
13	Idem, idem de retención angular para cruce de ferrocarril "RACF 35°" 2 x 22,50/2000/3.	Nº	2

A.E.E.

LINEA DE TRANSMISION DE 132 KV CUTRAL CO-ZAPALA
PCIA.DE NEUQUEN

CONFORME A CBR



-2-

Item	Descripción	Unidad	Cantidad
14	Idem, idem, terminal "T" 2 x 22,50/1250/3	Nº	1
15	Idem, idem "TU + 4" 2 x 24,50/ /1800/3.	Nº	1
16	Aisladores de suspensión a ró- tula, s/norma IRAM 2095, clase nominal 45 I.	Nº	10.950
17	Cable de acero galvanizado, de sección nominal 50 mm ² , 19 hi- los, s/norma IRAM 722, galva- nizado tipo pesado, tensión de rotura 110-125 Kg/mm ² .	Km.	71,22
18	Cable de aluminio-acero de sec- ción nominal 150/25 mm ² , s/ norma IRAM 2187/70 .	Km.	213,66
19	Accesorios de suspensión simple para cable Al/Ac 150/25 mm ² . con raquetas en ambos extremos.	Jgo.	750
20	Idem idem, de suspensión doble.	Jgo.	6
21	Accesorios de retención doble para cable Al/Ac 150/25 mm ² . con raquetas en ambos extremos.	Jgo.	204
22	Armor rods preformados para ca- ble Al/Ac 150/25 mm ² .	Jgo.	756
23	Accesorios completos de suspen- sión para cable de acero galva- nizado de 50 mm ² .	Jgo.	252
24	Accesorios completos de retención para cable de acero galvanizado de 50 mm ² . (ambos lados).	Jgo.	34 .
25	Material para la Puesta a tierra completa de una estructura de - poste simple.	Jgo.	252
26	Idem, idem para estructura de pos- te doble.	Jgo.	34

REPRESENTANTE TECNICO

CARLOS ALVARO RODRIGUEZ
INGENIERO ELECTRICISTA
ORIENTACION TECNICA
MATRICULACION N.º 1234
JURISDICCION NACIONAL

A.E.E.

LINEA DE TRANSMISION 132 kV CUTRAL CO- ZAPALA

PCIA. DE NEUQUEN



-3-

Item	Descripción	Unidad	Cantidad
27	Fundaciones de hormigon simple.	m3.	941
28	Fundaciones de hormigon simple con cemento especial A.R.S.	m3.	126
29	Contrapeso de cable de acero galvanizado de 50 mm2.	m	5994
30	Contrapeso para cadena de suspensión.	Kg.	50

CONFORME A OBRA

REPRESENTANTE TECNICO

CARLOS ALVARO RODRIGUEZ
INGENIERO ELECTROMECANICO
ORIENTACION ELECTRICIDAD
MATRICULA N° 4257
JURISDICCION NACIONAL

REPRESENTANTE TÉCNICO

CONFORME A OBRA



-2-

CARLOS ALVARO RODRIGUEZ
INGENIERO ELECTROMECHANICO
ORIENTACION ELECTROCIAD
MATRICULA N.º 4257
JURISDICCION NACIONAL

PLANILLA DE FUNDACIONES

Piquete	Coef.de compresib. Kg/cm3.	Resistiv. Especif. Ω cm.	Excavación (m3.)				Hormigon (m3.)	
			Normal	Duro	Roca	Anegado	Normal	A.R.S.
23	7	19.460	0,958	2,218			2,264	
24	7		0,662	0,994	1,656		2,362	
25	7		0,662	0,994	1,656		2,362	
26	8				0,950	2,218	2,264	
27	8					2,218	2,264	
28	7			0,634	1,267	1,267	2,264	
29	8			3,840	5,760		7,700	
30	8			1,987	1,325		2,362	
31	6			2,218	0,950		2,264	
32	6			2,318	0,994		2,362	
33	6	20.700	3,312				2,362	
34	6		3,312				2,362	
35	6		3,168				2,264	
36	6		3,312				2,362	
37	6		3,168				2,264	
38	6		3,168				2,362	
39	6		7,840	3,360			9,300	
40	6		4,397				3,447	
41	6		3,312				2,362	
42	6		2,318	0,994			2,362	
43	6	3,168				2,264		
44	6	3,312				2,362		
45	6	3,312				2,362		
46	4	11.900	4,541				3,437	
47	4		4,541				3,437	
48	7		0,950	2,218			2,362	
49	6		3,456				2,352	

AGUA Y ENERGIA ELECTRICA
Lic.Pub. N° 7/122
Orden 6018

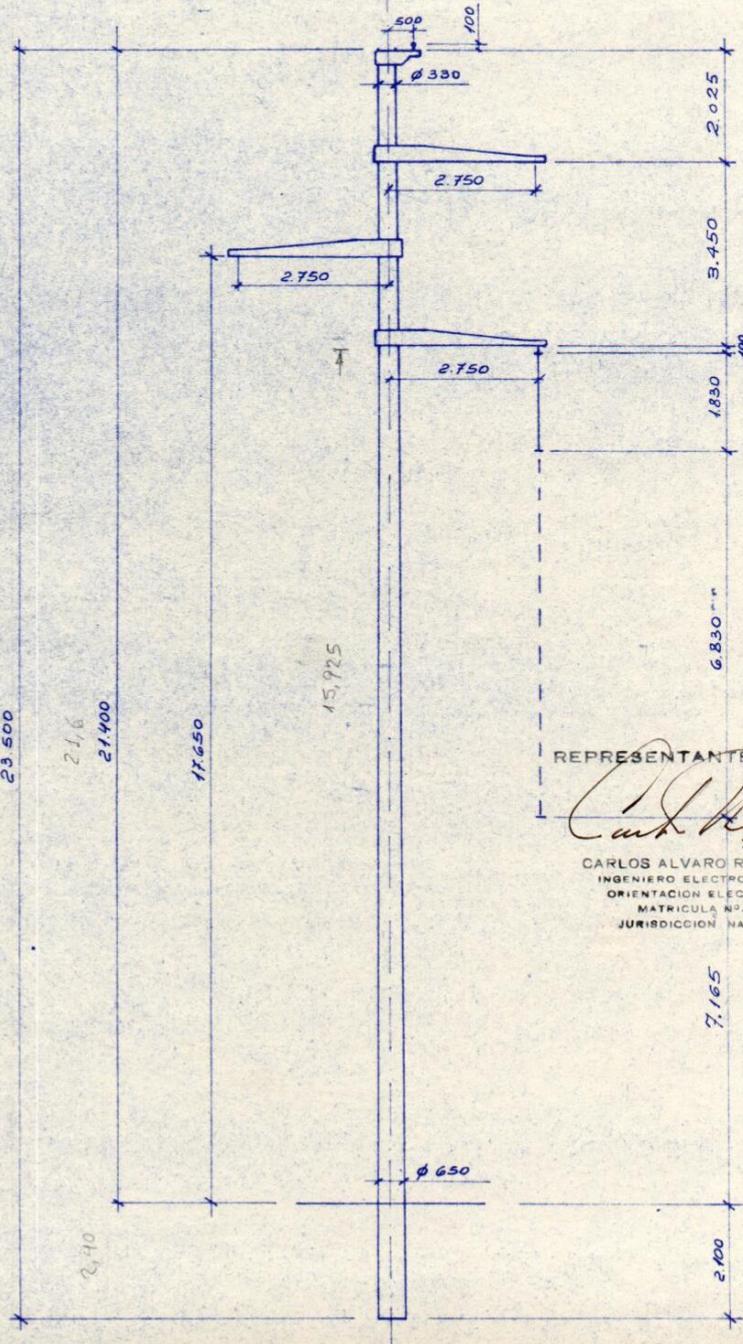
CONFORME A OBRA



23,50/1250/3

ESTRUCTURA DE SUSPENSION NORMAL " S1 "

6018-L2-01/a



REPRESENTANTE TECNICO

CARLOS ALVARO RODRIGUEZ
INGENIERO ELECTROMECANICO
ORIENTACION ELECTRICIDAD
MATRICULA N° 4287
JURISDICCION NACIONAL

24

23.500

21.6

21.400

11.650

15.925

19.37

7.165

2.40

2.100

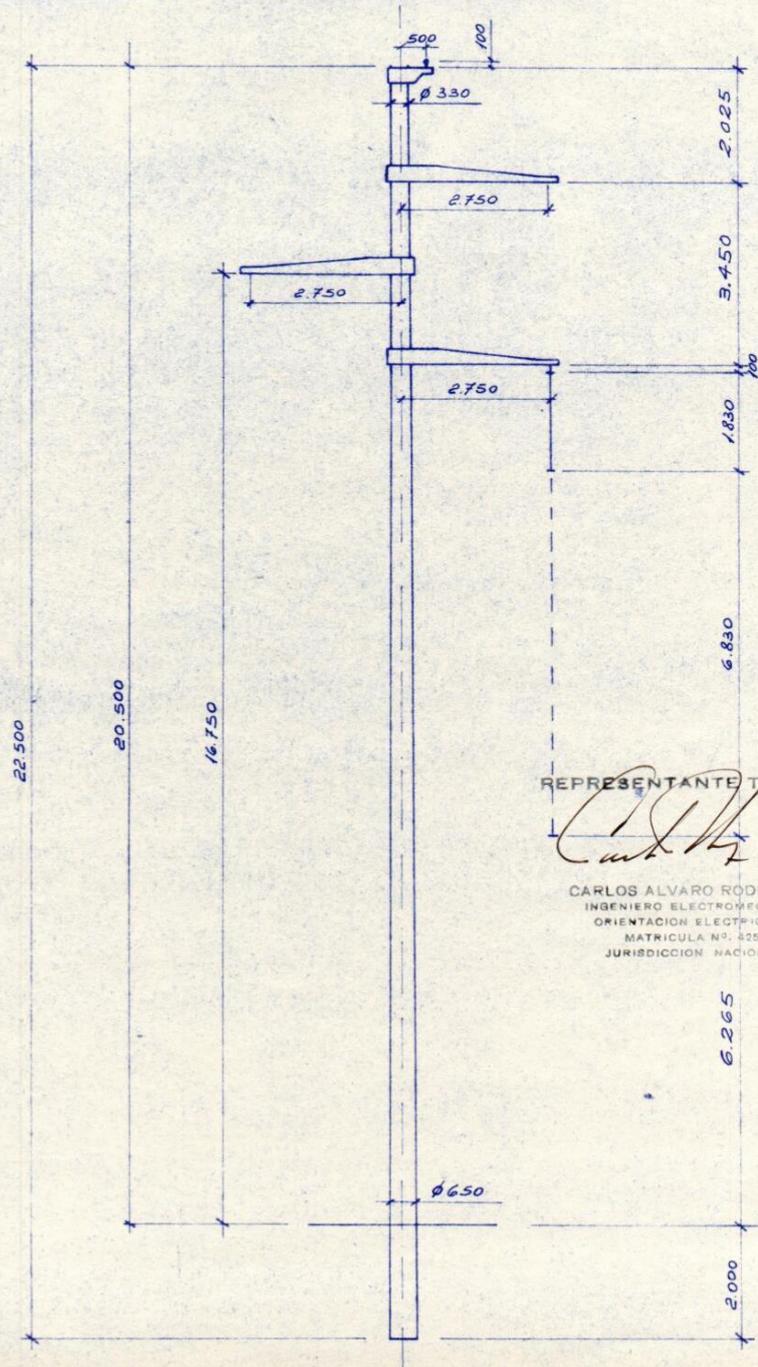
AGUA Y ENERGIA ELECTRICA
Lic.Pub. N° 7/122
Orden 5018
22,50/1250/3

CONFORME A OBRA



ESTRUCTURA DE SUSPENSION " S1- 1"

6018-L2-03/a



REPRESENTANTE TECNICO

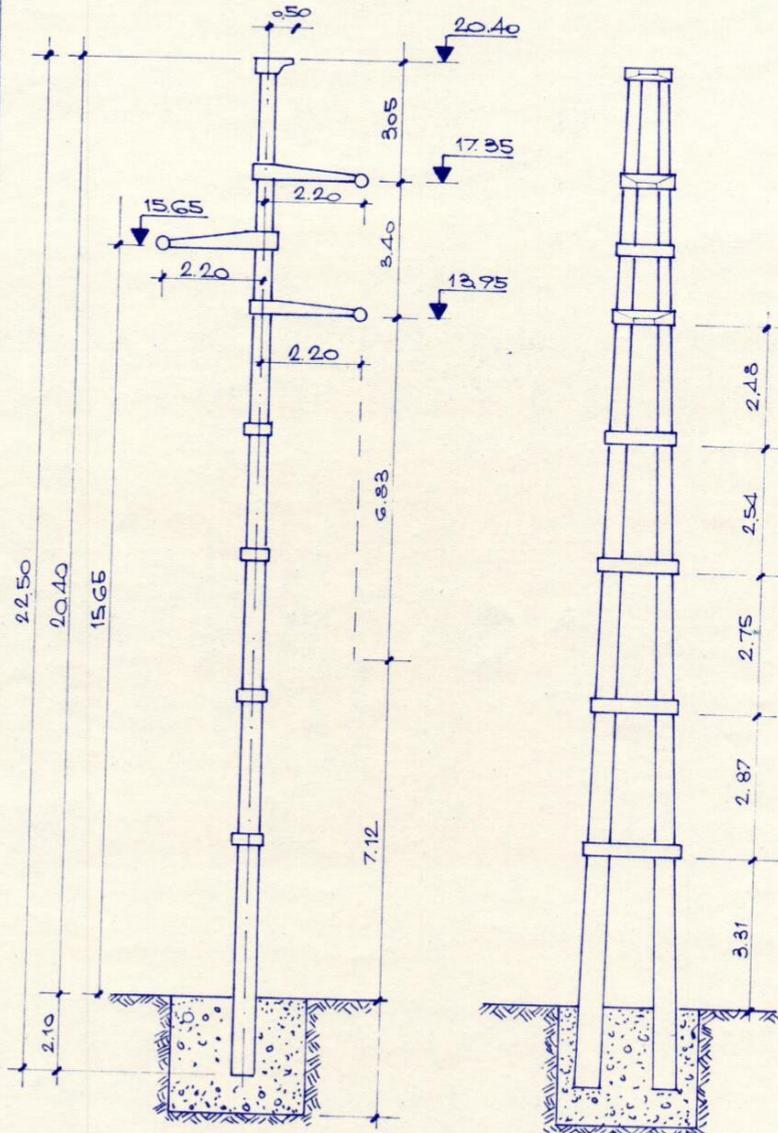
CARLOS ALVARO RODRIGUEZ
INGENIERO ELECTROMECANICO
ORIENTACION ELECTRICIDAD
MATRICULA N° 4257
JURISDICCION NACIONAL

6.265

ESTRUCTURA " R "

2x 22,5/300/3

6018-L2-11



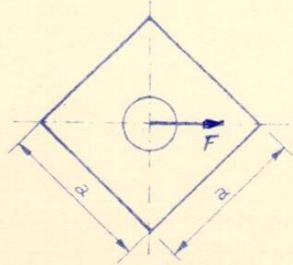
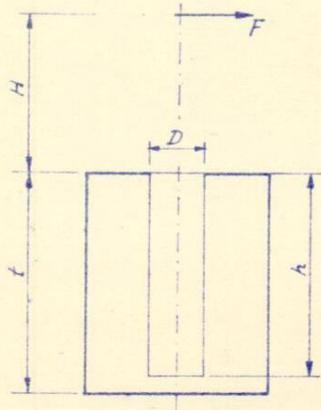
CONFORME A OBRA

REPRESENTANTE TECNICO
[Signature]
CARLOS ALVARO RODRIGUEZ
INGENIERO ELECTROMECANICO
ORIENTACION ELECTRICIDAD
MATRICULA NO. 4257
JURISDICCION NACIONAL

12

L.A.T. 132 KV CUTRAL CO' - ZAPALA

CALCULO DE FUNDACION "S₁"



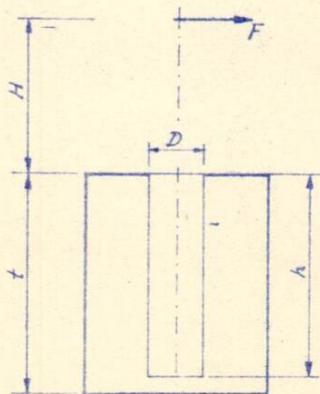
$F = 1.250 \text{ Kg}$
 $H = 21,40 \text{ m}$
 $\delta_h = 2.200 \text{ Kg/m}^3$
 $\delta_t =$
 $\text{tg} \alpha = 0,01$
 $D = 0,80$
 $C_t = C_b = C \frac{t}{2}$

		COEFICIENTE DE COMPRESIBILIDAD (Kg/cm ³)			
		C = 4	C = 6	C = 7	C = 8
DIMENSIONES (m)	a	1,20	REPRESENTANTE TECNICO CARLOS ALVARO RODRIGUEZ INGENIERO ELECTROMECANICO ORIENTACION ELECTRICIDAD MATRICULA NO. 4257 JURISDICCION NACIONAL		
	t	2,30			
	h	2,10			
VOLUMEN DE HORMIGON $V_h = a^2 \cdot t - 0,25 \cdot \pi \cdot D^2 \cdot h$		2,26	<div style="border: 2px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> CONFORME A OBRA </div>		
PESO DE HORMIGON = $V_h \cdot \delta_h$		4.972			
PESO DE POSTE, CABLES, ETC		9.500			
PESO TOTAL : G (Kg)		14.472			
MOMENTO DE VUELCO $M_V = F(H + \frac{2}{3}t)$		28.666			
MOMENTOS ESTABILIZANTES $M_s = \frac{a \cdot t^3}{36} \cdot C_t \cdot \sqrt{2} \cdot \text{tg} \alpha$		26.300	39.450	46.033	52.610
$M_b = G \left[0,707 \cdot a - 0,95 \sqrt{\frac{3 \cdot G}{C_b \cdot \text{tg} \alpha}} \right]$		5.160	6.078	6.382	6.628
PRESION SOBRE EL FONDO $P_f = \frac{G}{a^2} \text{ (Kg/cm}^2\text{)}$		1,005			
COEF. DE SEGURIDAD $C.S. = \frac{M_s + M_b}{M_V}$		1,09	1,58	1,82	2,06

L.A.T. 132 KV CUTRAL CO - ZAPALA

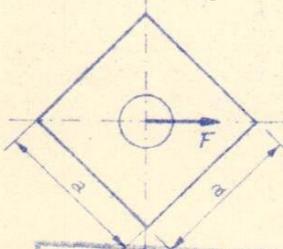
CALCULO DE FUNDACION "S₁-1"

REPRESENTANTE TECNICO



CAH
 CARLOS ALVARO RODRIGUEZ
 INGENIERO ELECTROMECANICO
 ORIENTACION ELECT. CIUDAD
 MATRICULA NO. 4297
 JURISDICCION NACIONAL

F = 1.250 Kg
 H = 20,50 m
 $\delta h = 2.200 \text{ Kg/m}^3$
 $\delta t =$
 $t_g \alpha = 0,01$
 D = 0,80 m
 $C_t = C_b = C \frac{t}{2}$



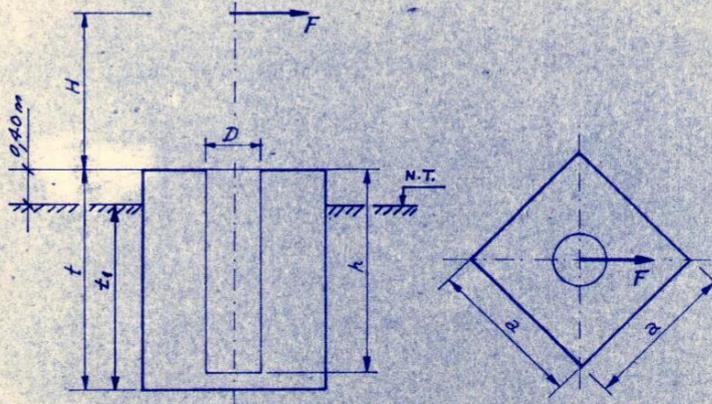
CONFORME A OBRAS

		COEFICIENTE DE COMPRESIBILIDAD (Kg/cm ²)			
		C = 4	C = 6	C = 7	C = 8
DIMENSIONES (m)	a	1,20	1,20	1,20	1,20
	t	2,30	2,20	2,20	2,20
	h	2,00	2,00	2,00	2,00
VOLUMEN DE HORMIGON $V_h = a^2 \cdot t - 0,25 \cdot \pi \cdot D^2 \cdot h$		2,30	2,16	2,16	2,16
PESO DE HORMIGON = $V_h \cdot \delta h$		5.060	4.752	4.752	4.752
PESO DE POSTE, CABLES, ETC		9.000	9.000	9.000	9.000
PESO TOTAL : G (Kg)		14.060	13.752	13.752	13.752
MOMENTO DE VUELCO $M_v = F \left(H + \frac{2}{3} t \right)$		27.541	27.458	27.458	27.458
MOMENTOS ESTABILIZANTES $M_s = \frac{a \cdot t^3}{36} \cdot C_t \cdot \sqrt{2} \cdot t_g \alpha$		26.300	33.000	38.500	44.000
$M_b = G \left[0,707 \cdot a - 0,95 \sqrt{\frac{3 \cdot G}{C_b \cdot t_g \alpha}} \right]$		5.100	5.775	6.070	6.325
PRESION SOBRE EL FONDO $P_f = \frac{G}{a^2} \text{ (Kg/cm}^2\text{)}$		0,97	0,95	0,95	0,95
COEF. DE SEGURIDAD $C.S. = \frac{M_s + M_b}{M_v}$		1,14	1,41	1,62	1,83

AyEE

ESTRUCTURA DE SUSPENSION "S1"

FUNDACION PARA ZONA CON SALITRE

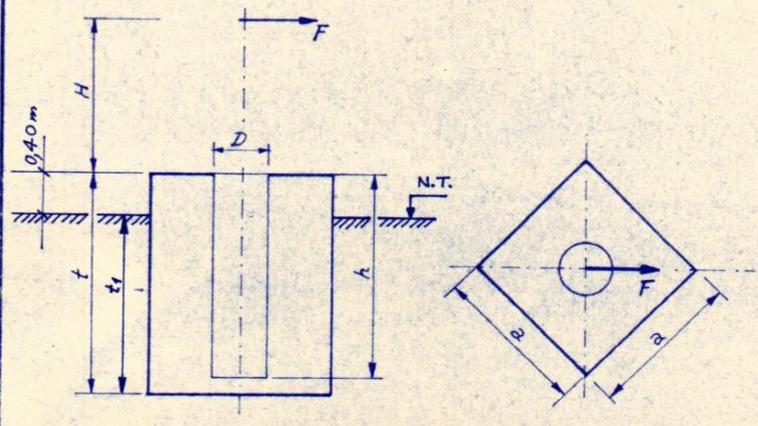


$F = 1.250 \text{ Kg}$
 $H = 21,00 \text{ m}$
 $\delta_h = 2.200 \text{ Kg/m}^3$
 $\delta_t =$
 $t_g \alpha = 0,01$
 $D = 0,80 \text{ m}$
 $C_t = C_b = C \frac{t_g}{2}$

		COEFICIENTE DE COMPRESIBILIDAD (Kg/cm ³)			
		C = 8	C =	C =	C =
DIMENSIONES (m)	a	1,20			
	t	2,70			
	h	2,50			
VOLUMEN DE HORMIGON $V_h = a^2 \cdot t - 0,25 \cdot \pi \cdot D^2 \cdot h$		2,63 m ³	REPRESENTANTE TECNICO CARLOS ALVARO RODRIGUEZ INGENIERO ELECTROMECANICO ORIENTACION ELECTRICIDAD MATRICULA NO. 4257 JURISDICCION NACIONAL		
PESO DE HORMIGON = $V_h \cdot \delta_h$		5.786			
PESO DE POSTE, CABLES, ETC		9.500			
PESO TOTAL : G (Kg)		15.286			
MOMENTO DE VUELCO $M_v = F \left(H + \frac{2}{3} t \right)$		28.666			
MOMENTOS ESTABILIZANTES $M_s = \frac{a \cdot t^3}{36} \cdot C_t \cdot \sqrt{2} \cdot t_g \alpha$		52.610	<div style="border: 2px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> CONFORME A CBEA </div>		
$M_b = G \left[0,707 \cdot a - 0,5 \sqrt{\frac{3 \cdot G}{C_b \cdot t_g \alpha}} \right]$		6.915			
PRESION SOBRE EL FONDO $p_f = \frac{G}{a^2} \text{ (Kg/cm}^2\text{)}$		1,06			
COEF. DE SEGURIDAD $C.S. = \frac{M_s + M_b}{M_v}$		2,07			

1-1-2586-12/71

AyEE ESTRUCTURA DE SUSPENSION "S₁-1"
 FUNDACION PARA ZONA CON SALITRE



F = 1.250 Kg
 H = 20,10 m
 $\delta_h = 2.200 \text{ Kg/m}^3$
 $\delta_t =$
 $\text{tg } \alpha = 0,01$
 D = 0,80 m
 $C_t = C_b = C \frac{t_1}{2}$

		COEFICIENTE DE COMPRESIBILIDAD (Kg/cm ³)			
		C = 8	C =	C =	C =
DIMENSIONES (m)	a	1,20			
	t	2,60			
	h	2,40			
VOLUMEN DE HORMIGON	$V_h = a^2 \cdot t - 0,25 \cdot \pi \cdot D^2 \cdot h$	2,53 m ³	REPRESENTANTE TECNICO CARLOS ALVARO RODRIGUEZ INGENIERO ELECTROMECANICO ORIENTACION ELECTRICIDAD MATRICULA N° 4257 JURISDICCION NACIONAL		
PESO DE HORMIGON = $V_h \cdot \delta_h$	5.566				
PESO DE POSTE, CABLES, ETC	9.000				
PESO TOTAL : G (Kg)	14.566				
MOMENTO DE VUELCO	$M_V = F \cdot (H + \frac{2}{3} t)$	27.458			
MOMENTOS ESTABILIZANTES	$M_s = \frac{a \cdot t^3}{36} \cdot C_t \cdot \sqrt{2} \cdot \text{tg } \alpha$	44.000	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> CONFORME A OBRA </div>		
	$M_b = G \left[0,707 \cdot a - 0,5 \sqrt{\frac{3 \cdot G}{C_b \cdot \text{tg } \alpha}} \right]$	6.589			
PRESION SOBRE EL FONDO	$p_f = \frac{G}{a^2} \text{ (Kg/cm}^2\text{)}$	1,01			
COEF. DE SEGURIDAD	$C.S. = \frac{M_s + M_b}{M_V}$	1,84			

1-7-2490-12-71

A₇EE

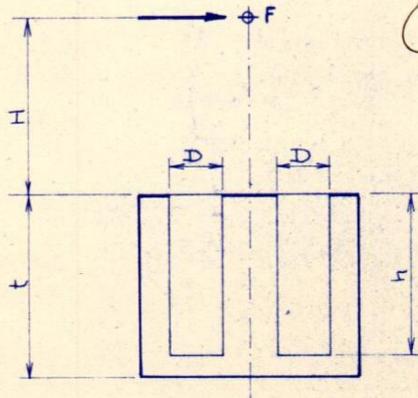
ESTRUCTURA DE RETENCION EN RECTA "R"

CALCULO DE LA FUNDACION

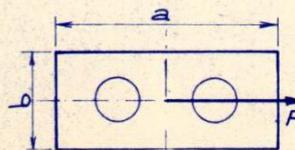


REPRESENTANTE TECNICO

6018-L2-11



CARLOS ALVARO RODRIGUEZ
INGENIERO ELECTROMECANICO
ORIENTACION ELECTRICIDAD
MATRICULA N° 4287
JURISDICCION NACIONAL



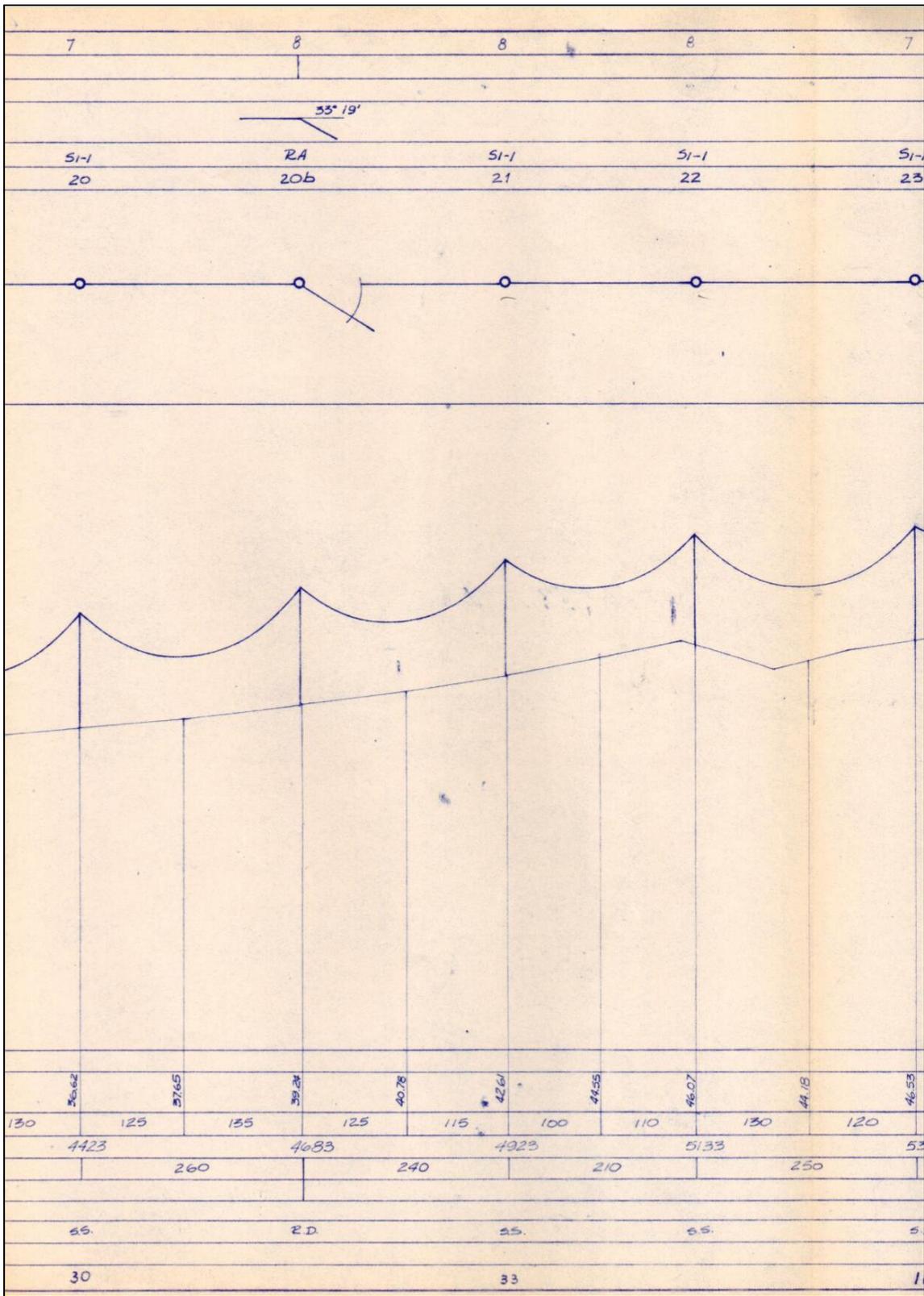
F = 3.665 Kg
H = 20,40 m
S_h = 2.200 Kg/m³
S_t =
tg α = 0,01
D = 0,70 m
C_t = C_b = C $\frac{t}{2}$

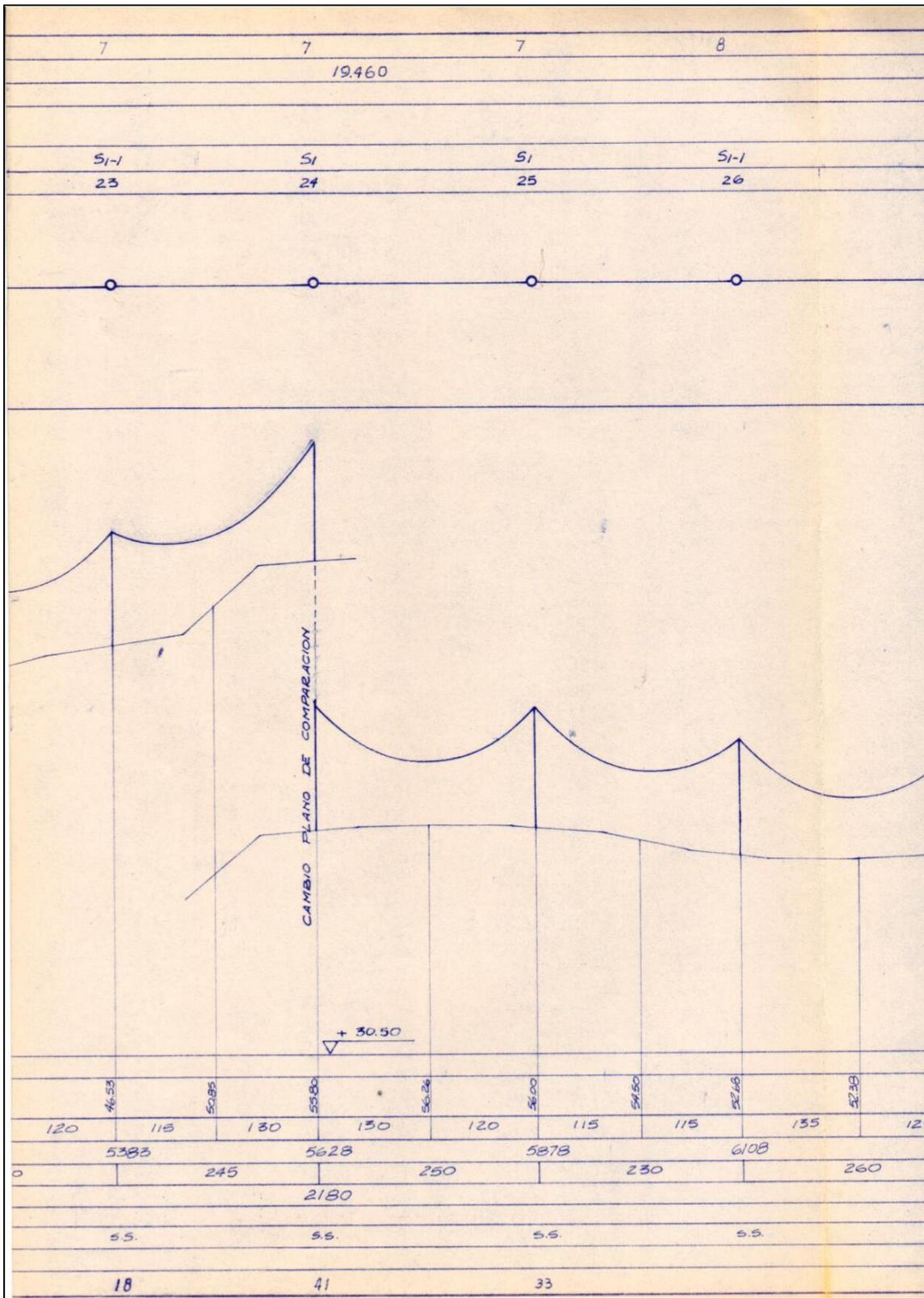
CONFIRME A OBRA

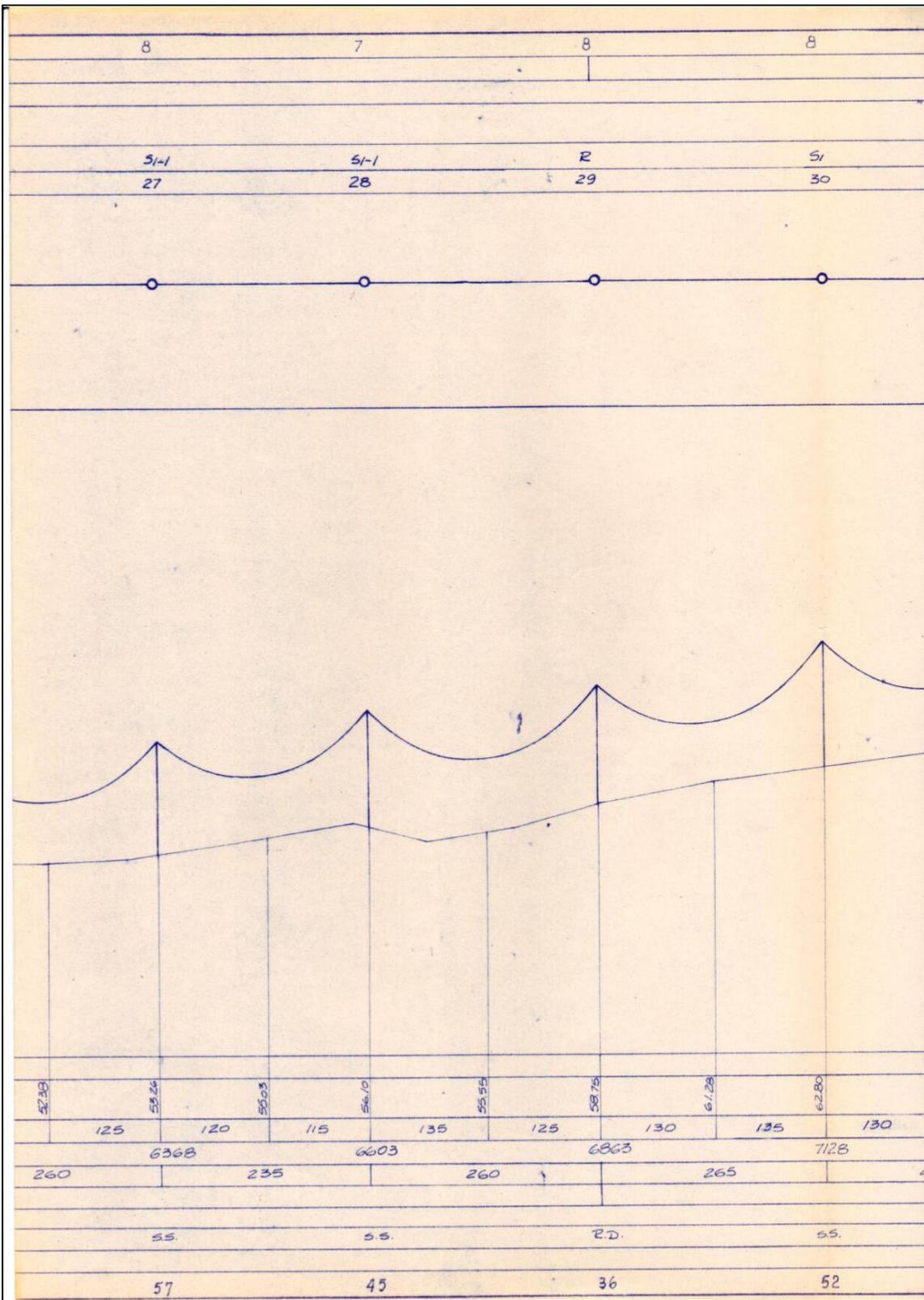
COEFICIENTE DE COMPRESIBILIDAD (Kg/cm²)

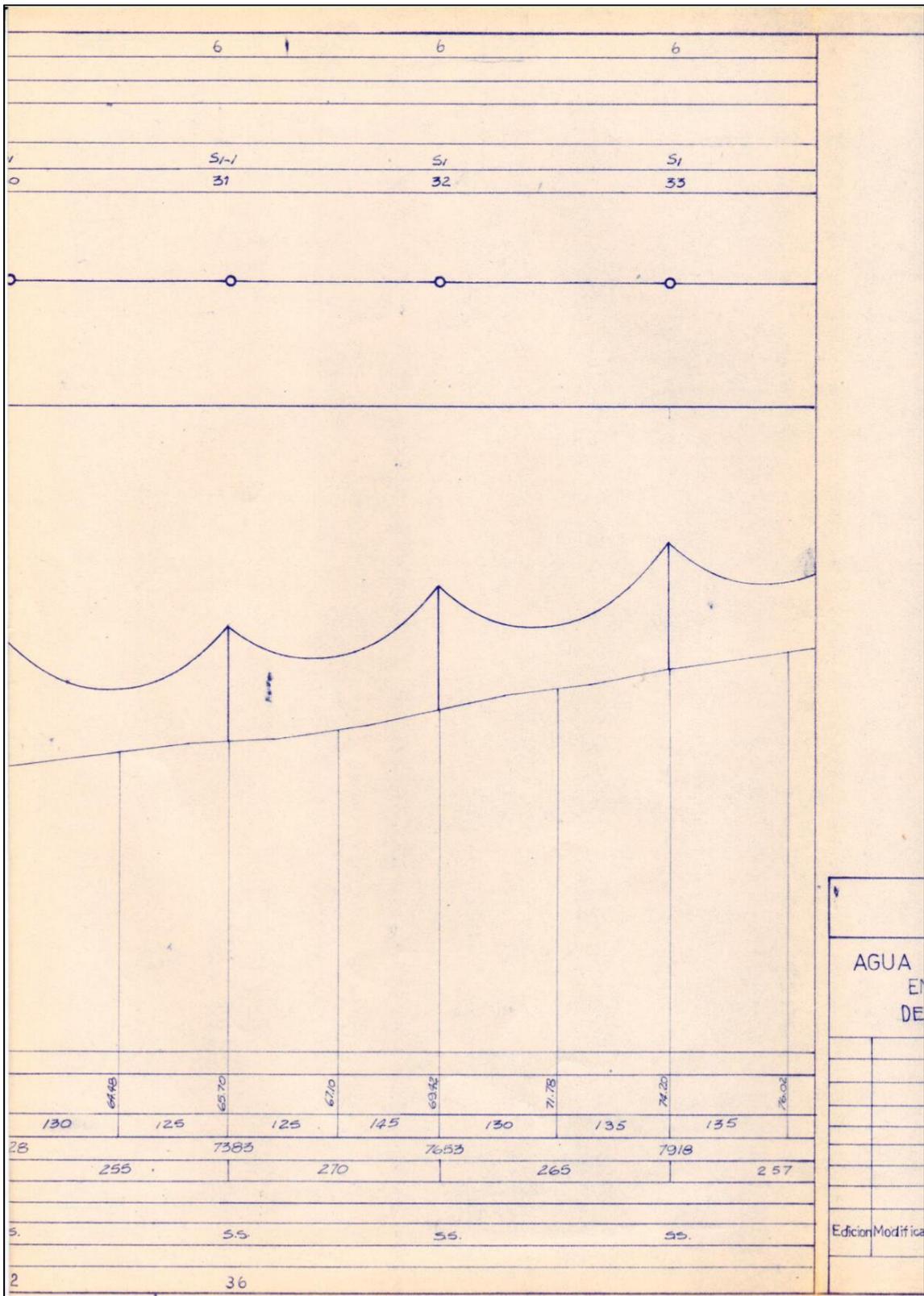
		C = 4	C = 7	C = 8	C =
DIMENSIONES (m)	a	3,40	3,20	3,10	
	b	1,50	1,20	1,20	
	t	2,50	2,50	2,50	
	h	2,10	2,10	2,10	
Vol. Horm = a.b.t - 2 $\frac{\pi \cdot D^2}{4}$ h		11,10 m ³	7,98	7,68	
PESO DE HORMIGON = V _h · S _h		24.420	17.556	16.896	
PESO DE POSTES, CABLES...		16.000	16.000	16.000	
PESO TOTAL : G (Kg)		40.420	33.556	32.896	
MOMENTO DE VUELCO M _v = F(H + $\frac{2}{3}$ t)		80.874	80.874	80.874	
MOMENTOS ESTABILIZANTES M _s = $\frac{b \cdot t^3}{36} \cdot C_t \cdot tg \alpha =$		32.550	45.573	52.083	
M _b = G $[\frac{b}{2} - 0,47 \sqrt{\frac{G}{b \cdot C_b \cdot tg \alpha}}] =$		54.767	44.773	42.893	
PRESION SOBRE EL FONDO P _f = $\frac{G}{a \cdot b}$ (Kg/cm ²)		0,8	0,87	0,88	
COEF. DE SEGURIDAD C.S. = $\frac{M_s + M_b}{M_v}$		1,08	1,11	1,17	

TIPO DE TERRENO $C = \text{kg/cm}^3$	6	7
SUELO $\rho = \Omega \text{ cm}$		
PROPIETARIOS		
ANGULOS Y KILOMETROS		
TIPO DE ESTRUCTURA	51-1	51-1
NUMERO DE ESTRUCTURA	18	19
PLANIMETRIA		
ALTIMETRIA		
COTA DE REFERENCIA	$\nabla 000$	
DESIGNACION DE ESTACAS		
COTA DEL TERRENO	5130	5150
DISTANCIAS PARCIALES	130	130
DISTANCIAS PROGRESIVAS		4183
VANOS	260	240
DISTANCIAS ENTRE AMARRES		3058
VANO IDEAL		
TIPO DE AISLACION		55
OBSERVACIONES		
METROS DE CONTRAPESOC CABLE Ac. 50 mm ²		









INGENIERO EN ELECTRICIDAD TECNICO

CARLOS ALVARO RODRIGUEZ
INGENIERO EN ELECTRICIDAD
INGENIERO EN ELECTRONICA
INGENIERO EN ELECTRICIDAD
COMISION NACIONAL

CONFORME A OBRA

TEYMA S.A.I.C.F.A.				Fecha	Firma	Nº DE PLANO
AGUA Y ENERGIA ELECTRICA EMPRESA DEL ESTADO DEPARTAMENTO DE OBRAS				Proy.		6018-L1-81
				Dibujo		
				Aprob.		
				INSPECCION OBRAS PATAGONICA NORTE		
				LINEA 132 Kv CUTRAL-CO - ZAPALA		
				PLANIALTIMETRIA		
				FECHA	FIRMA	
				DIB.		
				vº Bº		
				Ing. E. Daud		
Edicion	Modificac.	Fecha	Firma	Aprob.	G.I. Nº	ESCALAS
						V 1: 500
						H 1: 5000
						Reemplaza al plano

ANEXO B

Ref. III: Solicitud de datos meteorológicos y estimación del manguito

Nombre del archivo: 19-07-2018 L.A.T. Cutral Co Zapala.pdf

Estimado, disculpe nuestro atrevimiento, pero hemos tomado conocimiento de vuestros reconocidos trabajos técnicos sobre la acumulación de hielo en los conductores de líneas eléctricas de potencia y queríamos reportarle la información que disponemos de una contingencia en el servicio eléctrico que afectó a decenas de miles de personas durante una semana.

En el invierno pasado (19/7/2018) hemos sufrido la rotura de ocho columnas de hormigón armado en la línea de 132kV L.A.T. Cutral Co-Zapala. Ese día 9:41hs, las protecciones actuaron señalizando falla bifásica a una distancia de 49km desde Cutral Co. En el sector indicado, se encuentran importantes manguitos de hielo sobre los conductores que provocaban su acercamiento. Personal de mantenimiento interviene para desprenderlos. Finalizados los trabajos se solicita un intento de reposición (14.25 hs). La señalización cambia a 6.9 km y trifásica. Al llegar al lugar se encuentran las columnas rotas.

No se pudo observar directamente el espesor de hielo acumulado, solo el depósito vertical sobre ciertas columnas y el rastro de los manguitos de hielo (en anexo, Fotos, más adelante)

Los únicos datos meteorológicos disponibles también van adjuntos (Anexo datos meteorológico), corresponden a los registrados en un aeropuerto a 3 km del sitio y tienen una interrupción en horario nocturno (de 20 a 8 hs). El temporal comenzó la noche anterior. Como puede observarse, los valores de temperatura y viento no fueron extremos, las precipitaciones sostenidas y la visibilidad escasa. Las columnas luego de cuarenta años en servicio, no presentaban antes de la contingencia evidencias externas de debilitamiento y los hierros en las roturas no muestran corrosión.

Nuestra duda es si podemos encuadrar el fenómeno, sin antecedentes en la zona, dentro de la categoría "wet snow" y si se puede dar una idea del espesor (y con ello del esfuerzo sobre las estructuras por la acción combinada de hielo y viento) aplicando alguno de los modelos empíricos existentes con tan pocos datos.

¿Se puede correlacionar el espesor alcanzado sobre las columnas al manguito de hielo formado sobre el conductor para estimar su magnitud?

Agradeciendo profundamente vuestra atención, lo saludamos muy atentamente.

Elabora: Cesar H. Cedron
Edita: Diego R. Canavides

Página 1 de 15

Anexo datos meteorológicos



Cutral Co 15 de Agosto 2018

Nota DC N°08/18

Sr. Cesar Horacio Cedrón

EPEN

Me es grato dirigirme a Ud. a fin de responder su solicitud.

A continuación detallo los datos meteorológicos registrados en el Aeropuerto local, desde la hora 16:00 del día 18 de Julio del corriente año, hasta la hora 16:00 del día 19 de Julio del corriente. Es oportuno aclarar, que los datos meteorológicos de cada día, se registran desde las 08:00 am hasta las 20:00 pm.

Día	Hora	Temperatura	Humedad	Presión (en hPa)	Magnitud y dirección del viento (en Km)	Precipitaciones (en mm)	Acumulación de nieve (en cm)
18/07	16:00	0,5°	97	707.6	00 calma		
18/07	17:00	1,4°	96	707.3	00 calma		
18/07	18:00	1°	96	707.4	09 Km Suroeste		
18/07	19:00	1°	93	707.2	09 Km Suroeste		
18/07	20:00	0,5°	99	707.8	09 Km Suroeste		
19/07	08:00	0,6°	100	708.8	27 Km Suroeste		
19/07	09:00	0,5°	96	079.2	27 Km Suroeste	10	3,5
19/07	10:00	0,5°	99	709.4	27 Km Sur		
19/07	11:00	0,5°	99	709.9	27 Km Sur		
19/07	12:00	0,6°	100	710.0	25 Km Sur		
19/07	13:00	0,6°	100	710.8	27 Km Sur Suroeste		
19/07	14:00	0,8°	100	710.7	22 Km Sur		
19/07	15:00	0,8°	100	711.0	28 Km Suroeste	7,5	7,5
19/07	16:00	1°	99	711.1	28 Km Suroeste		

Sin otro particular, saludo atte.

Elabora: Cesar H. Cedron
Edita: Diego R. Canavides

Página 2 de 15

Acumulación vertical



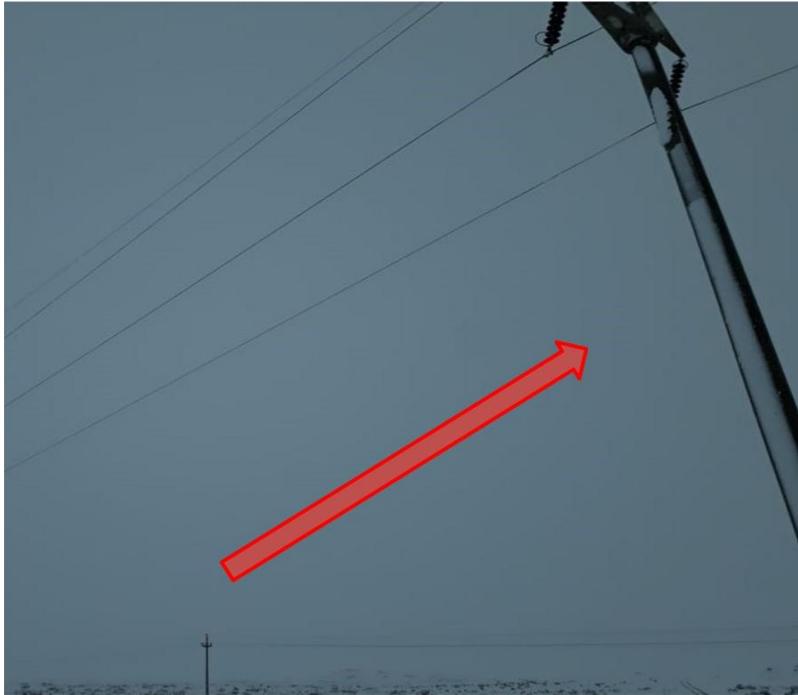
*Elabora: Cesar H. Cedron
Edita: Diego R. Canavides*

Página 3 de 15



Elabora: Cesar H. Cedron
Edita: Diego R. Canavides

Página 4 de 15



*Elabora: Cesar H. Cedron
Edita: Diego R. Canavides*

Página 5 de 15



*Elabora: Cesar H. Cedron
Edita: Diego R. Canavides*

Página 6 de 15

Rastro en el suelo



*Elabora: Cesar H. Cedron
Edita: Diego R. Canavides*

Página 7 de 15



Otras fotos donde se puede ver la magnitud del evento mencionado.



Elabora: Cesar H. Cedron
Edita: Diego R. Canavides

Página 9 de 15



*Elabora: Cesar H. Cedron
Edita: Diego R. Canavides*

Página 10 de 15



*Elabora: Cesar H. Cedron
Edita: Diego R. Canavides*

Página 11 de 15

Adjuntamos unas fotos de la ubicación satelital del lugar del evento.

Ciudad de Cutral Co



Vista Cutral Co y Zapala



Elabora: Cesar H. Cedron
Edita: Diego R. Canavides

Página 12 de 15

Vista alejada



Argentina



Elabora: Cesar H. Cedron
Edita: Diego R. Canavides

Página 13 de 15

L.M.T. Cutral Co Zapala

Citamos además en este último apartado el evento sucedido el mismo día, que comprendió línea de 33kV que sigue la traza de 132kV. Donde se cortan los conductores en las tres fases y produce a su vez el desprendimiento en más de 20 vanos de las atadura. En distintas columnas se rompen las crucetas de hormigón y consecuentemente gira las continuas, mientras en separados vanos arrasa con los pernos centrales de dichas estructuras.

Esto sucede en la misma franja donde transcurre el evento de mayor envergadura, sobre la línea de transmisión de 132kV, se anexan fotos.

Acumulacion de vertical en las columnas



Elabora: Cesar H. Cedron
Edita: Diego R. Canavides

Página 14 de 15



Cesar H. Cedron – email: cecdron@epen.gov.ar

*Elabora: Cesar H. Cedron
Edita: Diego R. Canavides*

Página 15 de 15

ANEXO C

Ref. IV: Acta escribana

Nombre del archivo: Acta 329 - Escribana Sylvia Ines Lopez Alaniz. Emergencia Energética Zona Centro-Oeste - Zapala – 2.pdf



1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25

FOLIO 329.- PRIMER TESTIMONIO.- PROTOCOLO UNICO.- ESCRITURA

NUMERO CIENTO VEINTITRES.- En la Ciudad y Provincia de Neuquén, República Argentina, a veintisiete días del mes de Julio del año dos mil dieciocho, ante mí, Escribana Autorizante, siendo las 11:00 horas, **COMPARECE:** el señor **Francisco ZAMBON**, argentino, Documento Nacional de Identidad N° 16.842.737, quien manifiesta ser casado, domiciliarse en calle Raihue 2498, de Neuquén Capital, persona mayor de edad, hábil a quien identifico en los términos del Artículo 306, inciso b) del Código Civil y Comercial de la Nación.- Y el compareciente **DICE:** Que concurre a este acto invocando su calidad de Presidente del Directorio Ente Provincial de Energía del Neuquén. Que ante la necesidad de verificar el estado en que se encuentran las estructuras de hormigón armado denominadas Piquete N° 23; 24; 25; 26; 27; 28; 30 y 31 de la Línea de Alta Tensión de 132 kilovoltios que desde la localidad de Cutral Co abastece de energía eléctrica a la Ciudad de Zapala; que se encuentran en la zona rural de la localidad de Cutral Co aledaña al aeropuerto de dicha localidad al sur de la Ruta Nacional N° 22, a las cuales desde dicha ruta se pueden acceder y recorrer a través de picadas de tierra abiertas en el campo, es que requiere me constituya a la brevedad posible en el día de la fecha, en el lugar referido acompañada por el Ingeniero Norman Vicente, a fin de constatar la toma de fotografías que se harán, con el fin de que las mismas reflejen lo observado; y cualquier otro hecho dicho o circunstancia que a criterio del ingeniero resulte conveniente para el EPEN. Acepto el requerimiento y leo la presente a la compareciente quien ratifica lo actuado y firma por ante mí, doy fé.- **Firmado:**

Francisco ZAMBON.- ANTE MI, SYLVIA INÉS LOPEZ ALANIZ.- ESTA MI

SELLO.- Acto seguido, siendo las 13.30 comparece ante mí, en esta notaría,



quien manifiesta llamarse Norman René Vicente y que se apersona a solicitud del Presidente del Directorio del EPEN, exhibiendo su documento de Identidad N° 14.748.228, que acredita su identidad y domicilio en calle Monseñor D'Andrea N° 335, de esta Ciudad, nacido el 10/12/1961; agrega ser casado, y de profesión Ingeniero, empleado del EPEN. Ante él luego identificarme doy lectura del requerimiento efectuado por el señor Francisco Zambón. Leído el mismo expresa que él está listo para ir al lugar de Constatación lo que hacemos por vía terrestre.- Tomamos ruta veintidós y nos dirigimos hacia Cutral Có. A indicación del Ingeniero Norman René Vicente se toma una picada a la izquierda quien expresa que al Kilómetro 1336 nos dirigimos a una línea que fue construida alrededor del año 1.975, antes de la creación del EPEN y que desde esa fecha permanece en servicio. Que el día jueves 21 de julio de 2.018 en horario cercano al mediodía se produjo la rotura de las estructuras mencionadas. Exhibe un croquis de la línea de alta tensión afectada, croquis que recibo para ser agregado al acta. Recorriendo una picada, a su indicación observo la existencia de una línea Eléctrica a la que nos acercamos, deteniéndonos frente a una Columna. El Ingeniero expresa que estamos frente al denominado piquete 23. Se toman fotografías. También se hace en los piquetes 24, 25 y 26. En este último piquete a indicación del ingeniero se toma la posición de un GPS marca Garmin-Oregon 550. En ese aparato verifico que indica lo siguiente: E 02473656 N 05688129.- Siendo las 15,20 horas continuamos el recorrido para tomar fotografías en los piquetes 27 y 28. Pasamos por la torre doble 29 y nos detenemos en el piquete 30. Se toman fotografías. Aclara el ingeniero que ésta es la única torre que se debió tirar abajo para poner otra provisoria en su reemplazo.- Nos dirigimos al piquete 30, donde se toman fotografías. El Ingeniero expresa que ésta es la última torre dañada. Se toman

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25



SYLVIA LOPEZ ALANIZ
Escribana Titular
REGISTRO N° 23 - Neuquén



1 fotografías.- Agrega que aquí finaliza el recorrido. Que los daños observados se
2 produjeron luego de haberse registrado en la zona muy bajas temperaturas y una
3 importante nevada. Que por ello se presume que sobre los conductores se
4 depositó una carga de hielo extraordinaria; que el organismo no cuenta con
5 registro de daños similares en dicha línea durante el tiempo de más de cuatro
6 décadas que lleva en servicio; que las causas de las roturas se determinarán
7 luego de los estudios correspondientes. Que es imprescindible dejar constancia
8 de las evidencias visibles actuales que presentan las estructuras dañadas por que
9 la acción de las condiciones climáticas las alterara en el corto plazo. Que la
10 apariencia de las zonas de rotura es evidencia que el colapso se habría producido
11 debido a que las estructuras se vieron sometidas a esfuerzos que agotaron su
12 capacidad resistente porque las evidencias visibles muestran que tanto las zonas
13 de rotura como el resto de cada estructura no presentan signos de disminución de
14 su capacidad resistente con motivo del paso del tiempo. Aclara que las armaduras
15 no presentan signos de corrosión ni de falta de adherencia con el hormigón, y los
16 hormigones no presentan desprendimientos ni manchas de óxido proveniente de
17 armaduras. Que en la estructura denominada Piquete N° 30 se debió demoler
18 completamente desde su arranque para permitir el montaje de una estructura
19 provisional.- Que los restos de la demolición muestran que existía íntima
20 adherencia entre el hormigón y las armaduras, las cuales no presentan signos de
21 corrosión. Que las estructuras denominadas Piquetes N° 23, 24, 25, 26, 27, 28, y
22 31 sufrieron daños de distinto grado en su parte superior pero aún se encuentran
23 en pie. Que en estas siete estructuras se observa que se desprendió la parte
24 superior de la columna en conjunto con parte de los elementos de soporte de los
25 conductores. Que las partes desprendidas no cayeron al suelo sino que fueron

depositadas mediante grúa al pie de cada estructura luego de cortar los hierros que las sostenían. Que por ello algunas armaduras muestran las marcas de corte de las herramientas utilizadas para separarlas del resto de cada estructura. Que las partes depositadas en el suelo muestran que la zona de fractura de estas siete columnas presenta la apariencia típica de armaduras que han estado perfectamente adheridas al hormigón hasta el momento de la rotura. Que en dichas zonas el hormigón muestra la apariencia típica de una rotura debida a esfuerzos que superaron su capacidad resistente, pero no tiene disgregaciones ni evidencias visibles de daños ocasionados por la acción de elementos agresivos.-

No siendo para más, doy por finalizado el acto y por cumplido el requerimiento según lo expresado, dando por constatado las roturas de las torres denominadas piquetes Nº 23; 24; 25; 26; 27; 28; y 31 de la Línea de Alta Tensión ya identificada y que la torre piqueta Nº 30 se encuentra derribada y en su reemplazo la existencia de una estructura provisional y la toma de fotografías, dejando constancia que las misma se certificaran si una vez impresas en dos ejemplares, reflejan fielmente lo observado. Leo la presente al compareciente quien ratifica lo actuado y firma de conformidad ante mí, doy fe.- **Firmado: Norman René**

VICENTE.- ANTE MI, SYLVIA INÉS LOPEZ ALANIZ.- ESTA MI SELLO.- HAY

UNA NOTA MARGINAL QUE DICE: En el día de la fecha, se certificaron dieciséis fojas de fotografías que son fiel reflejo de lo observado, las que se encuentran impresas en dos juegos, uno para ser entregadas al requirente quien las retira de conformidad y el otro juego se agrega al protocolo.- **Firmado:**

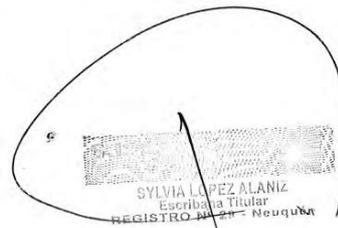
Norman René VICENTE.- ANTE MI, SYLVIA INÉS LOPEZ ALANIZ.- ESTA MI SELLO.-

SYLVIA LOPEZ ALANIZ
Escribana Titular
REGISTRO Nº 29 - Neuquén

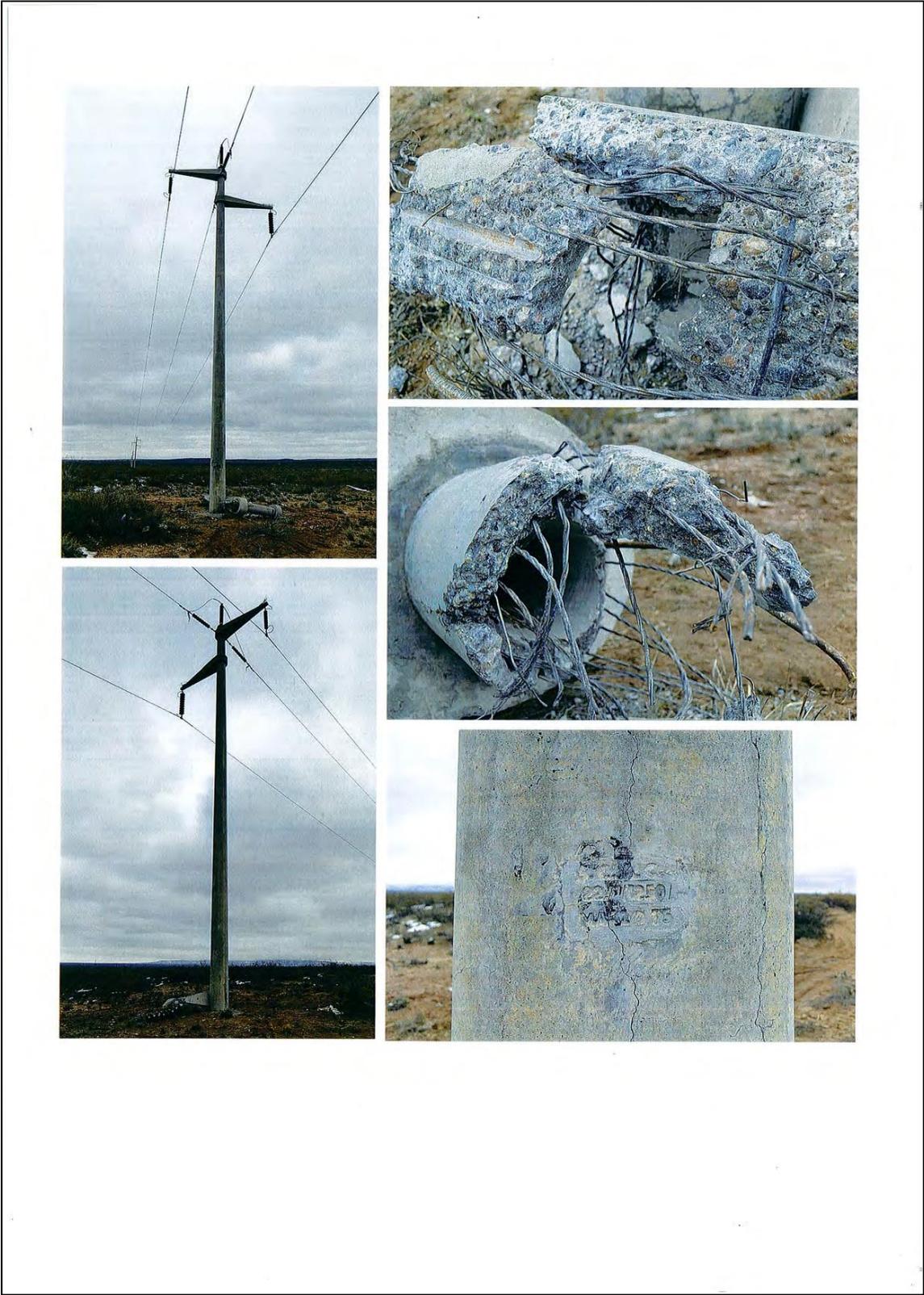


PROCOLO UNICO.-

///CUERDA con su matriz, Escr. Nº 123 ,que obra al Folio 329
del Registro Notarial Nº 29 de Neuquén Capital - - - - -
autorizada por Sylvia Inés Lopez Alaniz - - - - -
para EPEN - - - - -
En mi carácter de Escribana Titular de dicho Registro expido el
presente Primer testimonio en dos fojas de actuación notarial
Nº 01047924, 01047925 - - - - - y esta foja que sello
y firmo en el mismo lugar a los 27 días del mes de Julio
del año 2.018.-


SYLVIA LOPEZ ALANIZ
Escribana Titular
REGISTRO Nº 29 - Neuquén





CERTIFICO: Que las cinco fotografías impresas en el anverso de la presente foja, que lleva mi firma y sello, son copia fiel de lo observado, y corresponden al Piquete N° 23, según consta en escritura número Ciento veintitrés, pasada ante mí en el día de la fecha al folio 329 del protocolo único a mí cargo. Neuquén, 27 de Julio de 2018.-





CERTIFICO: Que la fotografía impresa en el anverso de la presente foja, que lleva mi firma y sello, es copia fiel de lo observado, y corresponde al Piquete N° 23, según consta en escritura número Ciento veintitrés, pasada ante mí en el día de la fecha al folio 329 del protocolo único a mí cargo. Neuquén, 27 de Julio de 2018.-





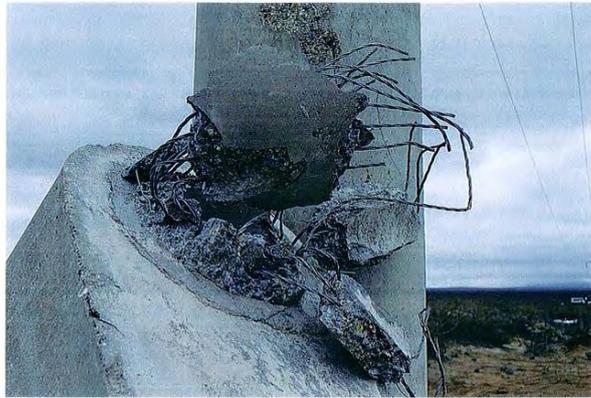
CERTIFICO: Que las cuatro fotografías impresas en el anverso de la presente foja, que lleva mi firma y sello, son copia fiel de lo observado, y corresponde al Piquete N° 24, según consta en escritura número Ciento veintitrés, pasada ante mí en el día de la fecha al folio 329 del protocolo único a mí cargo. Neuquén, 27 de Julio de 2018.-





CERTIFICO: Que la fotografía impresa en el anverso de la presente foja, que lleva mi firma y sello, es copia fiel de lo observado, y corresponde al Piquete N° 24, según consta en escritura número Ciento veintitrés, pasada ante mí en el día de la fecha al folio 329 del protocolo único a mí cargo. Neuquén, 27 de Julio de 2018.-





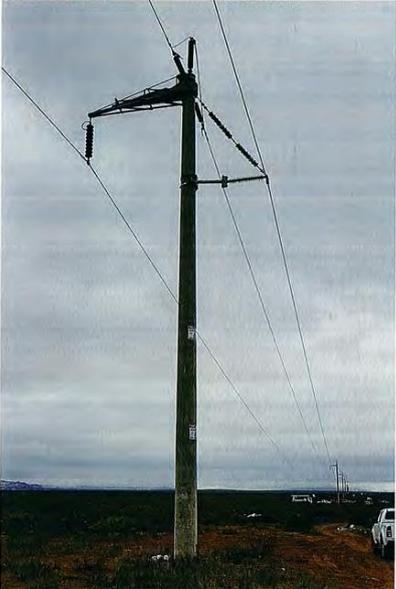
CERTIFICO: Que las cuatro fotografías impresas en el anverso de la presente foja, que lleva mi firma y sello, son copia fiel de lo observado, y corresponden al Piquete N° 25, según consta en escritura número Ciento veintitrés, pasada ante mí en el día de la fecha al folio 329 del protocolo único a mí cargo. Neuquén, 27 de Julio de 2018.-





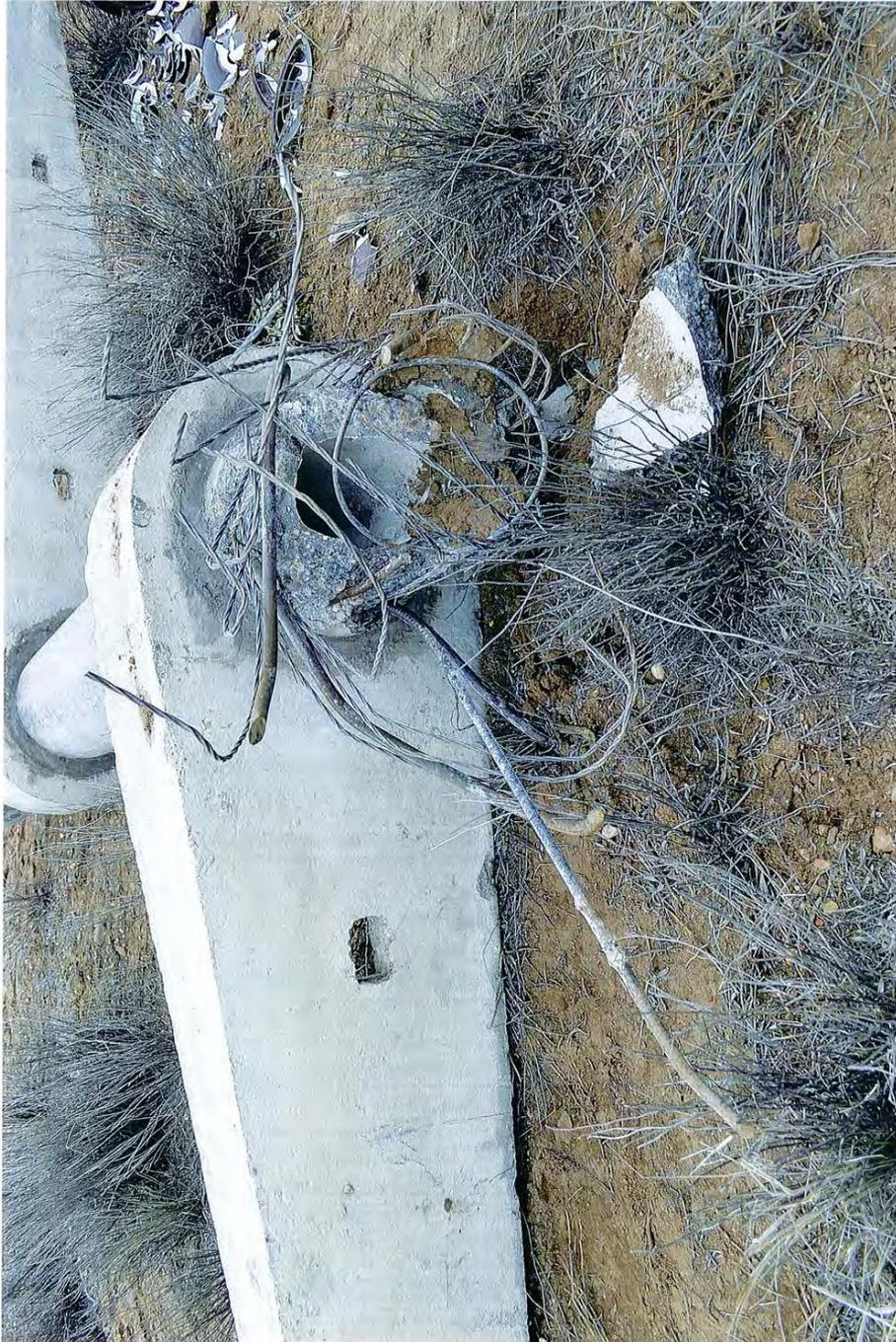
CERTIFICO: Que la fotografía impresa en el anverso de la presente foja, que lleva mi firma y sello, es copia fiel de lo observado, y corresponde al Piquete N° 25, según consta en escritura número Ciento veintitrés, pasada ante mí en el día de la fecha al folio 329 del protocolo único a mi cargo. Neuquén, 27 de Julio de 2018.-



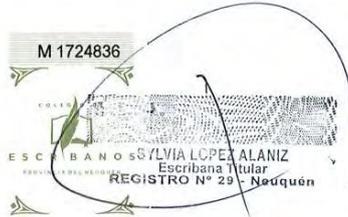


CERTIFICO: Que las cinco fotografías impresas en el anverso de la presente foja, que lleva mi firma y sello, son copia fiel de lo observado, y corresponden al Piquete N° 26, según consta en escritura número Ciento veintitrés, pasada ante mí en el día de la fecha al folio 329 del protocolo único a mí cargo. Neuquén, 27 de Julio de 2018.-





CERTIFICO: Que la fotografía impresa en el anverso de la presente foja, que lleva mi firma y sello, es copia fiel de lo observado, y corresponde al Piquete N° 26, según consta en escritura número Ciento veintitrés, pasada ante mí en el día de la fecha al folio 329 del protocolo único a mí cargo. Neuquén, 27 de Julio de 2018.-





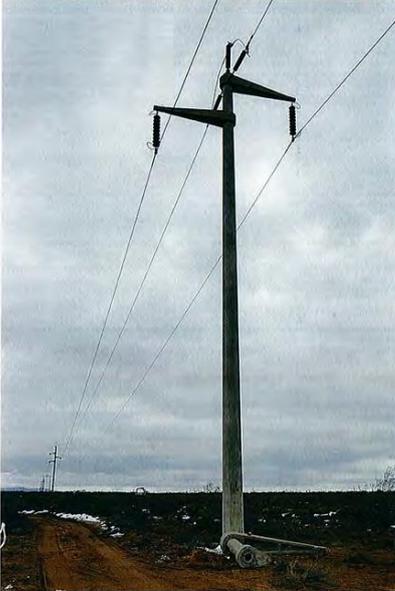
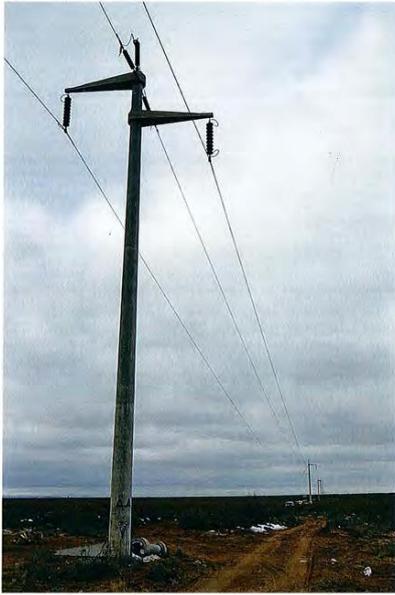
CERTIFICADO: Que las cinco fotografías impresas en el anverso de la presente foja, que lleva mi firma y sello, son copia fiel de lo observado, y corresponden al Piquete N° 27, según consta en escritura número Ciento veintitrés, pasada ante mí en el día de la fecha al folio 329 del protocolo único a mí cargo. Neuquén, 27 de Julio de 2018.-





CERTIFICO: Que la fotografía impresa en el anverso de la presente foja, que lleva mi firma y sello, es copia fiel de lo observado, y corresponde al Piquete N° 27, según consta en escritura número Ciento veintitrés, pasada ante mí en el día de la fecha al folio 329 del protocolo único a mí cargo. Neuquén, 27 de Julio de 2018.-





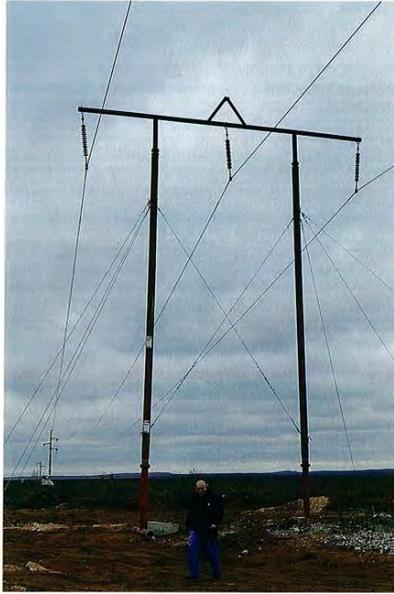
CERTIFICO: Que las cinco fotografías impresas en el anverso de la presente foja, que lleva mi firma y sello, son copia fiel de lo observado, y corresponden al Piquete N° 28, según consta en escritura número Ciento veintitrés, pasada ante mí en el día de la fecha al folio 329 del protocolo único a mí cargo. Neuquén, 27 de Julio de 2018.-



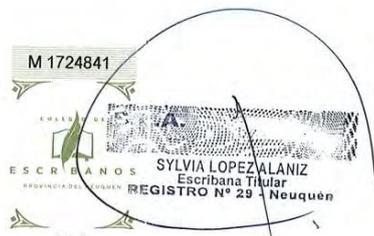


CERTIFICADO: Que la fotografía impresa en el anverso de la presente foja, que lleva mi firma y sello, es copia fiel de lo observado, y corresponde al Piquete N° 28, según consta en escritura número Ciento veintitrés, pasada ante mí en el día de la fecha al folio 329 del protocolo único a mí cargo. Neuquén, 27 de Julio de 2018.-



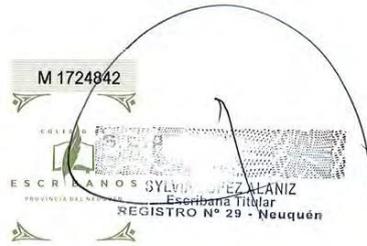


CERTIFICO: Que las cuatro fotografías impresas en el anverso de la presente foja, que lleva mi firma y sello, son copia fiel de lo observado, y corresponden al Piquete N° 30, según consta en escritura número Ciento veintitrés, pasada ante mí en el día de la fecha al folio 329 del protocolo único a mí cargo. Neuquén, 27 de Julio de 2018.-





CERTIFICADO: Que la fotografía impresa en el anverso de la presente foja, que lleva mi firma y sello, es copia fiel de lo observado, y corresponde al Piquete N° 30, según consta en escritura número Ciento veintitrés, pasada ante mí en el día de la fecha al folio 329 del protocolo único a mí cargo. Neuquén, 27 de Julio de 2018.-





CERTIFICO: Que las cinco fotografías impresas en el anverso de la presente foja, que lleva mi firma y sello, son copia fiel de lo observado, y corresponden al Piquete N° 31, según consta en escritura número Ciento veintitrés, pasada ante mí en el día de la fecha al folio 329 del protocolo único a mí cargo. Neuquén, 27 de Julio de 2018.-





CERTIFICADO: Que la fotografía impresa en el anverso de la presente foja, que lleva mi firma y sello, es copia fiel de lo observado, y corresponde al Piquete N° 31, según consta en escritura número Ciento veintitrés, pasada ante mí en el día de la fecha al folio 329 del protocolo único a mí cargo. Neuquén, 27 de Julio de 2018.-



ANEXO D

Ref. V: Comunicación interna EPEN - LAT 132 KV

Nombre del archivo: EMERGENCIA 132-kv CUTRAL CO - ZAPALA.doc

	SISTEMA DE CONTROL INTERNO PERMANENTE	SCIP -PGG006
		Comunicación interna

Anexo 2

A	DE
---	----

NOMBRE: CEDRON CESAR	CI.Nº: 00000	FECHA: 15/08/2018
AREA MANTENIMIENTO	NOMBRE : Pincheira Nelson	
C.C.:	SECTOR: Mat. Línea Zapala	

REF: LAT 132 KV CUTRALCO ZAPALA

Día 19/07/2018 sale de servicio la línea LAT-132KV Cutral-co Zapala por razones climática. Factores que se desconocen donde se quiebran rompen 8 columnas de H°G SUSPENSIÓN SIMPLE y Se cortan conductores en un Retención Doble . Adjunto fotos de las columnas conductores y manguitos de hielo en los conductores.



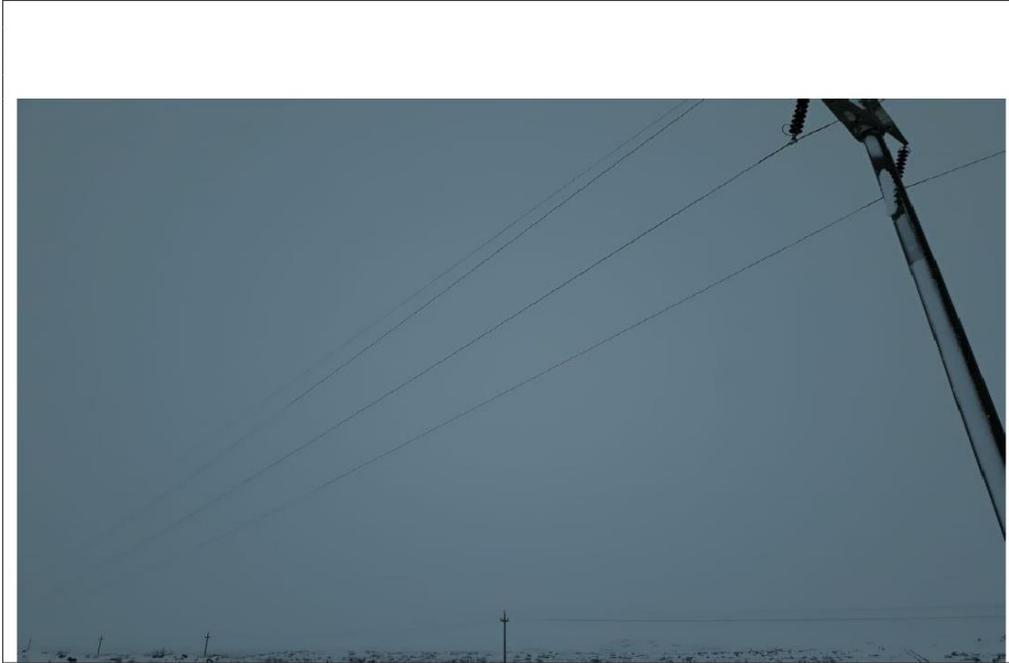


SISTEMA DE CONTROL INTERNO PERMANENTE

SCIP -PGG006
Revisión "1"
Página 2 de 13

Comunicación interna

Anexo 2





SISTEMA DE CONTROL INTERNO PERMANENTE

SCIP -PGG006
Revisión "1"
Página 3 de 13

Comunicación interna

Anexo 2





SISTEMA DE CONTROL INTERNO PERMANENTE

SCIP -PGG006
Revisión "1"
Página 4 de 13

Comunicación interna

Anexo 2





SISTEMA DE CONTROL INTERNO PERMANENTE

SCIP -PGG006
Revisión "1"
Página 5 de 13

Comunicación interna

Anexo 2





SISTEMA DE CONTROL INTERNO PERMANENTE

SCIP -PGG006
Revisión "1"
Página 6 de 13

Comunicación interna

Anexo 2





SISTEMA DE CONTROL INTERNO PERMANENTE

SCIP -PGG006
Revisión "1"
Página 7 de 13

Comunicación interna

Anexo 2





SISTEMA DE CONTROL INTERNO PERMANENTE

SCIP -PGG006

Revisión "1"

Página 8 de 13

Comunicación interna

Anexo 2





SISTEMA DE CONTROL INTERNO PERMANENTE

SCIP -PGG006
Revisión "1"
Página 9 de 13

Comunicación interna

Anexo 2





SISTEMA DE CONTROL INTERNO PERMANENTE

SCIP -PGG006
Revisión "1"
Página 10 de 13

Comunicación interna

Anexo 2



	SISTEMA DE CONTROL INTERNO PERMANENTE	SCIP -PGG006
		Revisión "1"
	Comunicación interna	Página 11 de 13

Anexo 2

--

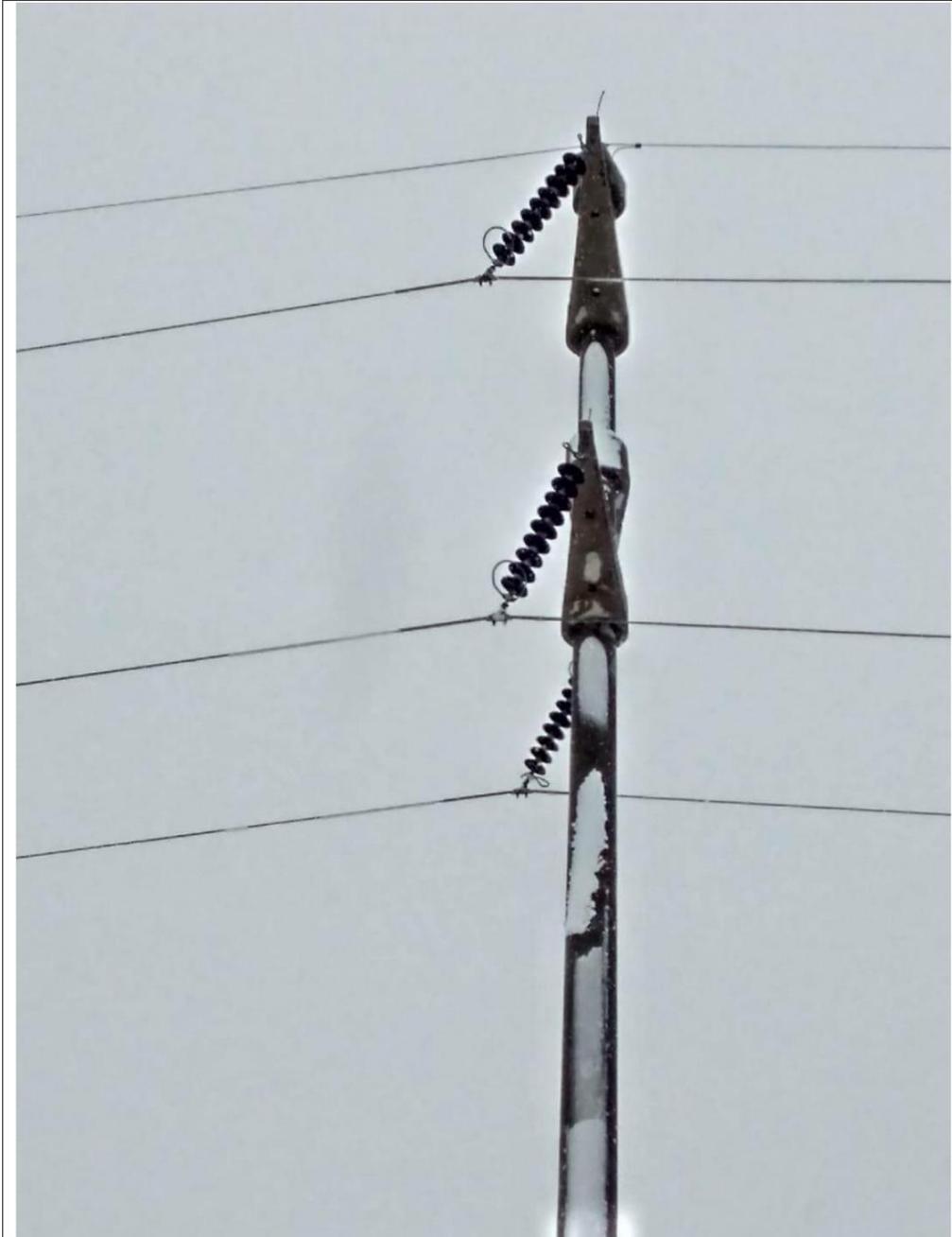


SISTEMA DE CONTROL INTERNO PERMANENTE

SCIP -PGG006
Revisión "1"
Página 12 de 13

Comunicación interna

Anexo 2



 EPEN	SISTEMA DE CONTROL INTERNO PERMANENTE	SCIP -PGG006
		Revisión "1"
	Comunicación interna	Página 13 de 13

Anexo 2



ANEXO E

Ref. VI: Comunicación interna EPEN - LAT 33 KV

Nombre del archivo: EMERGENCIA 33-kv CUTRAL CO - ZAPALA.DOC

	SISTEMA DE CONTROL INTERNO PERMANENTE	SCIP -PGG006
	Comunicación interna	Revisión "1"
		Página 1 de 5

Anexo 2

A	DE
---	----

NOMBRE: CEDRON CESAR	CI.Nº: 00000	FECHA:15/08//18
AREA MANTENIMIENTO	NOMBRE : Pincheira Nelson	
C.C.:	SECTOR: Mat. Línea Zapala	

REF: LMT 33KV CUTRAL-CO ZAPALA

Día 19/07/2018 sale de servicio la línea LMT 33KV Cutral-co Zapala por factores climáticos donde se corta los conductores en fase-S fase-T fase-R y desprendimiento en más de 20 piquetes las atadura. En otras columnas se rompen las crucetas de hormigón y gira algunas otras, en otros piquetes arrasa con los pernos centrales.

Adjunto fotos en otros vanos con mangos de hielo lo que causa también cortar la distancia de la misma.



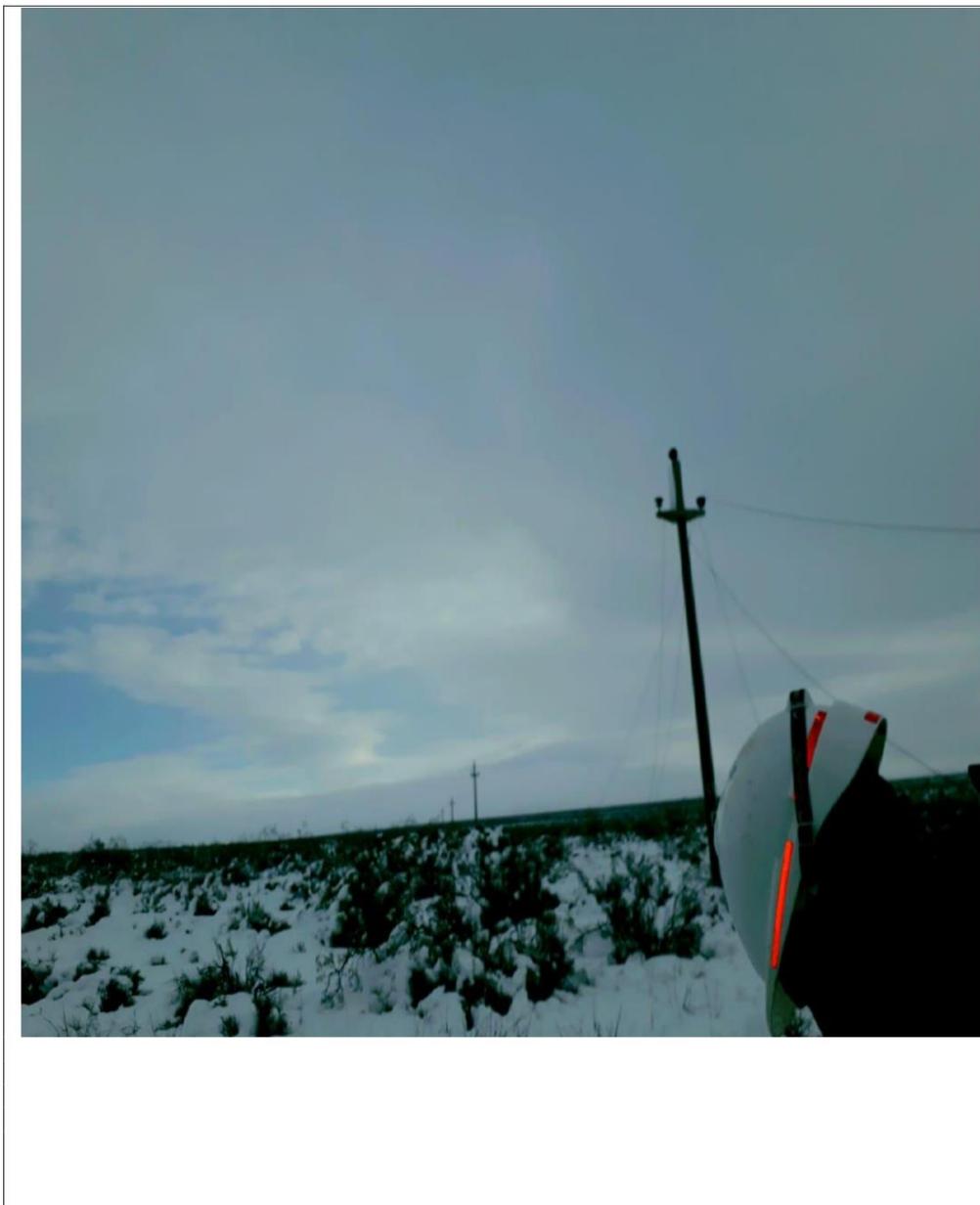


SISTEMA DE CONTROL INTERNO PERMANENTE

SCIP -PGG006
Revisión "1"
Página 2 de 5

Comunicación interna

Anexo 2





SISTEMA DE CONTROL INTERNO PERMANENTE

SCIP -PGG006

Revisión "1"

Página 3 de 5

Comunicación interna

Anexo 2





SISTEMA DE CONTROL INTERNO PERMANENTE

SCIP -PGG006

Revisión "1"

Comunicación interna

Página 4 de 5

Anexo 2





SISTEMA DE CONTROL INTERNO PERMANENTE

Comunicación interna

SCIP -PGG006

Revisión "1"

Página 5 de 5

Anexo 2



ANEXO F

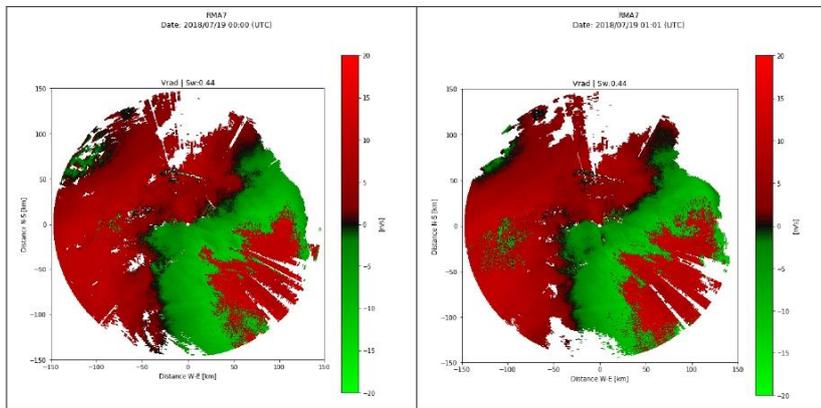
Ref. VII: INFORME TÉCNICO TORMENTA – GRC

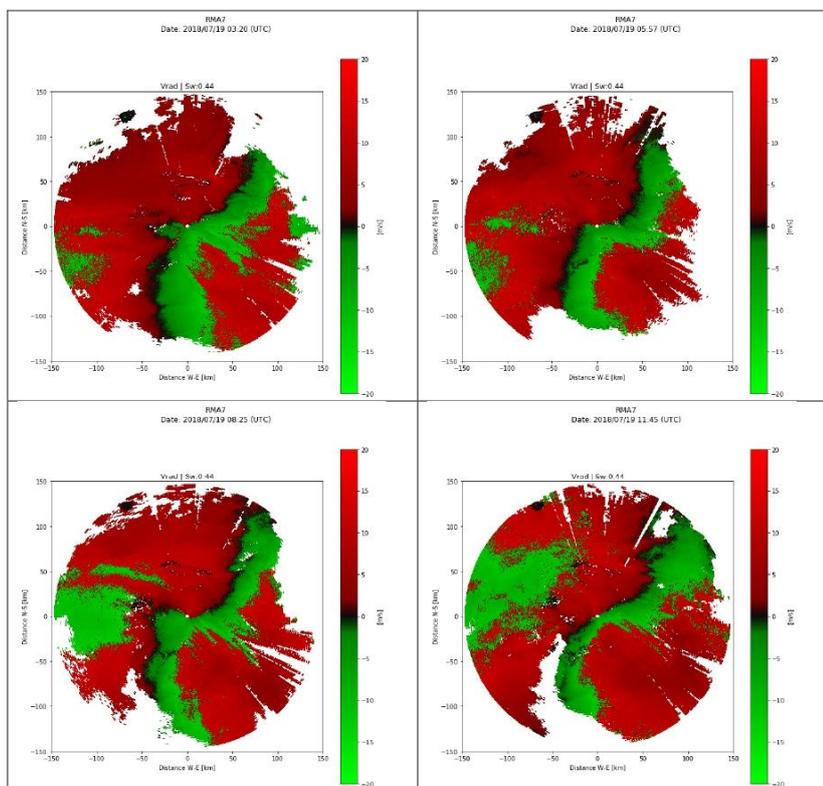
Nombre del archivo: INFORME tormenta_19072018.PDF

Análisis Cualitativo tormenta 19/07/2018

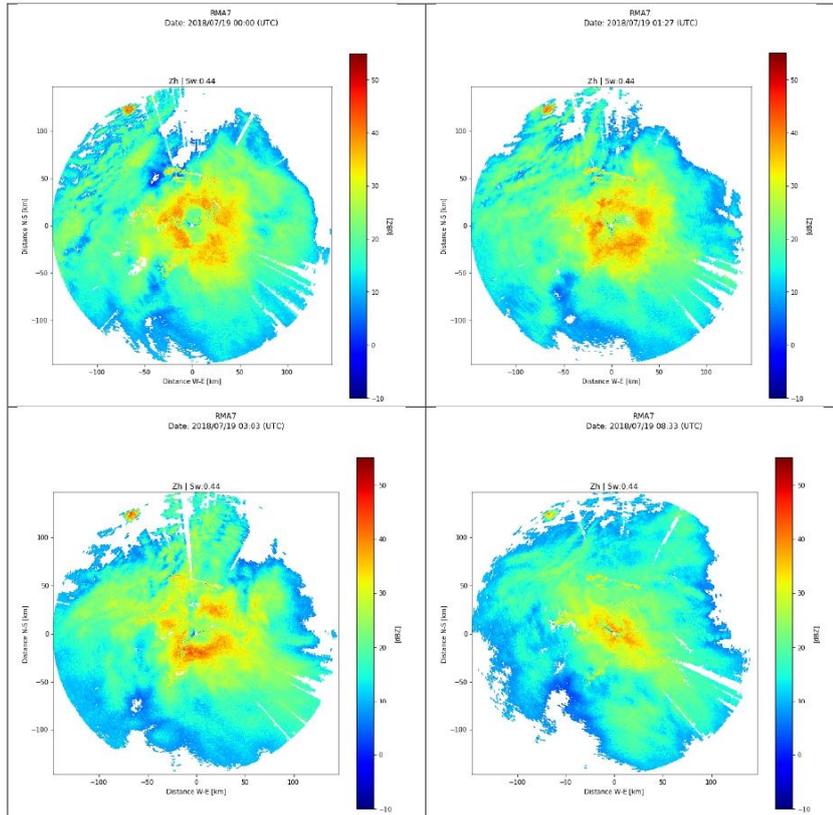
El siguiente análisis se realizó, con datos del radar meteorológico RMA7 con los productos DOPPLER y FACTOR DE REFLECTIVIDAD HORIZONTAL, con datos satelitales y con datos de modelado numérico obtenido a través de la aplicación WRF (Weather Research and Forecasting) implementada por el Grupo Radar Córdoba (GRC) y el Laboratorio de Hidráulica (LH) de la Universidad Nacional de Córdoba.

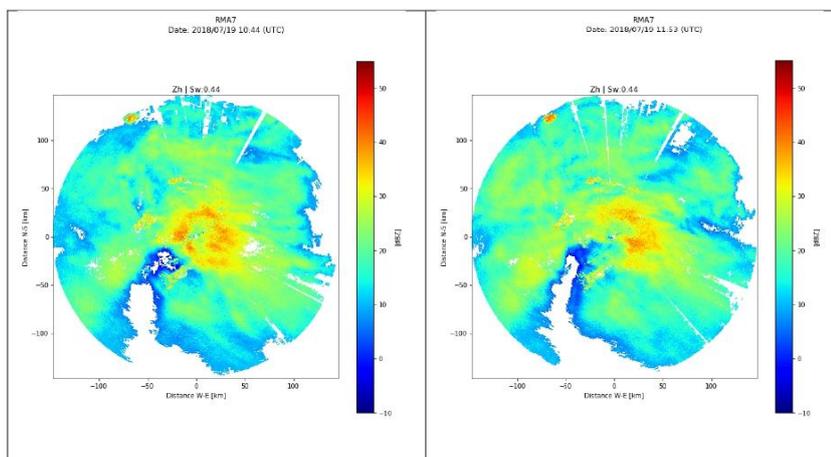
El análisis de datos de radar muestra una componente importante de vientos en dirección norte-oeste desde la madrugada del día 19 hasta pasado el mediodía. Según la información del radar, la velocidad radial del viento respecto del radar supera los 20 m/s (72 km/h). Esta información queda respaldada por el folding que muestran los datos Doppler analizados. A continuación se muestran seis imágenes del producto Vrad (Velocidad Radial) donde el color verde significa que la tormenta se mueve hacia el radar y el color rojo que la tormenta se aleja del radar.



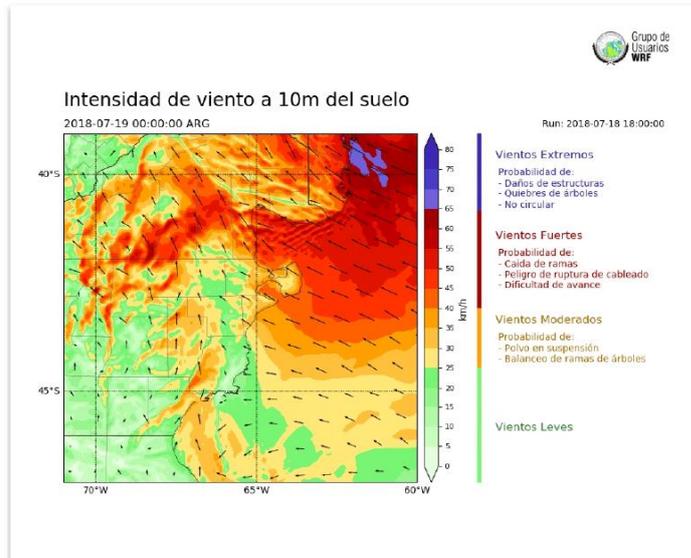


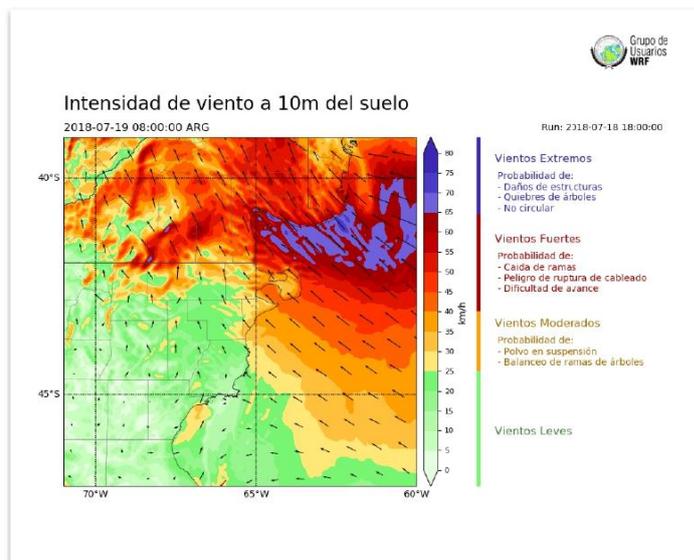
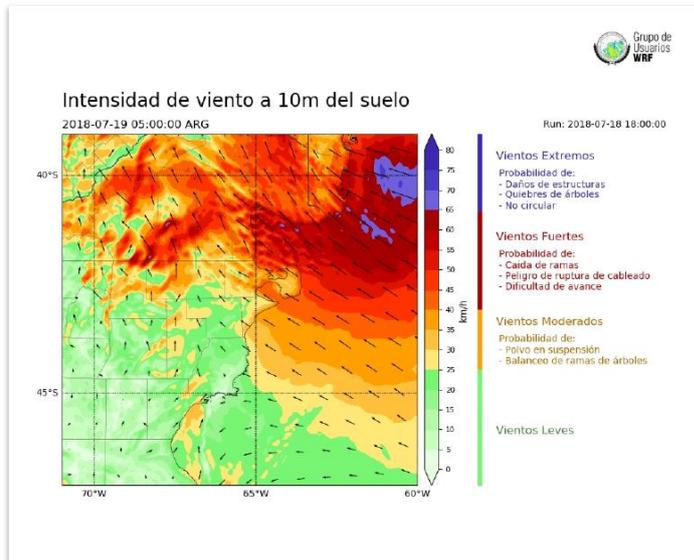
El factor de reflectividad horizontal TH muestra el desarrollo de una tormenta durante la madrugada del día 19. Las distintas intensidades observadas de TH (TH>40 dBZ) **manifiestan un evento severo alrededor del radar dentro de un radio de cobertura de 50 km como se muestra en las siguientes figuras.**

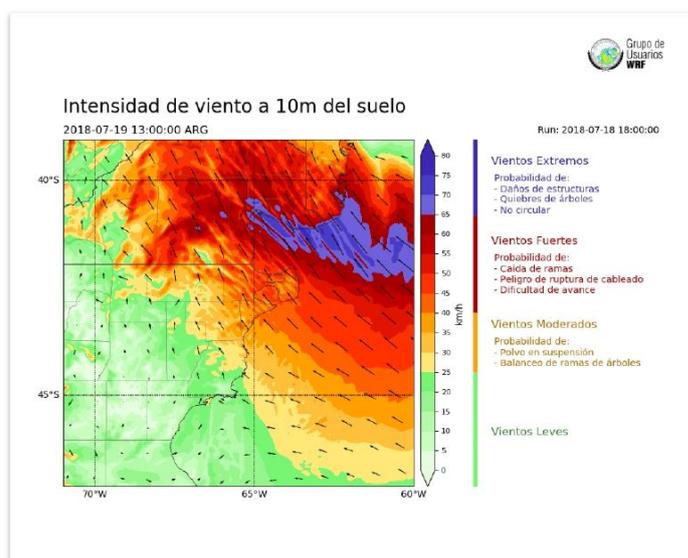




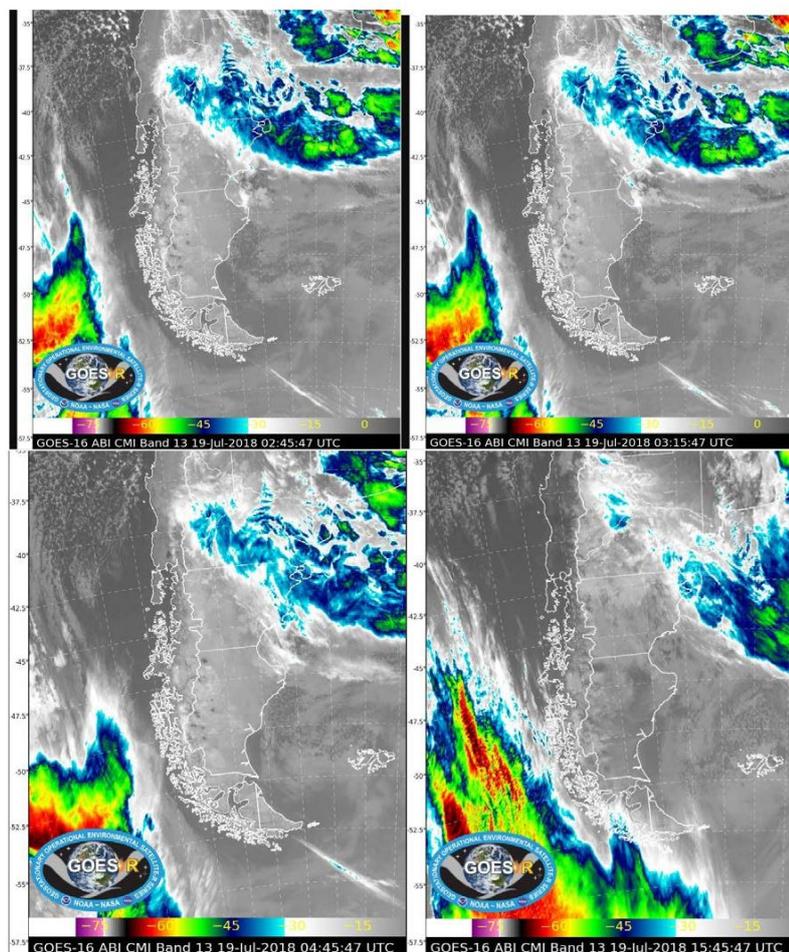
Otro Producto utilizado para este análisis es la información suministrada por la herramienta de modelado numérico WRF. La misma muestra la dirección e intensidad de los vientos que se sucedieron durante el día 19/07/2018. Las imágenes a continuación manifiestan que los vientos fueron muy intensos (entre 40 a 65 km/h) con algunas regiones donde pueden ser catalogados como extremos (entre 65 a más de 80 km/h). Notar que tanto la dirección como la intensidad que muestran los gráficos a continuación son consistentes con las imágenes de radar expuestas con el producto Doppler.







A continuación se muestran las imágenes satelitales obtenidas por GOES 16 donde se expone el producto temperatura de tope de nube. Nuevamente las imágenes son consistentes con los resultados obtenidos por los distintos métodos enumerados anteriormente ya que según lo que se puede ver a continuación, la etapa severa de la tormenta se registró durante la madrugada del 19 hasta el mediodía del mismo.



ANEXO G

Ref. VIII: Documentación Técnica de CIMALCO

Nombre del archivo: Esfuerzos torsores Cimalco .docx

Suspensión dimensional.pdf

Fotografías

De: "Lorena Ruiz" <lorena.ruiz@cimalconeuen.com.ar>
Para: omelero@epen.gov.ar, jmartinez@epen.gov.ar, jmeschini@epen.gov.ar,
"Virginia Santa Maria" <ingenieria@cimalconeuen.com.ar>, "Gustavo Lutz"
<gustavo.lutz@cimalconeuen.com.ar>, "German Flamarique"
<german.flamarique@cimalconeuen.com.ar>
Enviados: Miércoles, 19 de Septiembre 2018 13:40:13
Asunto: Informe solicitado - CIMALCO

Buenas tardes estimados

Se detalla lo solicitado sobre el esfuerzo torsor de las columnas solicitadas para provisión LAT 132 kV CCO - Zapala.

Nuestro sector de ingeniería responde con el siguiente detalle

1. **23R4050: (distancias tomadas desde cima)**

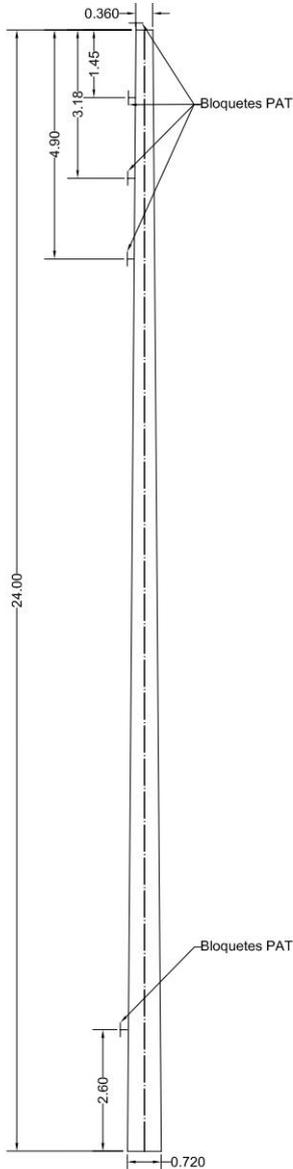
- 0 m (cima): Mt= 28355 kgm
- 2 m: Mt= 34186 kgm
- 3.55 m: Mt= 39081 kgm
- 5.05 m: Mt= 44130 kgm
- 6.60 m: Mt= 49669 kgm
- 9.00 m: Mt= 47114 kgm
- 12.00 m: Mt= 57219 kgm
- 15.00 m: Mt= 68305 kgm
- 18.00 m: Mt= 80373 kgm
- 21.00 m: Mt= 93422 kgm
- 23.00 m: Mt= 102666 kgm

2. **24R4350: (distancias tomadas desde cima)**

- 0 m (cima): Mt= 28355 kgm
- 2.00 m: Mt= 34186 kgm
- 3.75 m: Mt= 39737 kgm
- 5.50 m: Mt= 45704 kgm
- 6.00 m: Mt= 47486 kgm
- 9.00 m: Mt= 47114 kgm
- 12.00 m: Mt= 57219 kgm
- 15.00 m: Mt= 68305 kgm
- 18.00 m: Mt= 80373 kgm
- 21.00 m: Mt= 93422 kgm
- 23.00 m: Mt= 107451 kgm

Saludos,

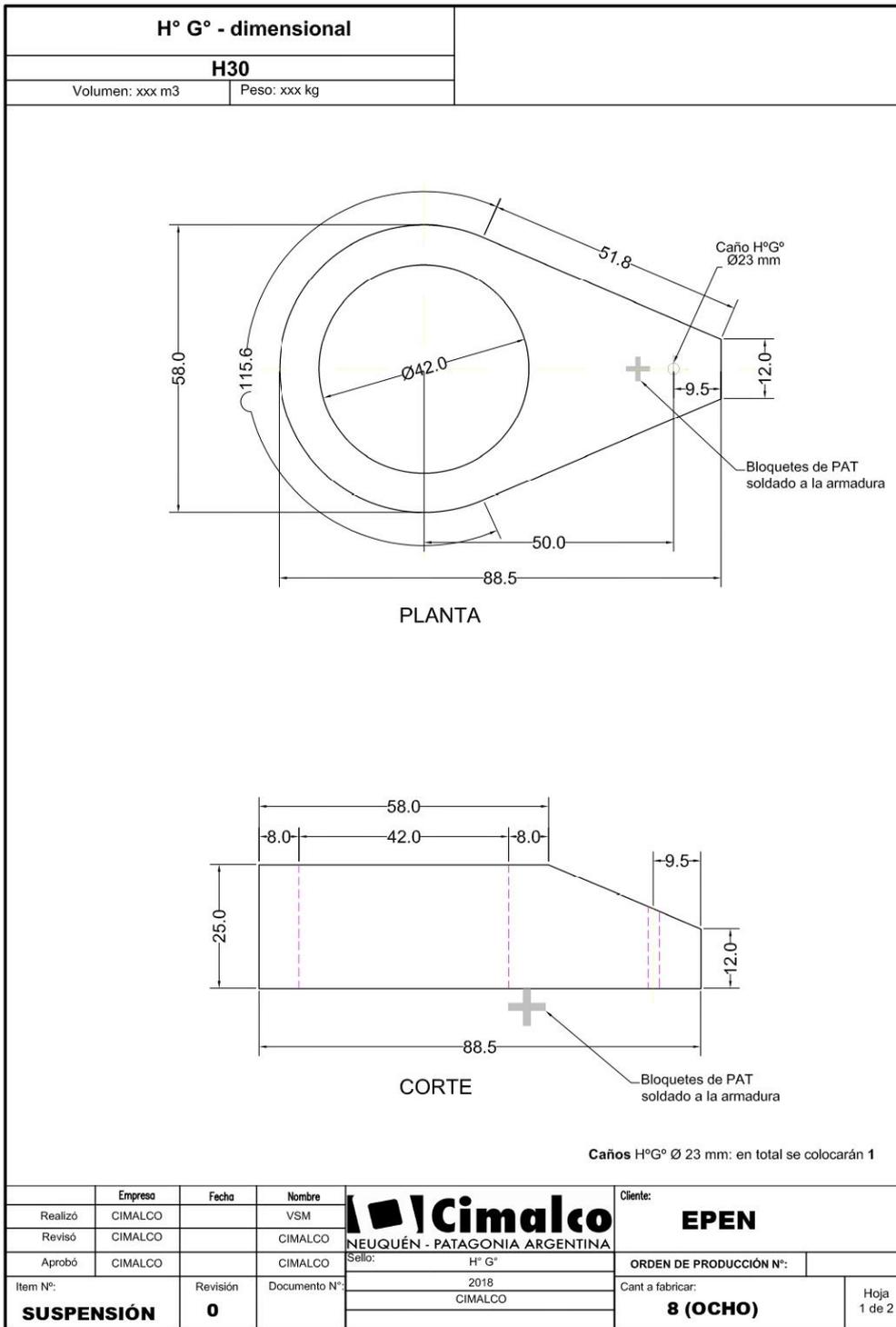
COLUMNA TIPO		24	R	4350
H30		ext: 36.00 cm int: 22.00 cm	ext: 72.00 cm int: 46.00 cm	Ø aro base: 62.8 cm
Volumen:	3.66 m ³	Peso:	8776 kg	



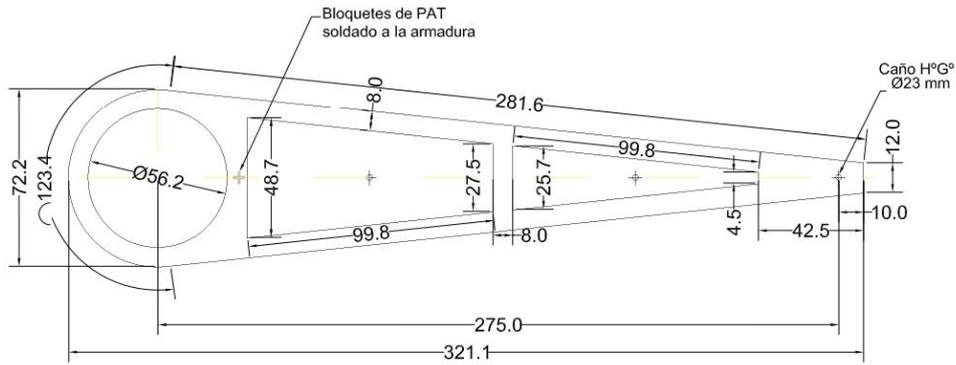
Sello:

24	R	4350
2018		
CIMALCO		

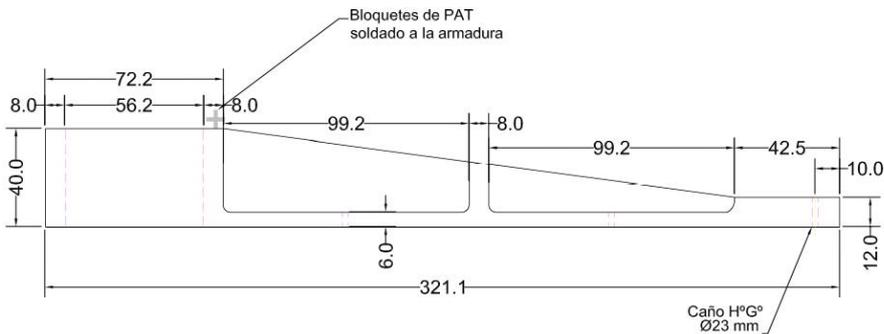
Empresa	Fecha	Nombre	 Cimalco NEUQUÉN - PATAGONIA ARGENTINA	Cliente:	EPEN
Realizó	CIMALCO	VSM		Sello:	ORDEN DE PRODUCCIÓN N°:
Revisó	CIMALCO	CIMALCO			
Aprobó	CIMALCO	CIMALCO		CIMALCO	Cant a fabricar:
Item N°:	Revisión	Documento N°:			Hoja
SUSPENSIÓN	0				1 de 1



MENSULAS - dimensional	
H30	
Volumen: xxx m3	Peso: xxx kg



PLANTA



CORTE

Caños H°G° Ø 23 mm: en total se colocarán 1

	Empresa	Fecha	Nombre	Cimalco NEUQUÉN - PATAGONIA ARGENTINA	Ciente:	EPEN	
Realizó	CIMALCO		VSM		Sello: K PS	ORDEN DE PRODUCCIÓN N°:	
Revisó	CIMALCO		CIMALCO	2018	Cant a fabricar:	24 (VEINTICUATRO)	Hoja 1 de 2
Aprobó	CIMALCO		CIMALCO	CIMALCO			
Item N°:		Revisión	Documento N°				
SUSPENSIÓN		0					











ANEXO H

Ref. XI: ESTUDIO CONDICIONES METEOROLÓGICAS - LASSIG

Nombre del archivo: Diagnóstico condiciones meteorológicas LASSIG.pdf

CONDICIONES METEOROLÓGICAS LOS DÍAS 18 Y 19 DE JULIO DE 2018 EN LA ZONA DE DAÑOS A LAS LÍNEAS ELÉCTRICAS Y ESTRUCTURAS CERCANA A CUTRAL-CÓ (NEUQUÉN)

Análisis multitemporal de las escalas regional y local

“En el invierno pasado (19/7/2018) hemos sufrido la rotura de ocho columnas de hormigón armado en la línea de 132 kV L.A.T. Cutral Co-Zapala. Ese día 9:41hs, las protecciones actuaron señalizando falla bifásica a una distancia de 49km desde Cutral Co. En el sector indicado, se encuentran importantes manguitos de hielo sobre los conductores que provocaban su acercamiento. Personal de mantenimiento interviene para desprenderlos. Finalizados los trabajos se solicita un intento de reposición (14.25 hs). La señalización cambia a 6,9 km y trifásica. Al llegar al lugar se encuentran las columnas rotas.” INFORME DE EPEN

Introducción

La nieve, la rotación del conductor y las bajas temperaturas ($-2.0^{\circ}\text{C} < T < +2^{\circ}\text{C}$) generan una capa de nieve húmeda sobre las líneas aéreas. Por otro lado, la lluvia y las altas temperaturas rompen dicha capa de nieve.

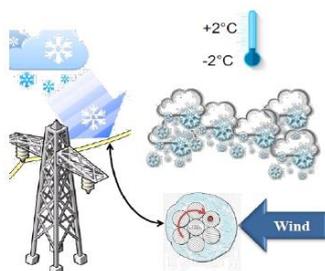


Figura 1: Proceso de acreción de nieve alrededor de un conductor de energía eléctrica.

La formación de hielo en estructuras y líneas eléctricas causa daños en muchos países (Fikke, 2005a, b; Fikke et al., 2007; Cigr`e, 2009).

Están involucrados dos clases de fenómenos uno dentro de la nube y el otro fuera de ésta:

- la formación de hielo, debido al sobre enfriamiento del agua contenida en nubes bajas o muy bajas que son frías y
- la precipitación, debido a la lluvia helada o la deposición de nieve húmeda (Farzaneh, 2008; Poots, 1996).

Admirat y Sakamoto, 1988a, b; Bonelli y Lacavalla, 2010 encontraron que son más importantes los procesos de deposición de nieve húmeda debido a la precipitación que la de formación de hielo dentro de nubes bajas.

La acumulación de nieve húmeda se considera riesgosa para las líneas de transmisión de la energía eléctrica cuando la nevada ocurre con vientos.

Kuroiwa (1965) investigó la formación de hielo y la acumulación de nieve en las líneas y descubrió que casi toda la acumulación de nieve húmeda en Japón ocurrió

cuando el viento era inferior a 3 m/s (11 km/s) y la temperatura del aire estaba entre -1 °C y +1 °C. Boyd (1970) informó que, en los valles protegidos de Columbia Británica, los vientos son particularmente ligeros y la nieve húmeda se acumula con frecuencia en las líneas de transmisión. Por otra parte, Higuchi (1973) ha indicado que en la isla de Hokkaido en Japón se acumula nieve húmeda frecuentemente acompañada de fuertes vientos.

Objetivo

Se realiza una evaluación de las condiciones meteorológicas ocurridas desde las 15 horas del día 18/07/2018 y 24 horas posteriores, haciendo énfasis en el tipo de nubosidad, la precipitación de nieve y los vientos que condujeron a la acreción de nieve sobre las líneas del tendido eléctrico y las estructuras.

Metodología

El análisis del estado de la atmósfera tanto en la escala regional y como en la local se realizó mediante la inspección visual de los mapas de las variables meteorológicas en distintas alturas (niveles atmosféricos verticales significativos) y su evolución temporal.

Los mapas regionales son de Argentina y de la Provincia del Neuquén, y los datos o mapas locales corresponden a la ubicación entre los piquetes 31 y 23.

Todos los datos analizados corresponden al período comprendido entre las 15 horas del día 18 hasta las 15 horas del día 19 de Julio de 2018.

Los datos de los campos meteorológicos provienen del Reanálisis del National Center of Environmental Prediction (NCEP/NCAR Reanalysis; Kalnay y otros, 1996), tienen resolución espacial horizontal de 0,5° x 0,5° y resolución temporal de 6 horas.

Para observar el campo nuboso se utilizaron imágenes satelitales infrarrojas del canal 4 de los satélites de la serie GOES (NOAA/CLASS).

Con la finalidad de estimar el desarrollo nuboso en la vertical se emplearon las estimaciones de los sondeos verticales de la temperatura y del viento del modelo Global Data Assimilation System (GDAS) obtenido del Real-time Environmental Applications and Display sYstem (READY) del Air Resources Laboratory (NOAA/ARL) en una posición intermedia entre los Piquetes 31 y 23.

Las expresiones termodinámicas utilizadas para el cálculo de algunas variables de interés, los mapas, imágenes satelitales y sondeos atmosféricos están incluidos en el Anexo.

Se aclara que no se puede utilizar los datos meteorológicos del Aeropuerto de Cutral Có dado que cubren los horarios nocturnos, y además, presentan errores.

Resultados

Características de la circulación del aire

La posición e intensidad de los sistemas de presión atmosférica a nivel regional son

indicativos de las características del flujo de aire que prevalecerá en un lugar.

En la secuencia de mapas de presión al nivel del mar, incluidos en el Anexo, se observa en el norte de Argentina un sistema de bajas presiones que a las 15 hs del día 18 abarcaba las provincias de Salta, Tucumán, Formosa y Chaco, tenía un valor de presión atmosférica (reducida al nivel del mar para poder comparar) inferior a 1008 hPa. Por otra parte, el sur del país se hallaba dominado por un sistema de alta presión que tenía valores superiores a 1035 hPa en la provincia de Santa Cruz.

La posición de estos sistemas de presión produjo un bloqueo a la circulación de los vientos Oestes típica de la zona. Esto provoca que las características del tiempo meteorológico perduren anómalamente en el tiempo.

Además, dicha configuración de presiones produjo en el área de estudio (y en toda la provincia) un flujo de aire con componente del sector Este, con advección de aire húmedo desde el Océano Atlántico. Este flujo estuvo establecido desde el día 15 de Julio al mediodía hasta el día 18 a la tarde y abarcaba hasta 1500 metros de altura aproximadamente (ver Figura 2).

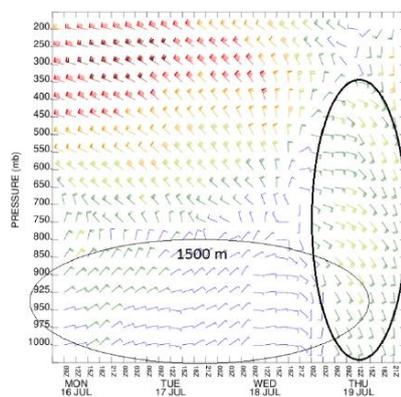


Figura 2: Corte vertical temporal (cada 3 hs) de los vientos (kt, barbas) entre los Piquetes 31 y 23 desde el 16 de Julio 06 hora local (09 Z ó UTC).

[La inclinación de la barba indica de qué dirección proviene el viento y los colores su intensidad: azul $V < 10$ kt (18 km/h); verdes 10 kt $< V < 40$ kt (74 km/h); naranjas y rojos $V > 40$ kt.]

Con el transcurso de las horas, la intensificación y el lento movimiento de los sistemas de presión provocaron, también, que el flujo se intensificara y adquiriera componente del sector Sur trayendo aire húmedo y más frío desde el 18 de Julio a la noche (ver Figura 3). Este patrón se observa en casi toda la estructura de la tropósfera (ver Figura 2).

En la tropósfera media, a 5000 metros de altura un centro cerrado de Bajas presiones se ubicó en la provincia de Neuquén a las 21 horas del día 18, produciendo en capas medias también un flujo con componente Este (ver Figura 4).

El análisis del espesor de una capa atmosférica es útil para identificar el tipo de precipitación. Una tropósfera muy fría tiene espesores chicos debido a que el aire está contraído. Esto significa que el grosor o profundidad de una capa es proporcional a su temperatura.

En la Figura 5 se observa la posición de los núcleos fríos y calientes a nivel regional. Sobre Neuquén hubo una zona de valores inferiores a 5320 metros que indican baja probabilidad de lluvias y alta de nieve debido al escaso grosor de la capa.

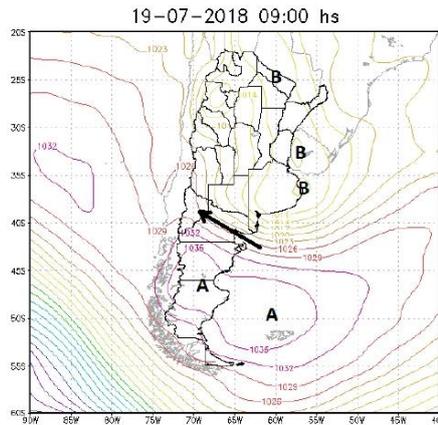


Figura 3: Presión reducida al nivel del mar del 19 de Julio de 2018 9:00 hora local.

[**A**: sistema de Alta presión; **B**: sistema de Baja presión; la flecha indica la dirección del flujo; las líneas de colores son isobaras trazadas cada 3 hPa]

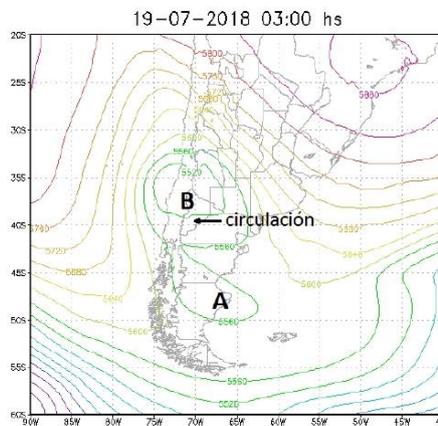


Figura 4: Mapa de los sistemas de presión a 5000 metros de altura del 19 de Julio de 2018 a las 03:00 hora local.

[**A**: sistema de Alta presión; **B**: sistema de Baja presión; la flecha indica la dirección del flujo; las líneas de colores son las curvas de nivel de 500 hPa y están trazadas cada 40 m]

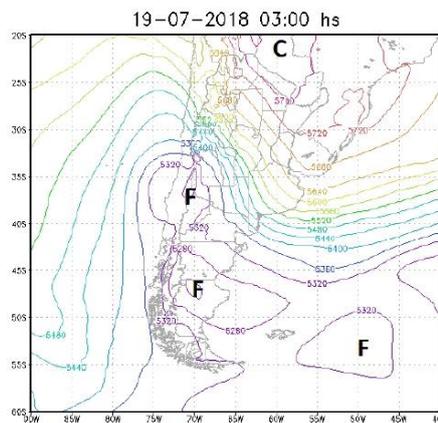


Figura 5: Mapa de los espesores de la capa entre superficie y una altura aproximada de 5000 metros de altura del 19 de Julio de 2018 a las 03:00 hora local.

[**F**: núcleo de aire muy frío; **C**: aire caliente; las líneas de colores son los espesores entre 1000 y 500 hPa y están trazadas cada 40 m]

Como la zona de análisis estuvo persistentemente afectada por aire frío en un ambiente saturado de humedad se promovió la formación de un sistema nuboso de tipo estratiforme que se observa en la Figura 6.

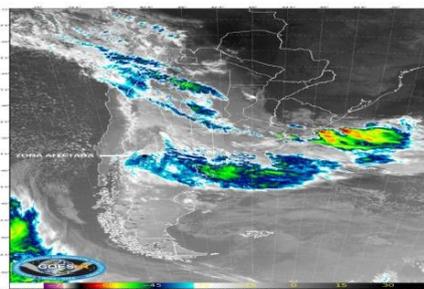


Figura 6: Imagen satelital infrarroja del canal 4 del satélite GOES16 del 18 de Julio de 2018 a las 20:45 hora local.

[●: posición de los piquetes 31 y 23; los colores indican la temperatura de los topos nubosos: grises y blancos $T > -30^{\circ}\text{C}$; celestes $-45^{\circ}\text{C} < T < -30^{\circ}\text{C}$; verdes $T < -45^{\circ}\text{C}$]

El gradiente horizontal de presiones intensificó la circulación entre las 3 y las 15 horas del día 19. El valor máximo estimado por el modelo fue de 8,8 m/s (32 km/h) acompañado con ráfagas de 14,7 m/s (53 km/h). En la Figura 7 se observa el mapa de las ráfagas del viento de la provincia a la hora del máximo.

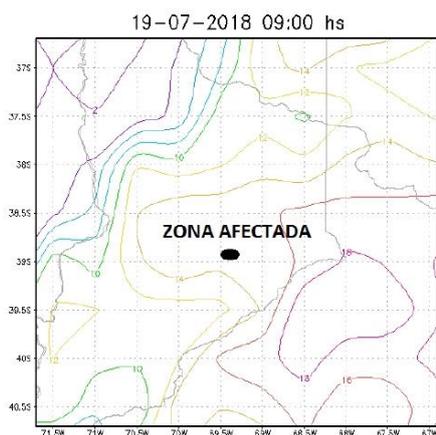


Figura 7: Ráfagas de viento estimadas por el modelo a 10 metros de altura a las 9 horas del día 19 de Julio de 2018.

[●: posición de los piquetes 31 y 23; las líneas de colores son las isotacas trazadas cada 2 m/s]

Características termodinámicas

En cuerpos de agua la congelación se da a 0°C , sin embargo, las gotas de agua que forman una nube se comportan de forma diferente. En nubes con temperaturas entre $-15^{\circ}\text{C} < T < 0^{\circ}\text{C}$ hay con mayor frecuencia agua líquida sobreenfriada. En la zona de la nube con temperaturas entre $-40^{\circ}\text{C} < T < -15^{\circ}\text{C}$ frecuentemente hay una mezcla de agua en las dos fases, líquida y sólida, es decir, agua sobreenfriada y hielo o nieve. En la capa con $T < -40^{\circ}\text{C}$ la nube está saturada de hielo. En general, la formación de la nieve se produce en la parte más alta de la nube. Luego, cae

produciendo copos de nieve cada vez más grandes y pesados por acreción.

Los sondeos verticales aerológicos de la zona de daño a las líneas eléctricas muestran una atmósfera saturada de humedad (humedad relativa HR >98 %) desde los 150 metros de altura respecto del nivel del suelo hasta los 5600 metros (ver Figura 8). Este hecho está relacionado con la presencia de nubosidad media y baja.

Toda la extensión vertical saturada tiene temperatura que varía entre 0 ° y -42 ° C, es decir, por debajo del punto de congelación del agua. La cantidad de agua precipitable de la columna atmosférica varió con las horas entre 9,6 y 10,2 kg/m².

La nieve húmeda se produce cuando hay precipitación de nieve y además la temperatura de bulbo húmedo es $T_w > -0,2$ °C. Según los sondeos analizados hubo precipitación de nieve desde las 21 horas del día 18 y los valores de T_w fueron superiores a 0,3 °C durante todo el período, como se puede ver en la Tabla 1. Este valor confirma la precipitación de nieve húmeda.

El espesor o grosor de una nube puede determinar el tipo e intensidad de la precipitación. Espesores de nubes inferiores a 400 metros no producen precipitación, entre 400 y 1000 metros producen precipitaciones débiles; entre 1000 y 2500 metros precipitación intermitente; entre 2500 y 3300 metros precipitación moderada; y cuando el espesor supera 3300 metros la precipitación es de moderada a fuerte.

La nube que produjo las nevadas en la zona de estudio tenía una profundidad superior a 5000 metros, hecho que indica que la precipitación de nieve húmeda fue de moderada a fuerte.

La profundidad máxima de la nieve acumulada sobre el suelo alcanzó 13 cm a las 9 horas del día 19, la intensidad de precipitación fue de 1 cm/h.

La profundidad de nieve acumulada (13 cm) equivale a 24 kg/m² de agua superficial.

Dado que la temperatura del aire hasta los 160 metros de altura aproximadamente estuvo por sobre 0 °C, es posible que parte de la precipitación nieve fundiera.

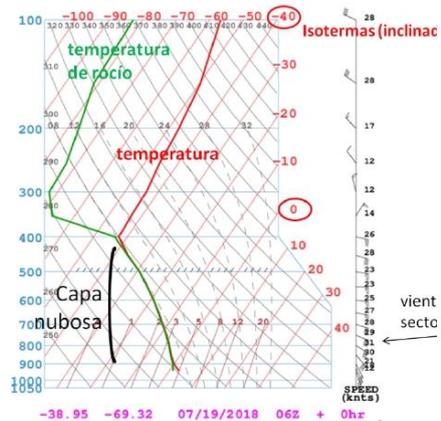


Figura 8: Sondeo aerológico del 19 de Julio de 2018 a las 03:00 hora local.

[Las isotermas son las líneas rojas inclinadas. El sondeo comienza en la zona inferior del diagrama que es la más cercana al suelo y termina en la parte de arriba que corresponde a la atmósfera superior].

Tabla I: Resumen de la evolución temporal de las variables termodinámicas del área afectada.

Variables/Fecha	18-7 15 hs	18-7 21hs	19-7 03hs	19-7 09hs	19-7 15hs
Presión al nivel del mar a 2 m (hPa)	1023,3	1024,7	1025,1	1026,9	1028,2
Presión al nivel de la estación a 2 m (hPa)	921,0	921,8	921,8	923,5	924,9
Humedad relativa a 2m (%)	85,8	90,8	99,9	90,5	99,3
Temperatura a 2m (°C)	6,4	1,9	0,8	1,4	1,6
Humedad específica a 2m(kg/kg)	0,0043	0,0043	0,0044	0,0041	0,0046
Visibilidad a 2 m (m)	18300	1200	500	800	2300
Temperatura de rocío a 2m (°C)	0,6	0,7	0,8	-0,04	1,5
Velocidad del viento a 10 m (m/s)	3,5	3,3	5,7	8,8	5,6
Agua precipitable atmosférica (kg/m ²)	9,6	10	10,2	9,8	9,7
Ráfaga de viento a 10 m (m/s)	4,	4,8	9,3	14,7	9,6
Profundidad de nieve superficial (m)	0	0,01	0,07	0,13	0,11
Agua superficial equivalente a la profundidad de nieve acumulada (kg/m ²)	0	1	13	24	24
Temperatura bulbo húmedo a 2 m (°C)	4,7	0,9	0,8	0,3	1,5
Presión de vapor a 2 m (hPa)	6,35	6,43	6,51	6,09	6,81
Presión de vapor saturación a 2 m (hPa)	7,41	7,09	6,52	6,73	6,86

Conclusiones

Los sistemas de presión de gran escala tuvieron una configuración que produjo un patrón de bloqueo a la circulación de los vientos Oestes que se ocurren típicamente en la Patagonia.

Se produjo una persistencia anómala de las condiciones meteorológicas.

La circulación de las masas de aire, desde el nivel del suelo hasta casi los 5000 metros de altura, provocó advección de humedad a la zona afectada en un ambiente muy frío.

Estos hechos desembocaron en la formación de nubes de mucho grosor y temperaturas por debajo del punto de congelación del agua que provocaron las nevadas observadas que fueron entre moderadas y fuertes desde la tarde del día 18 a la mañana del 19.

La temperatura de bulbo húmedo se mantuvo siempre positiva

La temperatura del aire en los primeros 160 metros de altura se mantuvo por encima del punto de congelación. La humedad relativa fue muy elevada (HR > 85,8 %).

El tipo de nieve caída fue nieve húmeda.

La visibilidad se vio fuertemente reducida por la nevada llegando a un valor mínimo de 500 metros.

La velocidad del viento se fue incrementando en el transcurso de la noche del día 18 llegando al máximo a la mañana del día 19 cuando estructura y cables estaban cubiertos de nieve depositada por el proceso de acreción.

Dato que los datos meteorológicos utilizados en la elaboración de este informe tienen una resolución temporal de 6 horas, no se pueden asegurar que entre dos

horarios analizados haya habido una intensificación tanto de la cantidad de nieve caída como de la velocidad del viento.

Referencias Bibliográficas

Admirat, P. and Sakamoto, Y., 1988a. Calibration of a wet-snow model on real cases in Japan and France, in: Proc. 4th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Paris, 7–13.

Admirat, P. and Sakamoto, Y., 1988b. Wet snow on overhead lines: a state of the art, in: Proc. of the 4th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Paris, 7–13.

Bonelli, P. and Lacavalla, M., 2010. Trend in snow deposition on overhead electric lines: using synoptic data to investigate the relationship black-out risk/climate change. Management of Weather and Climate Risk in the Energy Industry, NATO Science for Peace and Security Series – C. Environmental Security, edited by: Troccoli, A., (ISSN: 1874-6519), January 2010.

Boyd, D. W., 1970. Icing of Wires in Canada. National Research Council of Canada, Division of Building Research. Technical Paper No. 317.

Cigr'e, 2009. System for prediction and monitoring of ice shedding, antiicing and de-icing for overhead lines. Cigr'e Working Group B2.29, September 2009.

Farzaneh, M., 2008. Atmospheric Icing of Power Networks, edited by: Farzaneh, M., Springer Science.

Fikke, S., Ronsten, G., Heimo, A., Kunz, S., Ostrozlik, M., Persson, P. E., Sabata, J., Wareing, B., Wichure, B., Chum, J., Laakso, T., Santti, K., and Makkonen, L., 2007. COST 727: Atmospheric Icing on structures, Measurements and data collection on icing: State of the Art, Publication of MeteoSwiss, 75, 110 pp., ISSN:1422-1381.

Fikke, S., 2005a. Cost Action 727 Measuring and forecasting atmospheric icing on structures, in: Proc. 11th International Workshop on Atmospheric icing of Structures, Montreal, Canada, June Paper IW64.

Fikke, S., 2005b. Modern meteorology and atmospheric icing, in: Proc. 11th International Workshop on Atmospheric icing on Structures, Montreal, Canada, June, Paper IW73.

Higuchi, N., 1973. Snow accumulation prevention methods on transmission lines. Unpublished report presented at Technical Symposium on Transmission Conductor Icing, April 24, Regina.

Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Celliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K.C., Ropelewski, C., Wang, J., Leetmaa, A., Reynolds, R., Jenne, R. y Joseph, D. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. Bulletin of the American Meteorological Society, 77:437 – 471.

Kuroiwa, D., 1965. Icing and snow accretion on electric wires. Cold Regions Res. and Eng. Lab., Res. Rept. 133.

Poots, G.: Ice and snow accretion on wires, Wiley, 1996.

ANEXO

Temperatura de bulbo húmedo

La estimación de la temperatura de bulbo húmedo se realizó mediante las siguientes expresiones:

$$T_w = T + \frac{pv - pvs}{a_1 p}$$

$$pv = \frac{HE p}{0,622}$$

$$pvs = \frac{pv}{HR} 100$$

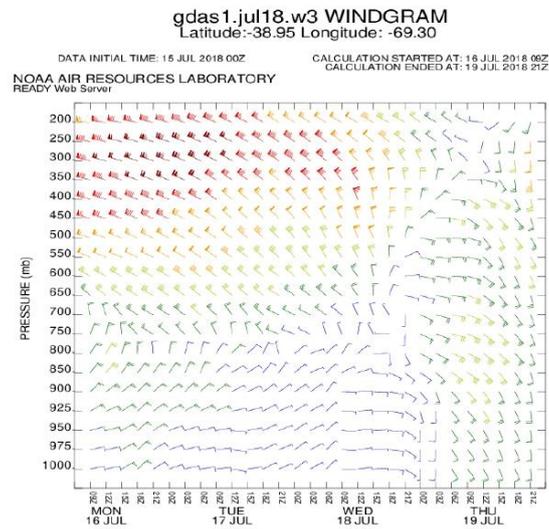
Donde:

- T es la temperatura del aire (K)
- pv es la presión de vapor de agua (hPa)
- pvs es la presión de vapor de saturación del agua a la temperatura T (hPa)
- a₁ es un coeficiente que depende de la velocidad del viento y que se muestra en la Tabla A.I.
- p es la presión atmosférica al nivel de la de la zona afectada (hPa)
- HE es la humedad específica (kg de vapor de agua/kg de aire)
- HR es la humedad relativa (%)
- V es la velocidad del viento (m/s)

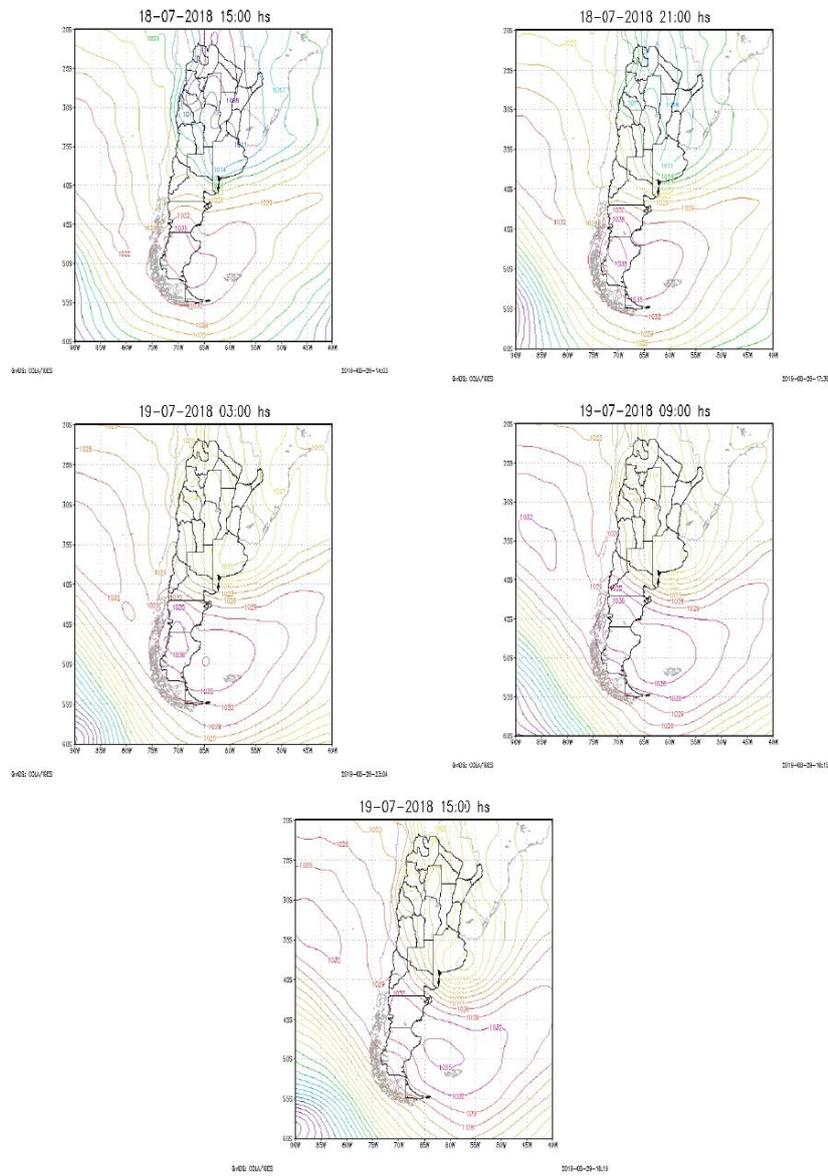
a ₁	0,001 2	0,000 8	0,0006 6	0,0006 4
V (m/s)	0 a 1	1 a 1,5	1,5 a 4	4 a 10

Valores del coeficiente a₁ utilizado en el cálculo de la T_w

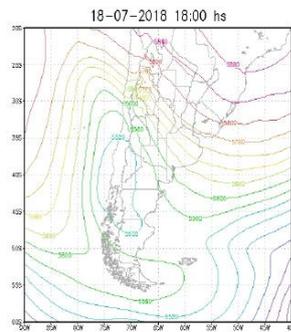
Diagramas, datos satelitales y mapas



Corte vertical temporal (cada 3 hs) de los vientos (kt, barbas) entre los Piquetes 31 y 23 desde el 16 de Julio 06:00 horas (09 Z ó UTC) hasta el 19 de Julio a las 18:00 horas (21 Z ó UTC). La inclinación de la barba indica de qué dirección proviene el viento. Los colores señalan la intensidad de viento: azul $V < 10$ kt (18 km/h); verdes $10 \text{ kt} < V < 40$ kt; naranjas y rojos $V > 40$ kt (74 km/h)



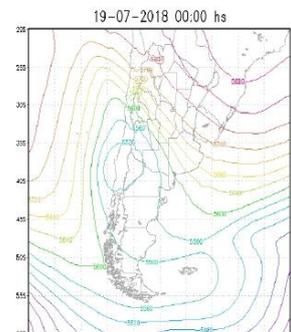
18-07-2018 15:00 hs



INMEX COU/EEZ

2018-07-18-15:00

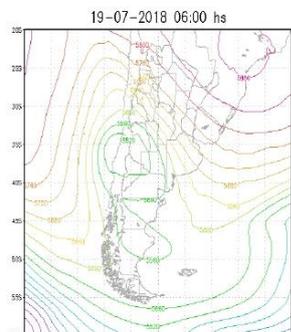
18-07-2018 21:00 hs



INMEX COU/EEZ

2018-07-18-18:00

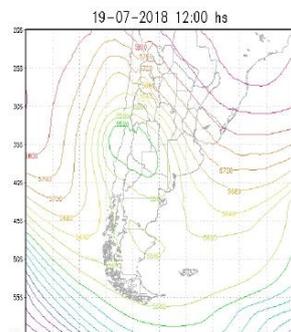
19-07-2018 03:00 hs



INMEX COU/EEZ

2018-07-19-03:00

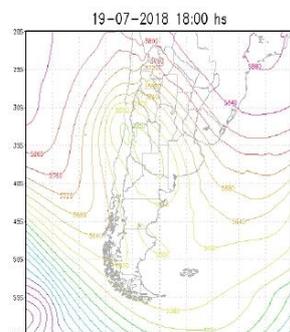
19-07-2018 09:00 hs



INMEX COU/EEZ

2018-07-19-09:00

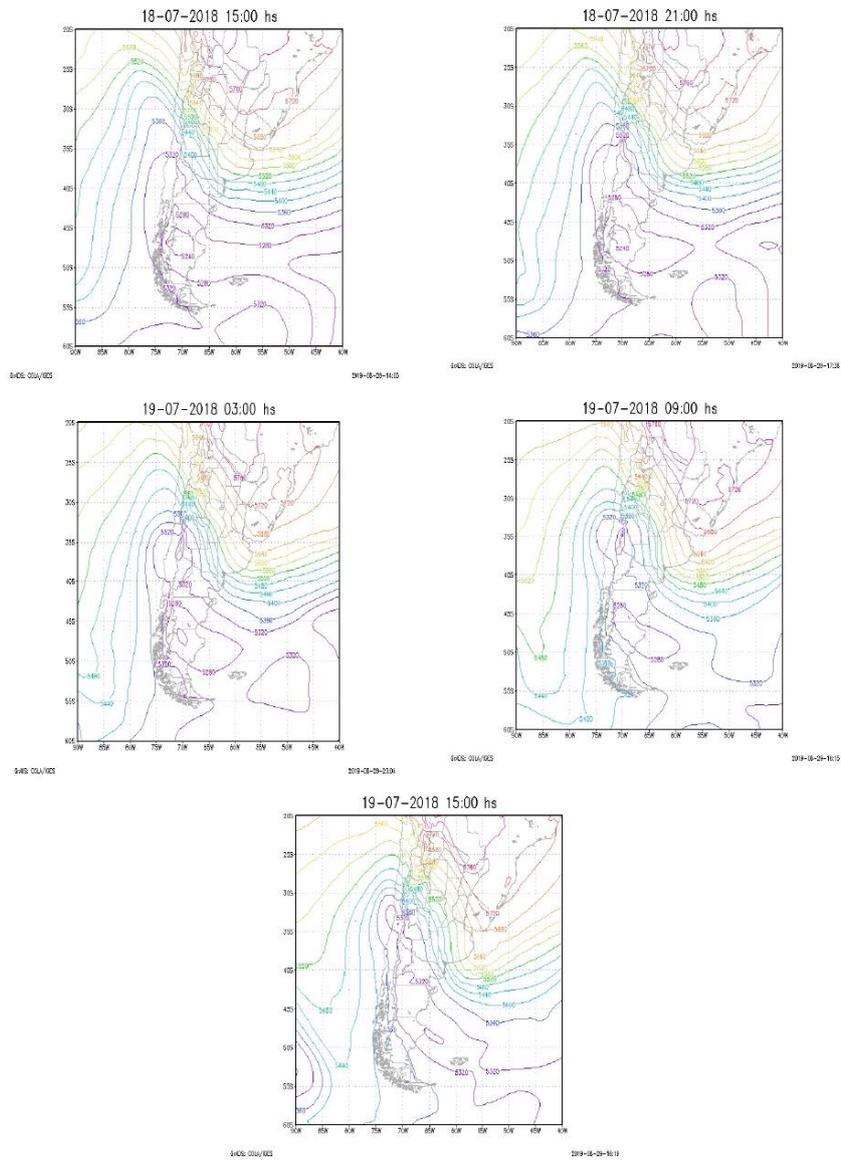
19-07-2018 15:00 hs



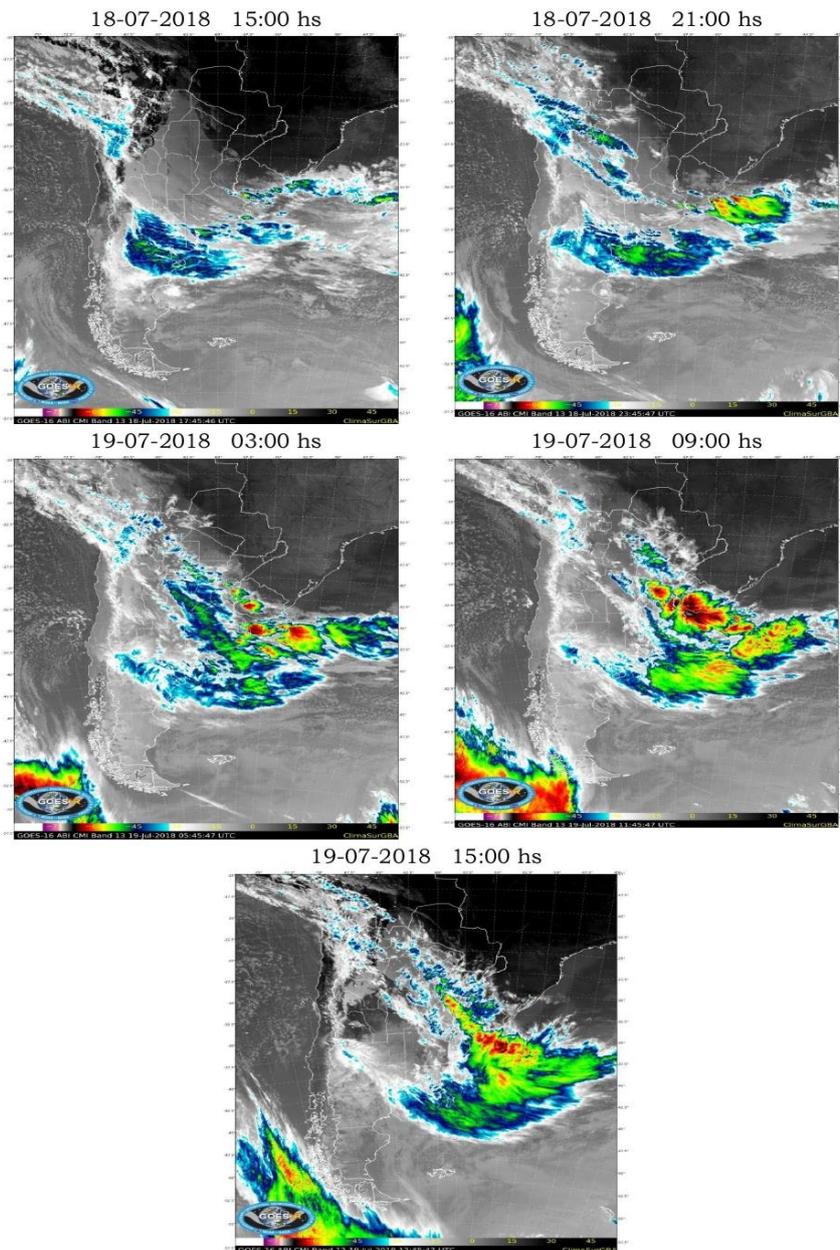
INMEX COU/EEZ

2018-07-19-15:00

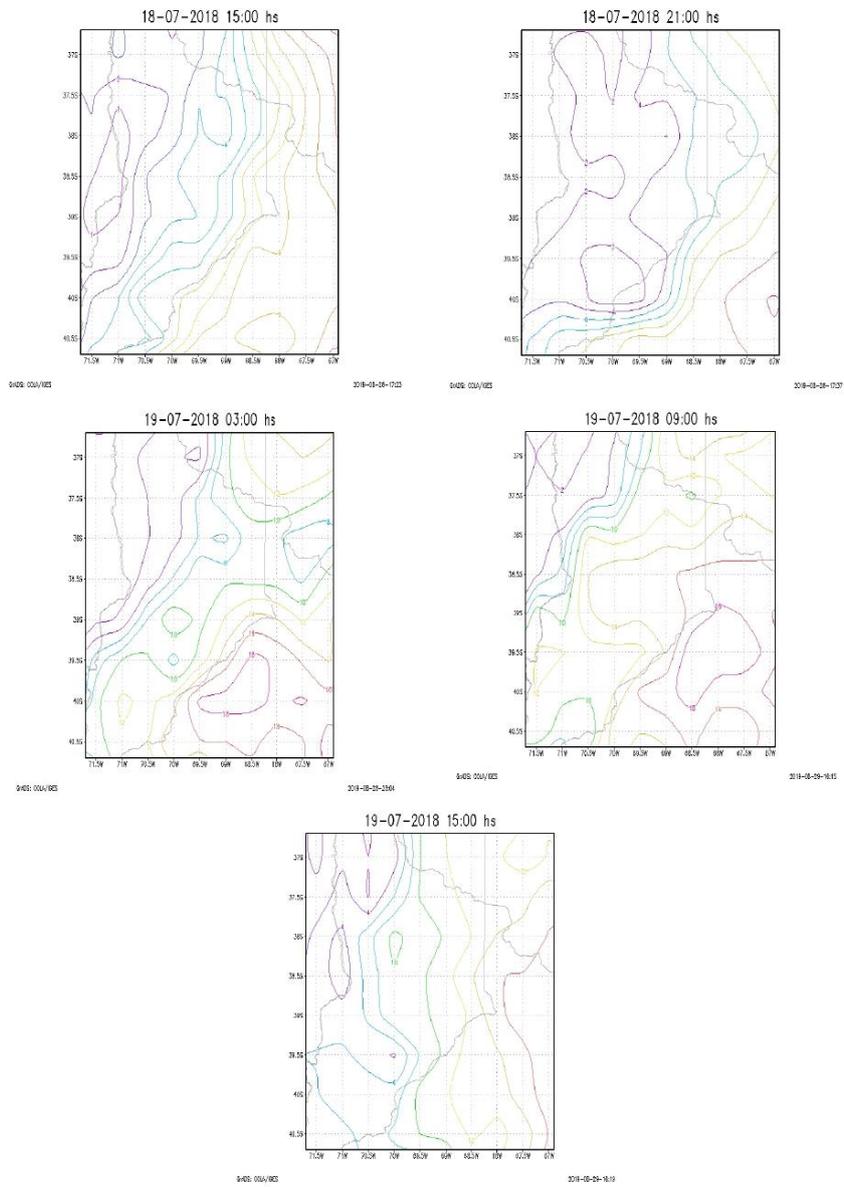
Sistemas de presión a 5000 metros de altura. Las líneas son las curvas de nivel de 500 hPa y están trazadas cada 40 m.



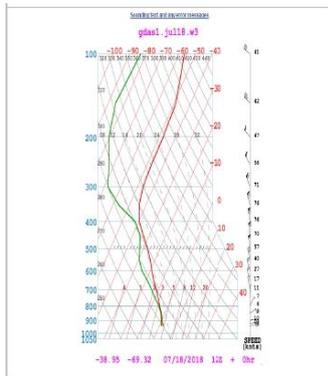
Espesores de la capa entre 1000 y 500 hPa. Las líneas están trazadas cada 40 m.



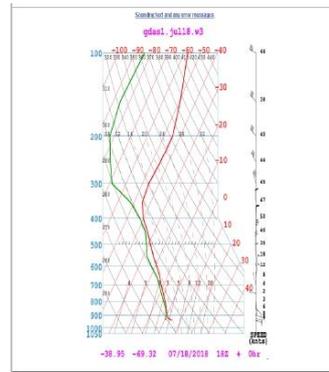
Imágenes satelitales infrarrojas realizadas del canal 4 del satélite GOES16. En colores temperatura del tope nuboso: grises y blancos $T > -30^{\circ}\text{C}$; celestes $-45^{\circ}\text{C} < T < -30^{\circ}\text{C}$; verdes $T < -45^{\circ}\text{C}$.



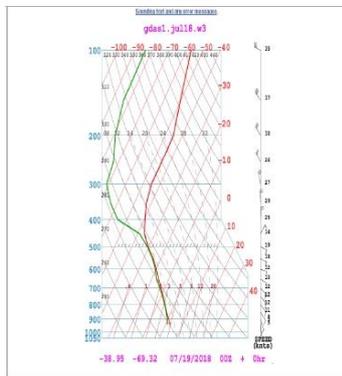
18-07-2018 09:00 hs



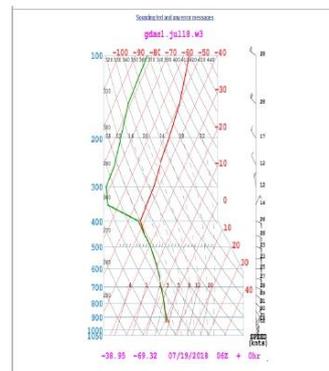
18-07-2018 15:00 hs



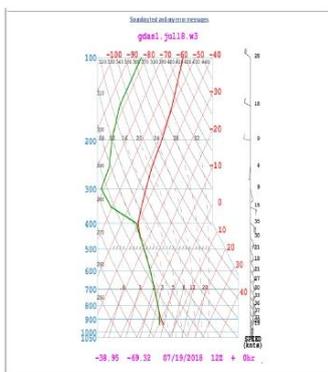
18-07-2018 21:00 hs



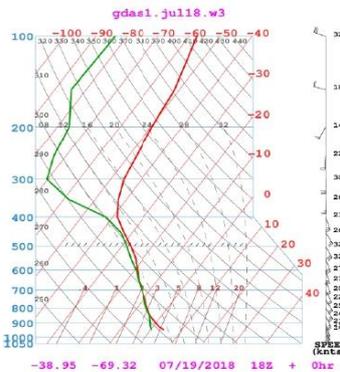
19-07-2018 03:00 hs



19-07-2018 09:00 hs



19-07-2018 15:00 hs



Sondeos aerológicos verticales en la posición de los Piquetes 31 y 23. Las isotermas son las líneas rojas inclinadas. El sondeo comienza en la zona inferior del diagrama que es la más cercana al suelo y termina en la parte de arriba que corresponde a la atmósfera superior. La curva roja corresponde a la temperatura y la verde a la temperatura de rocío. A la derecha el perfil de viento con intensidad en nudos (kt).

Glosario

ACRECIÓN es un término que se utiliza para nombrar el crecimiento de un cuerpo por agregación de cuerpos menores.

AGUA PRECIPITABLE: Es la profundidad total de agua líquida que se produciría si todo el vapor de agua contenida en una columna vertical de aire podría ser "exprimido", dejando el aire completamente seco.

AGUA SOBREENFRIADA: Es aquella que está enfriada a temperaturas más bajas que su punto de congelación de 0 °C.

CAMPO METEOROLÓGICO: Es un mapa o representación gráfica que aglutina las condiciones meteorológicas de una región determinada. Los datos volcados en este tipo de mapas provienen de la información obtenida de los modelos, sensores meteorológicos, satélites y radares.

GRADIENTE HORIZONTAL DE PRESIÓN: En un mapa meteorológico puede apreciarse que las isobaras están más o menos juntas en diferentes áreas. Se llama gradiente horizontal de presión a la variación de presión por unidad de distancia medida perpendicularmente a las isobaras.

ISOTACAS: Líneas que unen puntos donde el viento sopla con la misma intensidad.

NIEVE HÚMEDA: Se produce cuando nieve y agua se mezclan en diferentes proporciones, bien sea a causa de la lluvia o por las altas temperaturas. La nieve en la superficie adquiere un porcentaje de agua en estado líquido muy alto.

TEMPERATURA DEL BULBO HÚMEDO es la temperatura que brinda el termómetro de bulbo húmedo que es un termómetro de mercurio que tiene el bulbo envuelto en un paño de algodón empapado de agua, que se emplea para medir la temperatura húmeda del aire.

TROPÓSFERA: Es la capa de la atmósfera terrestre que está en contacto con la superficie de la Tierra y se extiende hasta una altitud de unos 10 km aproximadamente; en ella se desarrollan todos los procesos meteorológicos y climáticos.

ANEXO I

Ref. XII: SIMULACIÓN DE CRECIMIENTO DEL MANGUITO – LASSIG

Nombre del archivo: SIMULACIÓN MANGUITO DE HIELO.pdf

LaDiFA

Laboratorio de Dinámica
de Fluidos Ambientales

GAE

GRUPO ANALISE

**SIMULACIÓN DEL CRECIMIENTO DEL MANGUITO DURANTE LA
TORMENTA DEL 19/7/2018**

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
2.	MODELO DE MAKKONEN	1
3.	MODELO DE ADMIRAT.....	2
4.	DATOS METEOROLÓGICOS PARA ALIMENTAR A LOS MODELO	3
5.	RESULTADOS.....	3
6.	ANÁLISIS	4
7.	CONCLUSIONES FINALES.....	5
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	6

SIMULACIÓN DEL CRECIMIENTO DEL MANGUITO DURANTE LA TORMENTA DEL 19/7/2018

1. INTRODUCCIÓN

Existen varios modelos de nieve húmeda basados en datos experimentales y en datos de campo disponibles como los de Makkonen (1984), Poots (1996) y Admirat (2008).

Cada uno de ellos requiere datos meteorológicos distintos, y se aplicarán en función de los datos disponibles.

El de Makkonen se basa en un modelo en el que la visibilidad observada es el parámetro clave para modelar el contenido de nieve en el aire y la consiguiente carga de nieve en un conductor eléctrico.

El de Poots es un modelo simplificado de transferencia de calor y masa para la acumulación de nieve húmeda en un conductor de línea aérea de transmisión.

Las ecuaciones de transferencia de calor y masa que rigen el proceso de evolución de la nieve se deben resolver analíticamente para generar predicciones para la carga de nieve y el contenido de agua líquida de nieve en función de velocidad del viento, la humedad relativa, la temperatura del aire, la velocidad de precipitación y del diámetro y de las propiedades térmicas del conductor.

En el modelo de Admirat, el equilibrio termodinámico se simplifica a solo dos intercambios de calor: entre el calor convectivo que genera el flujo de aire a temperatura positiva y el calor de fusión resultante de parte de la nieve acrecida. Estos dos intercambios de calor están estrictamente localizados en la interfaz del manguito de aire y nieve.

El modelo de Poots requiere más datos de los disponibles por lo que no se lo utilizó en el presente informe.

2. MODELO DE MAKKONEN

Este modelo es muy empírico y está basado en las observaciones de la reducción de visibilidad que produce la precipitación, por lo que requiere de estaciones meteorológicas cercanas con observadores meteorológicos para asentar el registro de la visibilidad.

La expresión que indica la intensidad de acumulación de nieve en el conductor eléctrico I ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) es:

$$I = 2,1 \cdot V_m^{-1,29} \quad (1)$$

Donde V_m es la visibilidad.

La densidad de nieve que se acumula en el conductor ρ_i depende de la densidad de la nieve que precipita (K), y de la velocidad del viento (U) con la cual impacta sobre el mismo, así expresada:

$$\rho_i = K + 20 \cdot U \quad (2)$$

La masa M_i de nieve lineal depositada en el conductor ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$) en un intervalo de tiempo Δt se determina como:

$$M_i = M_{i-1} + l_i \cdot D_{i-1} \cdot \Delta t \quad (3)$$

Donde D_{i-1} es el diámetro de la nieve depositada en el intervalo anterior.

El diámetro incrementado será:

$$D_i = \left[\frac{4 \cdot (M_i - M_{i-1})}{\pi \cdot \rho_i} + D_{i-1}^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

Para que la nieve húmeda se deposite sobre el conductor es necesario cumplir con estos dos criterios:

$$\text{Que } T_a > \frac{1,75 \cdot 10^3}{P} \cdot [6,11 - R \cdot e_s(T_a)] \quad (5)$$

$$\text{Y además } T_w > -0,2^\circ\text{C} \quad (6)$$

Donde T_a es la temperatura del aire ($^\circ\text{C}$), y T_w es la temperatura de bulbo húmedo ($^\circ\text{C}$), R la humedad relativa, $e_s(T_a)$ la presión de saturación del vapor de agua a la temperatura del aire, y P es la presión del aire (Pa).

Por lo que el modelo opera primero verificando cuando se ha depositado nieve en el conductor a través de las ecuaciones 5 y 6, si se cumple entonces se calculan las ecuaciones 1 y 2, para aplicar sus resultados a las ecuaciones 3 y 4 determinando así el tamaño del manguito y su masa por metro lineal sobre el conductor eléctrico.

3. MODELO DE ADMIRAT

Este modelo asume que no todos los copos de nieve se adhieren al conductor eléctrico, y esto está representado por un factor de eficiencia β entre $0 < \beta < 1$.

También tiene en cuenta la tasa de deposición de nieve según la velocidad horizontal (U) y vertical del viento (W).

En su modelo simplificado el diámetro del maguito se calcula por la siguiente ecuación:

$$D_i = D_0 + \left(\frac{2 \cdot \beta}{\pi \rho_s} \cdot \frac{P_{prec}}{3600} \sqrt{1 + \frac{U^2}{W^2}} \right) \cdot \Delta t \quad (7)$$

Donde P_{prec} es la precipitación de nieve reducida a agua líquida por m^2 , ρ_s la densidad de la nieve y Δt el intervalo de tiempo.

La masa lineal depositada en el conductor esta expresada por:

$$M_i = M_{i-1} + \left(\beta \cdot \frac{P_{prec}}{3600} \cdot \sqrt{1 + \frac{U^2}{W^2}} \right) \cdot D_i \cdot \Delta y \quad (8)$$

4. DATOS METEOROLÓGICOS PARA ALIMENTAR A LOS MODELO

Como se mencionara antes, los datos desde la estación meteorológica de Cutral Có son escasos y dudosos, por lo que se recurrió a bases de datos más precisas.

Se tomaros dos bases de datos entre el 18 y 19 de Julio de 2018: la primera es de los pronósticos de la Ready NOAA, y la segunda del reanálisis NCEP/NCAR.

La base de datos pronosticados son obtenibles cada 3 horas, pero tienen el inconveniente de ser menos precisos, debido a la propagación de errores numéricos en el tiempo de cálculo, así un pronóstico meteorológico se considera bueno no más allá de 3 días.

Los datos de los reanálisis son más precisos, pues utilizan información real de lo ocurrido cada 6hs.

Comparando los mismos de ambas bases de datos, al no coincidir se decidió utilizar en las simulaciones los datos obtenidos desde el Reanálisis NCEP/NCAR.

5. RESULTADOS

En el modelo de Makkonen el parámetro más sensible es la visibilidad, y esta fue obtenida desde los datos del Reanálisis NCEP/NCAR como se indica en la tabla I.

Hs	Visibilidad (m)
15:00	18300
21:00	1200
03:00	500
09:00	800
15:00	2300

Tabla I: visibilidad expresada en metros.

Los resultados del crecimiento del diámetro del manguito y su masa se indican en la tabla II.

Hs	D (cm)	M (Kg/m)
15:00	1.72	0.000
21:00	3.05	0.084
03:00	6.04	0.540
09:00	7.70	1.034
15:00	8.30	1.194

Tabla II: evolución del manguito durante el evento meteorológico según el modelo de Makkonen.

Si bien el diámetro llegó a las 9hs a 7,70 cm, pero su masa fue de tan solo 1,034 Kg/m muy posiblemente sin consecuencias en la línea.

En el modelo de Admirat, además de los parámetros meteorológicos, el factor de eficiencia β juega un rol importante, en nuestra simulación se lo valió en $\beta = 0.1$ en función de la velocidad media del viento y a datos experimentales en túneles de viento reportados por varios autores.

Los resultados del crecimiento del diámetro del manguito y su masa se indican en la tabla III.

Hs	D (cm)	M (Kg/m)
15:00	1.71	0.000
21:00	1.92	0.001
03:00	6.63	0.348
09:00	20.13	3.212
15:00	28.75	4.378

Tabla III: evolución del manguito durante el evento meteorológico según el modelo de Admirat

Lo que conduce que a las 9hs del 19/7/2018 el diámetro del manguito llegó a unos 20,13 cm con una masa lineal de 3,212 Kg/m, valores que podrían producir un eventual daño en la línea según refiere Admirat en el trabajo "Wet snow accretion on overhead lines with French report of experience" (Journal Cold Regions Science and Technology, 65 (2011) 43-51, Ed. Elsevier).

6. ANÁLISIS

Ambos modelos de simulación son sencillos de aplicar a partir de datos meteorológicos confiables durante el evento.

El modelo de Makkonen dio el menor diámetro del manguito y una baja masa de nieve depositada, por otra parte este modelo es el más empírico, pues usa una variable subjetiva como es la visibilidad observada, que en nuestro caso no fue determinada en forma directa, y se la estimó a partir de los datos del Reanálisis NCEP/NCAR.

Los resultados comparativos de ambos modelos, de los crecimientos de los diámetros se indican en el gráfico 1, y el desarrollo de la masa de nieve acumulada en el conductor eléctrico se indican en el gráfico 2.

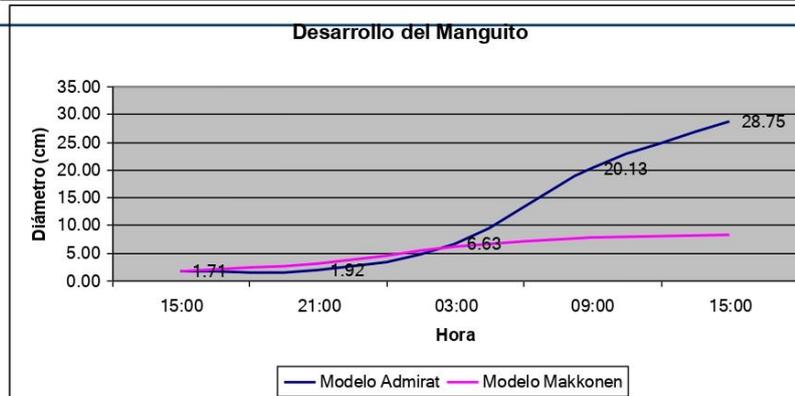


Gráfico 1: Comparación del crecimiento radial del maguito de nieve, según el modelo de Admirat y Makkonen.

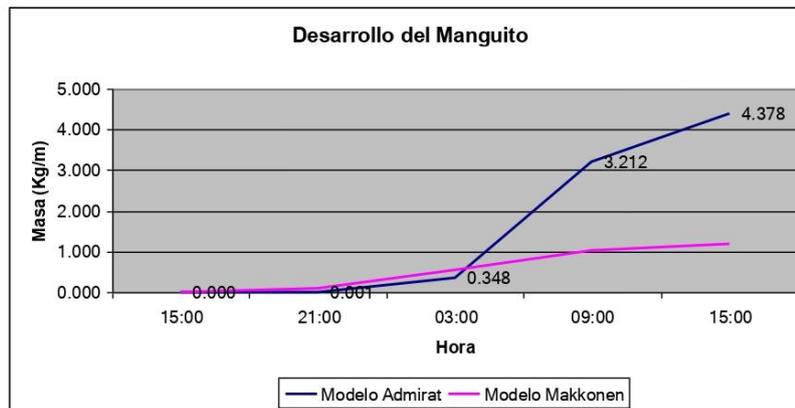


Gráfico 2: Comparación de la acumulación de masa de nieve en el maguito de nieve, según el modelo de Admirat y Makkonen.

7. CONCLUSIONES FINALES

1.- La precipitación de nieve húmeda en el área de los daños a las torres, entre los Piquetes 23 y 31 no fue excesiva puesto que se acumularon 13 cm.

2.- La velocidad máxima de la tormenta de viento en el área de estudio no fue extrema puesto que llegó a 32 km/h con ráfagas de 53 km/h, habiendo registros de eventos más intensos.

3.- El tamaño posible del manguito según el modelo de Makkonen arrojó un diámetro de 7,7 cm a las 9hs con una masa de 1,034 Kg/m, que según Admirat "manguitos de nieve de menos de 5-8 cm de diámetro y menos de 1 kg m^{-1} en sobrecarga de nieve, causan poco o ningún daño a las líneas aéreas".

4.- El tamaño posible del manguito según el modelo de Admirat arrojó un diámetro de 20,1 cm a las 9hs con una masa de 3,212 Kg/m, que según el mismo autor podrían producir daños en las líneas aéreas.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Makkonen, L., 1984. Modeling of ice accretion on wires. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 23 (6), 929-938.

Poots, G., 1996. Ice and snow accretion on structures. Research Studies Press (England) and John Wiley and Sons Inc., NY, New York, USA 35-37.

Admirat, P., 2008. Wet snow accretion on overhead lines. In: Farzaneh, Masoud (Ed.), *Atmospheric Icing of Power Network*, chap. 4. Springer Sciences, pp. 119-169.

Admirat, P.; 2011. Wet snow accretion on overhead lines with French report of experience; *Journal Cold Regions Science and Technology*, 65 (2011) 43-51, Ed. Elsevier.

ANEXO J

Ensayos Mecánicos de Tracción:

Barras lisas de $\frac{3}{4}$ " y cordones de pretensado de tres alambres

Ensayos Mecánicos: Tracción



UNCo

**Barras $\frac{3}{4}$ " y cordones de tres alambres de
columnas de LAT 132 Cutral Co – Zapala**

**Solicitante: Departamento de Ingeniería civil
(Ing. Sergio Paganini)**

Informe 109/19GEPSyN

Responsable: Edgardo L. Santarelli

Noviembre de 2019

*Centro de Ciencia y Tecnología de Materiales del Alto Valle
Departamento de Mecánica Aplicada - Facultad de Ingeniería - UNC
Buenos Aires 1400 - (8300) - NEUQUEN - ARGENTINA
Fax: ++54-299-4422836, Tel.: ++54-299-4490300 int. 210*

Contenido

1. Servicio realizado	1
2. Detalles Experimentales.....	1
2.1. Muestras.....	1
2.2. Ensayos.....	1
3. Resultados	2
4. Bibliografía	3
5. ANEXO A: Probetas cilíndricas de barra de 19 mm	4
6. ANEXO B: Trenzas de pretensado C 1750	9



INFORME

1. Servicio realizado

Se realizaron ensayo de tracción sobre probetas extraídas de barras de construcción y de cordones de tres alambres recuperados de estructuras de hormigón pretensado de columnas de la Línea de Alta Tensión 132 (LAT132) Cutral Co – Zapala, colapsadas.

2. Detalles Experimentales

2.1. Muestras

Se recibieron dos trozos de barras de hierro de construcción liso de 19 mm (3/4"), de diámetro y aproximadamente 2000 mm de longitud, de cada una las cuales se confeccionaron dos probetas de tracción cilíndricas estándar (tipo de probeta 1), según ASTM E8M – 2013. Estas probetas se extrajeron de los extremos de cada barra a fin de ensayar zonas diferentes en cada caso.

Se recibieron además varios trozos de Cordones de tres alambres de acero (3x3,00mm), para estructura de hormigón pretensado C 1750 (Ver Norma IRAM IAS U500-07/2005), de entre 1200 y 2000 mm de longitud, algunos de los cuales estaban doblados, y además en todos ellos se podían ver marcas de golpes, probablemente del martillo neumático utilizado para extraerlas de la columna de hormigón. De las zonas deterioradas se extrajeron una serie de probetas de prueba para puesta a punto del sistema de amarre en la MUE, y finalmente de las zonas que presentaron menor daño se extrajeron 5 probetas de aproximadamente 550 - 600 mm de longitud. Se utilizó una longitud libre entre mordazas de 495 mm.

2.2. Ensayos

Los ensayos de las probetas cilíndricas se realizaron según Norma ASTM E8M-2013, en la Máquina Universal Wolpert (Capacidad 400 kN) utilizando la escala de 200 kN. Estas probetas fueron instrumentadas, determinándose la carga, el desplazamiento del cabezal de la MUE, y el alargamiento mediante un extensómetro tipo Clip Gage con longitud de base de 25 mm. Este último instrumento se retiró de la probeta una vez alcanzadas deformaciones superiores a la de fluencia. Además, se identificó sobre la caña de la probeta, una longitud calibrada de 50 mm a fin de determinar el alargamiento plástico a rotura en base a esta dimensión.

Los cordones fueron ensayados en la misma MUE, en términos de la Norma IRAM IAS U500 – 246, pero solo se determinó carga máxima o de rotura, ya que dado el estado en que fueron recibidas las muestras, con restos de hormigón y deformaciones varias no sería relevante cualquier medición de deformación que hubiese podido realizarse sobre su longitud de ensayo y menos aún, la determinación de valores de carga al 1% de deformación como se plantea la Norma.

La fijación de los cordones en la máquina de ensayos se realizó mediante un sistema de conos partidos dentados que ajustan sobre la muestra (el dentado se modificó para que no provoquen daño excesivo sobre la probeta en la zona de ajuste), y deslizan sobre un cono hembra. Las



INFORME N° 109/19GEPsyN

condiciones de ensayo fueron temperatura ambiente = 28.5°C y humedad relativa del 35 % tanto para los ensayos de probetas cilíndricas como para los cordones.

3. Resultados

En el ANEXO A: Probetas cilíndricas de barra de 19 mm, se presentan los resultados individuales de cada probeta cilíndrica ensayada. En la tabla siguiente se resumen las dimensiones originales y los resultados de ensayo más relevantes de la muestra.

Tabla 1: Resultados de ensayos sobre probetas cilíndricas

Probeta	Diámetro	Lo	Lo clip	Carga máxima	Carga fluencia	Alarg.	Estricción	Sy	Su
	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[mm]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]
TR-1	12.6	50	25	95.06	57.50	22.60	45.05	461.1	762.4
TR-2	12.6	50	25	95.34	56.93	25.60	45.99	456.5	764.6
TR-3	12.55	50	25	94.34	56.88	24.00	46.61	459.8	762.7
TR-4	12.55	50	25	113.70	65.34	17.20	23.73	528.2	919.3
Promedio				94.91	57.10	24.07	45.88	459.13	763.23
Desvío Estándar				0.516	0.344	1.501	0.785	2.371	1.193

El análisis de estos resultados indica que la probeta TR-5 (que no se tuvo en cuenta para el cálculo de promedios y desvío estándar), presenta valores bien diferentes del promedio, fundamentalmente mayor resistencia y menor capacidad de deformación plástica. Llamativamente, en la etapa de construcción de la misma presentó evidencias de tensiones residuales, deformándose en cada pasada de torneado. Este comportamiento podría atribuirse a varias causas, entre ellas procesos de deformación plástica previa, altos gradientes térmicos, etc. Lo cierto es que pone en dudas la homogeneidad estructural y de comportamiento mecánico de la barra en cuestión.

En la Tabla 2 se resumen los resultados de ensayo de las muestras de cordones C1750, además en la misma se presentan los valores de referencia para estos cordones, según la Norma IRAM IAS U 500-07:2005. En el ANEXO B: Trenzas de pretensado C 1750, se presentan los gráficos de ensayo de estas muestras en términos de Carga vs. Desplazamiento del cabezal de la MUE, Variable esta última que podría considerarse como el alargamiento sobre la base de Lo=495 mm.

Tabla 2: Resultados de ensayo de Cordones C1750

Probeta	Masa unitaria	Carga Máxima	Resistencia a la tracción	Sección nominal	Alarg. (Lo=200mm)	Observaciones
	[kg/m]	[kN]	[Mpa]	[mm ²]	[%]	
Referencia	0.1665	37.10 (mín)	1749 (mín)	21.21	2.50%	IRAM IAS U500-7
Cr-1	0.1698	31.14	1468.18	ND	ND	Rot. en defecto
Cr-2	0.1700	38.63	1821.31	ND	ND	FZM ⁽¹⁾
Cr-3	0.1696	38.10	1796.32	ND	ND	FZM
Cr-4	0.1698	38.31	1806.22	ND	ND	FZM
Cr-5	0.1696	37.70	1777.46	ND	ND	FPZM ⁽²⁾
Promedio	0.1698	38.19	1800.33	---	---	CR-1 no incluida
Desvío Estándar	0.0002	0.39	18.38	---	---	---

(1) FZM = Fractura en zona de mordaza

(2) FPZM = Fractura parcial en zona de mordazas

Buenos Aires 1400 - (8300) - NEUQUEN - ARGENTINA. Fax: ++54-299-4422836/ ++54-299-4490300 int. 210



INFORME N° 109/19GEPsYN

La probeta CR-1 falló en la zona media de la longitud entre mordazas, por rotura de uno de los alambres. El análisis visual del mismo permitió determinar que la rotura se produjo en una marca de deformación plástica, que en virtud de sus características podría afirmarse que se produjo en la operación de recuperación del cordón. Esta probeta no fue incluida en el cálculo de los valores de la muestra.

Respecto de las probetas restantes, si bien se indica que fallaron en la zona de la mordaza, en realidad se produjeron en una zona próxima a la mordaza y el análisis visual de las fallas mostró que el efecto de éstas pudo haber inducido la falla, pero no se produjeron marcas ni daño sobre los alambres. Además, durante el ensayo se generó un proceso de acuellamiento o estricción de los alambres, dominado por el consecuente endurecimiento por deformación. Finalmente, los valores de resistencia medidos fueron levemente superiores al especificado en la norma.

Se puede concluir que esta muestra cumple con la especificación indicada en la Norma IRAM IAS U 500-07:2005 para cordones C1750.

4. Bibliografía

- I. IRAM – IAS U500-07:2005 “Cordones de dos o tres alambres de acero para estructuras de hormigón pretensado” Instituto Argentino de Normalización y Certificación (iram.org.ar).
- II. IRAM – IAS U500-246:2005 “Cordones de dos, tres o siete alambres de acero para estructuras de hormigón pretensado: Métodos de ensayos de tracción a temperatura ambiente” Instituto Argentino de Normalización y Certificación (iram.org.ar).
- III. ASTM E8/E8M - 13a “Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials” ASTM International (<https://www.astm.org/Standards/E8.htm>).


EDGARDO SANTARELLI
Profesor GEPsYN - DME (GTP)
Facultad de Ingeniería
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE

Salvo aclaración explícita en contrario, los resultados consignados se refieren exclusivamente a las muestras recibidas. No cabe al CECITEMA ni al Departamento de Mecánica Aplicada responsabilidad alguna por el uso indebido que se hiciera del presente informe.



Centro de Ciencia y Tecnología de Materiales del Alto Valle (CeCiTeMa)
Departamento de Mecánica Aplicada - Facultad de Ingeniería - UNC



5. ANEXO A: Probetas cilíndricas de barra de 19 mm



Resultados de ensayos tracción ASTM E8

Probeta = "Tr-1"

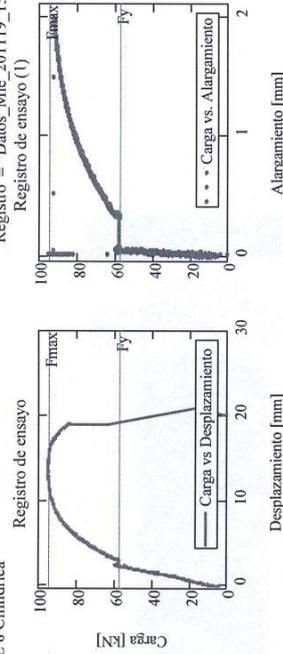
Tipo = "ASTM E 8 Cilindrica"

Registro = "Datos_Mie_201119_133748.txt"
Registro de ensayo (1)

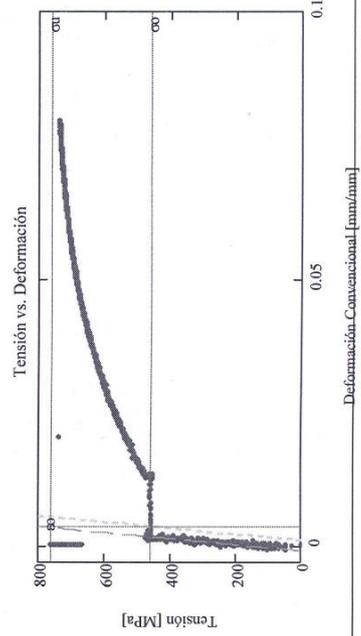
Datos de la probeta	
Diámetro do [mm]	12.60
Longitud Calibrada (G0) [mm]	50.00
Longitud Base extens. 1 (Gc1) [mm]	25.00
Longitud Base extens. 2 (Gc2) [mm]	

Condiciones Ambientales	
Temperatura Ambiente [°K]	302.15
Temperatura Ensayo [°K]	302.15
Humedad Relativa ambiente %	35.00
Velocidad de ensayo [mm/min]	1.07

Resultados del ensayo	
Carga Máxima [kN]	95.063
Tiempo hasta carga máxima [min]	13.217
Tiempo total [min]	15.393
Carga de Fluencia [kN]	57.500
Deformación en carga Máxima [mm/mm]	ND
Deformación en fluencia [mm/mm]	0.004
Alargamiento total [%]	22.600
Variación de sección en la estricción [%]	-45.052
Módulo Elástico Aparente* [MPa]	ND
Tension de Fluencia [MPa]	461.141
Tension de Tracción [MPa]	762.397



(1) Registro del alargamiento interrumpido por limite de extensómetro





Resultados de ensayos tracción ASTM E8

Probeta = "Tr-2"

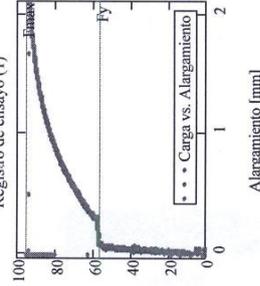
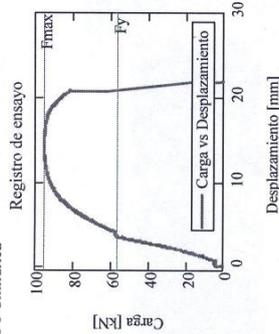
Tipo = "ASTM E 8 Cilindrica"

Registro = "Datos_Mié_201119_135819.txt"
Registro de ensayo (1)

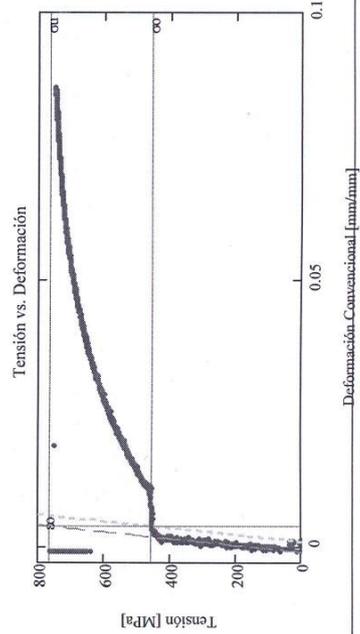
Datos de la probeta	
Diámetro do [mm]	12.60
Longitud Calibrada (G0) [mm]	50.00
Longitud Base extens. 1 (Gc1) [mm]	25.00
Longitud Base extens. 2 (Gc2) [mm]	

Condiciones Ambientales	
Temperatura Ambiente [°K]	302.15
Temperatura Ensayo [°K]	302.15
Humedad Relativa ambiente %	35.00
Velocidad de ensayo [mm/min]	0.78

Resultados del ensayo	
Carga Máxima [kN]	95.342
Tiempo hasta carga máxima [min]	16.215
Tiempo total [min]	22.157
Carga de Fluencia [kN]	56.926
Deformación en carga Máxima [mm/mm]	ND
Deformación en fluencia [mm/mm]	0.004
Alargamiento total [%]	25.600
Variación de sección en la estricción [%]	-45.989
Módulo Elástico Aparente* [MPa]	ND
Tension de Fluencia [MPa]	456.541
Tension de Tracción [MPa]	764.635



(1) Registro del alargamiento interrumpido por limite de extensómetro





Resultados de ensayos tracción ASTM E8

Probeta = "Tr-3"

Tipo = "ASTM E 8 Cilíndrica"

Registro = "Datos_Mit_201119_142454.txt"
Registro de ensayo (1)

Datos de la probeta

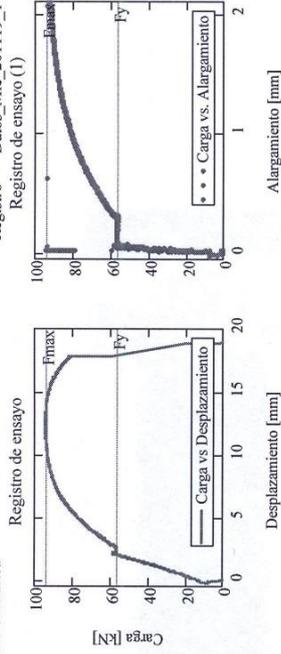
Diámetro [mm]	12.55
Longitud Calibrada (G0) [mm]	50.00
Longitud Base extens. 1 (Gc1) [mm]	25.00
Longitud Base extens. 2 (Gc2) [mm]	

Condiciones Ambientales

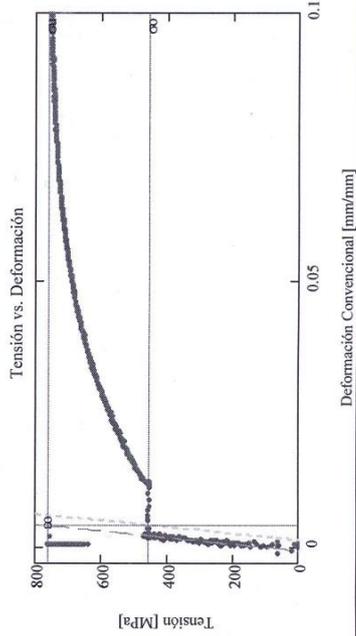
Temperatura Ambiente [°K]	302.15
Temperatura Ensayo [°K]	302.15
Humedad Relativa ambiente %	35.00
Velocidad de ensayo [mm/min]	1.67

Resultados del ensayo

Carga Máxima [kN]	94.342
Tiempo hasta carga máxima [min]	6.941
Tiempo total [min]	10.170
Carga de Fluencia [kN]	56.883
Deformación en carga Máxima [mm/mm]	ND
Deformación en fluencia [mm/mm]	0.004
Alargamiento total [%]	24.000
Variación de sección en la estricción [%]	-46.611
Módulo Elástico Aparente* [MPa]	ND
Tensión de Fluencia [MPa]	459.840
Tensión de Tracción [MPa]	762.656



(1) Registro del alargamiento interrumpido por límite de extensómetro





Resultados de ensayos tracción ASTM E8

Probeta = "T1-4"

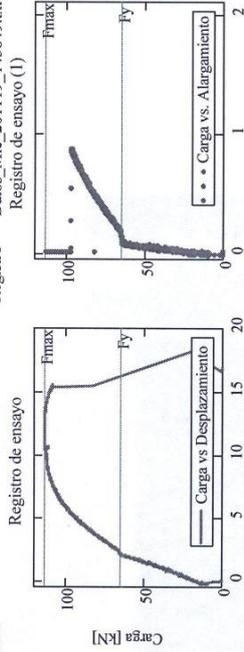
Tipo = "ASTM E 8 Cilíndrica"

Datos de la probeta	
Diámetro do [mm]	12.55
Longitud Calibrada (G0) [mm]	50.00
Longitud Base extens. 1 (Gc1) [mm]	25.00
Longitud Base extens. 2 (Gc2) [mm]	

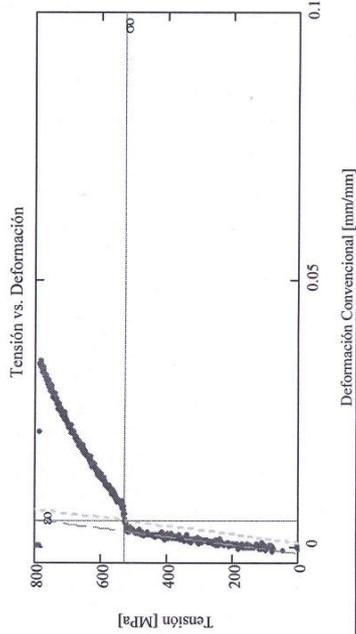
Condiciones Ambientales	
Temperatura Ambiente [°K]	302.15
Temperatura Ensayo [°K]	302.15
Humedad Relativa ambiente %	35.00
Velocidad de ensayo [mm/min]	0.78

Resultados del ensayo	
Carga Máxima [kN]	113.714
Tiempo hasta carga máxima [min]	14.792
Tiempo total [min]	17.088
Carga de Fluencia [kN]	65.335
Deformación en carga Máxima [mm/mm]	ND
Deformación en fluencia [mm/mm]	0.005
Alargamiento total [%]	17.200
Variación de sección en la estricción [%]	-23.734
Módulo Elástico Aparente* [MPa]	ND
Tensión de Fluencia [MPa]	528.166
Tensión de Tracción [MPa]	919.255

Registro = "Datos_Mié_201119_143849.txt"
Registro de ensayo (1)



(1) Registro del alargamiento interrumpido por límite de extensómetro





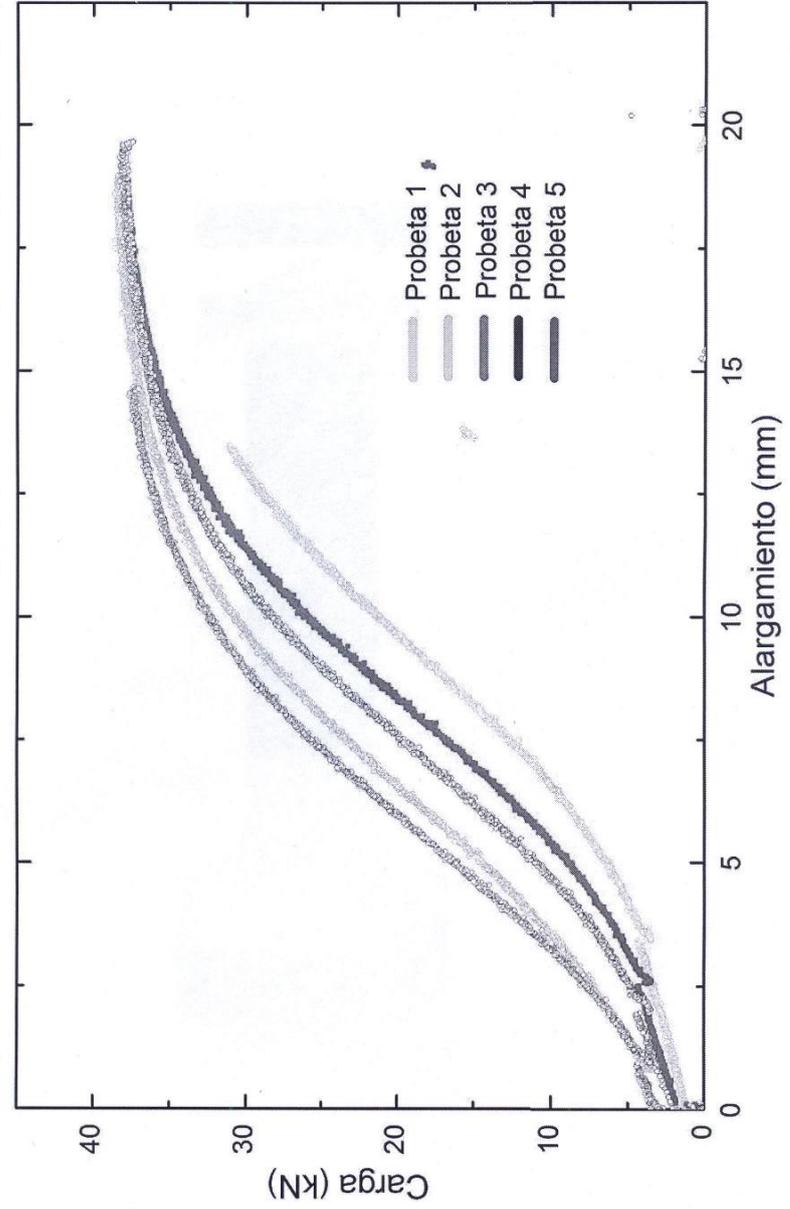
Centro de Ciencia y Tecnología de Materiales del Alto Valle (CeCITeMa)
Departamento de Mecánica Aplicada - Facultad de Ingeniería - UNC



6. ANEXO B: Trenzas de pretensado C 1750



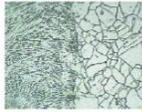
Centro de Ciencia y Tecnología de Materiales del Alto Valle (CeCiteMa)
Departamento de Mecánica Aplicada - Facultad de Ingeniería - UNC



ANEXO K

Informe Técnico:

Caracterización metalográfica de soldadura presente en barra lisa de $\frac{3}{4}$ "



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE MECANICA APLICADA
LABORATORIO DE METALOGRAFIA Y SOLDADURA



INFORME TÉCNICO: CARACTERIZACION METALOGRAFICA DE LA SOLDADURA PRESENTE EN UNA MUESTRA DE LAS COLUMNAS COLAPSADA DE LA LINEA 132KV – CUTRAL CO- ZAPALA

Solicitado por: LPM – Ing. Edgardo Santarelli

Producido por: Laboratorio de Metalografía y soldadura – Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional del Comahue – Ing.: Mónica Zalazar

Informe Número: LMT N° 1033- REV 00- 2019

Fecha: 18 de Diciembre de 2019.

1.- ALCANCE:

Se recibe en el Laboratorio una muestra soldada perteneciente a las columnas colapsadas de las líneas de 132KV Cutral Co – Zapala. Según lo informado la probeta pertenece a la muestra N° 2. El objetivo es caracterizar la soldadura presente para lo cual se obtiene un corte longitudinal en la zona de unión. La figura 1 corresponde a la muestra recibida y a la probeta preparada.

SALVO ACLARACION EXPLICITA EN CONTRARIO, LOS RESULTADOS CONSIGNADOS SE REFIEREN EXCLUSIVAMENTE A LA MUESTRA RECIBIDA. NO CABE AL DPTO. DE MECANICA APLICADA RESPONSABILIDAD ALGUNA POR EL USO INDEBIDO QUE SE HICIERE DE ESTE INFORME.

Buenos Aires 1400 -(8.300) - NEUQUEN - ARGENTINA. Tel: 0299-4490300 - Int. 261. Fax: 0299-4422836
e-mail: monica.zalazar@fain.uncoma.edu.ar

LMT N° 1033- REV 00 -2019

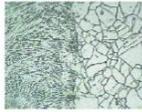


Figura 1: Muestra recibida y probeta preparada.



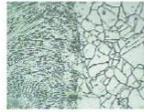
Probeta preparada



SALVO ACLARACION EXPLICITA EN CONTRARIO, LOS RESULTADOS CONSIGNADOS SE REFIEREN EXCLUSIVAMENTE A LA MUESTRA RECIBIDA. NO CABE AL DPTO. DE MECANICA APLICADA RESPONSABILIDAD ALGUNA POR EL USO INDEBIDO QUE SE HICIERE DE ESTE INFORME.

Buenos Aires 1400 -(8.300) - NEUQUEN - ARGENTINA. Tel: 0299-4490300 - Int. 261. Fax: 0299-4422836
e-mail: monica.zalazar@fain.uncoma.edu.ar

LMT N° 1033- REV 00 -2019



2.- RESULTADOS

La figura 2 muestra una macrografía de la probeta en la misma se observa la zona de unión, los cambios microestructurales y el material remanente.

Las barras involucradas en la unión no se observan alineadas.

La soldadura es en estado sólido, soldadura por fricción, no se observan marcas de flujo que puedan asociarse a rotación de uno de los elementos que forman la unión (soldadura por fricción). En la interfaz de soldadura se observa abundante porosidad e impurezas.

La microestructura de la barra lejos de la unión es de perlita, cercana a la soldadura se observa un importante crecimiento de grano con ferrita entre los granos. que corresponderían a cambios microestructurales asociados al conformado plástico de la muestra.

La muestra presenta un recubrimiento superficial de zinc. Si bien la microestructura en la matriz es de ferrita y perlita el tamaño de grano ferrítico no es homogéneo y se observan las zonas conformadas plásticamente.

Las figuras 3 y 4 muestran la microestructura en la superficie de fractura sobre uno de los extremos la microestructura es de mayor tamaño de grano y mayor presencia de perlita (figura 5). Las figuras 6 y 7 muestran la microestructura en la matriz.

Un análisis actual de la soldadura indicaría que la misma es inapropiada para las condiciones de servicio del material pero el análisis debe realizarse considerando las Normas que regían al momento de la fabricación de las columnas. Debido a que esta información que no fue suministrada no se utiliza en el presente informe.

SALVO ACLARACION EXPLICITA EN CONTRARIO, LOS RESULTADOS CONSIGNADOS SE REFIEREN EXCLUSIVAMENTE A LA MUESTRA RECIBIDA. NO CABE AL DPTO. DE MECANICA APLICADA RESPONSABILIDAD ALGUNA POR EL USO INDEBIDO QUE SE HICIERE DE ESTE INFORME.

Buenos Aires 1400 -(8.300) - NEUQUEN - ARGENTINA. Tel: 0299-4490300 - Int. 261. Fax: 0299-4422836
e-mail: monica.zalazar@fain.uncoma.edu.ar

LMT N° 1033- REV 00 -2019

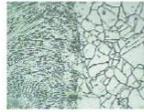


Figura 2: Macrografía de la muestra analizada



SALVO ACLARACION EXPLICITA EN CONTRARIO, LOS RESULTADOS CONSIGNADOS SE REFIEREN EXCLUSIVAMENTE A LA MUESTRA RECIBIDA. NO CABE AL DPTO. DE MECANICA APLICADA RESPONSABILIDAD ALGUNA POR EL USO INDEBIDO QUE SE HICIERE DE ESTE INFORME.

Buenos Aires 1400 -(8.300) - NEUQUEN - ARGENTINA. Tel: 0299-4490300 - Int. 261. Fax: 0299-4422836
e-mail: monica.zalazar@fain.uncoma.edu.ar

LMT N° 1033- REV 00 -2019

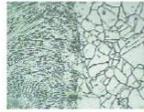
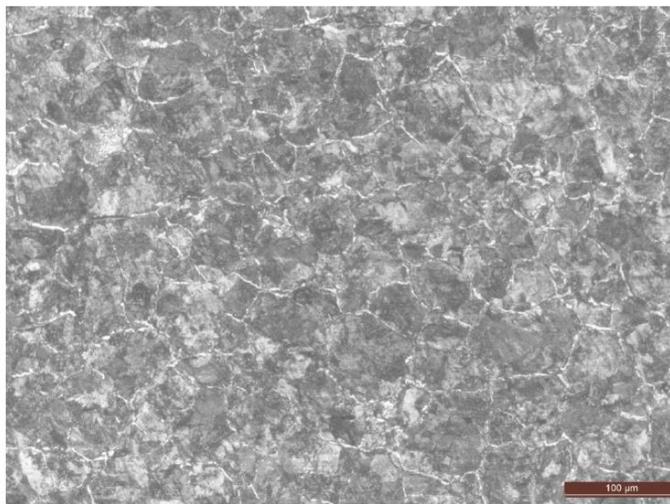
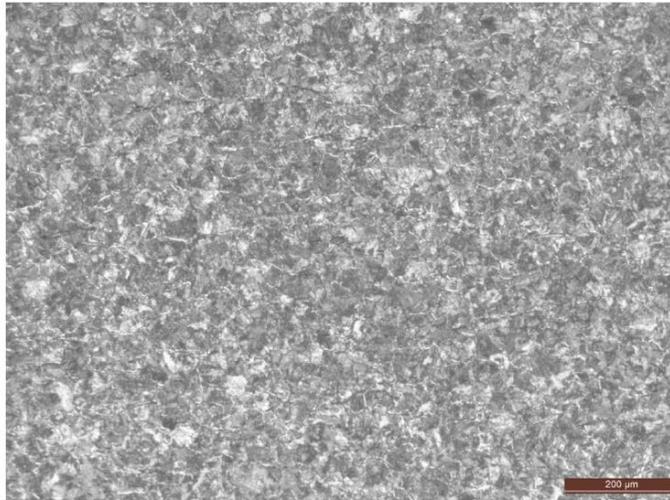


Figura 3: Microestructura en la barra lejos de la soldadura.



SALVO ACLARACION EXPLICITA EN CONTRARIO, LOS RESULTADOS CONSIGNADOS SE REFIEREN EXCLUSIVAMENTE A LA MUESTRA RECIBIDA. NO CABE AL DPTO. DE MECANICA APLICADA RESPONSABILIDAD ALGUNA POR EL USO INDEBIDO QUE SE HICIERE DE ESTE INFORME.

Buenos Aires 1400 -(8.300) - NEUQUEN - ARGENTINA. Tel: 0299-4490300 - Int. 261. Fax: 0299-4422836
e-mail: monica.zalazar@fain.uncoma.edu.ar

LMT N° 1033- REV 00 -2019

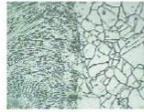
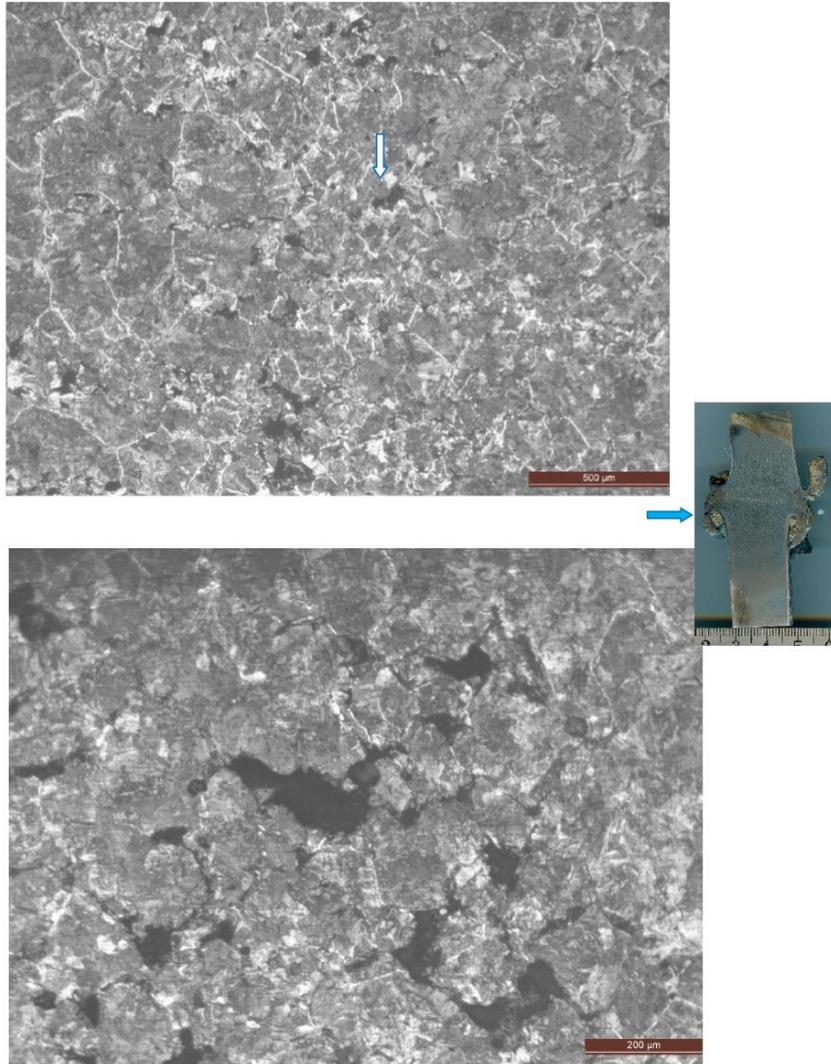


Figura 4: Microestructura en la zona de soldadura la zona oscura es porosidad.



SALVO ACLARACION EXPLICITA EN CONTRARIO, LOS RESULTADOS CONSIGNADOS SE REFIEREN EXCLUSIVAMENTE A LA MUESTRA RECIBIDA. NO CABE AL DPTO. DE MECANICA APLICADA RESPONSABILIDAD ALGUNA POR EL USO INDEBIDO QUE SE HICIERE DE ESTE INFORME.

Buenos Aires 1400 -(8.300) - NEUQUEN - ARGENTINA. Tel: 0299-4490300 - Int. 261. Fax: 0299-4422836
e-mail: monica.zalazar@fain.uncoma.edu.ar

LMT N° 1033- REV 00 -2019

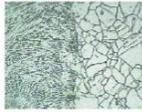
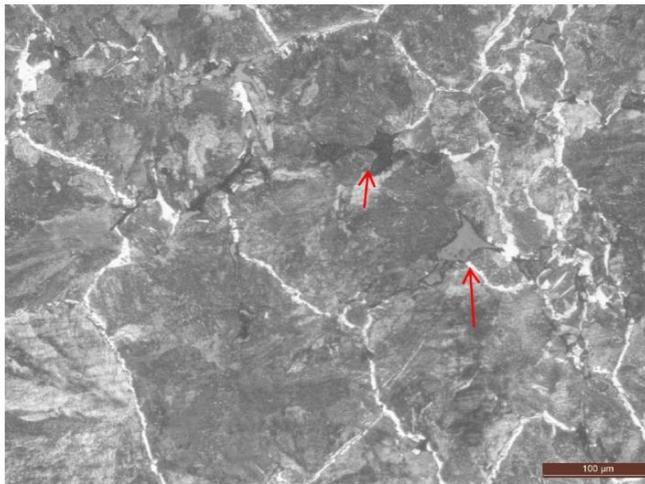
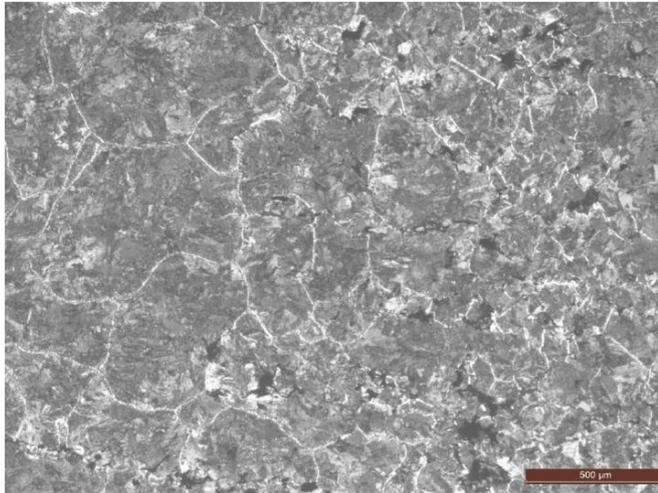


Figura 5: Microestructura en la zona de soldadura la zona oscura es porosidad.



SALVO ACLARACION EXPLICITA EN CONTRARIO, LOS RESULTADOS CONSIGNADOS SE REFIEREN EXCLUSIVAMENTE A LA MUESTRA RECIBIDA. NO CABE AL DPTO. DE MECANICA APLICADA RESPONSABILIDAD ALGUNA POR EL USO INDEBIDO QUE SE HICIERE DE ESTE INFORME.

Buenos Aires 1400 -(8.300) - NEUQUEN - ARGENTINA. Tel: 0299-4490300 - Int. 261. Fax: 0299-4422836
e-mail: monica.zalazar@fain.uncoma.edu.ar

LMT N° 1033- REV 00 -2019

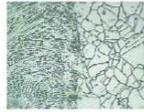
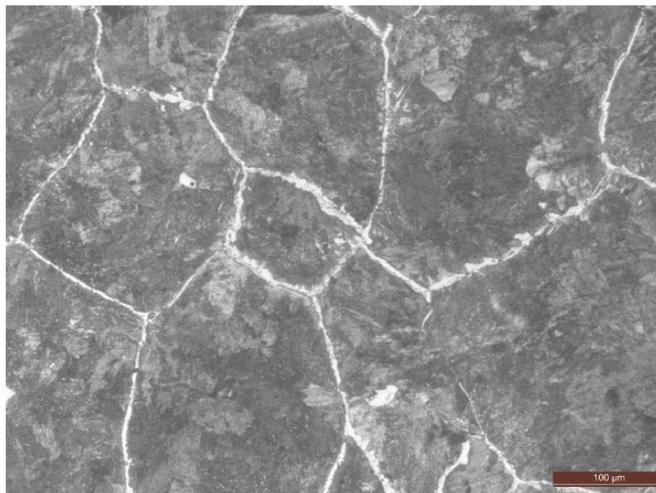
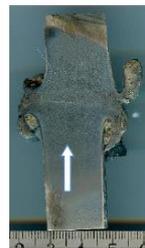
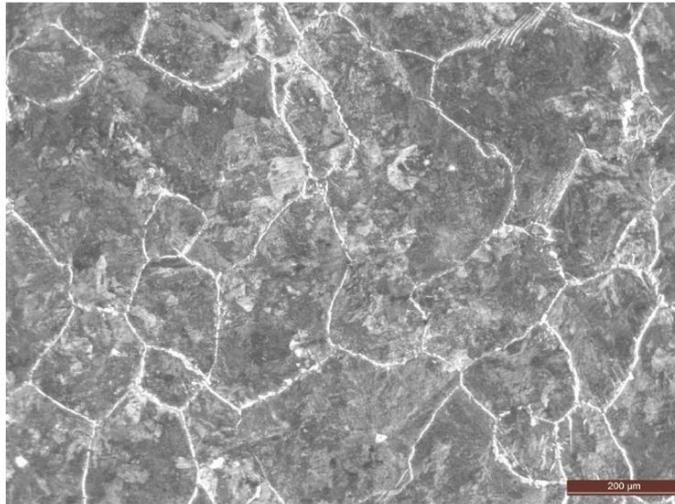


Figura 6: Microestructura en la zona afectada por calor



SALVO ACLARACION EXPLICITA EN CONTRARIO, LOS RESULTADOS CONSIGNADOS SE REFIEREN EXCLUSIVAMENTE A LA MUESTRA RECIBIDA. NO CABE AL DPTO. DE MECANICA APLICADA RESPONSABILIDAD ALGUNA POR EL USO INDEBIDO QUE SE HICIERE DE ESTE INFORME.

Buenos Aires 1400 -(8.300) - NEUQUEN - ARGENTINA. Tel: 0299-4490300 - Int. 261. Fax: 0299-4422836
e-mail: monica.zalazar@fain.uncoma.edu.ar

LMT N° 1033- REV 00 -2019

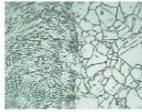
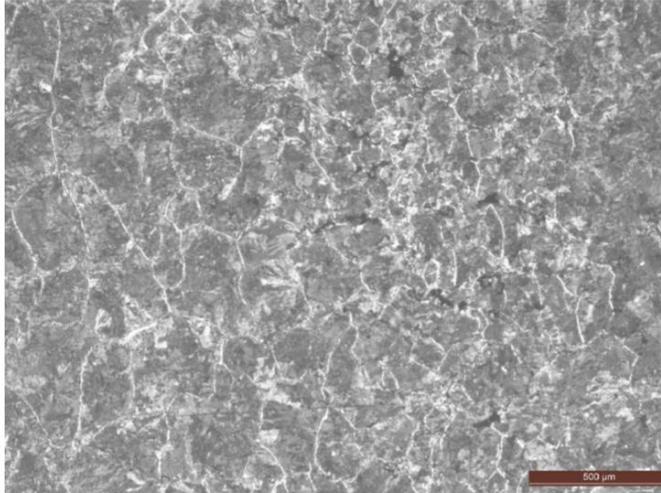
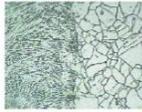


Figura 6: Microestructura en la zona afectada por calor



SALVO ACLARACION EXPLICITA EN CONTRARIO, LOS RESULTADOS CONSIGNADOS SE REFIEREN EXCLUSIVAMENTE A LA MUESTRA RECIBIDA. NO CABE AL DPTO. DE MECANICA APLICADA RESPONSABILIDAD ALGUNA POR EL USO INDEBIDO QUE SE HICIERE DE ESTE INFORME.

Buenos Aires 1400 -(8.300) - NEUQUEN - ARGENTINA. Tel: 0299-4490300 - Int. 261. Fax: 0299-4422836
e-mail: monica.zalazar@fain.uncoma.edu.ar LMT N° 1033- REV 00 -2019



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE MECANICA APLICADA
LABORATORIO DE METALOGRAFIA Y SOLDADURA



3.- NORMAS Y EQUIPOS UTILIZADOS:

La preparación metalográfica se realizó según Norma ASTM E3 - 11 "Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens".

Los reactivos de ataque están contemplados en la Norma ASTM E407 - 07e1 – "Standard Practice for Microetching Metals and Alloys".

La observación metalográfica óptica se efectuó en un microscopio óptico marca "LEICA DMI 3000M" con sistema incorporado de digitalización de imágenes.

SALVO ACLARACION EXPLICITA EN CONTRARIO, LOS RESULTADOS CONSIGNADOS SE REFIEREN EXCLUSIVAMENTE A LA MUESTRA RECIBIDA. NO CABE AL DPTO. DE MECANICA APLICADA RESPONSABILIDAD ALGUNA POR EL USO INDEBIDO QUE SE HICIERE DE ESTE INFORME.

Buenos Aires 1400 -(8.300) - NEUQUEN - ARGENTINA. Tel: 0299-4490300 - Int. 261. Fax: 0299-4422836
e-mail: monica.zalazar@fain.uncoma.edu.ar

LMT N° 1033- REV 00 -2019

ANEXO L

Ensayo Mecánico de Tracción:

Barra lisa de $\frac{3}{4}$ " con presencia de soldadura

**Evaluación estructural y de comportamiento
mecánico**



**Soldadura en Barras $\frac{3}{4}$ " de columnas de LAT
132 Cutral Co – Zapala**

**Solicitante: Departamento de Ingeniería
civil (Ing. Javier Buraschi)**

Informe 123/19GEPsYN

Responsable: Edgardo L. Santarelli

octubre de 2019

*Grupo de Estudio de Polimeros Sintéticos y Naturales (GEPsYN)
Departamento de Mecánica Aplicada - Facultad de Ingeniería - UNC
Buenos Aires 1400 - (8300) - NEUQUEN - ARGENTINA.
Fax: ++54-299-4422836, Tel.: ++54-299-4490300 int. 210*

INFORME

1. Servicio realizado

En el Informe 109/19 entregado oportunamente se realizaron ensayos de tracción instrumentados sobre las Barras de acero de construcción lisas recuperados de estructuras de hormigón pretensado de columnas de la Línea de Alta Tensión 132 (LAT132) Cutral Co – Zapala, colapsadas. Estas barras presentaron sendas uniones soldadas que fueron sometidas a estudios y ensayos.

2. Detalles Experimentales

2.1. Muestras

Se recibieron dos trozos de barras de hierro de construcción liso de 19 mm (3/4"), de diámetro y aproximadamente 2000 mm de longitud. En cada una de estas se identificó una zona en la que claramente se desarrolló un proceso de unión por soldadura en estado sólido (probablemente fricción, impacto o explosiva). Una de estas se utilizó para el Estudio Metalográfico llevado a cabo por el laboratorio LMT (Ver Informe LMT N° 1033- REV 00- 2019). Sobre la otra se realizó un ensayo de tracción para analizar la resistencia de la misma.

Para este ensayo se utilizó la Máquina de ensayos Wolpert (Capacidad 400 kN), y se obtuvo registro digital de los datos de carga y desplazamiento del cabezal.

3. Resultados

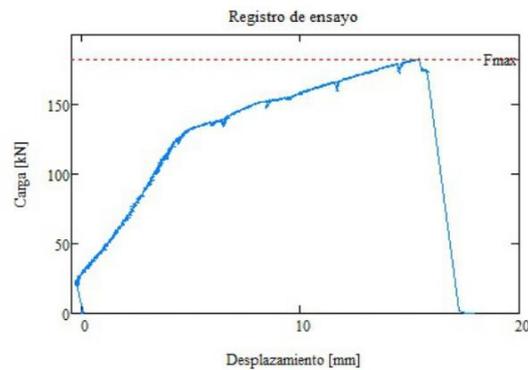


Figura 1: Registro del ensayo de tracción sobre la barra con unión soldada.

En la Figura 1 se presenta el gráfico carga desplazamiento, en el cual pueden apreciarse evidencias de resbalamiento de la barra en las mordazas.

La fractura se produjo de modo completamente frágil, pero fuera de la zona soldada, y en concordancia con una región con daño ocasionado probablemente en la etapa de extracción de la barra desde la columna de hormigón.

Las características mecánicas a tracción para este material se reportaron en el Informe 109/19, dando una tensión de fluencia de 460 MPa, una tensión de tracción de 760 MPa, y reducción de sección o estricción del 46%.

En función de estos valores, vemos que la tensión de tracción determinada para este ensayo es sensiblemente menor (612 MPa), correspondiente a una carga máxima de 182.74 kN (la carga máxima esperada para esta sección era del orden de los 220 a 230 kN), y una sección transversal derivada de un diámetro de 19.5 mm. Con respecto a la fluencia, si bien no es posible determinarla correctamente en este ensayo, en el gráfico de ensayo se puede ver que el cambio de comportamiento se produce aproximadamente a 130kN, lo que redonda en una tensión del orden de los 435 MPa.

Más llamativo aún es que el material no haya experimentado ningún tipo de proceso de reducción de diámetro (estricción $\cong 0$), es decir que la fractura de la probeta se produjo en la etapa de deformación plástica uniforme antes de alcanzar el valor de carga máxima del ensayo y como resultado, sin una estricción aparente.



Figura 2: Probeta ensayada y detalle de la fractura.

Cuando analizamos macroscópicamente la superficie de la fractura es claro que el proceso de fractura se inicia en un defecto superficial (defecto que podría estar asociado a la etapa de extracción de la barra), lo que demuestra la alta sensibilidad de este material a este tipo de daños. Cabe acotar que en el informe anterior se reportó el comportamiento anómalo de una probeta que indudablemente había sufrido algún proceso de daño previo.



INFORME N° 123/19GEPsyN

Según OT:

La evaluación de esta muestra pretendía evaluar si la zona soldada se comportaba como un sitio débil de la barra o no. Dado el comportamiento desarrollado por la probeta en el ensayo, no tenemos parámetro de comparación. En efecto, la marcada sensibilidad de este material a los daños por deformación localizada, determinó que la falla se produzca a niveles de carga sensiblemente inferiores a los esperados (183 kN contra 230kN máximo esperado), para esta sección de la muestra. A esto debe agregarse la mayor sección de la zona de soldadura, zona que sin embargo y teniendo en cuenta los resultados del informe metalográfico, debería tener menor resistencia mecánica debido a la inhomogeneidad estructural de la misma, la presencia de porosidad interna e impurezas derivadas del proceso de unión y la falta de alineación de las barras.

4. Conclusiones

Los resultados del ensayo de tracción no son concluyentes respecto a la resistencia de la zona de soldadura en comparación con la resistencia de la barra.

Al igual que en el informe anterior surge en forma dramática la afectación del comportamiento mecánico del material por efecto de daños localizados, deformación plástica localizada en este caso.

En cuanto a los resultados del análisis metalográfico de la zona de soldadura, las inhomogeneidades estructurales (variación de tamaño de grano, presencia de ferrita en bordes de grano, zonas con evidencia de deformación plástica localizada en la zona de unión, presencia de defectos internos tales como impurezas y fundamentalmente porosidades), y teniendo en cuenta la sensibilidad mecánica demostrada por este material a la presencia de defectos, es esperable que estas uniones se comporten como zonas mecánicamente débiles de la barra.

Firmado digitalmente por 91a759d7def2f455
Nombre de reconocimiento (DN):
cn=91a759d7def2f455
Fecha: 2019.12.20 10:33:21 -03'00'

Salvo aclaración explícita en contrario, los resultados consignados se refieren exclusivamente a las muestras recibidas. No cabe al CECITEMA ni al Departamento de Mecánica Aplicada responsabilidad alguna por el uso indebido que se hiciera del presente informe.

ANEXO M

Ensayo Mecánico de Compresión:

Testigos de hormigón

Ensayos Mecánicos: Compresión



**Testigos de hormigón extraídos de
columnas de LAT 132 Cutral Co – Zapala**

**Solicitante: Departamento de Ingeniería civil
(Ing. Sergio Paganini)**

Informe 114/19GEPSyN

Responsable: Edgardo L. Santarelli

Noviembre de 2019

*Centro de Ciencia y Tecnología de Materiales del Alto Valle
Departamento de Mecánica Aplicada - Facultad de Ingeniería - UNC
Buenos Aires 1400 - (8300) - NEUQUEN - ARGENTINA
Fax: ++54-299-4422836, Tel.: ++54-299-4490300 int. 210*



29 de noviembre de 2019

INFORME

1. Servicio realizado

Se realizaron ensayo de compresión sobre testigos de hormigón extraídos de estructuras de hormigón pretensado de columnas de la Línea de Alta Tensión 132 (LAT132) Cutral Co – Zapala, colapsadas.

2. Detalles Experimentales

2.1. Muestras

Se recibieron tres testigos de hormigón, los cuales contenían en su interior al menos un hierro en forma transversal a su altura. Las características, dimensiones y resultados de los ensayos se resumen en la Tabla 1.

2.2. Ensayos

Los ensayos se realizaron en la Máquina Universal Wolpert (Capacidad 400 kN) utilizando la escala de 200 kN.

3. Resultados

Tabla 1: Resultados de ensayos sobre probetas cilíndricas

Probeta		Diámetro	Altura	Peso	Carga	Su
Id.Lab.	Id.Comit.	[mm]	[mm]	[g]	[kN]	[MPa]
CH-1	C1	70	105	1050	142.5	37.03
CH-2	C2	70	94	930	115	29.88
CH-3	C7	70	77	740	126.5	32.87
Promedio					128.0	33.26
Desvío Estandar					19.4	5.06


EDUARDO L. SANTARELLI
Director GEPs y N - DME (GTP)
Facultad de Ingeniería
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE

Salvo aclaración explícita en contrario, los resultados consignados se refieren exclusivamente a las muestras recibidas. No cabe al CECITEMA ni al Departamento de Mecánica Aplicada responsabilidad alguna por el uso indebido que se hiciera del presente informe.



*Centro de Ciencia y Tecnología de Materiales del Alto Valle (CeCiteMa)
Departamento de Mecánica Aplicada - Facultad de Ingeniería - UNC*



ANEXO N

Ensayo Mecánico de Tracción:
Conductor de aluminio con alma de acero

Tracción a carga máxima

**Conductor de aluminio con alma de acero LAT 132
Cutral Co – Zapala.**

**Solicitante: Departamento de Ingeniería civil
(Ing. Javier Buraschi)**

Informe CTM 20/020

Responsable: Mg. Edgardo L. Santarelli



Setiembre 2020

*Centro de ciencia y Tecnología de los Materiales
Departamento de Mecánica Aplicada - Facultad de Ingeniería - UNC
Buenos Aires 1400 - (8300) - NEUQUÉN - ARGENTINA.
Email: edgardo.santarelli@fain.uncoma.edu.ar, Tel.: ++54-299-4490300 int. 210 - 355*

Informe: CTM 20/020	Neuquén, 10 de septiembre de 2020
Caracterización FTIR	Orden de trabajo:
Solicitante: Dpto. Ing. Civil-FAIN UNCo	Ing. Javier Buraschi

Contenido

INFORME	3
1. Servicio realizado	3
2. Detalles experimentales	3
2.1. Preparación de las muestras	3
2.2. Equipo y método	3
3. Resultados	4
3.1. Ensayos preliminares de cable completo	4
3.2. Ensayos del alma de acero completa	4
3.3. Ensayos de hilos individuales	5
3.3.1. Alma de acero	5
3.3.2. Hilos de aluminio	6
3.4. Análisis	7
4. Conclusión	8

Salvo aclaración explícita en contrario, los resultados consignados se refieren exclusivamente a las muestras recibidas. No cabe al CeCTeMa ni a la Facultad de Ingeniería, responsabilidad alguna por el uso indebido que se hiciera del presente informe.

INFORME

1. Servicio realizado

Se realizaron ensayos de tracción tendientes a determinar la resistencia en carga máxima de un cable conductor de aluminio con alma de acero.

2. Detalles experimentales

2.1. Preparación de las muestras

Se recibieron tres muestras de varios metros de longitud cada uno, de un conductor de aluminio compuesto por dos capas de alambres de aluminio con un total de 26 hilos de 2,65 mm de diámetro y un alma de acero 1x7 (siete hilos) de 2,05 mm de diámetro, tal como puede observarse en Figura 1. Estas muestras fueron identificadas como A, B y C respectivamente.

De estas muestras se obtuvieron probetas del cable completo, del alma completa, y de hilos individuales tanto del alma de acero como de los hilos de aluminio.

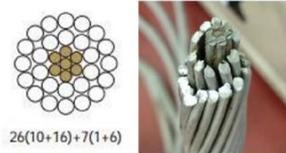


Figura 1: Esquema del conductor

2.2. Equipo y método

En primera instancia se intentó ensayar el conjunto completo con dos metodologías diferentes, ninguna de las dos permitió obtener resultados utilizables debido a que los hilos de aluminio externos deforman y generan resbalamientos en el sistema de sujeción.

Finalmente se optó por la evaluación del alma de acero completa (dos ensayos), en un equipo Wolpert en la escala de 100 kN y para la sujeción de las muestras en el marco de cargas de la MUE se utilizó un sistema de construcción propia, tipo cabrestante que trabaja por principio de freno de prony.

Además, se ensayaron hilos individuales tanto del alma de acero como de los conductores de aluminio. Esta etapa del trabajo se llevó a cabo en un equipo INSTRON – EMIC 23-30, y para el montaje de los hilos en el marco de carga se utilizó también un dispositivo tipo cabrestante que trabaja por principio de freno de prony (“UNCO D200 mm”), cuyos discos tienen un diámetro de arrollamiento de 200 mm y la superficie está recubierta con papel abrasivo tamaño de grano 1200. En todos los casos las distancia entre centros

de los discos de arrollamiento fue de 300 mm que coincide con la longitud de ensayo de las probetas. La velocidad de ensayo en todos los casos fue de 5 mm/min.

3. Resultados.

3.1. Ensayos preliminares de cable completo

En la Figura 2 se muestra uno de los esquemas de ensayo planteado para el cable completo y la muestra utilizada, el otro esquema se planteó sobre el mismo sistema de cabrestante que se utilizó para el ensayo del alma completa. En ningún caso fue posible alcanzar la rotura del cable debido a que los conductores de aluminio sufrían deformación y resbalamientos en los sistemas a niveles de carga moderados.

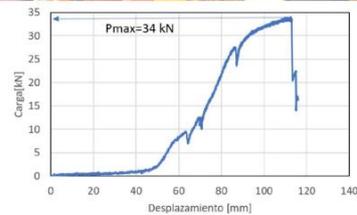
Figura 2: Montaje de cable completo en el equipo AMSLER, según prueba preliminar.



3.2. Ensayos del alma de acero completa

En la figura 4 puede observarse la probeta montada, el detalle de la etapa de rotura durante el ensayo y el resultado en términos de carga – desplazamiento. En el registro se

Figura 3: Ensayo del alma completa. En las imágenes superiores, el sistema de montaje y las roturas de hilos de acero, tanto a la salida del soporte superior como del inferior. En la parte inferior el registro de ensayos



pueden observar algunos eventos de caída de carga previos a la rotura, que están relacionados con acomodamientos y resbalamientos de la probeta sobre el sistema de sujeción. La carga máxima obtenida en estos ensayos fue de 34.00 kN.

3.3. Ensayos de hilos individuales.

3.3.1. Alma de acero.

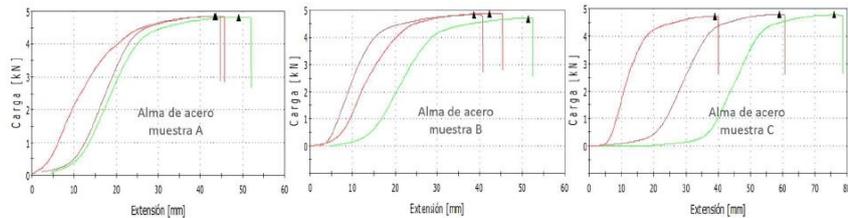


Figura 4: registros de ensayo para hilos individuales del alma de acero.

En la Figura 4 se presentan los registros de ensayos separados por cada muestra recibida. En la Tabla 1 se resumen las características dimensionales de las probetas y los resultados de ensayo. Además, se determinan los promedios y desvío estándar para los valores de carga máxima y reducción de sección.

Tabla 1: Datos y resultados para los hilos de acero

Probeta	Diámetro inicial [mm]	Diámetro final [mm]	Humedad [%]	Temperatura [°C]	Reducción de sección [%]	Carga máxima [kN]
T1A ⁽¹⁾	2.05	ND	40	21.8	ND	2.01
T2A ⁽¹⁾	2.05	ND	39	22.0	ND	3.14
T3A	2.05	1.53	39	22.0	-44.30	4.85
T4A	2.00	1.45	40	20.7	-47.44	4.85
T5A	2.08	1.44	40	20.8	-52.07	4.85
T6A	2.00	1.40	40	21	-51.00	4.82
T1B	2.05	1.45	39	22.2	-49.97	4.87
T2B	2.05	1.49	39	22.2	-47.17	4.81
T3B	2.05	1.54	39	22.2	-43.57	4.67
T1C	2.05	1.56	39	21.5	-42.09	4.72
T2C	2.05	1.53	39	21.6	-44.30	4.79
T3C	2.05	1.51	39	21.6	-45.74	4.77
Promedio					-46.77	4.80
Desvío SD					3.371	0.064

NOTA: (1) Probetas de la muestra A cuyos valores de resistencia dieron muy por debajo de los valores representativos del material, razón por la cual para esta muestra se ensayaron tres probetas adicionales. Los valores de las probetas T1A y T2A no se tuvieron en cuenta en la evaluación. No se determinaron causas de esta variación, pero dado que se intenta determinar la resistencia del cable, estos valores no son representativos.

3.3.2. Hilos de aluminio

En la Figura 5 se pueden observar los registros de ensayo tal como los entrega el utilitario "Blue Hill" del sistema de ensayos, INSTRON – EMIC 23-30.

Estas probetas de aluminio se extrajeron de las tres muestras (A, B, y C), de cada muestra se extrajeron 3 (tres) probetas de cada capa de hilos de aluminio. En la Tabla 2 se resumen los resultados de ensayo, incluidos promedios y desvío estándar.

Tabla 2: Datos y resultados para los hilos de aluminio

Probeta	Diámetro	Diámetro	Humedad	Temperatura	Reducción de sección	Carga máxima
	inicial	final				
	[mm]	[mm]	[%]	[°C]	[%]	[kN]
1	2.67	1.25	40	21.7	-78.08	1.02
2	2.66	0.99	39	21.8	-86.15	1.00
3	2.65	1.07	39	22.0	-83.70	0.87
4	2.65	1.27	39	22.1	-77.03	0.86
5	2.66	0.99	39	22.1	-86.15	0.97
6	2.65	1.15	39	22.1	-81.17	0.91
7	2.66	0.98	38	22.1	-86.43	0.95
8	2.65	0.93	39	22.1	-87.68	0.95
9	2.67	1.03	38	22.0	-85.12	0.87
10	2.64	0.97	39	21.5	-86.50	0.85
11	2.65	0.98	39	21.7	-86.32	0.92
12	2.65	1.04	39	21.7	-84.60	0.88
13	2.65	0.94	39	21.8	-87.42	0.87
14	2.64	0.88	39	21.8	-88.89	0.90
15	2.65	0.95	39	21.8	-87.15	0.84
16	2.62	1.09	39	21.8	-82.69	0.83
17	2.65	0.95	38	22.0	-87.15	1.03
18	2.67	1.25	38	22.0	-78.08	0.96
Promedio					-84.46	0.92
Desvío SD					3.613	0.063

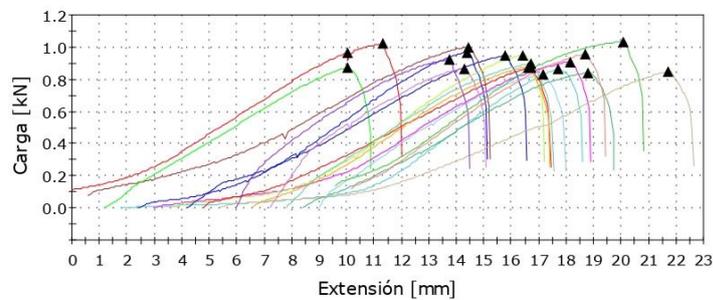


Figura 5: registros de ensayo de las probetas de aluminio

3.4. Análisis

Para este tipo de elementos es posible determinar un valor de Resistencia Específica o Resistencia Nominal, como la sumatoria de la resistencia (carga máxima) de cada uno de los componentes.

En este caso se determinó un valor promedio de resistencia de los componentes individuales tanto para el alma de acero como para los hilos de aluminio. Además, para el alma de acero, en el § 3.2 fue posible determinar el valor de Resistencia Total o Carga máxima que soporta en un ensayo de tracción, con un valor de 34 kN.

El alma está compuesta por siete hilos de acero de aproximadamente 2 mm de diámetro de modo que la Resistencia Nominal puede estimarse como el producto de la cantidad de hilos por el promedio de resistencia obtenido para los hilos individuales:

Resistencia Nominal del Alma= 33.6 kN.

Resultado este que es consistente con el anterior, dentro del desvío de la muestra.

Además, los hilos de aluminio presentan una carga máxima promedio 0.92 kN, y el cable está compuesto por 26 hilos, con lo cual el aporte máximo de los hilos de aluminio a la resistencia del cable será

Resistencia Nominal de los hilos de aluminio = 23.8 kN

En principio esto redundaría en una resistencia nominal total del cable de 57.4 kN.

Otra forma de analizarlo es utilizando los valores de resistencia mínima de los hilos, para lo cual se utilizaron los valores de carga mínima de ensayo y la sección máxima de conductor a fin de determinar la tensión de resistencia mínima tanto para Acero como para Aluminio.

De este modo:

Acero:	Resistencia mínima a rotura	$\sigma_{MINac} = 1374.36 \text{ MPa}$
	Sección neta de acero	$A_{TAc} = 23 \text{ mm}^2$
Aluminio:	Resistencia mínima a rotura	$\sigma_{MINal} = 148.24 \text{ MPa}$
	Sección neta de Aluminio	$A_{TAl} = 144 \text{ mm}^2$

Carga máxima nominal:

$$P_{NOM} = \sigma_{MINac} \cdot A_{TAc} + \sigma_{MINal} \cdot A_{TAl} \quad P_{NOM} = 53 \text{ kN}$$

Lo más probable es que este cable corresponda a un conductor de sección nominal Al/Ac 150/25 (en mm^2), constituido por 26 hilos de Aluminio puro de 2,7 mm de diámetro y

7 hilos de acero de 2,10 mm de diámetro. Para un cable de este tipo se especifica una resistencia mínima de 53.60 kN. El cálculo de resistencia mínima a rotura, teniendo en cuenta la tensión mínima por hilo determinada en estos ensayos, y la sección nominal total de cada uno de los componentes según catálogo, permite obtener:

$$P_{NOM} = \sigma_{MINac} \cdot A_{NOMac} + \sigma_{MINal} \cdot A_{NOMal} \qquad P_{NOM} = 56.6 \text{ kN}$$

Por lo demás, si se tratara de aleación de aluminio con alma de acero, la resistencia a la tracción asignada o nominal es determinada como la suma de la resistencia a la tracción mínima de la parte de aluminio más la resistencia a la tracción mínima del acero, correspondiente a un alargamiento compatible con el del aluminio en el momento de la rotura. Por razones de especificación y de comodidad, esta resistencia corresponde al 1 % del alargamiento sobre una muestra de 250 mm de longitud antes del cableado.

Si bien no se realizaron análisis de composición química de los componentes del conductor, los valores de resistencia de los hilos de aluminio permiten inferir que se trata de aluminio puro y no de aleación.

4. Conclusión

Dada las facilidades experimentales y el tipo de conductor bajo análisis no fue posible determinar la resistencia real mediante un ensayo del cable completo.

Si fue posible ensayar el alma de acero completa determinándose un valor de resistencia de 34 kN, resultado que correlaciona bien con la resistencia nominal del alma obtenida por ensayo de los hilos individuales.

Un procedimiento similar, teniendo en cuenta los valores de resistencia mínima individual a rotura, determinados en estos ensayos para los hilos de cada material y los diferentes análisis realizados permiten concluir que la carga mínima de rotura del conductor será un valor de entre 53 kN y 56 kN.

Edgardo Santarelli Firmado digitalmente por Edgardo Santarelli
Fecha: 2020.09.30 15:23:26 -03'00'

ANEXO O

Ensayo Mecánico de Deslizamiento:

Deslizamiento relativo cable conductor - grapas de suspensión



Universidad Nacional del Comahue
Facultad de Ingeniería
Departamento Mecánica Aplicada
Área Diseño Mecánico

INFORME TÉCNICO FI-MA-AD-IT-154-19

“Ensayo deslizamiento grapa de suspensión”

COMITENTE: EPEN

Rev.	Fecha	Descripción	Realizó	Revisó	Aprobó
00	25-10-2019	Versión final	JIC	DFC	GK

Contenido

CONTENIDO	2
1. OBJETIVO	3
2. METODOLOGÍA DE ENSAYO	3
3. EQUIPAMIENTO UTILIZADO	4
4. RESULTADOS	4
5. CONCLUSIONES	4
ANEXO I: REGISTRO FOTOGRÁFICO	5

1. OBJETIVO

El objetivo del ensayo a realizar es la determinación de la carga de deslizamiento del conductor en la grapa de suspensión. Se ensayaron tres muestras.

2. METODOLOGÍA DE ENSAYO

Para la realización del ensayo tecnológico solicitado, se fabricó un sistema de retención de la grapa a partir de un diseño ad-hoc, tal como se puede observar en la Figura 1 - Sistema de retención.



Figura 1 - Sistema de retención

El tiro del cable se realiza mediante un tornillo de tracción dispuesto en el laboratorio de ensayos de conductores (LEC). Mediante una celda de carga se determina la fuerza aplicada, sin registro, con visualización en un monitor. En función de lo indicado, se dispuso la instalación de una cámara de video a los fines de registrar en tiempo real, la fuerza aplicada mediante la visualización simultánea del monitor de la celda de carga y el movimiento relativo del conductor respecto de la grapa, tomando como referencia una marca sobre el conductor respecto de un punto fijo asociado al dispositivo de retención. Detalles sobre el particular se pueden apreciar en la Figura 2.



Figura 2

3. EQUIPAMIENTO UTILIZADO

- **Celda de Carga(*)**
Marca: Sensor Developments Inc.
Capacidad: 500.000 N
Modelo: 10190-055
Serie N°: 171423
- **Acondicionador y Monitor de señal**
Marca: Sensor Developments Inc
Modelo: PMAC 2000 Serie N°: 163797
- **Cámara de registro**
Marca: DAHUA EZ-IP
Producto: IP Camera
Modelo: IPC-B1A20P
Sensor de imagen: 1/2.9" 2Megapixel progresive CMOS
Píxeles efectivos: 1920(V) x 1080(H)

(*) N° Certificado calibración: 20257 Laboratorio: A&L LC-039 (OAA)

4. RESULTADOS

Muestra	Carga de inicio de deslizamiento [kg]
1	1464
2	1405
3	1200

Tabla 1

En el Anexo 1 se presentan imágenes con detalle sobre el particular.

5. CONCLUSIONES

En la Tabla 1 del apartado 4 se presentan los valores de carga obtenidos para generar el inicio de un proceso de deslizamiento sostenido. Independientemente de lo indicado, conforme al análisis de las imágenes grabadas del proceso de tiro, a partir de una fuerza promedio para las tres muestras de 770 kg se visualizó un acomodamiento del sistema morsa-conductor dentro del dispositivo de retención sin deslizamiento.

ANEXO I: REGISTROS FOTOGRÁFICOS



Figura 3 - Muestra 1 inicio de acomodamiento



Figura 4 - Muestra 1 inicio de deslizamiento



Figura 5 - Muestra 2 inicio del acomodamiento



Figura 6 - Muestra 2 inicio de deslizamiento



Figura 7 - Muestra 3 inicio de acomodamiento



Figura 8 - Muestra 3 inicio de deslizamiento

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM E8/E8M – 2013 “Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials” – ASTM International (<https://www.astm.org/Standards/E8.htm>).
- IRAM - IAS U500-07:2005 “Cordones de dos o tres alambres de acero para estructuras de hormigón pretensado” – Instituto Argentino de Normalización y Certificación (iram.org.ar).
- IRAM - IAS U500-246:2005 “Cordones de dos, tres o siete alambres de acero para estructuras de hormigón pretensado: Métodos de ensayos de tracción a temperatura ambiente” – Instituto Argentino de Normalización y Certificación (iram.org.ar).
- IRAM – NIME 20 022 Ed. 1991 “Morsetería y componentes para líneas aéreas y estaciones o subestaciones transformadores de energía eléctrica de 132 kV”.
- IRAM 1551-83 “Extracción, preparación y ensayo de testigos de hormigón endurecido”.
- “Relación entre la resistencia a compresión de probetas testigo y probetas normalizadas” MARIANO PÉREZ SÁNCHEZ, Lcdo. en Ciencias Químicas, Laboratorio Central de Materiales de la Confederación Hidrográfica del Duero. VALLADOLID.
- IRAM 1605 “Postes de hormigón pretensado, de sección anular y forma troncocónica, para soporte de instalaciones aéreas”, 4ta ed. 2009.
- CIRSOC 201/2005 – REGLAMENTO ARGENTINO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN.
- ACI 318S-14 – REQUISITOS DE REGLAMENTO PARA CONCRETO ESTRUCTURAL Y COMENTARIOS (Versión en español y en sistema métrico SI). AMERICAN CONCRETE INSTITUTE.
- Asociación Electrotécnica Argentina Ed. 2007 “Reglamentación de Líneas Aéreas Exteriores de Media Tensión y Alta Tensión - AEA 95301”.
- Agua y Energía Eléctrica – Empresa del Estado - Año 1962 “Líneas Aéreas de Transmisión de Energía Eléctrica – Especificación Técnica N° GC-IE-TN°1”.
- “Cables Catenarias” (<https://www.elrincondelingeniero.com/cables-catenaria-y-otros/>)
- “La catenaria”, Carlos Ivorra. (<https://www.uv.es/~ivorra/Libros/Catenaria.pdf>)
- “La Catenaria” (<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/solido/catenaria/catenaria.html>)
- “Cálculo de Cables” (<http://w3.mecanica.upm.es/~goico/mecanica/ICT/cables.pdf>)
- Tesis de Master – Año 2012: “SENSIBILIDAD Y SEGURIDAD DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN EN RÉGIMEN NO LINEAL”, Ronnie Antonio Maldonado Tapia. (<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/14777/TFM%2020Ronnie%20Antonio%20Maldonado%20Tapia.pdf>).

- Tesis “ANÁLISIS ESTÁTICO LINEAL Y NO LINEAL EN ESTRUCTURAS RACK”, Daniel Vera S., Ing. Civil.
(https://inglomayor.cl/edicion_17/secA/paper6.pdf)
- Trabajo: “Cálculo no lineal: ventajas e inconvenientes”, SASTRE Ramon, GIMFERRER VILAPLANA Xavier.
(http://www.latensored.org/wp-content/uploads/2019/11/PP02-C%C3%A1lculo-no-lineal_ventajas-e-inconvenientes_r.pdf)
- Trabajo: “Análisis No Lineal de Estructuras de Cable Empleando el SAP2000”, Bachiller Liliana Sánchez Fernández.
(<https://es.scribd.com/presentation/315588005/Analisis-no-lineal-de-cables-ppt>)