



XXVI CONGRESO INTERNACIONAL DE
MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

24 AL 26 DE ABRIL DE 2024. Bogotá - Colombia



Asociación
Colombiana
de Ingenieros

isa

INTERCOLOMBIA

LOS ANÁLISIS FORENSES COMO HERRAMIENTA PRINCIPAL EN EL ANÁLISIS DE FALLAS DE ACTIVOS PARA EL TRANSPORTE DE ENERGÍA Y DE TELECOMUNICACIONES





METODOLOGÍA PARA REALIZAR ANALISIS FORENSES DE FALLAS

- 1. Recopilación de información preliminar.**
- 2. Inspección del sitio de falla.**
- 3. Análisis de datos y pruebas de materiales.**
- 4. Determinación de causa raíz.**
- 5. Elaboración de informe.**
- 6. Definición de planes de acción.**

A través de una metodología simple pero rigurosa se busca obtener resultados precisos y confiables que puedan ser utilizados de manera efectiva en contextos operativos y legales.



METODOLOGÍA PARA REALIZAR ANALISIS FORENSES DE FALLAS

CASO 1 - ANALISIS FORENSE EN LÍNEA A 230 kV.



CASO 2 - ANALISIS FORENSE EN LINEA A 500 kV.





CASO 1

Corrosión en Cables Conductores de fase de Líneas a 230 kV.

- El análisis forense realizado respaldó la reclamación ante el fabricante, de aproximadamente 2500 km de cable corroído, cuya reposición tuvo un costo cercano a los USD 33,000,000.
- El análisis forense también permitió elaborar una estrategia de reposición de los cables para el corto y mediano plazo con base en su condición por corrosión y sin poner en riesgo la continuidad operativa y la integridad de los activos.



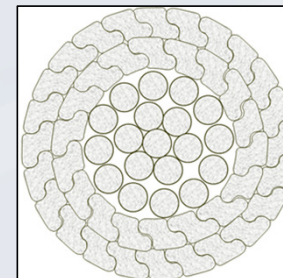
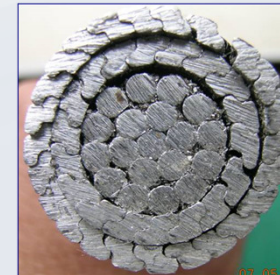


PASO 1 (RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN PRELIMINAR)

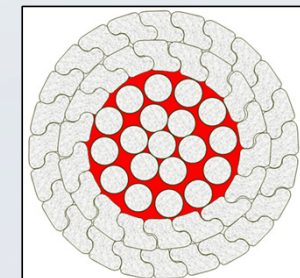
- El cable conductor fallado corresponde a un cable del tipo AAAC Aero Z instalado como parte del Proyecto de Rehabilitación de Líneas Costeras



Diseño del cable conductor



133 Km. sin grasa



2328 Km. con grasa parcial

- La rotura del cable conductor se produjo 8 años y tres meses después de su instalación; el cable se instaló en el año 2000 y la rotura se presentó en marzo de 2009



PASO 2 (INSPECCIÓN DEL SITIO DE FALLA)

- Se detecto un ataque corrosivo severo en los alambres que conformaban el cable conductor fallado



- Se observó un fenómeno de bruma procedente del océano pacifico que envuelve las líneas de transmisión instaladas en la costa.





PASO 3 (ANÁLISIS DE DATOS Y PRUEBAS DE MATERIALES)



Extracción de muestras de cable para pruebas de laboratorio

Muestra sin grasa



Muestra con grasa parcial





PASO 3 (ANÁLISIS DE DATOS Y PRUEBAS DE MATERIALES)

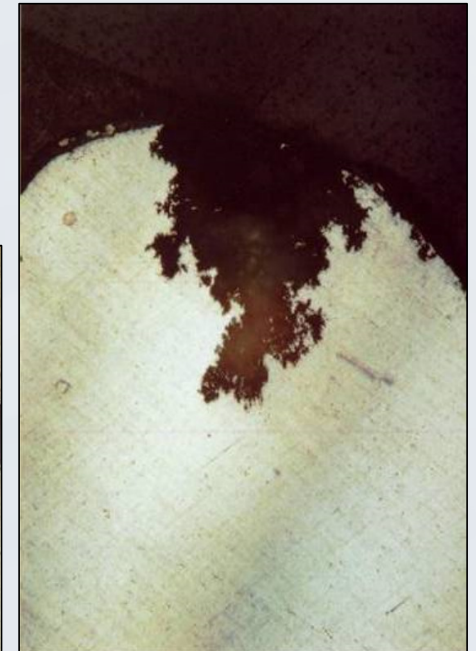
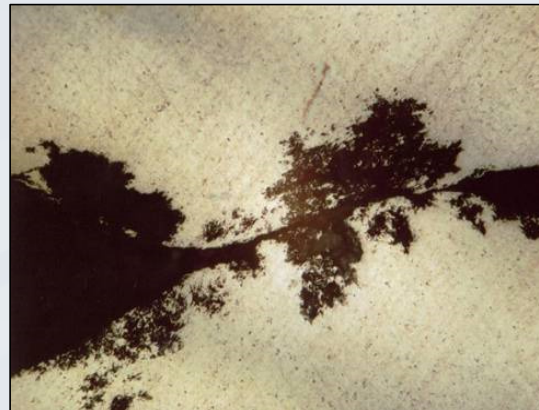


- Se realizó un análisis visual preliminar para identificar el nivel de afectación en los alambres interiores del cable conductor



PASO 3 (ANÁLISIS DE DATOS Y PRUEBAS DE MATERIALES)

- Se realizaron pruebas de rotura a muestras de cable para analizar la capacidad mecánica remanente

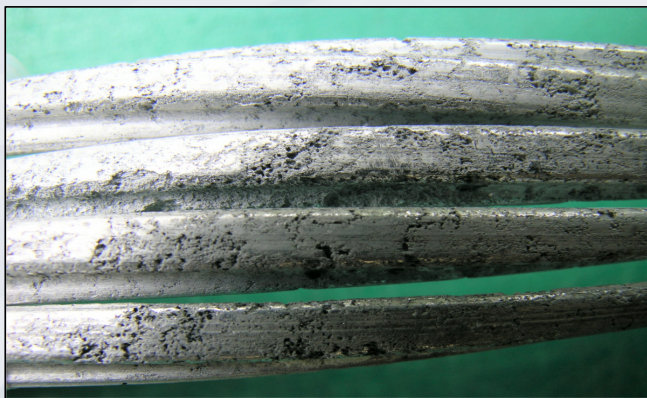


- Se tomaron micrografías para identificar procesos corrosivos en y entre los alambres



PASO 3 (ANÁLISIS DE DATOS Y PRUEBAS DE MATERIALES)

- Se realizó una limpieza química a los alambres de los cables para retirar todos los óxidos y productos de corrosión y poder visualizar con detalle la afectación real por corrosión de los alambres.





PASO 3 (ANÁLISIS DE DATOS Y PRUEBAS DE MATERIALES)

- Se realizaron análisis de composición química y de resistencia mecánica a los alambres de los cables en prueba

| MUESTRA | CARGA MÁXIMA (kN) | OBSERVACIONES |
|---------|-------------------|--------------------------------|
| 0-1 | 2.17 | Conductor central. |
| 2-1 | 2.16 | Conductor del 2do anillo. |
| 3-1 | 2.74 | Conductor del 3er anillo. |
| 3-2 | 2.54 | Conductor del 3er anillo. |
| 4-1 | 1.95 | Conductor del anillo exterior. |
| 4-2 | 1.99 | Conductor del anillo exterior. |

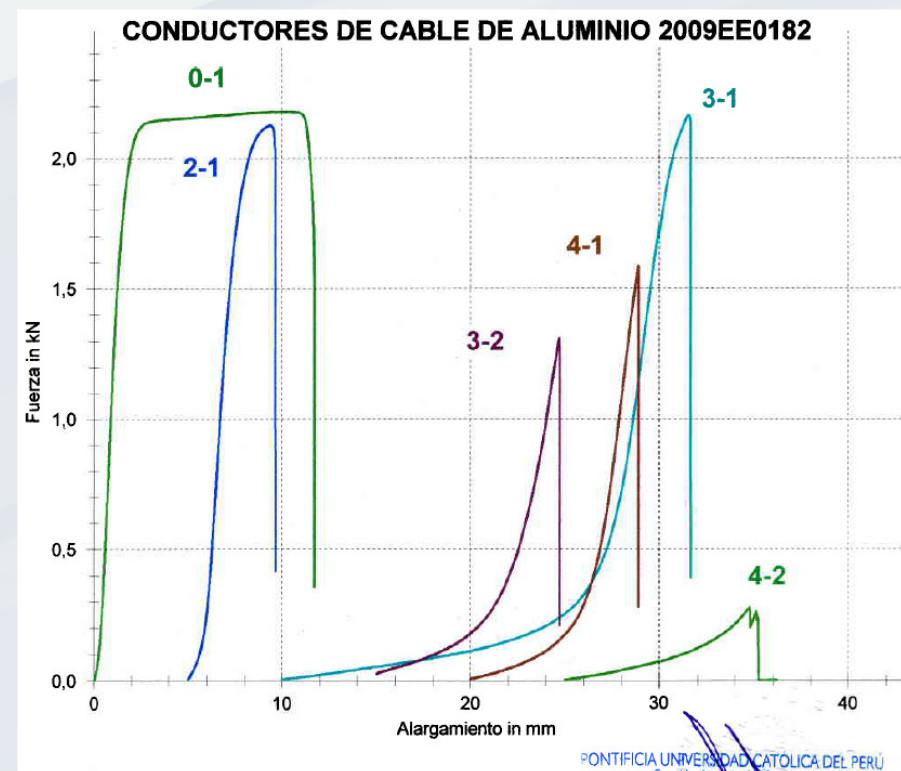
Tabla 1.- Resultados del análisis químico de los alambres de los dos conductores de aluminio.

| Muestra | Código ICP-PUCP | Composición porcentual (%) | | | | | | | |
|---------|-----------------|----------------------------|------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| | | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Zn | Al |
| M-1 | 2009EE0181 | 0,34 | 0,27 | <0,01 | <0,01 | 0,38 | <0,02 | 0,02 | Resto |
| M-2 | 2009EE0182 | 0,39 | 0,26 | <0,01 | <0,01 | 0,39 | <0,02 | <0,01 | Resto |

Tabla 4.- Composición nominal de la aleación AA6101.

| Especificaciones Técnicas | Código | Composición porcentual (%) | | | | | | | |
|---------------------------|------------|----------------------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|
| | | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Zn | Al |
| AA 6101 | UNS A96101 | 0,30-0,70 | Máx. 0,5 | Máx. 0,10 | Máx. 0,03 | 0,15-0,80 | Máx. 0,03 | Máx. 0,10 | Resto |

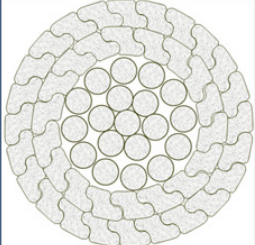
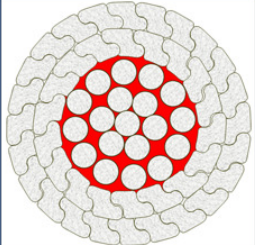
Comercialmente a esta aleación de aluminio se le conoce como **Al0.6Mg0.5Si**.





PASO 3 (ANÁLISIS DE DATOS Y PRUEBAS DE MATERIALES)

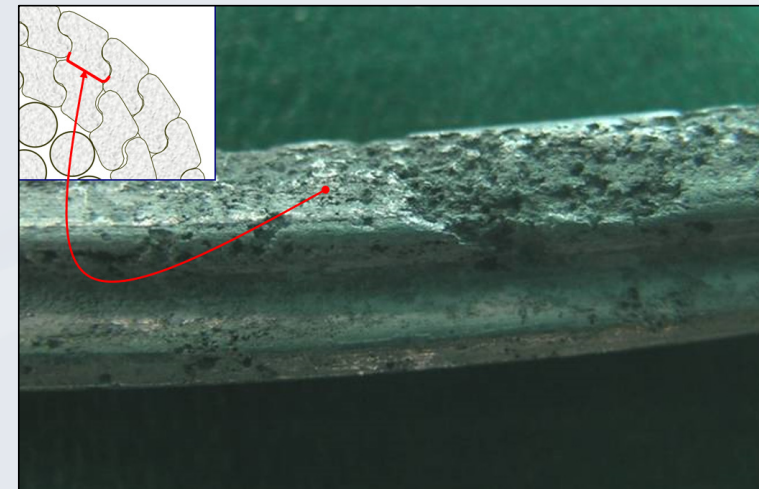
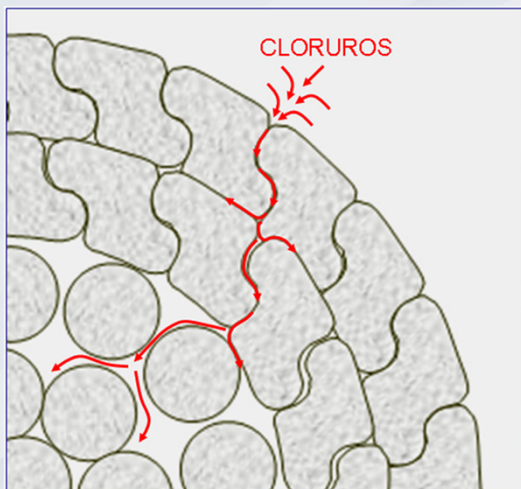
- Se determino una rata de deterioro por corrosión y se definieron expectativas de vida remanente de los cables instalados

| | AÑO DE INSTALACIÓN | VIDA ÚTIL REMANENTE (Año Vigente 2009) | KILÓMETROS INSTALADOS |
|---|--------------------|---|-----------------------|
| CABLE SIN GRASA  | 2000 | 1 AÑO | 133 |
| CABLE CON GRASA PARCIAL  | 2001 | 2 AÑOS | 405 |
| | 2003 | 4 AÑOS | 482 |
| | 2007 | 8 AÑOS | 1441 |



PASO 4 (DETERMINACIÓN DE CAUSA RAÍZ)

- La geometría y ensamble de los alambres que componen los cables helicoidales con alambres trapezoidales favorecen la generación de procesos corrosivos cuando son instalados en atmósferas marinas (Mal diseño anticorrosivo del cable).





PASO 5 (ELABORACIÓN DE INFORME)

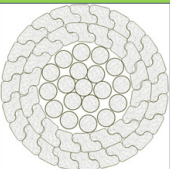
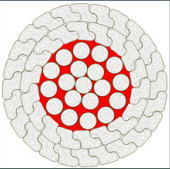
- Se elabora informe con toda la información precisa y necesaria para que este sea la base principal del ECR

The grid contains 24 numbered thumbnails representing the steps of a report preparation process:

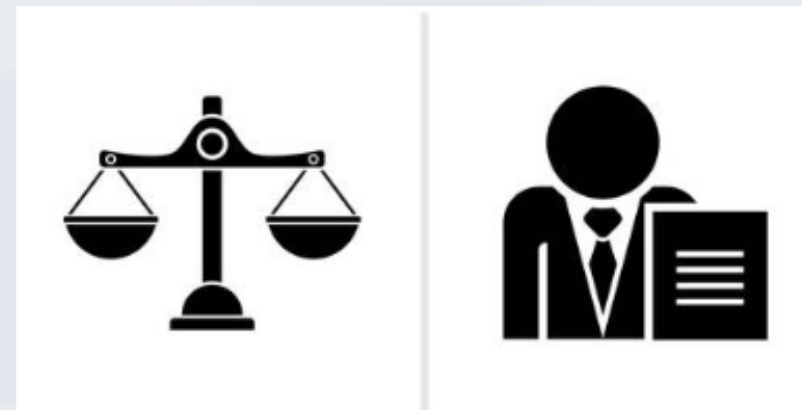
- 1: Initial assessment and data collection.
- 2: Evaluating the level of deterioration based on the type of cable and its location.
- 3: Identification of deterioration types.
- 4: Visual inspection of the cable.
- 5: Visual inspection of the cable.
- 6: Detailed description of the deterioration.
- 7: Detailed description of the deterioration.
- 8: Detailed description of the deterioration.
- 9: Detailed description of the deterioration.
- 10: Detailed description of the deterioration.
- 11: Detailed description of the deterioration.
- 12: Detailed description of the deterioration.
- 13: Detailed description of the deterioration.
- 14: Theoretical background.
- 15: Theoretical background.
- 16: Analysis of the deterioration.
- 17: Analysis of the deterioration.
- 18: Analysis of the deterioration.
- 19: Analysis of the deterioration.
- 20: Analysis of the deterioration.
- 21: Analysis of the deterioration.
- 22: Analysis of the deterioration.
- 23: Final report generation.
- 24: Final report generation.



PASO 6 (DEFINICIÓN DE PLANES DE ACCIÓN)

| CABLE SIN GRASA | AÑO DE CAMBIO DE CABLE | KILÓMETROS DE CABLE | COSTO ESTIMADO (USD) |
|--|------------------------|---------------------|-----------------------|
|  | 2010 | 133 | 1.795.500 |
| CABLE CON GRASA PARCIAL | 2012 | 405 | 5.467.500 |
|  | 2014 | 482 | 6.507.000 |
| | 2019 | 1441 | 19.453.500 |
| TOTAL: | | | USD 33.223.500 |

Programación técnica y financiera para el cambio de 2461 Km. de cable conductor con base en la condición por corrosión del cable y de la expectativa de vida útil remanente



Reclamación a fabricante por defecto de calidad y correcto funcionamiento

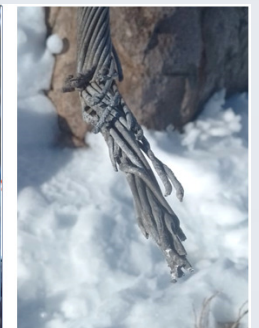
Gestión pólizas de seguros



CASO 2

Ruptura de 3 Cables Subconductores en Línea a 500kV.

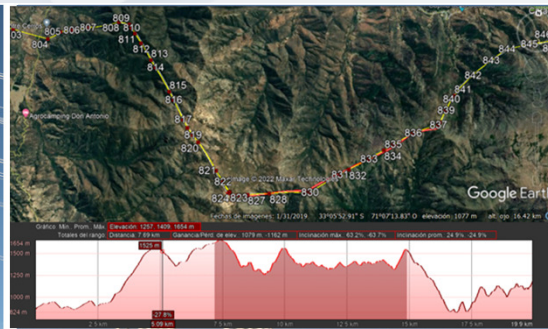
- El análisis forense respalda una reclamación ante el fabricante de unos separadores amortiguadores, instalados en cerca de 700 Km. de línea, cuya reposición estimada podría ascender hasta los USD 40,000,000.
- El análisis forense también permitió elaborar una estrategia de evaluación de condición de los cables subconductores, de reparación de estos y de reposición de los separadores amortiguadores cuestionados para el corto y mediano plazo sin poner en riesgo la continuidad operativa y la integridad de la línea.



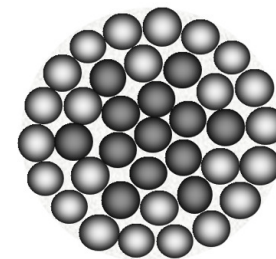


PASO 1 (RECOPILOCIÓN DE INFORMACIÓN PRELIMINAR)

- Zona de alta montaña y condiciones atmosféricas difíciles (Nieve y hielo)

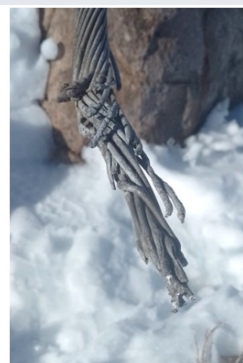


CABLE CONDUCTOR ACAR 700 – 24/13



● 24 Alambres de “Aluminio-1350 H-19”

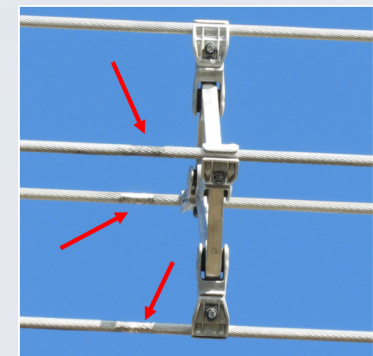
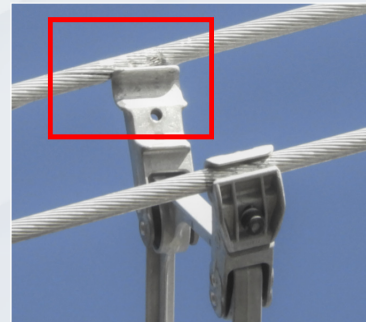
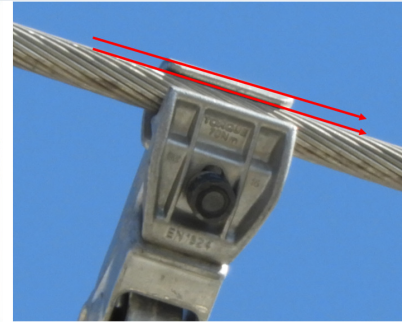
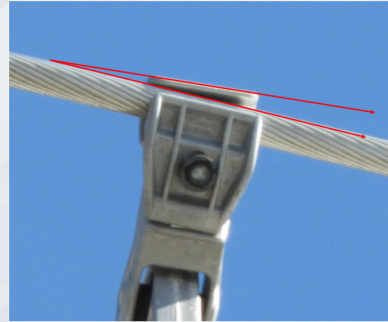
● 13 Alambres de “Aleación de Aluminio-6201-T81”





PASO 2 (INSPECCIÓN DEL SITIO DE FALLA)

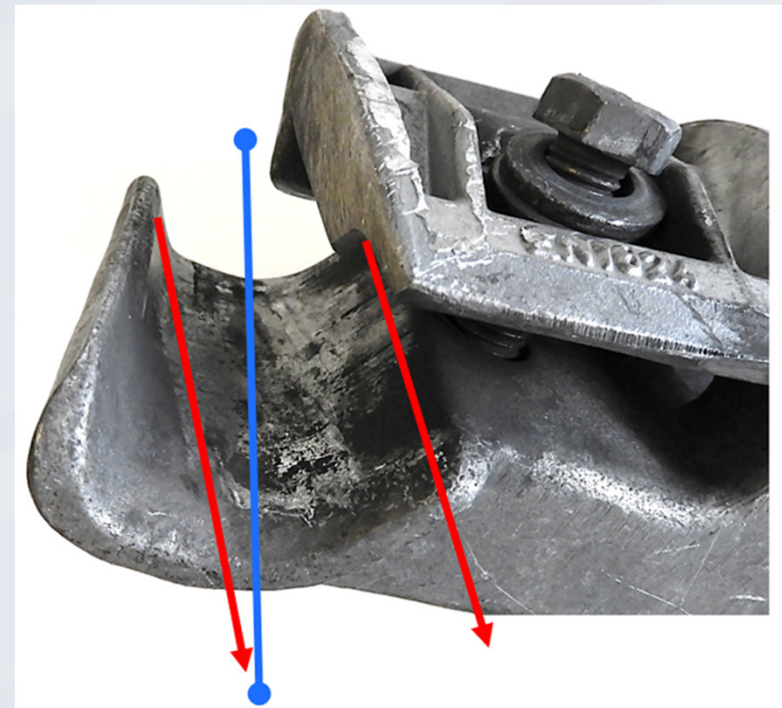
- Detalles de anomalías detectadas en la línea durante la inspección del sitio de falla





PASO 3 (ANÁLISIS DE DATOS Y PRUEBAS DE MATERIALES)

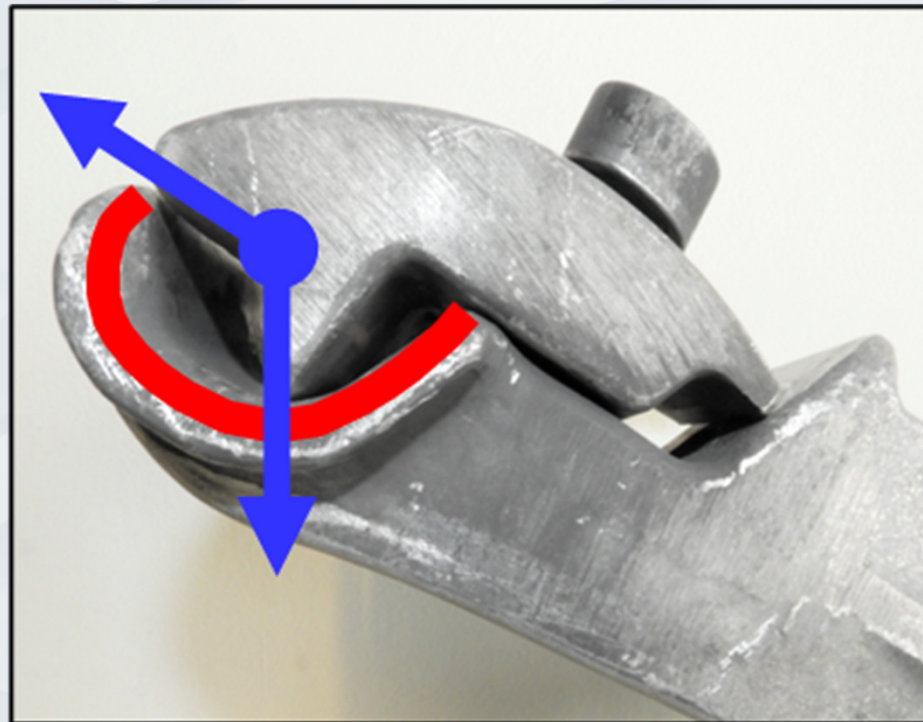
- Mordazas con evidencias de contaminación por “fretting” y desalineamiento de los cables conductores





PASO 3 (ANÁLISIS DE DATOS Y PRUEBAS DE MATERIALES)

- Mordazas con superficies de contacto con los cables conductores atípicas

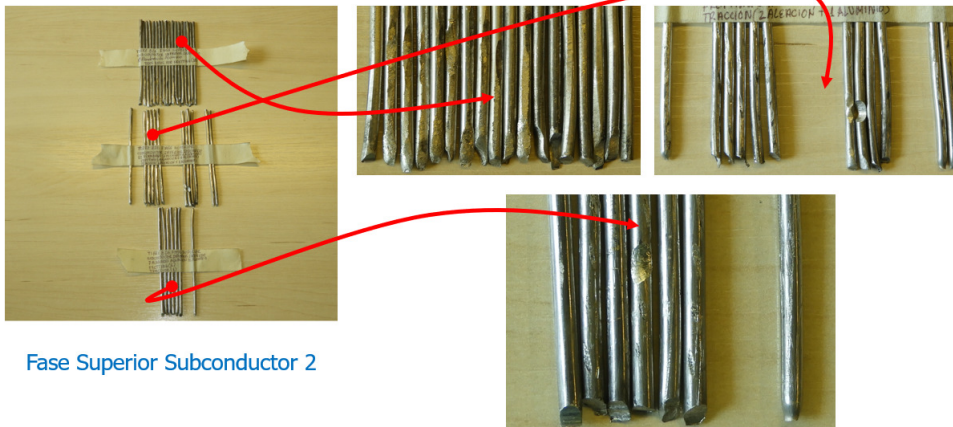




PASO 3 (ANÁLISIS DE DATOS Y PRUEBAS DE MATERIALES)

- Evidencias de rotura de los alambres por “fretting” en dos de los tres cables rotos, el tercero por sobre esfuerzo mecánico

Análisis modo de falla cables (Circuito 1 Vano T825-T826)

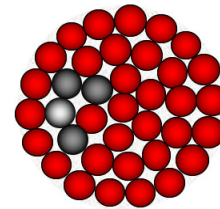


Fase Superior Subconductor 2

Resumen análisis modo de falla cables



Vano T825-T826 Fase Superior Circuito 1 (Subconductor 2)

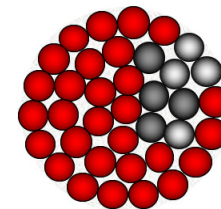


Al momento de la falla

- 33 Alambres rotos por “Fretting”.
- 3 Alambres buenos de aleación de aluminio.
- 1 Alambre bueno de aluminio.

Capacidad de Carga Mecánica
Remanente 13.6%

Vano T836-T837 Fase Superior Circuito 2 (Subconductor 2)

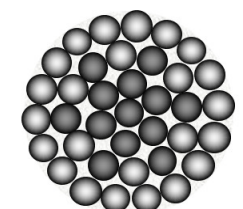


Al momento de la falla

- 29 Alambres rotos por “Fretting”.
- 4 Alambres buenos de aleación de aluminio.
- 4 Alambre buenos de aluminio.

Capacidad de Carga Mecánica
Remanente 23.9%

Vano T836-T837 Fase Superior Circuito 2 (Subconductor 3)



Al momento de la falla

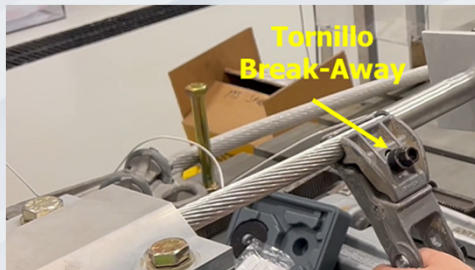
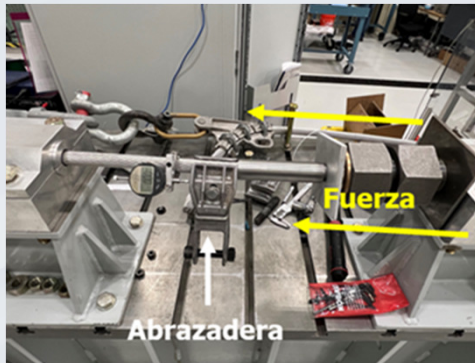
- Todos los alambres rotos por tracción
- 24 Alambres buenos de aluminio.
- 13 Alambre buenos de aleación de aluminio.

Capacidad de Carga Mecánica
Remanente 100%



PASO 3 (ANÁLISIS DE DATOS Y PRUEBAS DE MATERIALES)

- Pruebas de calidad al diseño de los separadores amortiguadores realizadas bajo norma por un laboratorio certificado



| Pruebas realizadas | Criterio de aceptación (IEC 62854) | Resultado |
|----------------------------|--|---|
| Deslizamiento Longitudinal | Ningún deslizamiento longitudinal de la grapa hasta una fuerza de 4kN aplicada durante 60 <u>seg.</u> | Cumple IEC |
| Deslizamiento Torsional | Ningún deslizamiento en o por debajo del torque de deslizamiento torsional M calculado. | No cumple IEC |
| Tornillo de Break-Away | Torque dentro de la tolerancia acordada entre el comprador y el proveedor. Si no se especifica será +/-10 %. | No cumple IEC |
| Vibración (Parcial) | No aplica | Afectación a capa externa del conductor (inicio de <u>fretting</u>). |



PASO 4 (DETERMINACIÓN DE CAUSA RAÍZ)

- Diseño deficiente del separador amortiguador y deficiencias en los procedimientos de instalación.

| Pruebas realizadas | Criterio de aceptación (IEC 62854) | Resultado |
|----------------------------|--|---|
| Deslizamiento Longitudinal | Ningún deslizamiento longitudinal de la grapa hasta una fuerza de 4kN aplicada durante 60 <u>seg.</u> | Cumple IEC |
| Deslizamiento Torsional | Ningún deslizamiento en o por debajo del torque de deslizamiento torsional M calculado. | No cumple IEC |
| Tornillo de Break-Away | Torque dentro de la tolerancia acordada entre el comprador y el proveedor. Si no se especifica será +/-10 %. | No cumple IEC |
| Vibración (Parcial) | No aplica | Afectación a capa externa del conductor (inicio de <u>fretting</u>). |



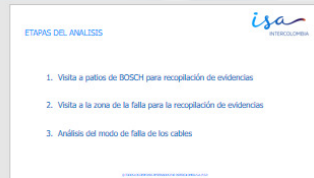


PASO 5 (ELABORACIÓN DE INFORME)

- Se elabora informe con toda la información precisa y necesaria para que este sea la base principal del ECR



1



2



3



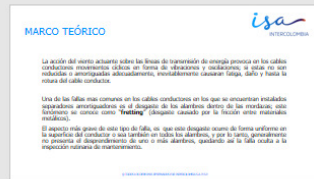
4



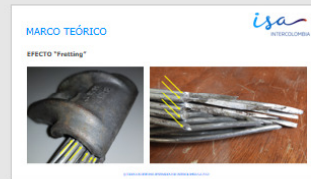
5



6



7



8



9



10





PASO 6 (ELABORACIÓN DE PLAN DE ACCIÓN)

Corto Plazo:

1. Capacitación identificación de anomalías con Dron
2. Evaluación de vanos críticos
3. Correctivos de hallazgos
4. Gestión de reclamación a fabricante
5. Gestión pólizas de seguros

Mediano Plazo:

1. Evaluación vanos restantes de la línea
2. Correctivos de nuevos hallazgos
3. Cambio de separadores amortiguadores en toda la línea



Reclamación a fabricante por defecto de calidad y correcto funcionamiento

Gestión pólizas de seguros



IMPACTO DE LOS ANALISIS FORENSES EN EL CICLO DE VIDA DE LOS ACTIVOS

CICLO DE VIDA DE LOS ACTIVOS

ETAPA DE CREACIÓN

- **DISEÑO:**
Ajustes a especificaciones técnicas de cables y separadores amortiguadores.
- **ABASTECIMIENTO:**
Mejoras en controles de calidad de los equipos adquiridos. Pruebas en fabrica y pruebas tipo a diseños desconocidos.
- **EJECUCIÓN PROYECTOS:**
Ajuste de procesos para identificar necesidades de capacitación a personal de montaje.
- **FINANCIERA:**
Programación presupuestal para compra e instalación de cables y separadores amortiguadores.

ETAPA DE OPERACIÓN

- Planeación de desconexiones para cambio de cables y separadores amortiguadores con afectación mínima al sistema interconectado.
- Estrategia operativa para la atención de fallas generadas por las condiciones identificadas.

ETAPA DE MANTENIMIENTO

- Programación y evaluación de condición de cables y separadores amortiguadores en las líneas.
- Programación de actividades correctivas para reparación de cables y separadores amortiguadores.

ETAPA DE RENOVACIÓN

- Estructuración de proyecto de renovación de los cables y de reposición total de separadores amortiguadores en la línea.
- Planeación para la disposición final de los elementos desmontados de las líneas.



CONCLUSIONES

1. La aplicación metodológica de análisis forenses en la investigación de fallas en activos no solo identifica causas y responsabilidades, sino que también contribuye en la mejora continua de la gestión de los activos.
2. Los análisis forenses, respaldados por datos técnicos fiables, no solo aumentan la eficiencia operativa y optimizan los recursos financieros en las organizaciones, sino que también fomentan una toma de decisiones basada en evidencia para maximizar el rendimiento de los activos.



XXVI CONGRESO INTERNACIONAL DE
MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

24 AL 26 DE ABRIL DE 2024. Bogotá - Colombia



Asociación
Colombiana
de Ingenieros

isa

INTERCOLOMBIA

GRACIAS

Juan Guillermo Maya Montoya

jmmaya@intercolombia.com