



UNIVERSIDAD
DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Diagnóstico de modos de falla de cables de acero bajo
diversas sollicitaciones en el rubro petrolero en la zona
norte del Perú**

Trabajo de Investigación para optar el Grado de
Máster en Ingeniería Mecánico -Eléctrica con mención en Sistemas Energéticos y
Mantenimiento

Manuel Ángel Castro Chávez
Manuel Ottoniel Goicochea García
Alex Leoncio Huayama Neyra

Asesor(es):
Mgtr. Ing. César Augusto Dioses Gutiérrez

Piura, marzo de 2023

NOMBRE DEL TRABAJO

Grupo 3 César Dioses

AUTOR

Grupo 3 César Dioses Grupo 3 César Dioses

RECUENTO DE PALABRAS

43168 Words

RECUENTO DE CARACTERES

233885 Characters

RECUENTO DE PÁGINAS

144 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

2.8MB

FECHA DE ENTREGA

Mar 17, 2023 5:13 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Mar 17, 2023 5:15 PM GMT-5**● 18% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos

- 16% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 9% Base de datos de trabajos entregados
- 3% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

Dedicatoria

A nuestras familias y a nuestro asesor de la Maestría en Ingeniería Mecánico-Eléctrica por su paciencia y apoyo permanente.





Resumen

En el presente trabajo de investigación se realiza el análisis correlacional causal de información cualitativa y cuantitativa perteneciente a once (11) informes técnicos históricos sobre modos de falla de cables de acero trenzado, realizados en el Laboratorio de Materiales de la Universidad de Piura, dos (02) de los cuales no llegaron a la fractura y se incluyeron con el fin de dar un valor agregado a la investigación. Para esto, se utiliza un método denominado “método de casos múltiples”, que es frecuente en trabajos de investigación del rubro de las ciencias sociales, al cual fue necesario realizar algunas adaptaciones durante el desarrollo del trabajo, como un aporte para futuros trabajos de investigación similares en el rubro ingenieril.

Los cables evaluados pertenecen a empresas del rubro petrolero que operan en la zona norte del país (entre Piura a Tumbes), en zona marina (offshore) o en inmediaciones a ella y, por ende, han estado expuestos a agresividad de la atmósfera marina.

El método consiste en recolectar la información proveniente de los informes técnicos, mediante cuestionarios o preguntas relacionadas con los criterios o atributos tecnológicos utilizados en el rubro de mecánica forense. Seguidamente la información se organiza por categorías y subcategorías, para ser presentada en tablas de doble entrada que incluyen la opción de ser debidamente verificada en base a la normativa internacional. Por último, se realiza el análisis y la correlación cruzada de todos los datos de los casos para la obtención del diagnóstico final y algunos lineamientos básicos de buenas prácticas para el manejo de este tipo de casos.

Los lineamientos que han destacado de la investigación para determinar las posibilidades de fractura o no de un cable son: el nivel de lubricación, la reducción del diámetro del cable en conjunción con la carga mínima de rotura, la agresividad del medio en que operan los cables y el nivel de deterioro. Por otra parte, para el diagnóstico de los cables que llegan finalmente a la fractura, específicamente en un ambiente costero marino, como el de los casos del presente trabajo, se espera la presencia de modos de falla por *fretting corrosion*, por fatiga y por sobretensión; generalmente presentes de manera combinada, salvo la excepción de un caso, el cual contiene recubrimiento polimérico y sólo presenta modo de falla por sobretensión.



Tabla de contenido

Introducción	15
Capítulo 1 Planteamiento de la Investigación.....	17
1.1 Antecedentes.....	17
1.1.1 A nivel nacional	17
1.1.2 A nivel internacional.....	17
1.2 Justificación	20
1.3 Objetivos.....	20
1.3.1 General	20
1.3.2 Específicos	20
Capítulo 2 Marco teórico.....	21
2.1 Generalidades.....	21
2.1.1 El diagnóstico	21
2.1.2 Definición de “Falla”	22
2.1.3 Análisis de fallas	23
2.1.4 Causas de fallas	23
2.1.5 Análisis metalúrgico de fallas	24
2.1.6 Análisis de modos y efectos de falla (AMEF).....	24
2.2 Método de estudio de casos	28
2.2.1 Concepto	28
2.2.2 Tipos de estudios de casos	28
2.2.3 Diseño de investigación con estudio de casos	29
2.2.4 Estudio de casos múltiples	30
2.2.5 Esquema para la redacción del Informe de Estudio de Casos	32

2.3	Cables de acero trenzado	33
2.3.1	Definición	33
2.3.2	Características de diseño y usos de los cables de acero	38
2.3.3	Principales modos de falla en cables de acero trenzado	41
2.3.4	Causas típicas de falla en cables de acero trenzado	48
2.3.5	Buenas prácticas.....	49
2.3.6	Marco normativo.....	52
Capítulo 3 Metodología de la investigación		53
3.1	Planteamiento del problema	53
3.2	Tipo y diseño de la investigación.....	53
3.3	Población y muestra de investigación	54
3.4	Técnica e instrumentos de recolección de datos, verificación y análisis	55
3.5	Procedimiento de organización y análisis de resultados	55
3.6	Estructura de los estudios de casos.....	57
3.7	Categorías, subcategorías y cuestionarios de preguntas	58
3.8	Criterios o atributos de investigación.....	60
3.9	Instrumentos de verificación.....	66
Capítulo 4 Resultados de la investigación		69
4.1	Casos seleccionados	69
4.1.1	Descripción general de los casos.....	70
4.2	Informes de casos individuales.....	88
4.3	Análisis de datos	103
4.4	Correlación de datos.....	112
4.5	Diagnóstico de los casos evaluados.....	149
4.5.1	Aspectos generales.....	150
4.5.2	Modos de falla	153
4.6	Buenas prácticas para el diagnóstico de modos de falla de los cables evaluados..	154
Conclusiones.....		157
Referencias bibliográficas		161

Lista de tablas

Tabla 1 Factores de diámetro de polea.....	40
Tabla 2 Clasificación de modos de falla en cables	42
Tabla 3 Modos de falla en cables y sus causas.....	48
Tabla 4 Casos seleccionados	54
Tabla 5 Calificación del “nivel de deterioro” de los cables.....	58
Tabla 6 Aspectos generales de los cables analizados	61
Tabla 7 Datos cualitativos - cables no fracturados	61
Tabla 8 Datos cuantitativos - cables no fracturados.....	61
Tabla 9 Datos cualitativos - cables fracturados.....	62
Tabla 10 Datos cuantitativos - cables fracturados.....	63
Tabla 11 Primera etapa de correlación - cables no fracturados	63
Tabla 12 Segunda etapa de correlación - cables no fracturados.....	64
Tabla 13 Análisis correlacional “nivel de deterioro” versus “medio de operación” - cables fracturados	64
Tabla 14 Análisis correlacional global de los atributos	64
Tabla 15 Análisis correlacional global de atributos “cualitativos” versus “cuantitativos”- cables fracturados	65
Tabla 16 Análisis correlacional global “nivel de deterioro” vs “lubricación”	65
Tabla 17 Análisis correlacional global “reducción diámetro” vs “criterio de norma”	66
Tabla 18 Análisis correlacional global “nivel de deterioro” vs “tiempo de servicio y medio de operación”	66
Tabla 19 Datos generales – Caso 1.....	88
Tabla 20 Datos cuantitativos – Caso 1	89
Tabla 21 Datos cualitativos – Caso 1.....	89

Tabla 22 Datos generales – Caso 2.....	90
Tabla 23 Datos cuantitativos – Caso 2	90
Tabla 24 Datos cualitativos – Caso 2.....	90
Tabla 25 Datos generales – Caso 3.....	91
Tabla 26 Datos cuantitativos – Caso 3	91
Tabla 27 Datos cualitativos – Caso 3.....	91
Tabla 28 Datos generales – Caso 4.....	91
Tabla 29 Datos cuantitativos – Caso 4	92
Tabla 30 Datos cualitativos – Caso 4.....	92
Tabla 31 Datos generales – Caso 5.....	93
Tabla 32 Datos cuantitativos – Caso 5	93
Tabla 33 Datos cualitativos – Caso 5.....	93
Tabla 34 Datos generales – Caso 6.....	94
Tabla 35 Datos cuantitativos – Caso 6	94
Tabla 36 Datos cualitativos – Caso 6.....	94
Tabla 37 Datos generales – Caso 7.....	96
Tabla 38 Datos cuantitativos – Caso 7	96
Tabla 39 Datos cualitativos – Caso 7.....	96
Tabla 40 Datos generales – Caso 8.....	97
Tabla 41 Datos cuantitativos – Caso 8	97
Tabla 42 Datos cualitativos – Caso 8.....	98
Tabla 43 Datos generales – Caso 9.....	99
Tabla 44 Datos cuantitativos – Caso 9	99
Tabla 45 Datos cualitativos – Caso 9.....	99
Tabla 46 Datos generales – Caso 10.....	100
Tabla 47 Datos cuantitativos – Caso 10	100
Tabla 48 Datos cualitativos – Caso 10.....	101
Tabla 49 Datos generales – Caso 11.....	102
Tabla 50 Datos cuantitativos – Caso 11	102
Tabla 51 Datos cualitativos – Caso 11.....	102

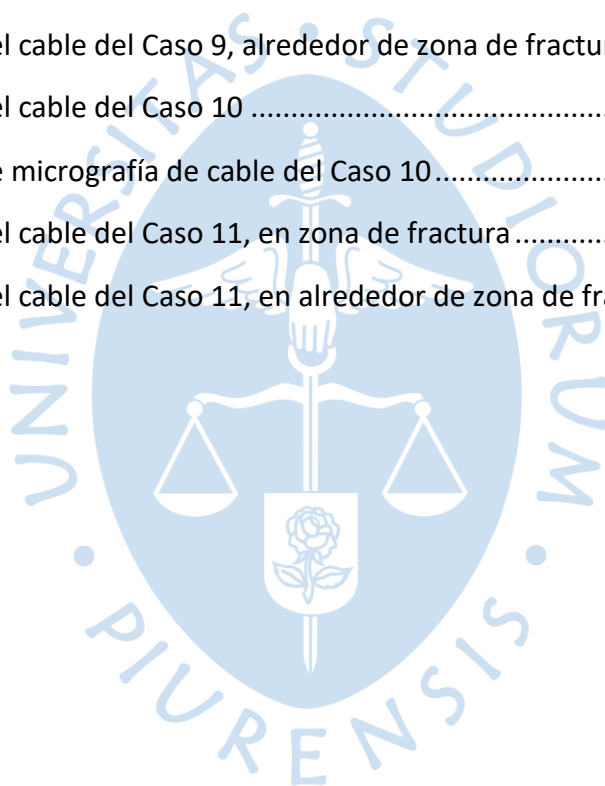
Tabla 52 Datos generales	104
Tabla 53 Datos cualitativos – Cables no fracturados	105
Tabla 54 Datos cuantitativos – Cables no fracturados.....	106
Tabla 55 Datos cualitativos – Cables fracturados	107
Tabla 56 Datos cuantitativos – Cables fracturados.....	110
Tabla 57 Correlaciones a analizar – Cables no fracturados	113
Tabla 58 Correlación entre “nivel de deterioro” y “lubricación” – Cables no fracturados....	113
Tabla 59 Correlación entre “nivel de deterioro” y “medio de operación” – Cables no fracturados	114
Tabla 60 Correlación entre “nivel de deterioro”, “lubricación” y “medio de operación” – Cables no fracturados	115
Tabla 61 Correlación entre “nivel de deterioro” y “diámetro actual” – Cables no fracturados	115
Tabla 62 Correlación entre “nivel de deterioro” y “carga de rotura” – Cables no fracturados	116
Tabla 63 Correlación entre “nivel de deterioro”, “diámetro actual” y “carga de rotura” – Cables no fracturados	117
Tabla 64 Correlación entre datos cualitativos y cuantitativos - cables no fracturados.....	118
Tabla 65 Correlaciones a analizar – Cables fracturados.....	119
Tabla 66 Correlación entre “nivel de deterioro” y “lubricación” – Cables fracturados.....	120
Tabla 67 Correlación entre “nivel de deterioro” y “medio de operación” – Cables fracturados	121
Tabla 68 Correlación entre “nivel de deterioro”, “lubricación” y “medio de operación” – Cables fracturados	122
Tabla 69 Correlación entre “nivel de deterioro” y el “modo de falla” – Cables fracturados	124
Tabla 70 Correlación entre “nivel de deterioro” y el “modo de falla” – Cables fracturados	125
Tabla 71 Correlación entre “nivel de deterioro”, “medio de operación” y “modo de falla” – Cables fracturados.....	126
Tabla 72 Correlación entre “nivel de deterioro” y “diámetro actual” – Cables fracturados.	127
Tabla 73 Correlación entre “nivel de deterioro”, “modo de falla” y “diámetro actual” – Cables fracturados	129

Tabla 74 Correlación entre “nivel de deterioro” y “carga de rotura mín. actual” – Cables fracturados	131
Tabla 75 Correlación entre “nivel de deterioro”, “diámetro actual” y “carga de rotura mín. actual” – Cables fracturados	133
Tabla 76 Correlación entre “nivel de deterioro” y “tiempo de servicio” – Cables fracturados	135
Tabla 77 Correlación entre “nivel de deterioro”, “carga de rotura mín.” y “tiempo de servicio” – Cables fracturados.....	136
Tabla 78 Correlación entre datos cualitativos y cuantitativos - cables fracturados.....	138
Tabla 79 Correlaciones globales - No fracturados y fracturados.....	141
Tabla 80 Correlación entre cables fracturados y no fracturados respecto al “nivel de deterioro” y “lubricación”	141
Tabla 81 Correlación entre cables fracturados y no fracturados respecto al “nivel de deterioro” y “medio de operación”	142
Tabla 82 Correlación entre cables fracturados y no fracturados respecto al “nivel de deterioro”, “lubricación” y “medio de operación”	143
Tabla 83 Correlación entre cables fracturados y no fracturados respecto al “nivel de deterioro” y “diámetro actual”	145
Tabla 84 Correlación entre cables fracturados y no fracturados respecto al “nivel de deterioro” y “carga mínima de rotura”	147
Tabla 85 Correlación entre cables fracturados y no fracturados respecto al “nivel de deterioro”, “diámetro actual” y “carga mínima de rotura”	148

Lista de figuras

Figura 1 Criterios para utilizar el estudio de caso como método de investigación	28
Figura 2 Método de estudio de casos	30
Figura 3 Procedimiento metodológico de la investigación utilizado para un estudio de casos	31
Figura 4 Propuesta de diseño metodológico del estudio de casos.....	32
Figura 5 Conformación de un cable de acero	33
Figura 6 Construcción de torones	35
Figura 7 Ejemplos de Nomenclatura de cables de acero	36
Figura 8 Ilustración de dirección de torcido de cables.....	37
Figura 9 Ranura de poleas.....	39
Figura 10 Uso de galgas.....	40
Figura 11 Zonas de fractura de tres cables diferentes.....	43
Figura 12 Alambres con formación de cuello y fracturas tipo copa-cono	43
Figura 13 Cable con alambres rotos por fatiga	44
Figura 14 Superficie desgastada de alambres por roce	44
Figura 15 Cable con partículas de arena entre sus torones y alambres	45
Figura 16 Corrosión generalizada en cable y corrosión por picadura.....	46
Figura 17 Cable, torón y alambre indentados.....	46
Figura 18 Cables que presentan doblado por mal montaje y manipulación	47
Figura 19 Cable que presenta deterioro por fretting corrosion	47
Figura 20 Esquema del proceso de investigación	57
Figura 21 Imágenes del cable del Caso 1	71
Figura 22 Imágenes del cable del Caso 2	72

Figura 23 Imágenes del cable del Caso 3	73
Figura 24 Imágenes del cable del Caso 4	74
Figura 25 Imágenes del cable del Caso 5	75
Figura 26 Imágenes del cable del Caso 6	78
Figura 27 Imágenes del cable del Caso 7	80
Figura 28 Imágenes de los cables PB y PE del Caso 8, antes de la fractura	81
Figura 29 Imágenes de los cables PB y PE del Caso 8, en la zona de falla	82
Figura 30 Imágenes de torones y alambre del cable PE del Caso 8	83
Figura 31 Imágenes del cable del Caso 9, en zona de fractura	84
Figura 32 Imágenes del cable del Caso 9, alrededor de zona de fractura	84
Figura 33 Imágenes del cable del Caso 10	85
Figura 34 Imágenes de micrografía de cable del Caso 10	86
Figura 35 Imágenes del cable del Caso 11, en zona de fractura	87
Figura 36 Imágenes del cable del Caso 11, en alrededor de zona de fractura	87



Introducción

Uno de los elementos mecánicos ampliamente utilizados en la industria mundial son los cables de acero. Estos se utilizan para el levantamiento y posicionamiento de cargas en equipos fijos o móviles, bajo diferentes entornos ambientales y sollicitaciones mecánicas. Utilizar los cables respetando sus especificaciones técnicas, así como mantenerlos en buenas condiciones, es fundamental para prevenir la ocurrencia de fallas, las cuales, tienen la potencialidad de causar accidentes con daños personales y materiales. En ese sentido, resulta importante investigar los distintos modos de falla que se observan en los cables de acero que se utilizan en el ámbito regional y nacional. Para ello, en el presente trabajo de investigación, se realizó un análisis de once casos de “análisis de falla” e “integridad mecánica de cables en operación”, que fueron evaluados en el Laboratorio de Materiales de la Universidad de Piura (UDEP), con el fin de obtener un diagnóstico sobre los modos de falla, rescatar las buenas prácticas para su preservación y también para contar con una data técnica debidamente analizada y organizada sobre modos de falla de cables de acero, que sirva como información para futuros trabajos de investigación.

El diagnóstico se ha realizado a partir de los datos históricos de los once casos reales antes mencionados, la cual lo clasifica como una investigación de tipo documental-retrospectiva; asimismo, es de tipo descriptivo-explicativo, por el nivel de análisis y evaluación que ha sido necesario realizar sobre dicha información. El proceso de análisis de los casos se ha desarrollado bajo un enfoque cualitativo, habida cuenta de los objetivos de la investigación.



Capítulo 1

Planteamiento de la Investigación

1.1 Antecedentes

1.1.1 A nivel nacional

Luego de efectuar la búsqueda en los principales repositorios académicos consultados (Scopus, Dialnet, Google Académico, Investigación y Ciencia, Pirhua, ScienceDirect, etc.), se advierte que, en el ámbito regional y nacional, no se han publicado estudios de análisis de fallas de cables de casos individuales; tampoco se han publicado trabajos de investigación que aborden el diagnóstico de modos de falla en cables de acero, a partir de análisis falla de un conjunto de casos individuales.

Durante el periodo 2009-2013, en el Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Piura, se realizaron evaluaciones de integridad y análisis de falla de cables en operación, a solicitud de empresas del rubro petrolero que operan en la zona noroeste del Perú; sin embargo, los resultados de estos estudios, no han sido publicados ni analizados en su conjunto.

1.1.2 A nivel internacional

En el ámbito internacional, se encuentran publicados trabajos de caracterización de fallas y, con mayor frecuencia, análisis de casos individuales ocurridas en cables de acero; sin embargo, no se han publicado trabajos de investigación específicos de “diagnóstico de modos de falla en cables de acero”, a partir de estudios de casos individuales.

Los métodos relacionados con diagnósticos de fallas en general, están evolucionando constantemente, siendo un campo muy activo de investigación. Lameda (2015), en su estudio documental, “Métodos Relacionados con Diagnósticos de Fallas con Síntomas Imprecisos mediante Comparación de Casos”, presenta una investigación sobre conceptos básicos para diagnósticos de fallas mediante comparación de casos, y sobre métodos relacionados con diagnósticos de fallas con síntomas imprecisos mediante comparación de casos. Se presenta una síntesis sobre la importancia, definición y propósito del diagnóstico de fallas, una clasificación de métodos para diagnosticar fallas, y formas de realizar diagnósticos de fallas con síntomas imprecisos basándose en la teoría de conjuntos borrosos y la comparación de casos previos con un caso nuevo a diagnosticar.

En los estudios analizados por el autor, no se llegó a establecer claramente los criterios utilizados para la representación de los síntomas imprecisos mediante conjuntos borrosos, ni la justificación para utilizar la teoría de la posibilidad para manipular información incierta. Además, los estudios estuvieron limitados en cuanto a los tipos de funciones de pertenencia utilizadas y al número de ejemplos empleados para validar los métodos propuestos.

Erena (2019), en su Tesis Doctoral, “Paliativo frente a la fatiga por *fretting*¹ y análisis del proceso de fatiga en cordones metálicos”, diseña, fabrica y valida un nuevo equipo de ensayos para analizar el fallo por fatiga en este tipo de elementos. Uno de los principales aspectos de este nuevo equipo de ensayos, es la capacidad de aplicar al cable tanto cargas axiales como de flexión simultáneamente. Además, ambas cargas pueden ser estáticas o variables con el tiempo y pueden aplicarse a diferentes configuraciones de los cables.

El autor aplica diversos métodos de predicción de vida a fatiga en función de los resultados experimentales y numéricos obtenidos. En base a ambos resultados llega a la conclusión que, debido a la geometría de cordón empleada, y por tanto al tipo de contacto que de forma inherente aparece entre hilos, el fallo es producido debido a las tensiones globales aplicadas al cordón y no al fenómeno de *fretting*, que, aunque también se observa en el contacto entre hilos, no es determinante. En base a estos resultados logra obtener un método simple, pero efectivo, para la predicción a fatiga de cordones de acero de siete hilos sometidos a cargas axiales y de flexión.

Peterka et al. (2014), en el artículo “Failure analysis of hoisting steel wire rope” estudian la falla de un cable de acero en la elevación de una plataforma de perforación, en el cual hubo un desprendimiento progresivo de los alambres de la capa exterior de los torones. En el estudio se determinó que la falla no fue por fatiga, y luego de las pruebas mecánicas y metalográficas en comparación con un cable nuevo, se comprobó que el cable fallado había sido fabricado de un grado diferente al declarado por el fabricante. También encontró que los alambres dañados de la capa superior fueron fabricados de alambres de diferentes grados. La mezcla de alambres de baja y alta resistencia en la capa superior del torón del cable provocó una tensión diferente de los alambres de la capa específica.

Zhang et al. (2013), en el artículo “Bending fatigue behaviour of bearing ropes working around pulleys of different materials”, estudian el problema del comportamiento de fatiga por flexión y los mecanismos de falla de los cables de acero. En su investigación se utilizan métodos de detección cuantitativa no destructivos y métodos de detección artificial. Cuando se trabaja alrededor de poleas de nylon, los cables de acero exhiben un aumento lento de la tasa de fractura y daño total en una longitud de tendido determinada. El estudio determina que la vida de fatiga por flexión de los cables de acero es dos veces mayor que la de los cables que trabajan alrededor de poleas de acero. Además, se evidencia que el principal modo de falla de los cables de acero que trabajan alrededor de poleas de *nylon*, es la fractura por fatiga

¹ Para su definición, ver marco teórico.

y las superficies de fractura de los cables muestran una amplia zona de propagación de grietas y una estrecha zona de desgarro.

Wang-Zhang et al. (2014), investigan el efecto de la masa terminal sobre los parámetros de fricción y fatiga del cable de elevación durante un ciclo de elevación en una mina de carbón. Realizan análisis estáticos del cable al inicio y al final del ciclo de elevación en comparación con los análisis dinámicos durante la elevación y establecen modelos de correlación entre las tensiones del cable y los parámetros de fricción y fatiga. Finalmente, se determina que los aumentos de los parámetros de fricción y fatiga acortan la vida útil del cable.

Espejo y Martínez (2007), en su artículo, "Caracterización de modos de falla típicos en cables de transmisión mecánica", realizado con base en el estudio de diez cables de transmisión de potencia que fallaron en servicio por diferentes mecanismos, encontraron los siguientes modos de falla: fractura (súbita/por fatiga), desgaste (adhesivo/abrasivo), corrosión (generalizada/picadura), descarga eléctrica, deformación (indentación/ doblado) (p. 78).

Los autores determinaron que las causas más comunes por las cuales fallaron los cables fueron:

- Deficiencia o ausencia de lubricación
- Ausencia de una rutina de inspección
- Almacenamiento u operación inadecuada
- Problemas en aislamientos de los bobinados de máquinas eléctricas
- Defectos de fabricación

Ossa y Paniagua (2005), en su artículo, "Análisis de falla en cable de acero", describen el análisis de falla realizado en dos muestras de cables de acero que sufrieron falla súbita bajo condiciones de carga de trabajo normales. La falla fue causada por una carga menor a la capacidad nominal y luego de la inspección óptica se evidenció que la falla fue ocasionada por fatiga del material de uno de los cables.

En este artículo indican que los materiales luego de estar fatigados crean microgrietas que reducen la capacidad de carga del material conllevando a ruptura repentina, incluso bajo cargas menores a la resistencia nominal. Esta conclusión es sustentada por (i) la aparición de "marcas de playa" en los alambres del cable, (ii) el cambio de orientación de los granos en la microestructura cercana a la falla y finalmente, (iii) por la resistencia mecánica máxima de los cables que está muy por encima de la carga causante de la falla.

Gómez y Wilches (2003), en su artículo, "Mecanismos y modos de falla en cables metálicos estructurales", estudian la falla presentada por un cable transportador de granos cuya operación de descarga incluía la introducción en su interior de un cargador motorizado

de 22 toneladas métricas para efectos de apilamiento de la carga. En una de esas maniobras, mientras el cargador estaba izado, el cable de la grúa utilizado para el efecto, falló súbita y catastróficamente por rotura. En este estudio se evidencia que los fenómenos de fatiga y *fretting-corrosion* fueron los causantes de la rotura catastrófica del cable, los cuales se identificaron a partir de un análisis de la falla del mismo, aplicando técnicas de ensayos mecánicos, microscopía óptica, electrónica y de microanálisis por dispersión de energías de rayos X.

1.2 Justificación

El uso universal de los cables de acero y por ende la recurrencia común de falla de estos siempre será un tema de relevancia investigativa. Es por esto que se ha considerado relevante rescatar más de una decena de casos reales de falla evaluados como servicio de mecánica forense en el Laboratorio de Materiales de la Universidad de Piura, en un período de cinco años, en empresas del rubro petrolero en la zona norte del país.

En esta línea, el estudio de estos casos ha permitido recopilar data técnica suficiente para reconocer los modos típicos de falla de dichos elementos en servicio, con reincidencias y similitudes de modos de falla, los cuales denotan cierto grado de negligencia o falta de cuidado en su uso.

Por todo lo anterior y por la importancia teórico-práctica que se infiere hacia las jefaturas de mantenimiento, se justifica sistematizar adecuadamente esta data real, de tal modo que la misma también pueda servir como fuente para otros estudios.

1.3 Objetivos

1.3.1 General

Realizar un diagnóstico acerca de los modos de falla de cables de acero trenzado expuesto a diversas sollicitaciones en el rubro petrolero.

1.3.2 Específicos

- Rescatar las buenas prácticas de tratamiento de los cables de acero.
- Aumentar la calidad y espíritu reflexivo de los profesionales encargados de las áreas de mantenimiento en lo relacionado a la preservación de la integridad estructural de los cables de acero.
- Obtener un data técnica debidamente analizada y organizada sobre modos de falla de cables de acero para futuros trabajos de investigación.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1 Generalidades

2.1.1 *El diagnóstico*

El diagnóstico, según la Real Academia Española, es la acción y efecto de diagnosticar, y este a su vez es la recolección y análisis de datos para evaluar problemas de diversa naturaleza (Diccionario de la lengua española, 2022).

Ateniéndonos a su origen etimológico, la palabra “diagnóstico” proviene del griego *diagnōstikós*, a su vez del prefijo *día*, "a través", y *gnosis*, "conocimiento" o "apto para conocer", se refiere al análisis que se realiza con el propósito de dilucidar cualquier situación y avizorar su tendencia, todo esto sustentado en información de bases de datos y/o hechos recogidos y ordenados sistemáticamente, que permiten juzgar mejor qué es lo que está pasando (Gestiopolis, 2022).

El diagnóstico es el primer paso para enfrentar y resolver un problema, pues a través de él se puede obtener un conocimiento real y concreto de una situación específica, para luego definir las acciones que son necesarias ejecutar para su solución. En ese sentido, considerando que el diagnóstico conlleva a recolectar y analizar datos para evaluar problemas, se puede aplicar en cualquier ámbito de las ciencias aplicadas; así tenemos: diagnóstico educativo, empresarial, financiero, económico, social, médico, ingenieril, político, ambiental, etc. La elaboración del diagnóstico es particular en cada rama, y cuenta con sus propios métodos de análisis y evaluación.

Para Vallejos Díaz (2008), el diagnóstico “es el resultado final o temporal de la tendencia del comportamiento del objeto de estudio que deseamos conocer, en un determinado contexto-espacio-tiempo, a través de sus funciones y principios que lo caracterizan como tal” (p. 12).

Con relación al diagnóstico empresarial, el blog de la Escuela de Dirección de la Universidad de Piura [PAD] (s.f.), señala lo siguiente:

El diagnóstico empresarial puede definirse como un proceso que permite conocer la situación real de la empresa en un momento dado para identificar problemas y áreas de

oportunidad, a fin de corregir los primeros y aprovechar las segundas. Se trata, así, de un procedimiento clave para establecer los objetivos que guiarán las próximas acciones de la organización (párr. 3).

Define 3 pasos para su realización: “1. distinguir el nivel de eficacia; 2. reconocer qué te hace diferente; 3. plantear una misión”.

Respecto al diagnóstico de problemas de ingeniería, Sotelo-Rosas y Ramírez-Carrera (2004), proponen como proceso integral de diagnóstico la ejecución de 4 pasos: 1. Reconocimiento e identificación de la necesidad de cambio; 2. Realización de diagnóstico externo (análisis FODA) e interno (diagramas de afinidad, causa-efecto y de relaciones); 3. Definir objetivos de decisión. Sin embargo, se observa que este proceso está enfocado en la ejecución de aspectos de gestión administrativa, más que de problemas o situaciones específicas de ingeniería.

De la revisión bibliográfica realizada por C. Lamedá (2015), respecto a algunos aspectos básicos sobre diagnósticos de fallas en procesos, se tiene lo siguiente:

De forma general, se puede concebir el problema de la diagnosis como un proceso en el que a partir de observaciones se generan hipótesis capaces de explicar un funcionamiento anómalo para seleccionar las acciones de reparación (Gonzales, 2008, citado por Lamedá, 2015, p. 852).

Asimismo, el diagnóstico de fallas busca identificar la causa principal de un funcionamiento defectuoso en un sistema, basado en observaciones externas (Feldman, A., Kalech, M. & Provan, G., 2013, citado por Lamedá, 2015, p. 852).

2.1.2 Definición de “Falla”

Según la norma IEC-60050, de la Comisión Electrotécnica Internacional [IEC] (2015), falla de un ítem² es la “pérdida de la capacidad para desempeñarse según lo requerido”.

Para Guerrero (2011), la falla es una “condición no deseada que hace que el elemento estructural no desempeñe una función para la cual fue diseñado”, agrega que “una falla no necesariamente produce colapso o catástrofe” (p. 19).

Moy (2003), define falla como “aquel componente estructural o componente mecánico que deja de operar satisfactoriamente o su operación puede causar daños mayores” (como se citó en Jaramillo H., Alba N., Canizales J. & Toro A. (2008, p. 120)).

En el ámbito de componentes mecánicos, Tovar (1999) señala que “La palabra Falla es un término general que se utiliza para designar que un componente, equipo o máquina ha

² Cualquier parte, componente, dispositivo, subsistema, unidad funcional, equipo o sistema que pueda ser considerado individualmente.

fallado en servicio” (p. 75). Asimismo, considera que un equipo o componente ha fallado cuando ocurre una de las condiciones siguientes:

- Cuando se vuelve totalmente inoperable.
- Cuando el componente aún es operable pero no es capaz de cumplir satisfactoriamente la función para la cual fue diseñado.
- Cuando el deterioro del componente ha llegado a una condición que lo hace inseguro y no confiable.

En el ámbito del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM, por sus siglas en inglés, *reliability centred maintenance*), Moubray (1997), define “falla” como “la incapacidad de un bien de cumplir con las funciones que el usuario espera realice”. De manera similar, para la Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio [NASA] (2000), falla es el “cese de la función o el rendimiento adecuados” (p. 11 de la sección 2).

2.1.3 Análisis de fallas

Para Guerrero (2011), el análisis de falla es una disciplina en la cual intervienen múltiples ramas de la ingeniería, tales como: ingeniería de materiales, mecánica del medio continuo, mecánica de la fractura, metalurgia, procesos de manufactura, termodinámica y transferencia de calor, tribología, corrosión y fractografía, etc. Asimismo, señala que el objeto del análisis de falla es “la determinación de las causas de rotura de un componente en servicio y la manera de evitarla en el futuro, sea mediante un nuevo diseño de la pieza o el reemplazo del material utilizado originalmente” (p. 20).

Según Jaramillo et al. (2008, p. 119):

La evaluación y el análisis de falla consisten en investigar las posibles causas de cómo y por qué falló un elemento mecánico o un componente estructural. Los resultados y la información obtenida con la evaluación y análisis de falla son de gran ayuda en el diseño, porque permite realizar una adecuada selección de materiales, mejoramiento en las técnicas de fabricación y métodos de inspección, entre otros, lo que va a prevenir fallas futuras en las estructuras o componentes mecánicos (p. 119).

Los autores concuerdan con Guerrero en el sentido que el análisis de falla puede integrar varias ramas de la ingeniería dependiendo del elemento o escenario a evaluar, con el fin de determinar la causa probable de falla.

2.1.4 Causas de fallas

La norma ISO-14224 (2016), de la Organización Internacional de Normalización (ISO), define causa de falla, al conjunto de circunstancias que conducen a la falla de un ítem. Señala que “la causa de una falla puede originarse durante la especificación, diseño, fabricación, instalación, operación o mantenimiento de un elemento”.

Por otro lado, para Tovar (1999, p. 76), las principales fuentes de falla en componentes de ingeniería son:

- Diseño defectuoso
- Selección inadecuada de material
- Tratamiento térmico defectuoso
- Manufactura defectuosa
- Mecanizado defectuoso
- Montaje defectuoso
- Operación deficiente
- Mantenimiento deficiente

De forma similar, Jaramillo et al. (2008, p. 120), precisa que entre las causas generales que originan una falla de componentes estructurales, se tienen:

- Deficiencias de diseño
- Imperfecciones en materiales
- Defectos o deficiencias de fabricación
- Defectos por ensamble
- Condiciones inapropiadas de servicio

2.1.5 Análisis metalúrgico de fallas

El análisis metalúrgico de fallas, es un tipo específico de análisis, en el cual, mediante ensayos y herramientas analíticas y experimentales de la ciencia de materiales y la metalurgia, se pretende determinar la causa física que ha derivado en la falla de un componente metálico. La determinación de la causa o causas de falla, permite formular recomendaciones para evitar su recurrencia (Rumiche, 2020). “En este tipo de análisis, la evidencia física está constituida por el componente que ha fallado, el cual es sometido a una serie de pruebas y ensayos para generar resultados que contribuyan a determinar las causas de falla” (Rumiche, 2020, p. 6).

2.1.6 Análisis de modos y efectos de falla (AMEF)

2.1.6.1 Definición. Según el estándar SAE J1739 (2002), un análisis de modos y efectos de falla (FMEA, por sus siglas en inglés de failure mode and effects analysis) es un conjunto de actividades sistematizadas destinadas a reconocer y evaluar cada una de las fallas potenciales que podría producirse en un producto o proceso, así como reconocer y evaluar sus efectos; asimismo, señala que el FMEA tiene el propósito de identificar aquellas acciones que lograrían minimizar o eliminar la posibilidad de que ocurran o se desencadenen las fallas potenciales, a la vez de documentar todo el proceso.

Complementando lo antes mencionado, el Manual de FMEA de la Ford Motor Company (2011), señala lo siguiente:

Los FMEA identifican el potencial y confirman las características críticas y significativas que se abordarán mediante cambios de diseño, cambios de proceso o inclusión en los planes de control de procesos.

Los FMEA evalúan la idoneidad de los controles propuestos y la necesidad de mitigar el riesgo mediante cambios en el Plan de verificación de diseño o el Plan de control de fabricación. La intención de la evaluación y las acciones propuestas es evitar que las fallas lleguen a los clientes, mejorando la satisfacción del cliente (p. 3 de la sección 2).

Para Moubray, J. (1997), el AMEF busca identificar los modos de falla que son más propensos a causar cada una de las fallas funcionales y a indagar los efectos que estas tienen (p. 53).

2.1.6.2 Objetivos del AMEF. Los propósitos generales que persigue un AMEF son los siguientes:

- Mejorar la calidad, confiabilidad y seguridad de los productos/procesos evaluados.
- Reducir el tiempo y el costo de redesarrollo de productos.
- Documentar y rastrear las acciones tomadas para reducir el riesgo.
- Ayudar en el desarrollo de planes de control robustos.
- Ayudar en el desarrollo de planes de verificación de diseño robustos.
- Ayudar a priorizar y enfocarse en eliminar o reducir las perturbaciones sobre productos y procesos y/o ayudar a prevenir que ocurran problemas.
- Mejora la satisfacción del cliente/consumidor.

(Ford Motor Company, 2011, p. 5 de la sección 2).

2.1.6.3 Función y fallas funcionales. Según la norma SAE JA1012 (2002), función se define como “lo que el propietario o usuario de un activo o sistema físico quiere que haga” (p. 6).

De modo similar, el Comando de Sistemas Aéreos Navales [NAVAIR] (2016), define “función” como “el propósito previsto de un elemento según lo descrito por un estándar de desempeño requerido” (p. 1 de la sección 5); es decir, la expectativa de rendimiento que se espera del elemento.

Cabe señalar que el cumplimiento de la “función” que debe desempeñar el bien se desarrolla en un determinado contexto operativo, en mismo que debe tenerse en consideración al momento que establecer la(s) función(es) operativas.

La norma antes mencionada señala que las funciones se pueden dividir en dos categorías: funciones primarias/principales y funciones secundarias.

Las funciones primarias son la razón por la cual cualquier organización adquiere cualquier activo o sistema es para cumplir con una función o funciones específicas. Por ejemplo, la razón principal por la que alguien adquiere un automóvil puede ser “para transportar hasta cinco personas a velocidades de hasta 90 km por hora por caminos adecuados”.

Las funciones secundarias se refieren al cumplimiento de otras funciones, además de las funciones primarias, las cuales suelen ser menos obvias que las funciones primarias; sin embargo, la pérdida de una función secundaria podría tener consecuencias graves, a veces más graves que la pérdida de una función primaria; por lo tanto, puede darse el caso que algunas funciones secundarias necesiten tanta o más atención que las funciones primarias. Por ejemplo, una función secundaria de protección asociada a un dispositivo o sistema que advierta la ocurrencia de condiciones anormales (luces de advertencia o alarmas) y que apague el equipo en caso de falla funcional (mecanismos de apagado). (p. 9-10)

Respecto a las fallas funcionales, este es un concepto utilizado en el ámbito de aplicación del RCM (Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad³), en el cual una “falla funcional” se define como “la incapacidad de todo bien de cumplir una función a un nivel de desempeño aceptable establecido por el usuario”. Esta definición cubre la pérdida total de funcionamiento y situaciones en las que el bien continúa funcionando, pero que se desempeña fuera de los límites deseados. (Moubray, 1997, p. 46-47).

Por ejemplo, en el caso de una bomba que transfiere petróleo a través de un oleoducto, cuya función es bombear petróleo crudo de 30° API, desde el Lote IV⁴ hasta la Refinería Talara, con un caudal mínimo de 300 barriles/hora, a una presión de descarga de 250 psig, se podrían dar las situaciones siguientes:

- Que no sea capaz de bombear el fluido
- Que bombee a menos de 300 barriles/hora

El primer caso, se calificaría como una falla total, y el segundo, como una falla parcial.

Se mencionó que, en general, cada bien tiene varias funciones, sobre el particular, y con relación a las fallas funcionales la norma SAE JA1012 (2002), señala que, considerando la posibilidad de que cada una de estas funciones falle, cualquier activo puede sufrir una variedad de estados fallidos; “por esta razón, es más exacto definir la falla en términos de la pérdida de funciones específicas, en lugar de la falla de un activo como un todo” (p. 13).

³ El RCM es un proceso cuya finalidad es definir qué debe hacerse para asegurar que todo bien físico continúe funcionando como el usuario lo desean en un determinado contexto operativo (Moubray, 1997).

⁴ El Lote IV es un área concesionada de producción de petróleo ubicado en el distrito de Pariñas, provincia de Talara, Piura.

Por su parte la NAVAIR (2016), señala lo siguiente:

Las fallas funcionales son descripciones de las diversas formas en que un sistema o subsistema puede fallar en cumplir con los requisitos funcionales diseñados en el equipo.

Es importante determinar todas las funciones de un elemento que son significativas en un contexto operativo determinado. Al definir claramente el incumplimiento de las funciones, la falla funcional queda claramente definida. Por ejemplo, no basta con definir la función de una bomba para mover agua. La función de la bomba debe definirse en términos de cuánta agua, a qué presión, a qué eficiencia, etc. (p. 13 de la sección 3).

2.1.6.4 Modo de falla. En el ámbito del RCM, un modo de falla es “cualquier evento que cause una falla funcional” (Moubray, 1997, p. 53).

Para la NAVAIR (2016), un modo de falla es “una condición física específica que resulta en una falla funcional”. Asimismo, señala que “la declaración del modo de falla debe incluir una descripción del mecanismo de falla (por ejemplo, fatiga) además de la condición específica siempre que sea posible” (p. 5 de la sección 3).

Por ejemplo, en el caso de la bomba que transfiere petróleo, descrita en párrafos precedentes, para la falla funcional: bombea a menos de 300 barriles/hora; un modo de falla puede ser: propulsor desgastado por corrosión interna.

2.1.6.5 Efectos de falla. Los efectos de falla “describen qué sucede cuando se presenta un modo de falla” (Moubray, 1997, p. 73).

Sobre el “efecto de falla”, la NAVAIR (2016), señala lo siguiente:

El efecto de falla se define como el resultado de una falla funcional en los elementos circundantes, la capacidad funcional del elemento final y los peligros para el personal y el medio ambiente. En otras palabras, es el impacto que tiene una falla funcional en el elemento bajo análisis, el entorno circundante (para incluir el equipo y el personal) y la capacidad funcional del elemento final. Los efectos de falla deben describir cualquier daño físico, incluidos los daños primarios y secundarios que puedan ocurrir, y cualquier acción requerida para restaurar la función del sistema. Deben identificar los efectos sobre la seguridad del personal y del sistema, la misión, los activos físicos e incluir cualquier acción no planificada del operador o del mantenedor requerida para restaurar la capacidad funcional. Los efectos de la falla deben describirse como si no hubiera una tarea de mantenimiento preventivo para prevenir o encontrar la falla (p. 7 de la sección 3).

2.2 Método de estudio de casos

2.2.1 Concepto

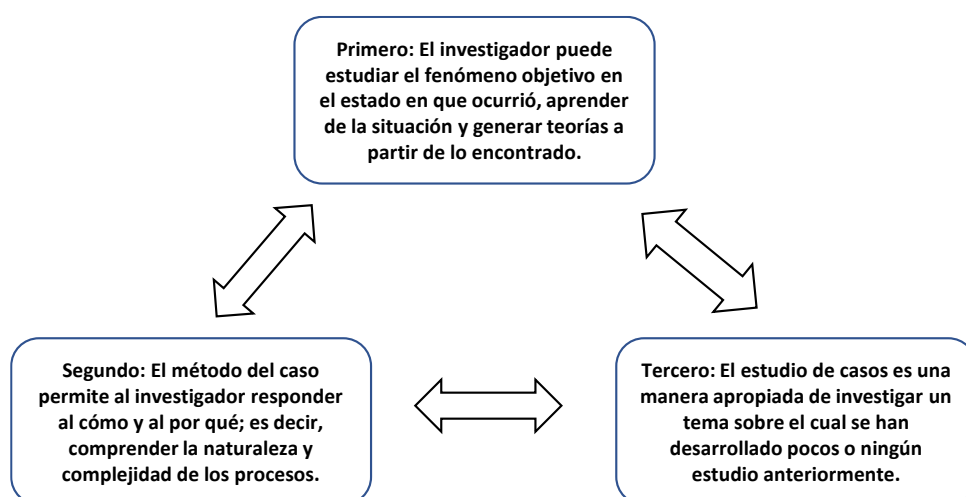
Un estudio de caso es una investigación empírica que investiga un fenómeno contemporáneo dentro del contexto de vida real en donde ocurrió o se generó; en ese sentido, se constituye como una estrategia de investigación comprensiva; es decir, no es una simple recopilación de datos. Asimismo, los casos en estudio pueden tratar tanto evidencia cuantitativa, como cualitativa, o una mezcla de ambas (Yin, 2009).

Para Ceballos (2009), el estudio de casos “es una modalidad de informe que valora la información para luego emitir un juicio” (p. 416).

En la Figura 1, Jiménez (2012), grafica los criterios para utilizar el estudio de caso como método de investigación:

Figura 1

Criterios para utilizar el estudio de caso como método de investigación



Nota. Adaptado de Jiménez, V. (2012, p. 144).

2.2.2 Tipos de estudios de casos

Pérez Serrano (1994), citado por Jiménez y Comet (2016), plantea los siguientes tipos de estudios de casos, atendiendo fundamentalmente al informe de investigación:

- **Estudio de casos descriptivo:** Se presenta un informe detallado del fenómeno objeto de estudio sin fundamentación teórica previa, con el objeto de no guiarse por hipótesis preestablecidas y aportar información básica sobre áreas educativas no investigadas aún.
- **Estudio de casos interpretativo:** Contiene descripciones ricas y densas, sin embargo, difiere del anterior en que los datos se utilizan para desarrollar categorías conceptuales o para ilustrar, defender o desafiar presupuestos teóricos defendidos antes de recoger los datos.

- Estudio de casos evaluativo: Implican descripción y explicación para llegar a emitir juicios sobre la realidad objeto de estudio.

(p. 7-8).

2.2.3 Diseño de investigación con estudio de casos

Como cualquier tipo de estudio de investigación es necesario el desarrollo de un plan o diseño de investigación de los estudios de casos que se van a analizar. Dicho plan servirá de guía en el proceso de recopilación, análisis e interpretación de las situaciones, eventos u observaciones que se hallaren en cada uno de los casos.

Yin (2009), propone cinco (5) componentes importantes de un plan de investigación:

- las preguntas de estudio;
- sus proposiciones (si las hubiere);
- su(s) unidad(es) de análisis;
- la lógica que vincula los datos a las proposiciones; y
- los criterios de interpretación de los resultados.

(p. 27)

Asimismo, señala que en el estudio de casos no se pueden realizar “generalizaciones estadísticas”, puesto que no se están muestreando los casos a partir tamaños de muestra, más bien los casos individuales son seleccionados por el investigador; en ese sentido, los casos múltiples deben ser considerados como experimentos múltiples, a partir de los cuales solo se puede realizar “generalizaciones analíticas” fundamentadas en teorías previamente desarrolladas.

En la investigación a partir del estudio de casos se pueden dar cuatro (4) diferentes situaciones:

- Un caso simple con una unidad de análisis.
- Un caso simple con varias unidades de análisis.
- Casos múltiples con una unidad de análisis.
- Casos múltiples con varias unidades de análisis.

(Yin, 2009)

2.2.4 Estudio de casos múltiples

Yin (2009), también manifiesta que los estudios de casos múltiples son usados con más frecuencia en el análisis de casos, pues la evidencia de los múltiples casos es considerada a menudo como más global y, por consiguiente, como más robusta. La lógica de estudio de caso múltiple es que cada caso produzca/vaticine resultados similares, por lo cual, cada caso debe seleccionarse cuidadosamente.

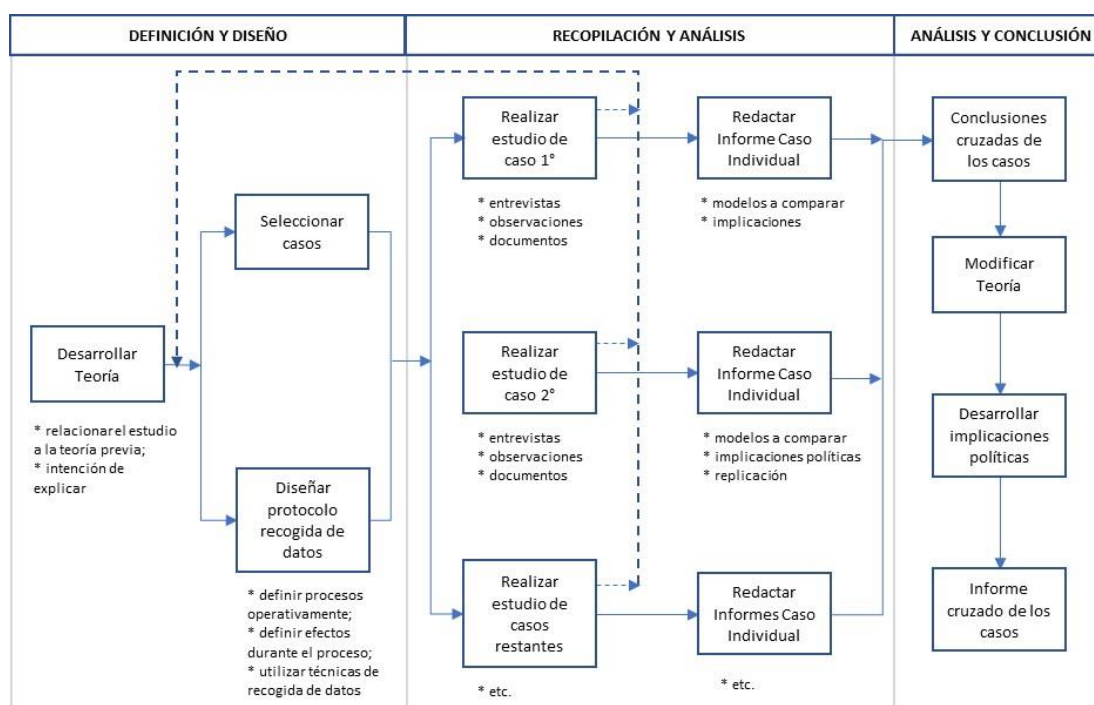
La metodología para la realización de estudio de casos propuesta por la Corporación Cosmos y estructurado por Yin (2009), está compuesta por tres fases:

- Definición y diseño
- Recopilación y análisis
- Análisis y conclusión

La Figura 2 ilustra la secuencia de estas fases y detalla las actividades involucradas en el proceso:

Figura 2

Método de estudio de casos

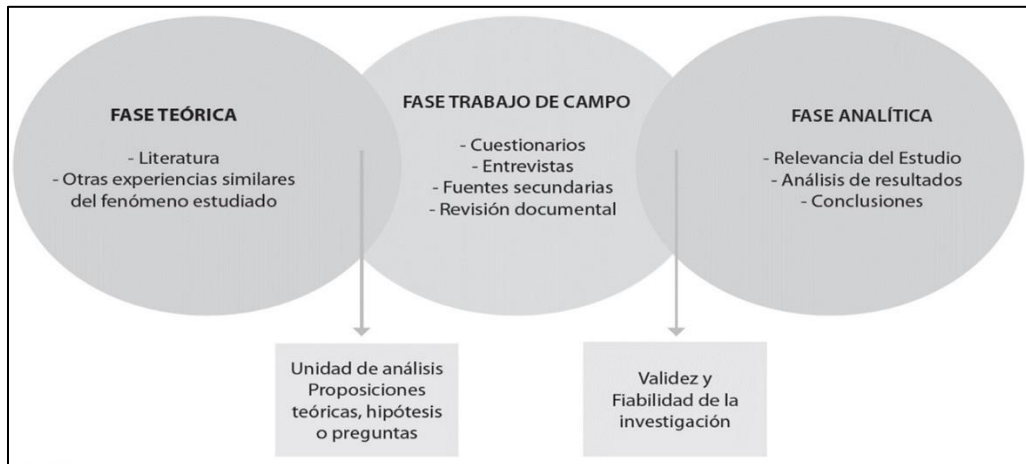


Nota. Tomado de Yin (2009, p. 57).

Castro, E. (2010), basado en su investigación realizada sobre el estudio de casos como metodología de investigación en la dirección y administración de empresas, resume las diferentes etapas o fases necesarias para la realización de un estudio de casos en el esquema mostrado en la Figura 3.

Figura 3

Procedimiento metodológico de la investigación utilizado para un estudio de casos



Nota. Tomado de Castro (2010, p. 50).

El autor concluye lo siguiente:

En la realización del estudio de casos debe existir una frontera espacial y temporal y debe definirse una o varias unidades de análisis, que en realidad es lo que constituye el caso a estudiar.

Establecidas las unidades de análisis se establecen hipótesis, proposiciones teóricas o preguntas de investigación que guían al investigador, focalizando de esta manera la atención en lo que se desea investigar y destinando así el tiempo efectivo en el trabajo de campo.

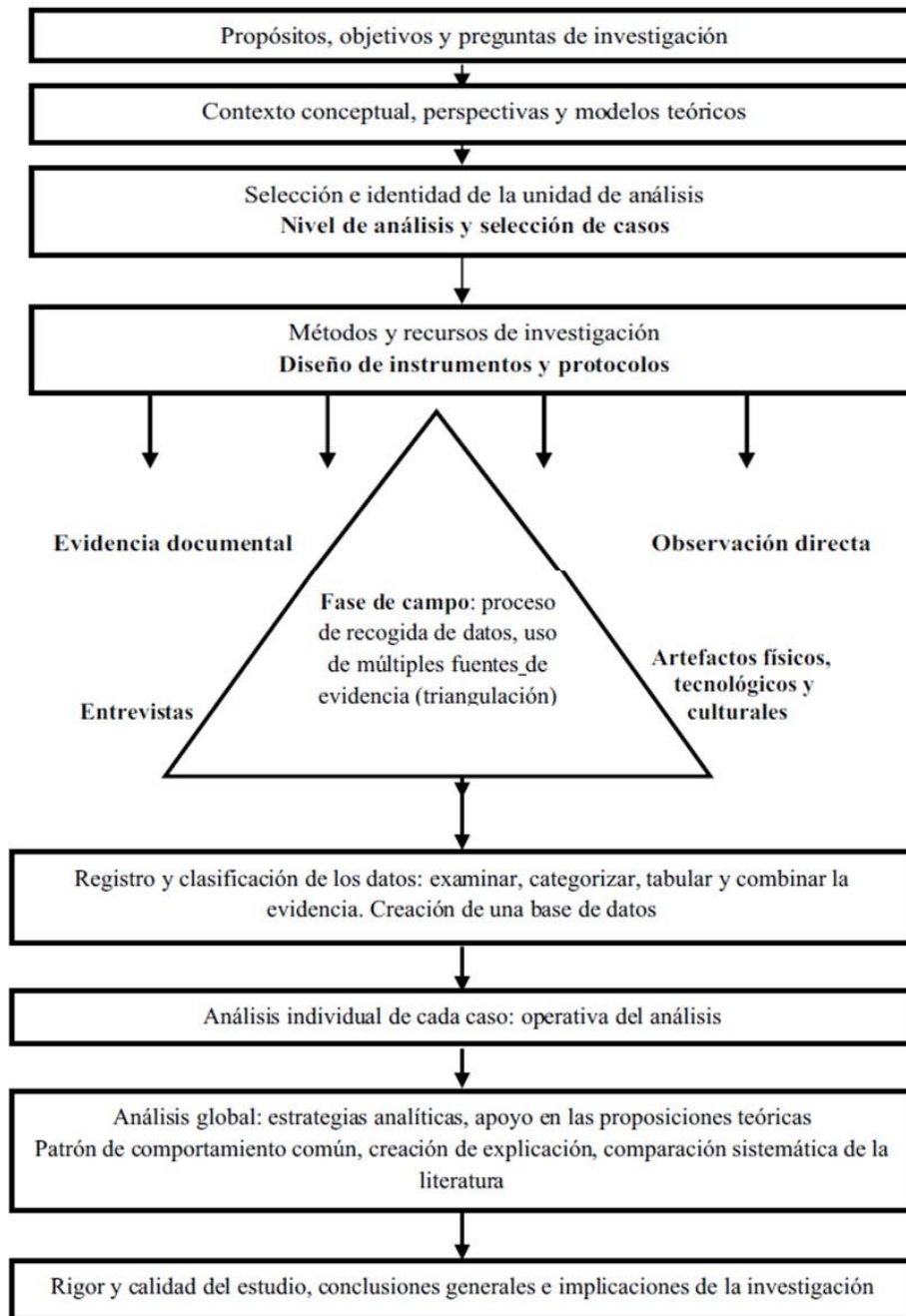
La selección de los casos que componen la investigación es de suma importancia y ésta se realiza más por razones teóricas que estadísticas y puede ser un único caso o múltiples casos con una o varias unidades de análisis.

Un buen estudio de casos debe tener validez interna, reflejando que la investigación es objetiva, analizando y explicando la verdadera situación estudiada. Asimismo, debe darse la investigación con validez externa que brinda la capacidad de que sus conclusiones puedan ser generalizadas analíticamente a teorías más amplias (p. 50-51).

Por otro lado, Villareal y Landeta (2010), proponen la metodología que se muestra en la Figura 4, enfocada en la investigación empírica en economía de la empresa mediante el estudio de casos. Su diseño ha sido elaborado a partir de las aportaciones más relevantes de reconocidos autores, enriquecido con su propia experiencia.

Figura 4

Propuesta de diseño metodológico del estudio de casos



Nota. Tomado de Villareal y Landeta (2010, p. 36).

2.2.5 Esquema para la redacción del Informe de Estudio de Casos

No existe un formato aceptado por unanimidad para reportar los resultados del estudio, por lo cual el investigador debe diseñar un esquema básico de lo que será el Informe del estudio de casos. Este Informe debe ser elaborado de tal manera de facilitar la obtención de evidencia relevante para el estudio y reducir la necesidad de regresar a los estudios originales por información adicional (Martínez, 2006, p.20).

2.3 Cables de acero trenzado

2.3.1 Definición

Espejo y Martínez (2007), señalan que “los cables son elementos cuya función básica consiste en transmitir potencia mecánica lineal, sirviendo de multiplicadores de fuerza cuando se utilizan combinándolos convenientemente con poleas en máquinas de elevación y transporte” (p. 77).

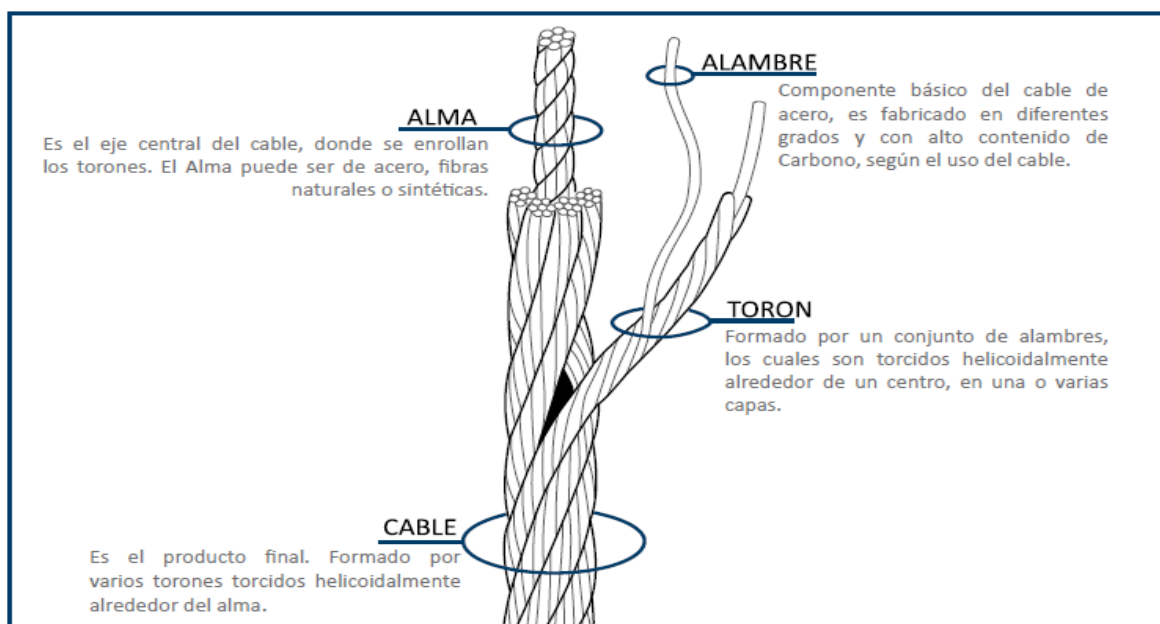
Según la empresa Productos de Acero S.A. (Prodinsa, 2020), “el cable de acero es una máquina simple, compuesta de un conjunto de elementos que transmiten fuerzas, movimientos y energía entre dos puntos, de una manera determinada para lograr un fin determinado” (p. 4).

En los párrafos subsiguientes se definen los elementos que conforman los cables, tipos y particularidades⁵.

2.3.1.1 Elementos. Los cables de acero están conformados básicamente por los siguientes elementos: alambre, torón y alma. Ver ilustración de Figura 5.

Figura 5

Conformación de un cable de acero



Nota. Tomado de PRODINSA (2020, p. 4).

Alambre: El alambre de acero es el componente básico del cable. Es fabricado con acero de alto contenido de carbono y posee distintos grados o calidades, que dependen exclusivamente de los requerimientos finales del cable.

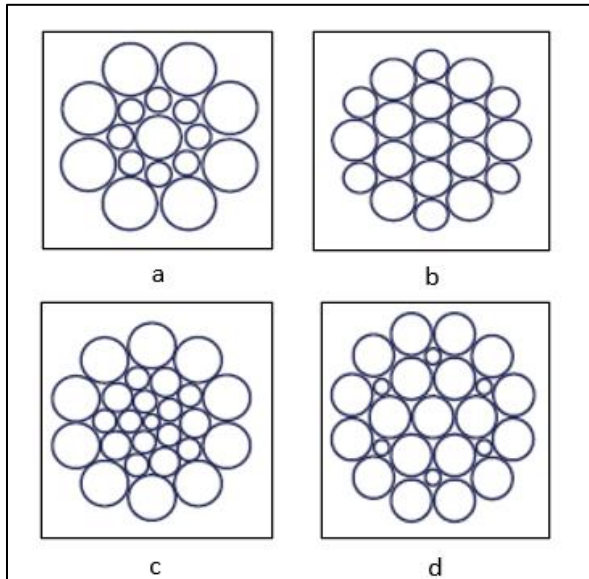
⁵ Se precisa que, en tanto que las definiciones incluidas son de conocimiento general y no suponen una idea original, no necesitan ser referenciadas (UDEP, p.8).

Los tipos básicos de alambre son los siguientes:

- Alambre de acero negro brillante: Acero con alto contenido de carbono, ofrece alta resistencia a la tensión, a la fatiga y al desgaste.
- Alambre de acero inoxidable: Acero especial que contiene aproximadamente 18% de cromo y 8% de níquel. Tiene alta resistencia a la corrosión.
- Alambre galvanizado antes del trefilado: Alambre se hace pasar por la línea de galvanización, el revestimiento de zinc incrementa su diámetro así antes del trefilado tiene una resistencia 10% menor que el alambre de acero negro.
- Alambre trefilado antes del galvanizado: Alambre galvanizado luego del trefilado. Tiene igual resistencia que el alambre de acero negro del mismo tamaño y tipo.

Torón: Los torones de un cable de acero están formados por un determinado número de alambres enrollados helicoidalmente alrededor de un alambre central, y dispuestos en una o más capas. A cada número y disposición de los alambres se les llama “construcción” y se distinguen entre ellas por su cantidad de alambres, número de capas, diámetro y disposición de los alambres. Las “construcciones” más comunes son:

- *Seale*: Más rígida, pero con mejor comportamiento a roces, presiones y aplastamientos. Tiene la misma cantidad de alambres en las distintas capas. Torón de 19 alambres (9/9/1) o 17 alambres (8/8/1).
- *Warrington (W)*: Más flexible, pero con menor estabilidad al aplastamiento, compuesta por dos diámetros de alambres en una de sus capas. Torón de 19W alambres (6+6/6/1).
- *Warrington Seale (WS)*: Tiene en su capa exterior el mismo número de alambres que en la interior, pero con dos diámetros distintos. Torón de 26WS alambres (10/5+5/5/1).
- *Filler Seale (FS)*: Una capa de N alambres y la siguiente de N/2 alambres con un diámetro menor como relleno. Torón de 25FS alambres (12/6F/6/1).

Figura 6*Construcción de torones*

Nota. Tomado de PRODINSA (2020, p. 9).

Alma: El alma es el eje central o núcleo de un cable. Alrededor del alma van colocados los torones. Su función es servir como base del cable, conservando su redondez, soportando la presión de los torones y manteniendo las distancias o espaciado correcto entre ellos.

Rivera (2008), nos dice que el alma es quien aporta la estabilidad mecánica y dimensional al cable garantizando que no ocurran descompensaciones en la distribución de la carga. Los tipos de alma más usadas son:

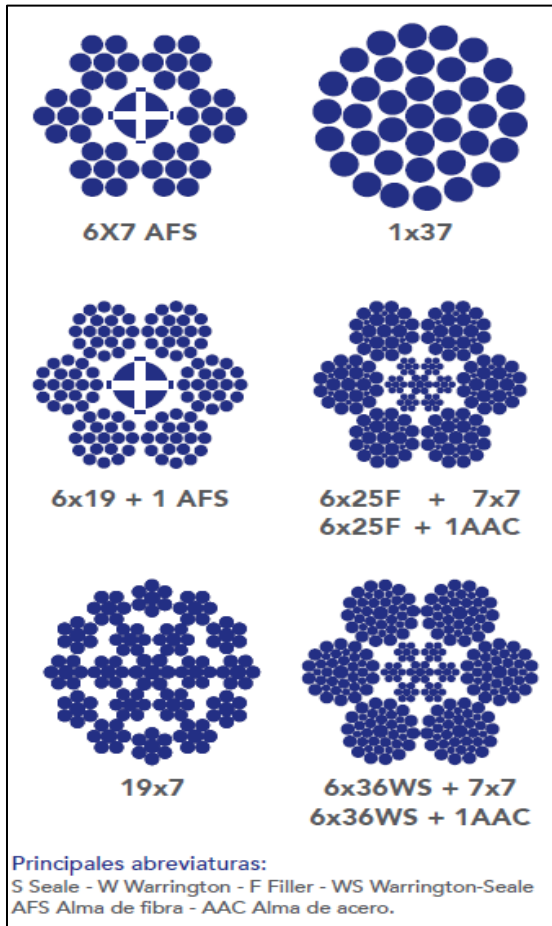
- **Alma de fibra natural:** Utilizado en aplicaciones donde el requerimiento de levantamiento de cargas no es alto y la operación es a temperaturas no muy elevadas.
- **Alma de fibra sintética:** Generalmente de polipropileno, no ideales para entornos de calor excesivos, son muy livianos, aunque con muy baja resistencia al desgaste abrasivo.
- **Alma de acero:** Ideales para aplicaciones que requieren gran resistencia a la tensión o situaciones de grandes presiones que generen aplastamiento, a su vez ideales para ambientes de calor excesivo. Puede ser un torón individual o un cable independiente, podrían llevar un recubrimiento plástico que sirve como protección al desgaste con los torones exteriores del cable y a la corrosión.

Cable: Los alambres son las unidades básicas del cable de acero, los cuales se arrollan alrededor de un centro en un modo específico en una o más capas, de manera de formar lo que se denomina un "cordón" o "torón". Los torones se arrollan alrededor de otro centro llamado "alma", y de esta manera se forma el cable de acero.

2.3.1.2 Nomenclatura. La nomenclatura básica del cable de acero tiene la siguiente representación:

Figura 7

Ejemplos de Nomenclatura de cables de acero



Nota. Tomado de Cía. Italo Percossi e Hijos [IPH] (2017, p.5).

Dicha nomenclatura hace referencia a:

- La primera cifra es la cantidad de cordones. (6x25F + 7x7)
- La segunda cifra es la cantidad nominal de alambres en cada cordón. (6x25F + 7x7)
- La tercera cifra se refiere a la composición del cable que compone el alma. (6x25F + 7x7)
- Una letra o palabra descriptiva indicando el tipo de construcción.
- Una designación de alma, cualitativa o cuantitativa.

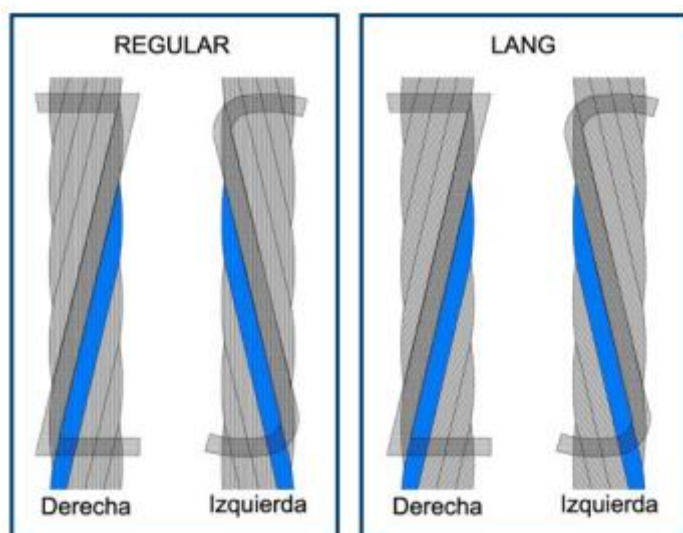
2.3.1.3 Torcido (arrollamiento). En un cable, los alambres dentro del torón están arrollados en un determinado sentido y a su vez los torones también están arrollados en un determinado sentido alrededor del alma.

Los cables se fabrican en dirección de torcido “Regular” o “Lang”, haciendo referencia a si tienen dirección izquierda o derecha.

En el cable “Regular”, los alambres del torón están torcidos en dirección opuesta a la dirección de los torones en el cable. Por su parte, los alambres y los torones en un cable “Lang” están torcidos en la misma dirección de los torones en el cable. Los cables “Regular” son más fáciles de manipular, son menos susceptibles a la formación de “cocas” y ofrecen mayor resistencia al aplastamiento. Bajo carga presentan una menor tendencia a destorcerse. Los cables “Lang”, son ligeramente más flexibles y muy resistentes a la abrasión y fatiga; sin embargo, poseen mayor tendencia a destorcerse, por lo que deben utilizarse en aplicaciones en donde ambos extremos del cable estén anclados y no permitan girar sobre sí mismos

Figura 8

Ilustración de dirección de torcido de cables



Nota. Tomada de Prodinsa (2020, p. 11).

2.3.1.4 Alargamiento. Los cables presentan dos tipos de alargamiento:

- Alargamiento de puesta en servicio: ocurrido debido al acomodamiento de los alambres y de los torones dentro del cable después de fabricado y ensamblado. Es permanente.
- Alargamiento elástico: ocurre durante la operación normal del cable, debido a las cargas que los estiran. Recupera su longitud original.

2.3.1.5 Resistencia. La resistencia de un cable está representada primordialmente por su valor de carga mínima de rotura (CMR). Se considera que un cable se rompe cuando se le aplica una carga de tracción mayor a la CMR. Los valores de CMR se presentan en tablas para cada tipo y medida de cable.

Por otro lado, la carga segura de trabajo se determina dividiendo el valor de la CMR por un factor de seguridad (FS) que varía dependiendo del equipamiento o aplicación. A modo informativo se tiene:

- Cables estáticos: 3 a 4.
- Elevación de cargas en general, grúas, eslingas, etc.: 5 a 6.
- Casos con altas temperaturas u otras condiciones extremas: 8 a 12.
- Elevación de personas: 12 a 22.
- El factor de seguridad lo toma el diseñador o usuario tomando como referencia la recomendación del fabricante del equipo y del cable, así como de la normativa vigente.

2.3.2 Características de diseño y usos de los cables de acero

Según la norma API RP 9B (1999), Recommended Practice on Application, Care, and Use of Wire Rope for Oilfield Service de la American Petroleum Institute (API), la vida útil de un cable de acero depende del adecuado diseño de sus elementos complementarios como son: poleas, tambores, etc., por lo que se recomienda que el usuario señale al fabricante lo necesario de cumplir con los siguientes requerimientos (p. 14):

Para zócalo de cesta: El diámetro interior de las cestas y del casquillo giratorio debe ser 5/32" más grande que el diámetro nominal del cable de acero que se inserta.

Material para ranura de poleas: Los más adecuados son los aceros aleados o al carbono tratados térmicamente.

Rodamientos: Se recomiendan rodamientos antifricción para la adecuada rotación de las poleas.

Diámetro de tambores: Deben ser lo suficientemente grandes para manejar el cable con el menor número posible de capas. Una práctica económica es que los tambores tengan un diámetro mínimo de 20 veces el diámetro nominal del cable de acero, pero es preferible que sean mayores. Para líneas de medición de pozos, el tambor debe ser tan grande como lo permita el diseño del equipo, aunque no debe ser inferior a 100 veces el diámetro de la línea.

Ranuras de tambor: El ranurado recomendado para tambores de cable metálico es el siguiente:

- En los tambores diseñados para bobinado de capas múltiples, la distancia entre las líneas centrales de las ranuras debe ser de aproximadamente igual al diámetro nominal del cable más la mitad de la tolerancia indicada. Para obtener las mejores condiciones de bobinado, esta dimensión puede variar según el tipo de operación.
- El radio de curvatura del perfil de la ranura debe ser igual a los radios enumerados en la tabla 6 de la norma referenciada.

- La profundidad de la ranura debe ser aproximadamente el 30% del diámetro nominal del cable de acero. Las crestas entre las ranuras se deben redondear.

Diámetro de poleas: La vida útil de los cables de acero utilizados para el servicio en campos petroleros se ve afectada por las condiciones de funcionamiento. Entre estos se encuentran: doblado sobre las poleas, doblado y aplastamiento en tambores, condiciones de carga, velocidad del cable, abrasión, corrosión, etc. Cuando predominan las condiciones de flexión en el control de la vida útil del cable, las poleas deben ser del mayor diámetro posible después de considerar la economía de diseño, portabilidad, etc. Cuando el servicio se da para la elevación en perforación rotatoria, el tamaño de las poleas puede reducirse sin afectar seriamente la vida útil del cable.

A continuación, se muestra una fórmula que puede servir de guía para la selección de tamaño de polea adecuado:

$$D_t = dxF$$

Donde

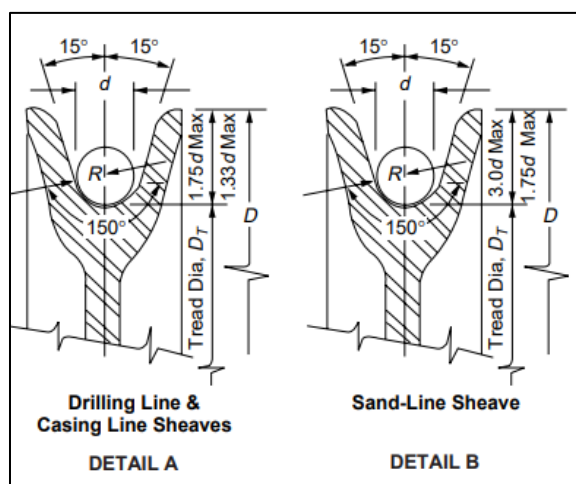
D_t = Diámetro de la pista de rodadura de la polea

d = Diámetro nominal de cable

F = Factor de diámetro de polea

Figura 9

Ranura de poleas



Nota. Tomado de la figura 10 de la norma API RP 9B (1999).

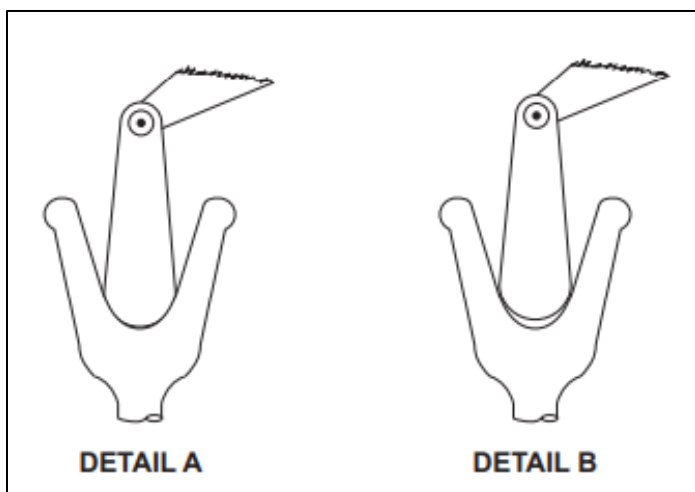
Tabla 1*Factores de diámetro de polea*

Cables Clasificación	Factor, <i>F</i>		
	Condición A	Condición B	Condición C
6 x 7	72	42	-
6 x 7 Seale	56	33	-
6 x 19 Seale	51	30	-
6 x 21 Filler Wire	45	26	-
6 x 25 Filler Wire	41	24	-
6 x 31	38	22	-
6 x 37	33	18	-
8 x 19 Seale	36	21	-
8 x 19 Warrington	31	18	-
18 x 7 y 19 x 7	51	36	-
Hilo aplanado	51	45	Siga las recomendaciones del fabricante

Nota. Tomado de la Tabla 4 de la norma API RP 9B (1999).

Ranuras de poleas: En todas las poleas el arco del fondo de la ranura debe ser liso y concéntrico con el diámetro interior o eje de la polea. La línea central de la ranura debe estar en un plano perpendicular al eje del orificio o eje de las poleas.

Galgas para poleas: Se utilizan galgas para medir el calibre de las poleas (ver Figura 10). El detalle A muestra una polea con un radio de ranura mínimo y el detalle B una con ranura ajustada.

Figura 10*Uso de galgas*

Nota. Tomado de la figura 11 de la norma API RP 9B (1999).

En cuanto a los usos del cable de acero, la Nota Técnica de Prevención [NTP] 155 (s.f.), del Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo del gobierno español, señala que “los cables metálicos son elementos ampliamente utilizados en la mayoría de actividades industriales. Forman parte de los equipos para la manipulación y sujeción de cargas, (grúas, cabrestantes, eslingas, etc.) e incluso en el transporte de personas (teleféricos, ascensores, etc.)” (p. 1).

En cuanto a las aplicaciones de los cables, éstas se clasifican en 2 grupos: estáticas y dinámicas. Las aplicaciones estáticas son aquellas en las que el cable permanece cargado constantemente, fijo en ambos extremos y no pasa por poleas ni tambores, como es el caso de los cables utilizados en puentes, postes y antenas. Por otro lado, las aplicaciones dinámicas son aquellas en las que los cables están sometidos a cargas variables, recorren poleas y se enrollan en tambores, como en el caso de las palas mineras, ascensores y grúas en general.

La Cía. Transportes y Trincajes del Mediterráneo S.I [TTM] (s.f.), menciona que los cables de acero se utilizan para muchos fines, gracias a sus propiedades y características únicas, algunos de estos usos son:

- Cables de acero inoxidable para líneas de vida: a los cuales se fijan los trabajadores por medio de arneses para garantizar un trabajo seguro.
- Cables de acero inoxidable para uso náutico: usado como amarre para embarcaciones o para elementos internos de la propia embarcación.
- Cables de acero inoxidable para uso arquitectónico: como soporte de puentes, en el diseño de campos de fútbol se ven también sujetando algún mecanismo de sombra.
- Elevación y tiro: cable usado en grúas y otros elementos de elevación.

Así, en prácticamente cualquier lugar se puede encontrar cables de acero trabajando: frenos de bicicletas, ascensores, puentes, estadios de fútbol, mecanismos, grúas, etc.

2.3.3 Principales modos de falla en cables de acero trenzado

Durante su operación los cables de acero son propensos a sufrir distintos tipos de daño, dependiendo del medio en el que trabajen, el trabajo que realicen, la forma en que lo realicen y el cuidado que se tenga de ellos. Por esto cobra vital importancia el mantenimiento preventivo que se aplique a fin de extender lo más posible la vida útil del cable.

Según Rivera (2008), un cable tiene que estar sometido a lubricación continúa cada cierto tiempo durante toda su vida. La correcta lubricación protege al cable del desgaste adhesivo entre alambres y del desgaste abrasivo con objetos externos como poleas. La lubricación protege también contra la fatiga y la corrosión.

TTM (s.f.), menciona que los cables de acero pueden sufrir distintos daños como:

- Aumento de longitud y disminución de diámetro, esto debido a la tensión de trabajo.
- Aplastamiento, causada por impacto o presión.
- Desgaste o abrasión, debido a rozamiento entre cable y mecanismo.
- Fatiga, cuando está sometido a flexión por encima de su capacidad.
- Retorceduras, cuando hay distorsión permanente en la forma del cable.
- Corrosión, por incorrecta lubricación.
- Corte, por rozamiento o impacto con cualquier superficie.

Según Espejo y Martínez (2007), los cables merecen un cuidado especial debido a:

- Operación normalmente cíclica y, por tanto, sometidos a fatiga.
- Operación normalmente a la intemperie y, por tanto, expuestos a la corrosión y el desgaste.
- Trabajan con poleas, por lo que debido al contacto se genera desgaste interno y externo.

En la Tabla 2 se presentan los principales tipos de falla en cables de acero, así como también el modo de falla relacionado, según el autor consultado:

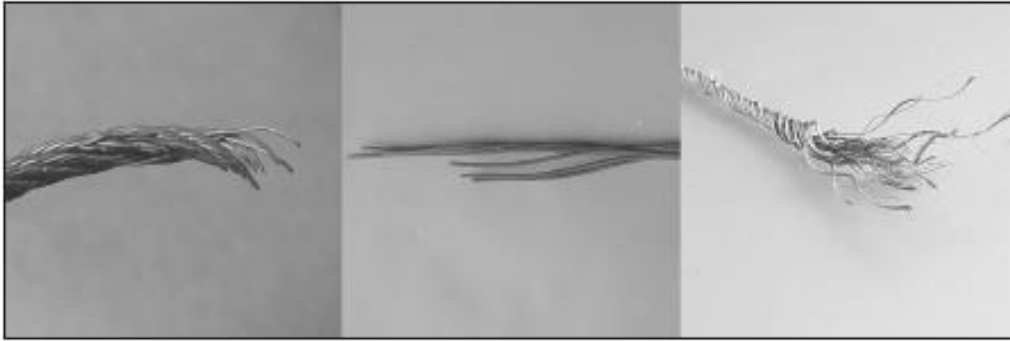
Tabla 2

Clasificación de modos de falla en cables

Tipos de Falla	Modo de Falla
Fractura	Súbita
	Fatiga
Desgaste	Adhesivo
	Abrasivo
Corrosión	Generalizada
	Picadura
Descarga Eléctrica	Descarga Eléctrica
Deformación	Indentación
	Doblado

Nota. Tomado de Espejo y Martínez (2007, p. 78).

2.3.3.1 Fractura del cable. Comprende aquellos casos en los cuales se ha perdido la continuidad mecánica del cable, es decir, se ha producido la fractura de todos los alambres en alguna zona de él (Figura 11). Los modos de falla son fractura súbita o por fatiga.

Figura 11*Zonas de fractura de tres cables diferentes*

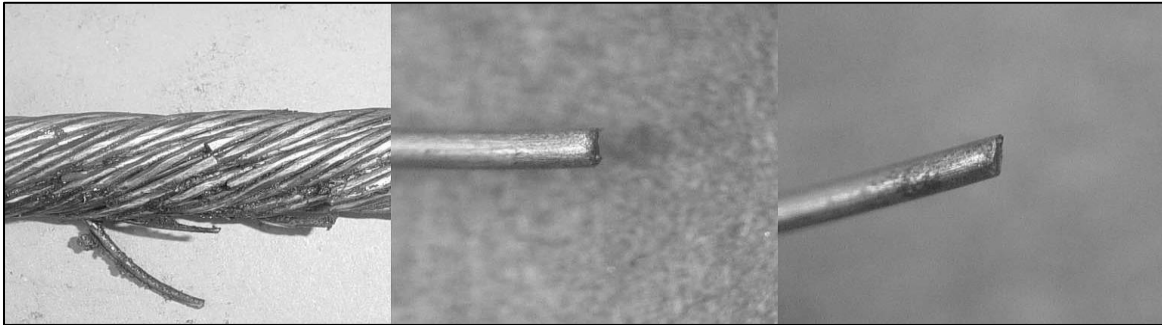
Nota. Tomado de Espejo y Martínez (2007, p. 79).

Fractura súbita: Cuando todos sus alambres del cable han colapsado mediante este mecanismo, se da cuando se sobrepasa la CMR; es decir, que se ha sobrecargado. Se fracturan con la formación de un cuello cuya magnitud depende de la ductilidad del material de los alambres, obteniéndose así una fractura de tipo copa-cono o con desgarre a 45° aproximadamente.

Figura 12*Alambres con formación de cuello y fracturas tipo copa-cono*

Nota. Alambres con formación de cuello y fractura tipo copa-cono (7X), alambre con formación de cuello y fractura a 45° (7X) y alambre con formación de cuello y fractura tipo copa-cono (33X). Tomado de Espejo y Martínez (2007, p. 79).

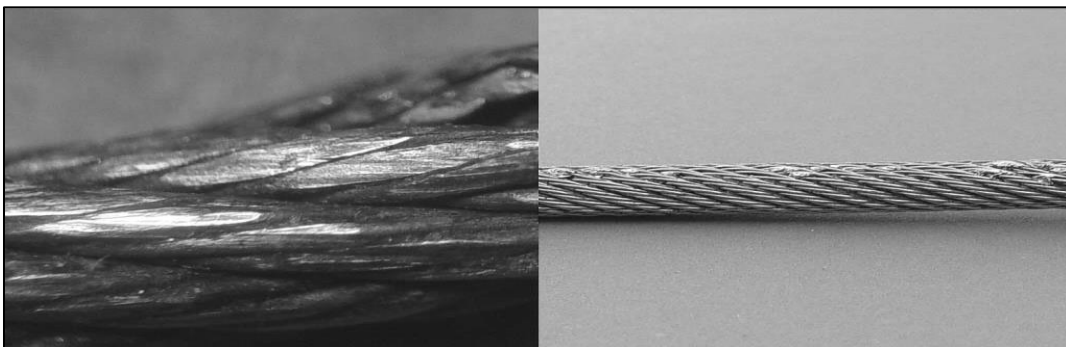
Fractura por fatiga: Cuando el cable se va fracturando de manera progresiva, es decir durante su operación al estar expuesto a cargas cíclicas y al enrollado o desenrollado que produce flexión cíclica, progresando esta situación hasta que los alambres remanentes fallan de manera súbita. Los alambres fatigados se rompen sin cuello; o sea, sin deformación plástica a gran escala, pudiendo darse la fractura perpendicular al eje del alambre o formando 45° con este (Figura 13).

Figura 13*Cable con alambres rotos por fatiga*

Nota. Alambre sin cuello con la superficie de fractura perpendicular a su eje (7X), y alambre sin cuello con la superficie de fractura formando 45° con su eje (7X). Tomado de Espejo y Martínez (2007, p. 79).

2.3.3.2 Desgaste del cable. Este desgaste se da debido al contacto del cable con otros componentes propios de su operación, desencadenándose una pérdida progresiva del material de los alambres. El desgaste se puede dar por dos mecanismos básicos: adhesivo y abrasivo.

Desgaste adhesivo: Se da cuando durante su operación el cable roza con otros cuerpos metálicos, o cuando se desliza sobre poleas mal lubricadas, lo cual lleva a que los alambres que entran en contacto con el cuerpo exterior pierdan material superficialmente, obteniéndose la disminución de la resistencia a la tracción y a la fatiga (Figura 14).

Figura 14*Superficie desgastada de alambres por roce*

Nota. Superficie desgastada de alambres por roce, (15X), y fragmentos de duraluminio entre alambres del cable de una grúa de helicóptero, el cual rozó con el fuselaje de este. Tomado de Espejo y Martínez (2007, p. 80).

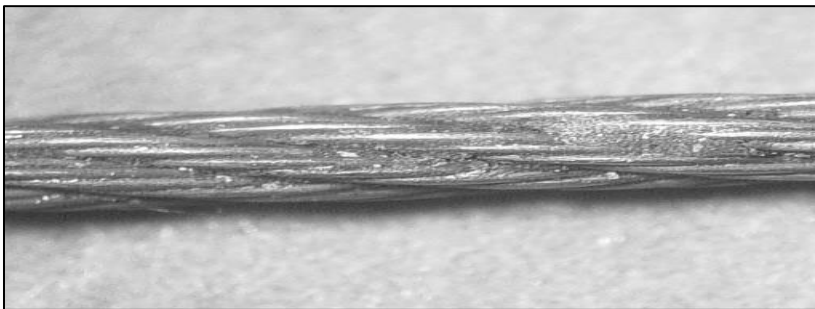
También hay desgaste adhesivo interno; es decir, por desgaste entre los alambres. Sucede cuando la lubricación no es apropiada o es inexistente. Son críticas las aplicaciones de

cables que deben pasar por poleas, ya que la flexión del cable sobre este elemento lleva a que los alambres se deslicen entre sí.

Desgaste abrasivo: Se da en ambientes polvorientos, de manera que partículas abrasivas como la arena penetra entre los alambres de los torones del cable generando desgaste por abrasión entre ellos, y al igual que con el desgaste adhesivo, se traduce en una disminución de la resistencia a tracción y a la fatiga del cable (Figura 15).

Figura 15

Cable con partículas de arena entre sus torones y alambres



Nota. Tomado de Espejo y Martínez (2007, p. 80).

2.3.3.3 Corrosión del cable. Se da debido a una mala lubricación del cable y al ambiente hostil en que opera, lo que origina reacciones químicas y electroquímicas que llevan a la pérdida de material superficial de los alambres del cable, disminuyendo su resistencia a tracción y a la fatiga. La corrosión en los cables puede ser generalizada o por picadura.

Corrosión generalizada: Ataque homogéneo en la superficie de los alambres, en áreas grandes sin concentrarse en una región en especial, produciendo disminución del diámetro de los alambres, con el agravante de que los productos de la corrosión generados (óxidos, sulfuros, cloruros, etc.) son sustancias en general más duras que el material de los alambres, lo que desencadena además la contribución del desgaste abrasivo.

Corrosión por picadura: Ataque selectivo de la superficie, acentuándose en zonas anódicas y provocando disminución severa de la resistencia a la tracción y fatiga, y en otras zonas llamadas catódicas es menos severa. Las picaduras también pueden acentuarse en ambientes tipo rendija; es decir, zonas de traslapes de láminas, debajo del recubrimiento de un cable, etc., ya que en estas zonas se pueden generar gradientes de concentración de especies químicas que promuevan la corrosión localizada (Figura 16).

Figura 16

Corrosión generalizada en cable y corrosión por picadura



Nota. Corrosión generalizada en cable bajo tierra, corrosión generalizada y corrosión por picadura en cable recubierto con material polimérico. Tomado de Espejo y Martínez (2007, p. 81).

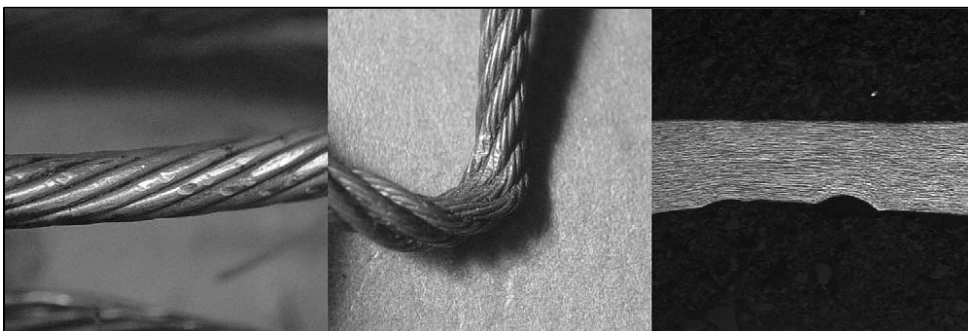
2.3.3.4 Descarga eléctrica. Se presenta en cables de conducción eléctrica y también en cables de transmisión de potencia mecánica cuando operan con máquinas eléctricas, la descarga eléctrica genera temperaturas muy elevadas en los materiales de los cables en las zonas donde se generan los arcos.

2.3.3.5 Deformación. Se da cuando el cable sufre cargas de aplastamiento, momentos torsores o flectores excesivos, generándose deformaciones permanentes que hacen que no se pueda seguir utilizando el cable. Se presentan 2 tipos: indentación y doblado.

Indentación: En este caso un objeto presiona severamente el cable, donde dicho objeto puede ser incluso él mismo, como cuando el cable enrolla sobre un tambor. El objeto también puede ser un cuerpo extraño sobre una polea, la cabeza de un tornillo en la zona de apoyo de un cable sobre una superficie, etc. La presión obliga a que los alambres se indenten o entallen dejando zonas de deformación plástica superficial, a partir de las cuales puede crecer una grieta de fatiga.

Figura 17

Cable, torón y alambre indentados



Nota. Torón de cable que se indentó con otros similares cuando el cable se llevó hasta fractura en tensión; cable que se indentó con otra sección de sí mismo generando además doblado, y

alambre indentado donde se ven las zonas deformadas, (100X). Tomado de Espejo y Martínez (2007, p. 81).

Doblado: Durante el almacenamiento, la operación o el mantenimiento de un cable se pueden generar doblados del mismo, estos doblados dañan su geometría generando momentos flectores que, aunados con el daño propio de la deformación, disminuyen la resistencia a tracción y a la fatiga de este.

Figura 18

Cables que presentan doblado por mal montaje y manipulación

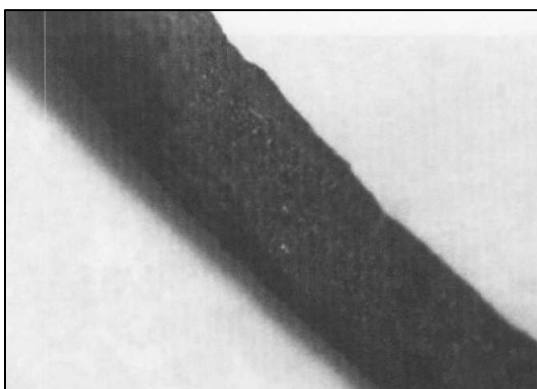


Nota. Tomado de Espejo y Martínez (2007, p.81).

2.3.3.6 Fretting Corrosion. Es un daño que se genera por la acción combinada de la fricción del cable con los elementos complementarios (poleas, polipastos, tambores de enrollamiento, etc.) y la presencia de corrosión electroquímica en la superficie de los alambres, siendo el deslizamiento relativo del cable con los componentes indicados lo que produce el desprendimiento del material en la zona de contacto y consecuente adelgazamiento progresivo de los alambres.

Figura 19

Cable que presenta deterioro por fretting corrosion



Nota. Tomado de Gómez y Wilches (2003, p. 135).

2.3.4 Causas típicas de falla en cables de acero trenzado

Para el desarrollo de esta sección nos basaremos en los autores Espejo y Martínez (2007) en su estudio de “Caracterización de modos de falla típicos en cables de transmisión mecánica”.

Debido a que cada modo de falla deja una pista característica, al estudiar los cables fallados se encontrarán pruebas que pueden llevar finalmente a un concepto sobre los orígenes del problema, con argumentos que expliquen las posibles causas. Entre las causas más comunes por las cuales fallan los cables de transmisión de potencia mecánica se tienen:

- Deficiencia o ausencia de lubricación en el cable lo que acelera el desgaste interno entre alambres.

- Ausencia de una rutina de inspección que detecte a tiempo alambres rotos por fatiga y evalúe sobre si el número de hilos rotos es aceptable o no.

- Almacenamiento u operación inadecuada que genera desgaste, corrosión o deformación de los alambres del cable.

- Problemas provenientes del proceso de fabricación de los cables, los cuales pueden ser básicamente:

un proceso de trefilado de alambres muy severo que genere zonas de intensa deformación plástica con baja resistencia a la fatiga.

problemas en el trenzado de alambres y de los torones que dejen un apriete excesivo o insuficiente; en cualquier caso, disminuye la capacidad de carga estática y ocasiona la fatiga del cable.

decarburation superficial en alambres de acero al carbono, con lo cual se tiene una baja resistencia a fatiga.

En la Tabla 3 se resumen los principales factores que contribuyen a la aparición de los diferentes modos de falla en cables de transmisión de potencia mecánica.

Tabla 3

Modos de falla en cables y sus causas

Modo de falla	Causas
Fractura Súbita	(a) cargas en servicio superiores a las esperadas en diseño, que con un solo ciclo de carga son suficientes para llevar el elemento a fractura, (b) deterioro del cable por desgaste, corrosión o deformación que se ha traducido en una disminución de su resistencia a tracción, (c) problemas en el trenzado de alambres y/o torones que hace que en servicio unos queden cargados y otros no.

Fractura por Fatiga	(a) cargas en servicio superiores a las esperadas en diseño, que en varios ciclos de carga llevan el elemento a fractura, (b) deterioro del cable por desgaste, corrosión o deformación que se ha traducido en una disminución de su resistencia a fatiga, (c) diámetros de poleas o tambores muy pequeños o cables muy gruesos, que acentúan la flexión acelerando así la fatiga, (d) problemas en el trenzado de alambres y/o torones que hace que en servicio unos queden cargados y otros no.
Desgaste adhesivo	(a) ausencia o inadecuada lubricación que acentúa el desgaste por fricción interna entre los alambres y con las poleas, (b) almacenamiento, operación y mantenimiento inadecuados que hagan que el cable roce con otros cuerpos.
Desgaste abrasivo	(a) contaminación con partículas abrasivas, (b) consecuencia de proceso corrosivo sobre los alambres.
Corrosión generalizada y por picadura	(a) selección inadecuada del material del cable para el medio ambiente en que opera. (b) contacto del cable en almacenamiento, operación o mantenimiento con sustancias que no se esperaban en diseño, (c) formación de gradientes de concentración de sustancias corrosivas entre diferentes zonas de un cable, por encauchetados parciales, inmersión parcial, etc.
Descarga eléctrica	(a) daño en aislamientos de los bobinados en estatores y rotores de máquinas eléctricas o problemas en la puesta a tierra de las bancadas, (b) puede ser consecuencia en cables de transmisión eléctrica de procesos de corrosión o fatiga que van fracturando progresivamente alambres.
Indentación	(a) presión sobre el cable de un cuerpo extraño o de otra sección del mismo cable, (b) puede ser consecuencia de un proceso de fractura súbita de un cable.
Doblado	(a) incorrecto enrollado en tambores y poleas. (b) aceleración demasiado rápida de la carga.

Nota. Tomado de Espejo y Martínez (2007, p. 82).

2.3.5 Buenas prácticas

Para el desarrollo de esta sección se ha tomado como referencia la norma API RP 9B, Recommended Practice on Application, Care, and Use of Wire Rope for Oilfield Service.

Esta norma brinda recomendaciones específicas para el adecuado uso de los cables de acero en aplicaciones petroleras, así tenemos:

Manejo en bobina:

Uso de cadenas de amarre o elevación. Cuando manipule cable de acero en un carrete con una cadena de amarre o de elevación, siempre se deben usar bloques de madera entre el cable y la cadena para evitar daños al cable o distorsión de los hilos del cable.

Uso de barras. Las barras para mover el carrete deben usarse contra la brida del carrete y no contra la cuerda.

Objetos afilados. El carrete no debe volcarse ni dejarse caer sobre ningún objeto duro y afilado de tal manera que la cuerda resulte magullada o mellada.

Dejar caer. El carrete no debe dejarse caer desde un camión o plataforma. Esto puede dañar el cable y romper el carrete.

Barro, suciedad o cenizas. Debe evitarse enrollar el carrete o dejarlo reposar en cualquier medio dañino para el acero, como lodo, suciedad o cenizas. Los entablonados o apuntalamientos serán de asistencia en el manejo del carrete, así como en la protección de los cables contra daños.

Manipulación durante la instalación:

Tendido de bloques. Los bloques deben ensartarse para dar un desgaste mínimo contra los lados de las ranuras de las poleas.

Cambio de líneas y corte. Es una buena práctica en los cambios de líneas suspender el bloque móvil de la corona en una sola línea. Esto tiende a limitar la cantidad de fricción en los protectores o espaciadores, así como las posibilidades de torceduras. Esta práctica también es muy eficaz en los procedimientos de extracción y corte.

Rotación de carrete. El carrete debe instalarse sobre un eje sustancialmente horizontal de modo que pueda girar libremente a medida que se tira del cable, y en una posición tal que el cable no roce contra los miembros de la torre de perforación u otras obstrucciones mientras se tira por encima de la corona. Se debe usar una polea de tamaño adecuado para mantener la cuerda alejada de tales obstrucciones.

Elevación. Es deseable el uso de un aparato adecuado para levantar el carrete del suelo y sujetarlo de modo que pueda girar sobre su eje.

Tensión en cable. Se debe mantener la tensión en el cable metálico cuando sale del carrete restringiendo el movimiento del carrete. Una madera o tablón proporciona una acción de frenado satisfactoria. Al enrollar el cable de acero en el tambor, se debe mantener la tensión suficiente en el cable para asegurar un enrollado ajustado.

Agarre de encordado de tipo giratorio. Cuando se va a reemplazar un cable desgastado por uno nuevo, se recomienda el uso de una mordaza de encordado de tipo giratorio para sujetar la cuerda nueva a la cuerda vieja. Esto evitará que se transfiera la torsión de un trozo

de cuerda al otro. Se debe tener cuidado para ver que el agarre se aplique correctamente. El cable nuevo no debe soldarse al cable viejo para pasarlo por el sistema.

Torceduras. Se debe tener cuidado para evitar torcer un cable de acero, ya que un torcimiento puede ser motivo para retirar el cable de acero o la sección dañada.

Golpes con martillo. Los cables de acero no deben golpearse con ningún objeto, como un martillo de acero, un hacha para torres de perforación o una palanca, ya que pueden causar muescas o magulladuras innecesarias. Incluso cuando se utiliza un martillo de metal blando, debe tenerse en cuenta que el cable puede dañarse con tales golpes. Por lo tanto, cuando sea necesario juntar las envolturas, dicha operación debe realizarse con el mayor cuidado; y se debe interponer un bloque de madera entre el martillo y el cable.

Limpieza. El uso de solvente puede ser perjudicial para un cable de acero. Si el cable se cubre con suciedad o arena, debe limpiarse con un cepillo.

Envolturas en exceso o muertas. Después de asegurar correctamente el cable de acero en el receptáculo del tambor, se debe mantener el número devueltas o vueltas muertas o en exceso especificadas por el fabricante del equipo.

Cable de acero nuevo. Siempre que sea posible, se debe tender un cable de acero nuevo con cargas y velocidades controladas durante un período corto después de haberlo instalado. Esto ayudará a su ajuste a las condiciones de trabajo.

Cuidado del cable en servicio (p. 3-7):

Tener en cuenta el factor de diseño (FS), para un FS mínimo se debe tener sumo cuidado durante la operación para minimizar golpes u otros. Es mejor tener FS altos para prolongar la vida útil del cable.

- El cable debe mantenerse apretado y enrollado uniformemente en los tambores.
- La aplicación de cargas, esfuerzos severos y repetitivos deben minimizarse.
- El desgaste aumenta con la velocidad; la economía resulta de aumentar moderadamente la carga y disminuir la velocidad.
- Una velocidad excesiva cuando los bloques corren hacia arriba pueden dañar el cable.
- Asegurarse de que las abrazaderas utilizadas para sujetar el cable para el extremo muerto no se doblen, aplasten o aplasten el cable.
- La lubricación del cable debe realizar de manera periódica.
- Las poleas y ranuras desgastadas provocan desgaste excesivo del cable por están en contacto, por lo que deben revisarse continuamente.

- El alineamiento de poleas debe estar correcto.
- En la instalación de cable nuevo, revisar estado de ranuras de poleas previamente.
- Mantener la lubricación de poleas para asegurar un mínimo esfuerzo de giro.

2.3.6 Marco normativo

Para cables de acero existen varias normas internacionales que son guías para la correcta operación y mantenimiento de estos:

- API SPEC9A-95, Wire Rope: Esta norma especifica los requisitos mínimos y los términos de aceptación para la fabricación y prueba de cables de acero que no excedan el grado de cable 2160, para las industrias del petróleo y el gas natural.
- ASME B30.5-2014, Mobile and Locomotive Cranes: Norma de seguridad para teleféricos, grúas, torres de perforación, polipastos, ganchos, gatos y eslingas.
- NTP 155, Cables de acero: Recoge indicaciones prácticas y recomendaciones, fruto de los conocimientos y experiencias de usuarios y fabricantes.
- API RP9B-99, Recommended Practice on Application, Care, and Use of Wire Rope for Oilfield Service: Práctica recomendada que cubre las aplicaciones típicas de cables de acero para la industria del petróleo y el gas.
- ASTM A1023-A1023M-09, Specification for stranded carbon steel wire ropes: Especificación estándar para cables de acero al carbono trenzados para usos generales.
- ISO 4309-2010: Establece principios generales para el cuidado y mantenimiento, inspección y desecho de cables de acero utilizados en grúas y polipastos.
- RR-W-410G, Federal Specification - Wire Rope and Straind: Esta especificación cubre los tipos, clases, construcciones y tamaños más comunes de cables de acero que son adecuados para uso del gobierno federal de los Estados Unidos.

Capítulo 3

Metodología de la investigación

3.1 Planteamiento del problema

Uno de los elementos mecánicos mayormente presentes en el historial o casuística de fallas es el cable de acero trenzado, utilizado principalmente como elemento tensor y de sujeción en los equipos de levantamiento y posicionamiento de cargas como grúas, barcasas, puentes, etc. A estos se les encuentra junto con otros elementos mecánicos conocidos como las poleas, polipastos y aparejos, para servicios con altas cargas, por lo que en conjunto requieren de un buen performance.

A su vez, en el archivo histórico de servicios de mecánica forense de la Universidad de Piura, destaca un período comprendido entre los años 2009 y 2013, donde son recurrentes las evaluaciones de integridad mecánica y de falla de cables de acero trenzado, utilizados en la industria petrolera. Como corolario de estos estudios y con lo que sigue mostrando la observación actual, se puede notar un importante descuido y desinterés por cumplir con los programas de mantenimiento, que ya se conocen, para el adecuado tratamiento de estos elementos mecánicos. Esta valiosa experiencia adquirida y la información con la que se cuenta brindan la oportunidad de reforzar y no dejar en el olvido las “buenas prácticas”, no sólo respecto al uso correcto de los cables de acero en sus diversas sollicitaciones mecánicas, sino también con el fin de proponer lineamientos guía para el diagnóstico pre y post fractura de los mismos.

Por último, es bien sabido que cualquier evento de falla o colapso de cualquier elemento mecánico de carga y descarga, como en este caso los cables de acero, siempre traerá consecuencias asociadas a posibles pérdidas humanas y materiales, así como a la falta de disponibilidad operativa.

3.2 Tipo y diseño de la investigación

Considerando que es necesario prevenir la reincidencia de fallas de los cables de acero, se propone realizar un diagnóstico a través de una investigación de tipo documental-retrospectiva, a partir de la literatura actual disponible y de data histórica de casos reales de estudio de cables de acero, y de tipo descriptivo-explicativo-deductivo, por el nivel de análisis y evaluación que se requiere realizar sobre dicha información (tauniverssity.org, 2002-2023).

La literatura disponible sobre cables de acero y sus modos de falla típicos en la industria es extensa y accesible en los sitios web; mientras que la data histórica que se analiza se centra en once informes técnicos de evaluación y de casos de falla de estos elementos, los cuales han estado sometidos a diversos requerimientos o solicitudes y han sido contrastados con normas técnicas internacionales del rubro.

El diseño de la investigación es de tipo no experimental-correlacional-causal, ya que no se necesita realizar comprobaciones actuales, pues “las causas y efectos ya ocurrieron en la realidad” (tauniverssity.org, 2002-2023); y, además, tendrá un enfoque cualitativo, a pesar de que se procesan datos tanto de tipo cualitativo como cuantitativo.

En general, la información cualitativa está referida a la pérdida de integridad tecnológica y a los modos o morfologías posfractura de los cables de acero; mientras que la data cuantitativa proviene de resultados experimentales de análisis y ensayos de laboratorio.

3.3 Población y muestra de investigación

El universo o población es el “conjunto de todos los casos que concuerdan con determinadas especificaciones” (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014), por lo que para el presente diagnóstico corresponde a informes técnicos sobre evaluación de su integridad mecánica y de análisis de fallas metalúrgicas sobre cables de acero trenzado utilizados en el rubro petrolero en la zona norte del país. Se precisa que las evaluaciones de integridad se refieren a casos en que los elementos aún no fallan, pero se desea saber su estado actual para tomar las medidas preventivas correspondientes.

La muestra seleccionada está representada por once (11) informes técnicos (unidades de muestreo), realizados entre mayo del 2009 y julio del 2013, los cuales se listan en la Tabla 4.

Tabla 4

Casos seleccionados

Caso	Descripción	Fecha
1	Cable trenzado de acero de 1 1/8" perteneciente a la grúa Manitowoc modelo 4100w.	Mayo 2009
2	Dos cortes del cable de acero trenzado de la barcaza: lado sumergido y lado del carrete.	Junio 2009
3	Cable de acero trenzado del sistema del doble de grúa Manitowoc 4100w.	Julio 2009
4	Cable trenzado de acero de 1 3/8" perteneciente a barcaza.	Julio 2010
5	Dos cables trenzados de acero de 1 1/2" pertenecientes a la barcaza.	Septiembre 2010
6	Cable trenzado de acero de 1 1/2" perteneciente a la barcaza.	Abril 2011

7	Cable de 7/8" perteneciente a una grúa Manitowoc 4100w.	Junio 2011
8	Dos cables trenzados de acero de 1 ½" pertenecientes a la barcaza.	Septiembre 2011
9	Cable trenzado de acero de 1 3/8" perteneciente a la barcaza.	Noviembre 2011
10	Cable de acero de 5mm de diámetro, plastificado, perteneciente a un equipo RCG, de extracción de crudo.	Diciembre 2011
11	Cable trenzado de acero de 1 ½" perteneciente a la barcaza.	Julio 2013

3.4 Técnica e instrumentos de recolección de datos, verificación y análisis

Las técnicas a utilizar para la extracción de los datos a partir de las unidades de muestreo es la siguiente:

- Para la obtención de los estudios de casos individuales, se recogen los datos principales y relevantes, siguiendo la estructura básica de una evaluación de integridad mecánica o tecnológica sobre cables de acero, hasta obtener los informes de los casos individuales.
- Para las etapas de análisis y correlaciones resulta más apropiado aplicar cuestionarios de preguntas como instrumentos, distribuidas por categorías y subcategorías y en tablas de doble entrada organizadas por criterios o atributos tecnológicos.

Para reforzar las líneas de discusión dentro de la etapa de análisis y correlaciones, se contrastan los datos contenidos en cada criterio o atributo con el marco teórico y la normativa técnica internacional, para luego fijar como resultado el cumplimiento o no de la norma en cuestión.

3.5 Procedimiento de organización y análisis de resultados

Teniendo en cuenta que se trata de un diagnóstico en base a un conjunto de casos de evaluación de integridad y de análisis de falla, se utiliza el método de estudio de "casos múltiples". Este método intenta "dar respuesta a cómo y por qué ocurre(n) el(los) hecho(s) focalizando a los fenómenos en estudio desde múltiples perspectivas, haciendo que la exploración sea en forma más profunda y el conocimiento obtenido sea más amplio" (Jiménez & Comet, 2016, p. 9).

En la práctica el método sigue los siguientes pasos (ver esquema de la Figura 20):

- Desarrollo de la teoría: Se rescata una casuística de fallas que quedó pendiente de analizar desde el año 2013, la cual comprende once (11) casos de evaluación de integridad mecánica y de análisis de falla.
- Seleccionar los casos: Se forma una base de datos extrayendo de cada caso la información adecuada de tipo cualitativa y cuantitativa, debidamente verificada con la normativa internacional.

- Diseñar protocolo: Describir las categorías, subcategorías, criterios o atributos de investigación y los instrumentos tipo cuestionario para la recogida, análisis y verificación de la información.

- Estudios e informes de casos: Realizar el estudio de los casos individuales, organizando la información en base a las categorías y subcategorías descritas, y con el fin de obtener los informes de cada caso para el análisis.

- Análisis de los informes: Analizar los informes de manera individual por categorías y subcategorías, separando los casos de cables no fracturados y fracturados y organizando la información en base a cómo los atributos responden a los cuestionarios de preguntas.

- Correlaciones entre los casos: Correlacionar todos los casos por categorías y subcategorías en dos etapas:

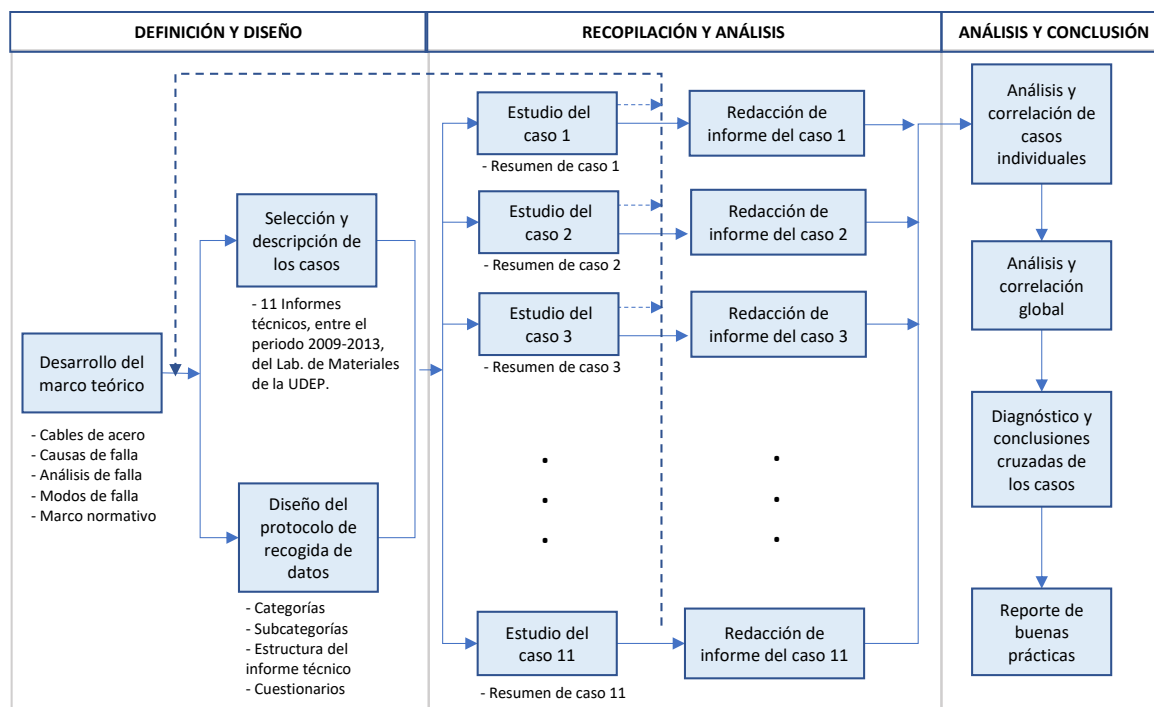
La primera etapa, correlaciona los casos buscando coincidencias y diferencias, para presentarlas como un resumen de atributos globales. Para esta etapa se tiene como referencia la lista de los atributos para correlacionarlos entre sí.

La segunda etapa también correlaciona los casos, pero toma las evaluaciones individuales cualitativas y cuantitativas del paso 5 para buscar líneas de correlación global. Como resultado se detallan los hallazgos a modo de comentarios que sirven para el último paso del procedimiento.

- Diagnóstico final de los casos evaluados: El diagnóstico a modo de conclusiones cruzadas de los casos evaluados son el consolidado de los resultados de los análisis y correlaciones obtenidos previamente, para proponer un reporte de buenas prácticas relacionadas al diagnóstico de los casos de la muestra considerada en el presente trabajo de investigación.

Figura 20

Esquema del proceso de investigación



Nota. Estructurado en base a Yin (2009, p. 57).

3.6 Estructura de los estudios de casos

Considerando los informes históricos o unidades de muestreo para la evaluación de los cables, en la etapa de obtención de cada estudio de caso, se tiene en cuenta la siguiente estructura:

Datos de bajo nivel (información general):

- Ubicación: Ubicación del equipo donde operó el cable.
- Diámetro y construcción: Datos dimensionales del cable y su tipo de construcción de acuerdo a la normativa y al marco teórico.
- Uso del cable y medio donde opera: “No sumergido”, cuando operó fuera del agua; y “sumergido”, cuando operó mayormente sumergido en el mar (por ejemplo, cables que sujetan anclas de barcas).
- Tiempo de servicio: El tiempo que indicó el cliente, aunque a veces no se conoce.

Datos de alto nivel:

- Macrografía: Se presenta el análisis morfológico a nivel macro del estado de integridad y mantenimiento, externo e interno, visibles del cable, así como el análisis de las superficies de fractura, en caso se haya producido falla.

Nivel de deterioro: Para la fluidez del análisis micrográfico, en la presente investigación se consideró el atributo “nivel de deterioro”, teniendo en cuenta el tiempo de servicio, el estado superficial del cable en general y el nivel de lubricación. Este podría tener cuatro valoraciones: leve, moderado, severo y muy severo. En la Tabla 5 se muestra la calificación del “nivel de deterioro” según los factores antes mencionados.

Tabla 5

Calificación del “nivel de deterioro” de los cables

Factores	Nivel de deterioro			
	Leve	Moderado	Severo	Muy severo
Tiempo de servicio	≤ 6 meses	> 6 meses	≤ 1 año	> 1 año
Apariencia superficial	Corrosión localizada en algunas zonas.	Corrosión uniforme y localizada en algunas zonas. Leve abuso mecánico.	Corrosión generalizada en algunas partes del cable. Algunos alambres fracturados por fatiga. Moderado abuso mecánico.	Corrosión localizada en todo el cable. Muchos Alambres fracturados por fatiga. Severo abuso mecánico.
Nivel de lubricación	Rasgos	Rasgos	Rasgos	Ya no existe

- Análisis químico: Teniendo la composición química del material de los alambres del cable se puede identificar la especificación del acero desde el punto de vista químico.
- Metalografía: Análisis a nivel micro del estado de suministro y material de los alambres.
- Microdureza: Propiedad relacionada con la resistencia del material de los alambres.
- Carga de rotura mínima: Resistencia mecánica última que puede soportar el cable sujeto a tensiones uniaxiales.
- Elementos complementarios: En este caso, principalmente algunos datos del estado de las poleas y sus dimensiones.

3.7 Categorías, subcategorías y cuestionarios de preguntas

Para la etapa final de análisis, correlación, diagnóstico, conclusiones y propuestas, se utilizan cuestionarios de preguntas como instrumentos de recolección de datos. Estas preguntas están directamente relacionadas con los criterios o atributos tecnológicos, propios del rubro de los cables de acero, organizados por categorías y subcategorías, las cuales se describen a continuación:

Categoría: Aspectos generales

Se consideran las características más generales del cable en evaluación, su entorno y su último estado de servicio.

¿Dónde estuvo en servicio? ¿Cuáles son sus parámetros dimensionales (diámetro nominal, construcción y tipo)? ¿Cuál fue su tipo de servicio? ¿Se han fracturado? ¿Cuánto tiempo estuvo en servicio?

Categoría: Cables no fracturados

El análisis se realizará tomando los datos cualitativos y cuantitativos por separado y siempre organizados en tablas por criterios o atributos.

Subcategoría: Datos cualitativos

¿Muestran signos de deterioro importante? ¿Mantienen su lubricación? ¿Elementos complementarios (poleas, polipastos, etc.) con parámetros adecuados?

Subcategoría: Datos cuantitativos:

¿Disminución de diámetro aún dentro de norma? ¿Su carga mínima de rotura está dentro de norma? ¿Se conoce el tiempo de servicio y uso?

Categoría: Cables fracturados

El análisis se realizará tomando los datos cualitativos y cuantitativos por separado y siempre organizados en tablas por criterios o atributos.

Subcategoría: Datos cualitativos

¿Muestra signos de deterioro importante? ¿Mantiene su lubricación? ¿Cuál es la morfología de los alambres fracturados? ¿Se conoce el material y microestructura que gobierna los alambres del cable? ¿Elementos complementarios (poleas, polipastos, etc.) con parámetros adecuados?

Subcategoría: Datos cuantitativos

¿Disminución de diámetro aún dentro de norma? ¿Su carga mínima de rotura está dentro de norma? ¿Tiempo de servicio y uso?

Categoría: Correlaciones particulares

La correlación de los datos ya analizados previamente se inicia procesando individualmente los cables fracturados y no fracturados organizados en tablas por criterios o atributos.

Subcategoría: Cables no fracturados

- Primera etapa:

¿Qué relación tienen los cables no fracturados en cuanto al nivel de deterioro y el medio en que se usan? ¿Qué relación tienen los cables no fracturados en cuanto al nivel de deterioro y el nivel de lubricación? ¿Qué relación tienen los cables no fracturados en cuanto al nivel de lubricación y el medio en que se usan?

- Segunda etapa:

¿Qué relación existe entre los datos cualitativos y cuantitativos de los cables no fracturados?

Subcategoría: Cables fracturados

- Primera etapa:

¿Qué relación tienen los cables fracturados en cuanto al nivel de deterioro y el medio en que se usan? ¿Cuáles son las morfologías de fractura más comunes? ¿Los modos de falla de los cables fracturados dependen del exceso de carga o de su nivel de deterioro?

Una tabla donde se analice qué tienen en común los cables fracturados con las diferentes morfologías de falla: fretting corrosion, fatiga, sobretensión, etc.

- Segunda etapa:

¿Qué relación existe entre los datos cualitativos y cuantitativos de los cables no fracturados?

Categoría: Correlaciones globales (no fracturados y fracturados)

La correlación de los datos global considera todos los cables en su conjunto organizados en tablas por criterios o atributos.

¿Hay relación entre los cables fracturados y no fracturados respecto al nivel de deterioro y el nivel de lubricación? ¿Hay relación entre los cables fracturados y no fracturados respecto al nivel de reducción del diámetro y la carga de rotura mínima? ¿Hay relación entre los cables fracturados y no fracturados respecto al tiempo de servicio?

3.8 Criterios o atributos de investigación

Están referidos a los diferentes parámetros dimensionales, físicos, mecánicos, etc., que caracterizan a los cables de acero trenzado, requeridos para cualquier evaluación de integridad mecánica o análisis de falla. Estos se consignan dentro de categorías y sub categorías, tal como se describe a continuación:

Categoría: Aspectos generales

Tabla 6*Aspectos generales de los cables analizados*

Ubicación	Diámetro nominal/Construcción	Uso	¿Fracturado?	Tiempo servicio
Lugar geográfico donde el cable estuvo en servicio.	Es el diámetro con el cual el cable es designado por el fabricante (ISO 4309 Cranes - Wire ropes - care and maintenance, inspection and discard, 2010). Tiene como unidades típicas las fracciones de pulgada / Del marco teórico se refiere al número de torones, alambres por torón y tipo de construcción.	Se refiere al uso que ha tenido el cable inmediatamente antes de la evaluación.	Se consulta si el cable en evaluación llegó a la condición de fractura o no. Si falló, se menciona en qué circunstancias ocurrió.	Se indica el tiempo de servicio y algún otro dato relevante.

Categoría: Cables no fracturados

Subcategoría: Datos cualitativos

Tabla 7*Datos cualitativos - cables no fracturados*

Nivel de deterioro	¿Lubricación?	¿Elementos complementarios adecuados?	Evaluaciones individuales cualitativas
Se describen las morfologías de deterioro externo extraídos de la macrografía de los informes de los casos. Puede ser de nivel leve, moderado, severo y muy severo	Se confirma o no la existencia de rastros de lubricación durante la evaluación de los cables.	En caso se tenga información de elementos complementarios, como, por ejemplo, las poleas que fueron incluidas en los casos.	Se hace un resumen breve de todos los criterios o atributos cualitativos más destacados por cada caso individual.

Subcategoría: Datos cuantitativos

Tabla 8*Datos cuantitativos - cables no fracturados*

Diámetro actual/ nominal / respecto a norma AST A1023 (máx. 4%).	Carga rotura mín. actual / mín. norma AST A1023 / respecto a norma	Tiempo servicio/medio operación	Evaluaciones individuales cuantitativas
Se realiza una comparación entre el diámetro actual del cable medido como lo indica la norma UNE 36701-75 y el	Se realiza una comparación entre la carga mínima de rotura calculada del cable actual (con la UNE 36710-	Se indica el tiempo de servicio y el medio en que el cable ha estado operando.	Se hace un resumen breve de todos los criterios o atributos cuantitativos más

diámetro nominal, para 75) y la carga mínima del después indicar si el cable que indica la norma porcentaje de reducción, en AST A1023, para después caso lo hubiera, está dentro de indicar el porcentaje de la tabla 7 de la norma AST reducción en caso lo A1023 (máximo 4% de hubiera. reducción permitida).	destacados por cada caso individual.
--	--------------------------------------

Categoría: Cables fracturados

Subcategoría: Datos cualitativos:

Tabla 9

Datos cualitativos - cables fracturados

Nivel de deterioro	¿Lubricación?	Morfología alambres fracturados	Material y microestructura	¿Elementos complementarios adecuados?	Evaluaciones individuales cualitativas
Se describen las morfologías de deterioro externo extraídos de la macrografía de los informes de los casos. Puede ser de nivel leve, moderado, severo y muy severo	Se confirma o no la existencia de rastros de lubricación durante la evaluación de los cables.	Se describen las morfologías o modos de fractura de los alambres desflecados extraídos de la macrografía de los informes de los casos.	Se indica la especificación del material de los alambres en base a su composición química y la microestructura obtenida en la metalografía, en caso se haya realizado.	En caso se tenga información de elementos complementarios, como, por ejemplo, las poleas que fueron incluidos en los casos.	Se hace un resumen breve de todos los criterios o atributos cualitativos más destacados por cada caso individual.

Subcategoría: Datos cuantitativos:

Tabla 10*Datos cuantitativos - cables fracturados*

Diámetro actual/ nominal / respecto a norma AST A1023 (máx. 4%).	Carga rotura mín. actual / mín. norma AST A1023 / respecto a norma	Tiempo servicio/medio operación	Evaluaciones individuales cuantitativas
Se realiza una comparación entre el diámetro actual del cable medido como lo indica la norma UNE 36701-75 y el diámetro nominal, para después indicar si el porcentaje de reducción, en caso lo hubiera, está dentro de la tabla 7 de la norma AST A1023 (máximo 4% de reducción permitida).	Se realiza una comparación entre la carga mínima de rotura calculada del cable actual (con la UNE 36710-75) y la carga mínima del cable que indica la norma AST A1023, para después indicar el porcentaje de reducción en caso lo hubiera.	Se indica el tiempo de servicio y el medio en que el cable estuvo operando.	Se hace un resumen breve de todos los criterios o atributos cuantitativos más destacados por cada caso individual.

Categoría: Correlaciones particulares

Subcategoría: Cables no fracturados

Primera etapa:

Se construye una Tabla con las correlaciones a analizar, seleccionadas a criterio de los investigadores respecto a los diferentes atributos, seleccionando las correlaciones más significativas y evitando redundancia. La Tabla que sigue ilustra la construcción de una de las correlaciones a analizar.

Tabla 11*Primera etapa de correlación - cables no fracturados*

Nivel de deterioro	Medio operación	Análisis correlacional global
Se describen las morfologías de deterioro externo extraídos de la macrografía de los informes de los casos. Puede ser de nivel leve, moderado, severo y muy severo	Se indica el medio en que el cable estuvo operando (sumergido, en zona no sumergida, etc.).	Se hace un resumen breve correlacionando todos los criterios o atributos entre todos los casos en evaluación

Segunda etapa:

Tabla 12*Segunda etapa de correlación - cables no fracturados*

Evaluaciones individuales cualitativas	Evaluaciones individuales cuantitativas	Líneas de correlación
Se hace un resumen breve de todos los criterios o atributos cualitativos más destacados por cada caso individual.	Se hace un resumen breve de todos los criterios o atributos cuantitativos más destacados por cada caso individual.	Se describen las correlaciones entre todos los atributos y todos los casos de manera global para luego profundizar en la evaluación.

Subcategoría: Cables fracturados

Primera etapa:

Se construye una Tabla con las correlaciones a analizar, seleccionadas a criterio de los investigadores respecto a los diferentes atributos, seleccionando las correlaciones más significativas y evitando redundancia. Las Tablas subsiguientes ilustran la construcción de algunas de las correlaciones a analizar.

Tabla 13*Análisis correlacional “nivel de deterioro” versus “medio de operación” - cables fracturados*

Nivel de deterioro	Medio operación	Análisis correlacional global
Se describen las morfologías de deterioro externo extraídos de la macrografía de los informes de los casos. Puede ser de nivel leve, moderado, severo y muy severo	Se indica el medio en que el cable estuvo operando (sumergido, en zona no sumergida, etc.).	Se hace un resumen breve correlacionando todos los criterios o atributos entre todos los casos en evaluación

Tabla 14*Análisis correlacional global de los atributos*

Nivel de deterioro resumido	Modo de falla	Estado carga	Líneas de correlación
Leve, moderado, severo y muy severo.	Del atributo “morfología alambres fracturados” se indica el modo de falla en su versión más breve: fatiga, fretting corrosión y sobretensión.	Indicar si el cable estuvo con sobrecarga o sobretensión antes de colapsar.	Se describen las correlaciones entre todos los atributos y todos los casos de manera global, para luego profundizar en la evaluación.

Segunda etapa:

Tabla 15

Análisis correlacional global de atributos “cualitativos” versus “cuantitativos”- cables fracturados

Evaluaciones individuales cualitativas	Evaluaciones individuales cuantitativas	Líneas de correlación
Se hace un resumen breve de todos los criterios o atributos cualitativos más destacados por cada caso individual.	Se hace un resumen breve de todos los criterios o atributos cuantitativos más destacados por cada caso individual.	Se describen las correlaciones entre todos los atributos y todos los casos de manera global para luego profundizar en la evaluación.

Categoría: Correlaciones globales (no fracturados y fracturados)

Para las correlaciones globales se consideran todos los cables, fracturados y no fracturados, para lo cual se construye una Tabla con las mismas correlaciones utilizadas en la categoría “cables no fracturados”, para la debida contrastación con la categoría “cables fracturados”. Las Tablas subsiguientes ilustran la construcción de algunas de las correlaciones a analizar.

Tabla 16

Análisis correlacional global “nivel de deterioro” vs “lubricación”

¿Fracturado?	Nivel de deterioro	¿Lubricación?	Análisis correlacional global
Se consulta si el cable en evaluación llegó a la condición de fractura o no. Si falló se indica en qué circunstancias ocurrió.	Leve, moderado, severo y muy severo.	Se confirma o no la existencia de rastros de lubricación durante la evaluación de los cables.	Se hace un resumen breve correlacionando todos los criterios o atributos entre todos los casos en evaluación

Tabla 17

Análisis correlacional global “reducción diámetro” vs “criterio de norma”

¿Fracturado?	Reducción diámetro respecto a norma AST A1023 (máx. 4%)	Reducción carga mínima respecto a norma AST A1023	Análisis correlacional global
Se consulta si el cable en evaluación llegó a la condición de fractura o no. Si falló, se indica en qué circunstancias ocurrió.	Se indica el % de reducción del diámetro del cable y si está en norma o no.	Se indica el % de reducción de la carga mínima del cable y si está en norma o no.	Se hace un resumen breve correlacionando todos los criterios o atributos entre todos los casos en evaluación

Tabla 18

Análisis correlacional global “nivel de deterioro” vs “tiempo de servicio y medio de operación”

¿Fracturado?	Nivel de deterioro	Tiempo de servicio/medio operación	Análisis correlacional global
Se consulta si el cable en evaluación llegó a la condición de fractura o no. Si falló, se menciona en qué circunstancias ocurrió.	Leve, moderado, severo y muy severo.	Se indica el tiempo de servicio y el medio en que el cable estuvo operando.	Se hace un resumen breve correlacionando todos los criterios o atributos entre todos los casos en evaluación

3.9 Instrumentos de verificación

Para la verificación de los datos organizados por categorías y subcategorías se utiliza, en primer lugar, el marco teórico sobre cables de acero y su normativa, de la cual se extraen algunas que se especifican a continuación, indicando qué atributos verifica.

- ISO 4309: Cranes - Wire ropes - care and maintenance, inspection and discard. Esta norma se utiliza para designar al diámetro nominal.
- AST A1023: Standard Specification for Stranded Carbon Steel Wire Ropes for General Purposes. Esta norma plantea el máximo porcentaje permisible de reducción de diámetro y la carga mínima de rotura aceptable para cada diámetro de cable.
- UNE 36-701: Definiciones de términos utilizados en la fabricación de cables y alambres de acero. Se indica la manera en que se debe obtener la medida del diámetro actual del cable.

- UNE 36-710: Cables de acero para usos generales. Indica la forma en que se calcula la carga mínima de rotura a través del ensayo de tracción de los alambres que lo componen.
- API RP9B: Recommended Practice on Application, Care, and Use of Wire Rope for Oilfield Service. Esta norma gobierna las buenas prácticas indicadas en el marco teórico sobre los cables de acero.





Capítulo 4

Resultados de la investigación

Tal como se ha descrito en el procedimiento de organización y análisis de resultados, además de que el diseño es de tipo no experimental-correlacional-causal con enfoque de carácter cualitativo, se ha creído conveniente estructurar el presente capítulo en cuatro secciones que, en su conjunto, resumen las pautas de análisis y resultados de la investigación.

La primera sección describe los casos de estudio seleccionados, para conocer detalles generales de cada caso y el estado situacional de cada uno, ya sea que el cable en evaluación se haya fracturado o no. La segunda sección reorganiza cada caso a modo de descripción técnica, según sea la data de tipo general (datos de bajo nivel) o data técnica específica sobre cables de acero trenzado (datos de alto nivel). En tercer lugar, se presentan los cuadros con las respuestas a los cuestionarios, que se analizan y correlacionan, particular y globalmente, con base en la normativa, para consolidar el diagnóstico y los hallazgos del análisis realizado. Finalmente, se presentan las conclusiones cruzadas o propuestas sobre todos los casos evaluados a modo de buenas prácticas específicas para la muestra evaluada en la presente investigación.

4.1 Casos seleccionados

Se ha mencionado que las unidades de muestreo o casos son informes técnicos sobre cables de acero que en la mayoría de los casos han llegado a la fractura, salvo dos casos en que los cables fueron enviados para determinar su nivel de deterioro; vale decir, su estado de integridad.

Todos los casos provienen de empresa marinas que hacen servicios a empresas del rubro petrolero para sus actividades de extracción y distribución, donde el uso de cables de acero es rutinario llegando muchas veces a ser poco considerado dentro de los planes de mantenimiento crítico.

Como se podrá notar al estudiar los casos individuales, la estructura de los informes para la evaluación de cables fracturado o no fracturados, consta de muchos puntos en común y sólo se diferencian en que, para el caso de los cables fracturados, se incluyen el análisis morfológico de la fractura, denominado también el modo de falla y por supuesto la causa de la fractura.

A continuación, se realiza la descripción general de los casos seleccionados, siendo la fuente de información, los archivos de estudios forenses mecánicos, del laboratorio de materiales de la Universidad de Piura.

4.1.1 Descripción general de los casos

Caso 1: Análisis de la falla de un cable de 1 1/8" perteneciente a la grúa Manitowoc 4100W

Datos generales:

- Empresa de Tumbes con un cable de grúa perteneciente a la barcaza CX.
- Diámetro, configuración y composición comercial: 1 1/8" (28,6 mm), 6 x 31 (grupo 6 x 36) Warrington Seale (alma de acero) y 1 – 6 - (6 + 6) – 12.
- El cable corresponde a la polea simple de izaje (la que va con la bola de acero y gancho) y al momento de la falla levantaba ancla de 8 t.
- Falla a 2,5 m del gancho de izaje y a 6 m de la polea de 35" de diámetro.
- No se sabe tiempo de servicio.

Datos de alto nivel:

- Macrografía:

Diámetro real: 27,2 – 29,0 mm (reducción del 6%, es decir mayor al 4% permitido por norma ASTM A1023 tabla 7).

En zona de fractura:

Alambres con corrosión-desgaste (fretting corrosion), fractura mayoritaria formando 45° (fatiga de acuerdo a norma ASME B 30.5, sección 5-2.4) y sin evidencia de deformación plástica.

Alrededor de zona de fractura:

Alambres externos con pérdida de cilindridad, desgaste con corrosión (fretting corrosion).

Casi todo el cable con corrosión localizada generalizada.

Grumos de grasa seca sobre el cable.

Figura 21*Imágenes del cable del Caso 1*

- Metalografía:

Transversal: Martensita revenida.

Longitudinal: Martensita revenida bandeada con alargamiento de granos (estirado en frío).

Final de fractura forma dentada y a 45° confirmado.

Desgaste corrosivo (fretting corrosion) y cavernizante cerca de fractura de alambres.

Microdureza:

Promedio 350 HV ó 35 HRc.

- Carga de rotura mínima:

Bajo norma UNE 36-713-74: P0 (carga de rotura mínima) = 30 474 kg (aprox. 30,5 t)

Norma AST 1023 tabla 14 del anexo III para 1 1/8", 6 x 31 WARR-SEALE, RL, IMP PLOW STEEL (IPS), IWRC, debe tener una carga mínima de rotura de 56,5 t; es decir, reducción mayor del 40%.

- Poleas:

La polea simple del Boom con ligero desgaste en la pista de rodadura. Diámetro de poleas adecuado para el servicio (26 veces el diámetro del cable como mínimo; es decir, aprox. 30" de acuerdo a buenas prácticas).

Caso 2: Análisis de cable de barcaza AX según norma AST A1023-02

Empresa de Tumbes con dos cortes de un cable de grúa perteneciente a la barcaza AX.

Diámetro, configuración y composición comercial: 1 3/8" (35 mm), 6 x 26 (grupo 6 x 19) Warrington Seale (alma de acero) y 1 – 5 - (5 + 5) – 10.

Un corte es del lado sumergido (A) y el corte B ha estado en el lado del carrete.

No se sabe tiempo de servicio.

Datos de alto nivel:

- Macrografía:

Diámetro real corte A: 34,1 mm – 34,8 mm (reducción del 2,6%, menor al 4% permitido por norma AST A1023 tabla 7).

Diámetro real corte B: 34,5 mm – 35,0 mm (reducción del 1,4%, menor al 4% permitido por norma AST A1023 tabla 7).

Corrosión severa externa e interna en corte A (adherencia de sales marinas) y moderada por el exterior en corte B. La corrosión es del tipo localizado.

Ausencia de lubricante en ambos cortes.

Figura 22

Imágenes del cable del Caso 2



Nivel de deterioro: severo

- Metalografía:

No se realizó.

- Carga de rotura mínima:

Corte A: bajo norma UNE 36-713-74: P0 (carga de rotura mínima) = 72 546 kg (aprox. 72 t)

Corte B: bajo norma UNE 36-713-74: P0 (carga de rotura mínima) = 79 507 kg (aprox. 79 t)

Norma AST 1023 tabla 12 para 1 3/8", 6 x 19 WARR-SEALE, RL, IMP PLOW STEEL (IPS), IWRC, debe tener una carga mínima de rotura de 83,5 t, es decir reducción del 14% en el corte A y del 5% en el corte B.

Caso 3: Evaluación de muestra de cable del sistema del doble de barcaza DX según norma AST A1023-02

Empresa de Tumbes con un cable de grúa perteneciente al sistema doble de grúa perteneciente a la barcaza DX.

Diámetro, configuración y composición comercial: 1 1/8" (28,575 mm), 6 x 31 (grupo 6 x 36) Warrington Seale (alma de acero) y 1 – 6 - (6 + 6) – 12.

No se sabe tiempo de servicio.

Datos de alto nivel:

- Macrografía:

Diámetro real: 29,0 mm – 29,9 mm (no hay reducción, por lo que es dudoso el diámetro comercial).

Corrosión ligera externa. El alma aún conserva el galvanizado.

Aún quedan restos de lubricante, pero hay zonas con gránulos abrasivos.

Figura 23

Imágenes del cable del Caso 3



- Metalografía:

No se realizó.

- Carga de rotura mínima:

Bajo norma UNE 36-713-74: P0 (carga de rotura mínima) = 61 967 kg (aprox. 61 t)

Norma ASTM 1023 tabla 14 para 1 3/8", 6 x 36 WARR-SEALE, RL, IMP PLOW STEEL (IPS), IWRC, debe tener una carga mínima de rotura de 65 t; es decir, reducción aprox. del 4%.

Caso 4: Evaluación de cable de 1 3/8" de acero fracturado perteneciente a la barcaza KX

Empresa de Talara con un cable de grúa perteneciente a la barcaza KX.

Diámetro, configuración y composición comercial: 1 3/8" (35 mm), 6 x 36 (grupo 6 x 36) Warrington Seale (alma de acero) y 1 – 7 - (7 + 7) – 14.

El cable corresponde al sistema de fondeo de la barcaza (va unido a un ancla de fondeo).

Falla en zona sumergida a 800 pies del fondo, con 20 días de servicio.

Datos de alto nivel:

- Macrografía:

Diámetro real: 36,0 – 36,2 mm (no hay reducción, por lo que es dudoso el diámetro comercial).

En zona de fractura:

85% de alambres desflecados con morfología copa-cono (deformación plástica de acuerdo a norma ASME B 30.5, sección 5-2.4) y resto de alambres con fractura a 45°. En esta zona hay deterioro corrosivo localizado leve.

Alrededor de zona de fractura:

Trazas de corrosión en alambres externos y en el alma.

Casi no se aprecia lubricación.

Figura 24

Imágenes del cable del Caso 4



- Análisis químico

Fe	C	Si	Mn	S	Cr	Ni	Mo	Pb	Cu
Resto	0,73	<0,1	0,73	0,01	0,02	0,02	<0,01	<0,01	0,02

Acero al carbono prácticamente eutectoide (alto carbono) típico de los alambres para cable trenzado.

- Metalografía:

Transversal: Martensita revenida.

Longitudinal: Martensita revenida bandeada con alargamiento de granos (estirado en frío).

Final de fractura con granos deformados plásticamente confirmado.

- Microdureza:

Promedio 357 HV ó 36 HRc.

- Carga de rotura mínima:

Bajo norma UNE 36-713-74: P0 (carga de rotura mínima) = 100 051 kg (aprox. 100 t)

Norma ASTM 1023 tabla 14 para 1 3/8", 6 x 36 WARR-SEALE, (EIP), IWRC, debe tener una carga mínima de rotura de 96,0 t; es decir, está dentro de norma.

- Poleas:

Una polea estacionaria (guiador) de 18" y una móvil (guiada) de 22" están con las pistas conservadas; sin embargo, sus diámetros no son los más adecuados para el servicio (26 veces el diámetro del cable como mínimo; es decir, aprox. 30" de acuerdo a buenas prácticas).

Caso 5:

Análisis de 02 cables fracturados de fondeo de barcaza EX, según norma ASTM A1023-02

Datos generales:

Empresa de Tumbes con dos cortes de un cable de grúa perteneciente a la barcaza EX.

Diámetro, configuración y composición comercial: 1 1/2" (38,1 mm), 6 x 26 (grupo 6 x 19) Warrington Seale (alma de acero) y 1 – 5 - (5 + 5) – 10.

El cable corresponde al sistema de fondeo de la barcaza (va unido a un ancla de fondeo). Un corte es del lado sumergido de popa-babor (A) y el corte B del lado sumergido de proa-estribor.

1 año, 8 meses de servicio, pero ya estaba en la barcaza antes de este tiempo transcurrido.

Datos de alto nivel:

- Macrografía:

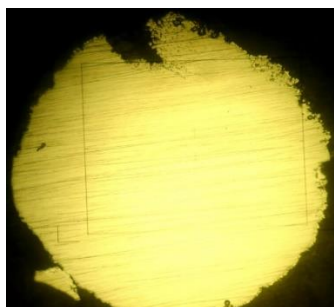
Diámetro real corte A: 37,1 mm – 37,3 mm (reducción del 2,4%, menor al 4% permitido por norma ASTM A1023 tabla 7).

Diámetro real corte B: 37,5 mm – 37,8 mm (reducción del 1,1%, menor al 4% permitido por norma ASTM A1023 tabla 7).

Figura 25

Imágenes del cable del Caso 5





En zona de fractura:

Corte A: 70% de alambres desfleados con corrosión-desgaste (fretting corrosion), fractura mayoritaria “dentada” formando 45° (“fatiga” de acuerdo con norma ASME B30.5, sección 5-2.4) y el resto con morfología copa-cono (deformación plástica de acuerdo a norma ASME B30.5, sección 5-2.4).

Corte B: 55% de alambres desfleados con corrosión-desgaste (fretting corrosion), fractura mayoritaria “dentada” formando 45° (“fatiga” de acuerdo a norma ASME B 30.5, sección 5-2.4) y el resto con morfología copa-cono (deformación plástica de acuerdo a norma ASME B30.5, sección 5-2.4).

Alrededor de zona de fractura:

Corrosión severa externa e interna en corte A y entre severa y moderada por el exterior e interior en corte B. La corrosión es del tipo uniforme (hay capas corrosivas y productos marinos incrustados).

Alambres del alma en corte A severamente corroídos y trozados. En el corte B hay ausencia del alma.

Ausencia de lubricante en ambos cortes.

Nivel de deterioro: muy severo.

- Composición química:

Fe	C	Si	Mn	S	Cr	Ni	Mo	Pb	Cu
Resto	0,67- 0,80	0,22- 0,25	0,65- 0,71	0,013- 0,012	<0,01- 0,02	<0,01- 0,02	<0,01	<0,01	<0,01

Acero al carbono prácticamente eutectoide (alto carbono) típico de los alambres para cable trenzado.

- Metalografía:

Transversal: Martensita revenida.

Longitudinal: Martensita revenida bandeada con alargamiento de granos (estirado en frío).

Alma:

Transversal: alma corroída localizadamente con picaduras profundas y cavernas (profundidad de aprox. 15%).

Longitudinal: alma corroída localizadamente con picaduras profundas, cavernas y microgrietas (profundidad de aprox. 70%).

Final de fractura forma por delaminación o dentada a 45° confirmado.

Alambres externos:

Desgaste corrosivo (fretting corrosion) cerca de fractura de alambres.

Final de fractura forma por delaminación o dentada a 45° confirmado.

Microdureza:

Promedio 366-400 HV ó 37-41 HRc.

- Carga de rotura mínima:

Corte A: Bajo Norma UNE 36-713-74: P0 (carga de rotura mínima) = 76 808 kg

Corte B: Bajo Norma UNE 36-713-74: P0 (carga de rotura mínima) = 83 427 kg

Norma ASTM 1023 tabla 12 para 1 1/2", 6 x 19 WARR-SEALE, RL, IMP PLOW STEEL (IPS), IWRC, debe tener una carga mínima de rotura de 98,9 t; es decir, reducción del 22,3% en el corte A y del 15,6% en el corte B.

Caso 6: Evaluación de fractura de cable de fondeo de barcaza GX, según norma ASTM A1023-02

Empresa de Tumbes con cable fracturado perteneciente a la barcaza GX.

Diámetro, configuración y composición comercial: 1 1/2" (38.1mm), 6 x 26 (grupo 6 x 19) Warrington Seale, alma de acero y 1 – 5– (5 + 5) -10.

El cable corresponde al sistema de fondeo de la barcaza (va unido a un ancla de proa). La fractura se produjo en el lado aéreo proa, en zona ascendente, en inmediaciones de polea.

Tiempo de servicio: 12 meses.

Figura 26*Imágenes del cable del Caso 6*

Datos de alto nivel:

- En zona de fractura:

La fractura es del tipo súbita. El 70% de los alambres desflecados con morfología tipo deformación plástica, de acuerdo a norma ASME B30.5, sección 5-2.4. El resto de alambres con fractura a 45° (fractura por fatiga tipo dentado). Se observa rotura de los torones en diferentes lugares y los alambres que lo conforman. También se observa corrosión del tipo localizado (picaduras) – generalizado en los alambres externos del cable.

En los alambres intermedios y centrales de un torón de la zona de falla, hay deterioro corrosivo localizado, pero aún no se ha generalizado lateralmente como en el caso de los alambres externos.

- Alrededor de zona de fractura:

Alma expuesta y trenzada fuera de su posición habitual. Alambres externos del alma con signos de abuso mecánico (excesivo desgaste), y rotura en algunos toroncillos cercanos que podrían haber estado en contacto con poleas u otro elemento consistente.

Presencia de corrosión sobre la superficie exterior del cable, la cual ha afectado al alma de acero del cable, ya que ésta se encuentra expuesta totalmente cerca de la zona de falla. El ataque corrosivo es del tipo localizado (picaduras) – generalizado.

Nivel de deterioro: severo.

- Análisis químico:

Fe	C	Si	Mn	S	Cr	Ni
Resto	0,70	0,18	0,63	0,013	0,03	0,04

- Metalografía:

Alambres externos:

Transversal: Martensita revenida (bonificado).

Longitudinal: Martensita revenida bandeada (bonificado).

Final de fractura forma por deformación plástica y fatiga.

- Microdureza:

De probetas metalográfica transversal (fatiga): 350 HV ó 36 HRc (promedio).

De probetas metalográfica longitudinal (deformación plástica): 354 HV ó 36 HRc (promedio).

- Carga de rotura mínima:

Corte B: Bajo Norma UNE 36-713-74: P0 (carga de rotura mínima) = 93,8 t

La norma AST 1023, tabla 12 del anexo III, indica que para cable que de: 1 1/2" 6 x 26 (EIP), IWRC, debe tener una carga mínima de rotura de 114,00 t; es decir, se advierte una reducción del 17,7%.

Caso 7: Análisis de falla de un cable de 7/8" perteneciente a una grúa Manitowoc 4100W código CMC-016

Datos generales:

Empresa de Talara con un cable perteneciente a una grúa Manitowoc modelo 4100W, código CMC-016.

Diámetro, configuración y composición comercial: 7/8" (21,3 – 21,9 mm), 6 x 19 (grupo 6 x 19) Seale (alma de acero) y 1 – 9 – 9.

El cable corresponde al sistema de izaje o elevación de la pluma (boom hoist reeving), que envuelve el ecualizador y el gantry de la grúa.

La rotura del cable se presentó en las cercanías del ecualizador, cuando la pluma tenía un largo de 190 pies y se encontraba levantando un ancla de 13500 libras.

Tiempo de servicio del cable: 17 meses.

Datos de alto nivel:

- Macrografía:

En zona de fractura:

Los alambres del alma y alambres más representativos de los torones, muestran mecanismo de fractura tipo súbita. Aprox. el 82% de los alambres desflecados de los torones tienen una morfología tipo fatiga mayormente “por doblamiento” y el resto tiene el plano de fractura formando 45° con el eje longitudinal del cable; correspondiente a un tipo de fractura por fatiga tipo “dentado”. El 18% de alambres restantes tienen una morfología tipo “deformación plástica” (por sobretensión, de acuerdo a norma ASME B30.5, sección 5-2.4).

Alrededor de zona de fractura:

Alambres desflecados, con signos de abuso mecánico (deformaciones) y corrosión en las cercanías de la zona de fractura. Presencia del lubricante sobre la superficie exterior corroída del cable, así como restos de color rojo provenientes del recubrimiento de las poleas.

Desgaste de los alambres externos, lo cual estaría corroborando el contacto directo del cable con alguno de los elementos mecánicos que lo manipulan (tambores, poleas, guidores, etc.). Asimismo, los alambres externos en las cercanías de la fractura presentan signos claros de fatiga.

Figura 27

Imágenes del cable del Caso 7



- Poleas:

El cable ha estado sometido a excesivos ciclos de doblamiento a través de las poleas pertenecientes al “gantry” y al ecualizador. En general, las poleas presentaban estado regular de conservación, a pesar del deterioro del recubrimiento en la ranura de recorrido del cable, el cual evidencia contacto directo de la polea con el cable, debido a una inadecuada lubricación.

En el ecualizador las poleas no presentan desgaste; sin embargo, en el “gantry” hay tres de las más pequeñas (de 14 $\frac{3}{4}$ ” de diámetro), que sí lo tiene, lo cual habría sido perjudicial para el cable en su recorrido cíclico.

De acuerdo a las convenciones internacionales, el diámetro mínimo de las poleas debería ser de 21"; por lo tanto, las poleas del ecualizador de 20" de diámetro, y las poleas de 14 ¾" de diámetro del "gantry", no cumplen con lo estipulado por las convenciones internacionales.

Caso 8: Evaluación de fractura de cable de fondeo de barcaza FX, según norma ASTM A1013-02

Empresa de Tumbes con dos cables trenzados pertenecientes a la barcaza FX.

Diámetro, configuración y composición comercial: 1 1/2" (38,1 mm), 6 x 36 (grupo 6 x 36) Warrington Seale (alma de acero) y 1 – 7 - (7 + 7) – 14.

Los cables corresponden al sistema de fondeo de la barcaza (van unidos a las anclas de fondeo) uno en popa-babor (PB), con 7 meses de servicio y el otro en proa-estribor (PE) con 18 meses de servicio.

Datos de alto nivel:

Macrografía:

Diámetro real corte PB: 37,5 mm – 39 mm (reducción del 3.8% respecto al Dmax, menor al 4% permitido por Norma ASTM A1023 tabla 7).

Diámetro real corte PE: 38,5 mm – 38,8 mm (reducción del 0,7% respecto al Dmax, menor al 4% permitido por Norma ASTM A1023 tabla 7).

Figura 28

Imágenes de los cables PB y PE del Caso 8, antes de la fractura



En zona de fractura:

Se aprecia deterioro corrosivo externo de los alambres desfilados por la fractura, superficies de los mismos con un acabado irregular, típico de la corrosión del tipo localizado ya generalizado.

Figura 29

Imágenes de los cables PB y PE del Caso 8, en la zona de falla



El 63% de los alambres fracturados súbitamente, tienen el plano de fractura formando 45° con el eje longitudinal del cable y corresponde a un tipo de fractura por fatiga. El resto de alambres desflecados (37%), pertenecientes mayormente a ubicaciones intermedias y centrales de los torones tienen una morfología tipo deformación plástica.

Cable PB:

En los alambres desflecados del cable PB predomina la morfología de fractura tipo “desgaste abrasivo”. Adicionalmente, debido a las condiciones de fatiga a la que está sometido, una de las morfologías típicas a observar será también la “dentada” o formado ángulo de 45°. Por último, y en menor cuantía, se han encontrado alambres con morfología tipo deformación o sobretensión, donde uno de los extremos del alambre fracturado tiene forma cónica y el otro está ahuecado (copa).

El 69% del total de alambres de este cable, presenta esta morfología típica de abrasión y fatiga. El resto de alambres, 15% pertenecientes a zonas intermedias y centrales de los torones y 16% al alma en su totalidad, evidencian una morfología tipo deformación plástica por sobretensión.

Cable PE

Este cable ha sufrido abuso mecánico en forma de “hernia”, cerca de la polea. Así mismo, la salida del alma de su posición habitual indica que el cable ha estado sometido a tirones y latiguesos excesivos. La morfología de fractura de casi todos los alambres de este primer torón ha sido del tipo “deformación plástica por sobretensión”.

Figura 30

Imágenes de torones y alambre del cable PE del Caso 8



La presencia de corrosión en un cable, contribuye a reducir su resistencia mecánica.

Nivel de deterioro: moderado-muy severo

- Análisis químico:

Se ha realizado el análisis químico de carbono y azufre a muestras de alambre de los cables fracturados obteniéndose los siguientes resultados:

Elemento	Cable PB	Cable PE
Carbono	0,75	0,70
Azufre	0,015	0,014

- Metalografía:

La metalografía revela una probable microestructura de martensita revenida (bonificado), para ambas muestras:

- Microdureza:

Cable	Microdureza	
	HV (vickers)	HRc (rockwell C)
PB	357	36
PE	359	36

- Carga de rotura mínima:

Corte Cable PB: Bajo Norma UNE 36-713-74: P0 (carga de rotura mínima) = 41 278 kg

Corte Cable PE: Bajo Norma UNE 36-713-74: P0 (carga de rotura mínima) = 62 236 kg

Norma ASTM 1023 tabla 12 para 1 1/2", 6 x 19 WARR-SEALE, RL, IMP PLOW STEEL (IPS), IWRC, debe tener una carga mínima de rotura de 98,9 t; es decir, hay una reducción hasta 41,8% en el Cable PB y del 62,9% en el Cable PE.

Caso 9: Evaluación de fractura de cable de fondeo, perteneciente a barcaza HX

Empresa de Talara con un cable de grúa perteneciente a la barcaza HX.

Diámetro, configuración y composición comercial: 1 3/8" (35 mm), 6 x 36 (grupo 6 x 36) Warrington Seale (alma de acero) y 1 – 7 - (7 + 7) – 14.

El cable corresponde al sistema de fondeo de la barcaza (va unido a un ancla de proa estribor).

Falla en zona superior ancla de proa estribor, con menos de 01 año de servicio.

Datos de alto nivel:

- Macrografía:

Diámetro real: 34,9 mm

En zona de fractura:

Signos de abuso mecánico (deformaciones de cable): mellado, martilleo, alambres desflecados, falta de lubricación externa.

60% de alambres desflecados con morfología tipo fatiga con plano de fractura 45° con el eje longitudinal, tipo de fractura "dentado".

40% de alambres restantes con morfología tipo "deformación plástica".

Figura 31

Imágenes del cable del Caso 9, en zona de fractura



Alrededor de zona de fractura:

Alambres externos fracturados sin presencia de desgaste abrasivo. Alambres del alma fracturados, desde antes del desfleque completo del cable (50 cm antes).

Figura 32

Imágenes del cable del Caso 9, alrededor de zona de fractura



- Metalografía:

No se realizó.

- Carga de rotura mínima:

Bajo norma UNE 36-713-74: P0 (carga de rotura mínima) = 94 535,61 kg (aprox. 94,54 t)

Norma ASTM 1023, Tabla 14, para 1 3/8", 6 x 36 WARR-SEALE, (IPS), IWRC, debe tener una carga mínima de rotura de 83,5 t; es decir, que está dentro de norma.

Caso 10: Evaluación de fractura de cable de acero perteneciente a un equipo de extracción de crudo

La Empresa J De Talara con fractura de un cable de acero plastificado perteneciente a un equipo RCG de extracción de crudo.

Diámetro, configuración y composición comercial: 5 mm (real 5,4mm), CAB.AC.PLAST. G. 6 x 7 + 1 y 1 - 6.

Cable sostiene un tubo de 8 metros de longitud por 3" de diámetro, fallando a 70 metros de donde lo sostiene. Cuenta con 11 meses de servicio.

Datos de alto nivel:

- Macrografía:

Diámetro real: 5,4 mm

Una primera inspección visual general muestra deterioro del recubrimiento plástico del cable. En la inspección interna se encuentra indicios de lubricante entre los alambres y el recubrimiento plástico.

En zona de fractura y alrededor de zona de fractura:

Tanto cerca como lejos de la zona de fractura hay deterioro superficial localizado de los alambres externos que coincide con las superficies de contacto con los elementos de izaje y almacenaje (rodete y poleas). Se observa puntos de coloración marrón por corrosión.

Figura 33

Imágenes del cable del Caso 10



Nota. Puntos de coloración marrón por corrosión.

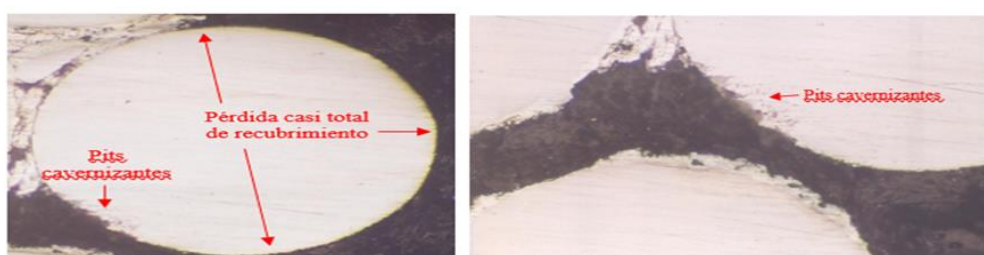
De acuerdo con la norma ASME B30.5, sección 5-2.4., la fractura del cable según su mecanismo ha sido del tipo súbita, el 100% de los alambres desflecados del cable tienen una morfología tipo “sobretensión” o “deformación plástica”, adicionalmente se han observado signos incipientes, de ataque localizado por corrosión.

- Micrografía:

Se observa alambres con y sin capa de recubrimiento, así como zonas con dicho recubrimiento deteriorado, hasta el punto de originarse deterioro por corrosión localizada en el alambre en forma de “pits” cavernizantes.

Figura 34

Imágenes de micrografía de cable del Caso 10



- Carga de rotura mínima:

Bajo Norma ASTM A370: P0 (carga de rotura mínima) = 1520,0 daN

Resistencia a la Tracción Alambres = 228,55 daN/mm²

Proveedor indica debe tener una carga mínima de rotura de 1470,0 daN y una resistencia a la tracción de 189,0 daN/mm²; es decir, que superan las especificaciones indicadas por el proveedor.

Caso 11: Evaluación de fractura de cable de fondeo fracturado de barcaza IX

Empresa I de Tumbes con un cable trenzado de acero perteneciente a la barcaza IX.

Diámetro, configuración y composición comercial: 1 1/2" (38,1 mm), 6 x 36 Warrington Seale (alma de acero) y 1 – 7 – (7 + 7) - 14.

El cable corresponde al sistema de fondeo de la barcaza, es decir, va unido a las anclas de fondeo, en la ubicación proa-estribor.

Falla después de casi un año de servicio.

Datos de alto nivel:

- Macrografía:

Diámetro real: 38,1 mm

Un examen visual del cable muestra ataque corrosivo en alambre exteriores e interiores, especialmente en el alma de acero.

En zona de fractura:

Se puede apreciar también el alma del cable como un torón adicional, el cable presenta productos de corrosión, cúmulos de lubricante seco, semi-seco y productos marinos de color blanquecino incrustados.

Figura 35

Imágenes del cable del Caso 11, en zona de fractura



Alrededor de zona de fractura:

Mayor deterioro corrosivo en alambres externos y en el alma, deterioro corrosivo localizado en forma de picaduras que se expanden formando cráteres disminuyendo la sección del mismo y por ende la resistencia global del cable.

Figura 36

Imágenes del cable del Caso 11, en alrededor de zona de fractura



En referencia a la norma ASME B30.5, sección 5-2.4, se tiene que en el cable predomina la morfología típica de fatiga con fracturas tipo “dentada” o formando ángulo de 45° (60%), en menor cuantía se ha encontrado morfología tipo deformación plástica o sobretensión (40%).

En resumen, el tipo de morfología presentada en los alambres desflecados del cable evaluado, es típico cuando hay deterioro corrosivo hasta el interior del cable, en condiciones de servicio propias de la ubicación del cable y las cargas dinámicas del entorno submarino (vibraciones, tirones, golpes, etc.); todo esto, en ausencia de un adecuado programa periódico de inspección, limpieza y lubricación.

Nivel de deterioro: moderado.

- Análisis químico:

C	S
0,73	0,01183

Acero al carbono prácticamente eutectoide (alto carbono) típico de los alambres para cable trenzado.

- Carga de rotura mínima:

Bajo Norma UNE 36-713-74: P0 (carga de rotura mínima) = 79112,18 kg (aprox. 79,11 t)

P0 (carga de rotura promedio) = 94535,61 kg (aprox. 94,54 t)

Proveedor indica debe tener una carga mínima de rotura de 103000 kg (103,0 t)

Considerando el mínimo valor de carga de rotura de la especificación del fabricante, el cable ha tenido una reducción promedio de 8.2%, siendo su zona de máxima debilidad el núcleo de soporte, es decir el alma central del cable.

4.2 Informes de casos individuales

En esta sección, de cada caso se recolecta la información relevante de los extractos anteriormente descritos.

Caso 1

Tabla 19

Datos generales – Caso 1

Ubicación	Diámetro/Configuración/Composición (ISO 4309-UNE 36703)	Uso	Cómo falló	Otros
Tumbes	1 1/8" (28,6 mm). 6 x 31 (grupo 6 x 36) Warrington Seale (alma de acero). 1 – 6 - (6 + 6) – 12.	En polea simple de izaje (la que va con la pesa y gancho).	Levantando un ancla de 8 T	No se conoce tiempo de servicio

Nota. D: Diámetro; CNF: Configuración; CMP: Composición.

Tabla 20*Datos cuantitativos – Caso 1*

Diámetro real (mm)	Microdureza Hv / HRc	Carga rotura mínima (kg)	Conclusiones	Referencia
27,2 – 29,0	350 / 35	30 474	Reducción de diámetro y de carga de rotura.	AST A 1023

Tabla 21*Datos cualitativos – Caso 1*

Macrografía	Metalografía	Accesorios	Conclusiones	Referencia
<u>Zona de fractura:</u> Alambres con fretting corrosión, fractura mayoritaria formando 45° y sin evidencia de deformación plástica.	<u>Zona de fractura:</u> Final de fractura forma dentada y a 45° confirmado.	<u>POLEAS:</u> La polea simple del Boom de 35" con ligero desgaste en la pista de rodadura.	Algunas zonas de cable con diámetro fuera de norma.	Norma AST A1023 tabla 7
<u>Cerca de fractura:</u> Alambres externos con pérdida de cilindridad, fretting corrosión. Casi todo el cable con corrosión localizada generalizada. Grupos de grasa seca sobre el cable. Nivel de deterioro muy severo.	<u>Cerca de fractura:</u> <u>Transversal:</u> Martensita rev. Martensita rev. bandeada con alargamiento de granos (estirado en frio).		Alambres con pérdida de cilindridad, corrosión generalizada, fretting corrosión y fatiga a 45° en la zona de fractura.	Bibliografía
			Alambres externos con desgaste por corrosión atmosférica y contacto con poleas.	
			Microestructura de alambres de martensita revenida.	
			Carga mínima de rotura fuera de Norma.	Norma AST 1023 tabla 14. UNE 36-713-74
			Diámetro de poleas adecuado para el servicio (mayor de 30").	Buenas prácticas.

Probable uso de cable en solicitudes antiguas con poleas de menor diámetro. Bibliografía

Caso 2

Tabla 22

Datos generales – Caso 2

Ubicación	Diámetro/Configuración/Composición	Uso	Cómo falló	Otros
Tumbes	1 3/8" (35 mm) 6 x 26 (grupo 6 x 19) Warrington Seale (alma de acero). 1 – 5 - (5 + 5) – 10.	Corte A: Lado sumergido. Corte B: lado del carrete.	No falló.	No se conoce tiempo de servicio

Tabla 23

Datos cuantitativos – Caso 2

Diámetro real (mm)	Microdureza	Carga rotura mínima
Corte A: 34,1 mm – 34,8 mm Corte B: 34,5 mm – 35,0 mm	No se realizó	Corte A: 72 546 kg (\approx 72 t). Corte B: 79 507 kg (\approx 79 t).

Tabla 24

Datos cualitativos – Caso 2

Macrografía	Metalografía	Accesorios	Conclusiones	Referencia
Corte A: corrosión severa externa e interna.			Diámetro reducido, pero dentro de norma.	Norma AST A1023 tabla 7
Corte B: corrosión moderada. Sin lubricación. Nivel de deterioro moderado-severo.	No se realizó.	No se mencionan.	Cable y alambres con corrosión marina severa localizada. Sin lubricación. Carga mínima de rotura fuera de Norma. Diámetro de poleas debe ser de aprox. 45".	Bibliografía Norma AST 1023 tabla 14. UNE 36-713-74 Buenas prácticas.

Caso 3**Tabla 25***Datos generales – Caso 3*

Ubicación	Diámetro/Configuración/Composición	Uso	Cómo falló	Otros
Tumbes	1 1/8" (28,575 mm). 6 x 31 (grupo 6 x 36) Warrington Seale (alma de acero). 1 – 6 - (6 + 6) – 12.	No se tiene dato.	No falló	No se conoce tiempo de servicio

Tabla 26*Datos cuantitativos – Caso 3*

Diámetro real (mm)	Microdureza	Carga rotura mínima
29,0 mm – 29,9 mm	No se realizó	Corte A: 61 967 kg (~61 t)

Tabla 27*Datos cualitativos – Caso 3*

Macrografía	Metalografía	Accesorios	Conclusiones	Referencia
Corrosión ligera externa. Lubricación, pero con sólidos abrasivos. Alma con galvanizado. Nivel de deterioro leve.	No se realizó.	No se mencionan.	Diámetro dudoso.	Norma AST A1023 tabla 7
			Cable y alambres con corrosión ligera. marina severa localizada. Sin lubricación. Alma galvanizada.	Bibliografía
			Carga mínima de rotura fuera de Norma.	Norma AST 1023 tabla 14. UNE 36-713-74
			Diámetro de poleas debe ser de aprox. 45".	Buenas prácticas.

Caso 4**Tabla 28***Datos generales – Caso 4*

Ubicación	Diámetro/Configuración/Composición	Uso	Cómo falló	Otros
Talara	1 3/8" (35 mm). 6 x 36 (grupo 6 x 36) Warrington Seale (alma de acero). 1 – 7 - (7 + 7) – 14.	En zona sumergida de	No se indicó.	20 días de servicio

fondeo unido a
ancla.

Tabla 29*Datos cuantitativos – Caso 4*

Diámetro real (mm)	Microdureza	Carga rotura mínima
36,0 – 36,2	357 HV (36 HRC)	100 051 kg (≈100 t)

Tabla 30*Datos cualitativos – Caso 4*

Macrografía	Metalografía	Accesorios	Conclusiones	Referencia
			Diámetro dudoso.	Norma AST A1023 tabla 7
<u>Zona de fractura:</u> 85% de alambres con sobretensión y resto con fractura a 45°.	<u>Zona de fractura:</u> Final de fractura con granos deformados plásticamente.		Alambres con sobretensión y a 45° en zona de fractura.	
<u>Cerca de fractura:</u> Alambres externos y alma con ligera corrosión.	<u>Cerca de fractura:</u> Transversal: Martensita rev. Longitudinal: Martensita rev. bandeda con alargamiento de granos (estirado en frío).	<u>POLEAS:</u> Poleas sin desgaste de 18" y 22".	Alambres externos y del alma con ligera corrosión. Alambres de acero de alto carbono. Microestructura de alambres de martensita revenida.	Bibliografía
Casi no existe lubricación.			Carga mínima de rotura dentro de Norma.	Norma AST 1023 tabla 14. UNE 36- 713-74
Nivel de deterioro leve.			Diámetro de poleas no adecuado para el servicio (menor de 30").	Buenas prácticas.

Caso 5**Tabla 31***Datos generales – Caso 5*

Ubicación	Diámetro/Configuración/Composición	Uso	Cómo falló	Otros
Tumbes	1 1/2" (38,1 mm) 6 x 26 (grupo 6 x 19) Warrington Seale (alma de acero). 1 – 5 - (5 + 5) – 10.	En zona sumergida de fondeo unido a ancla.	No se indicó.	1 año, 8 meses de servicio (ya en servicio tiempo desconocido).

Tabla 32*Datos cuantitativos – Caso 5*

Diámetro real (mm)	Microdureza	Carga rotura mínima
Corte A: 37,1 mm – 37,3 mm	366-400 HV	Corte A: 76 808 kg
Corte B: 37,5 mm – 37,8 mm	(37-41 HRc)	Corte B: 83 427 kg

Tabla 33*Datos cualitativos – Caso 5*

Macrografía	Metalografía	Accesorios	Conclusiones	Referencia
<u>Zona de fractura:</u> Corte A: 70% de alambres con fretting-corrosion-fatiga y resto con sobretensión. Corte B: 55% de alambres con fretting-corrosion-fatiga y resto con sobretensión.	<u>Zona de fractura:</u> Final de fractura con fatiga (dentada y a 45°) y líneas de deformación plástica confirmado. Corrosión desgaste cavernizante cerca de fractura de alambres.	No se mencionan.	Diámetro reducido, pero dentro de norma. Cable y alambres trozados con corrosión marina y micro agrietamientos muy severos. Un corte no tiene alma. Sin lubricación. Alambres de acero de alto carbono.	Norma AST A1023 tabla 7
<u>Cerca de fractura:</u> Alambres del alma en corte A severamente corroídos y trozados. En el corte B hay ausencia del alma	<u>Cerca de fractura:</u> <u>Transversal:</u> Martensita rev. <u>Longitudinal:</u> Martensita rev. bandeada con		Microestructura de alambres de martensita revenida. Carga mínima de rotura fuera de Norma.	Bibliografía Norma AST 1023 tabla

Sin lubricación. Nivel de deterioro muy severo.	alargamiento de granos (estirado en frio).	14. UNE 36- 713-74
		Alambres con fatiga mayoritaria y sobretensión en zona de fractura.
		Conviene cables de más alambres (6x36 o 6x41)
		Bibliografía
		Buenas prácticas.

Caso 6

Tabla 34

Datos generales – Caso 6

Ubicación	Diámetro/Configuración/Composición	Uso	Cómo falló	Otros
Tumbes	1 1/2" (38,1 mm) 6 x 26 (grupo 6 x 19) Warrington Seale (alma de acero) 1 – 5 - (5 + 5) – 10	En zona aérea del sistema de fondeo unido a ancla.	No se indicó.	1 año de servicio.

Tabla 35

Datos cuantitativos – Caso 6

Diámetro real (mm)	Microdureza	Carga rotura mínima
-----	335-372 HV (34-38 HRc)	93 800 kg

Tabla 36

Datos cualitativos – Caso 6

Macrografía	Metalografía	Accesorios	Conclusiones	Referencia
<u>Zona de fractura:</u> 70% de alambres desflecados con morfología tipo deformación plástica y resto con fractura por fatiga. Deterioro corrosivo localizado en los	<u>Zona de</u> <u>fractura:</u> Alambres externos: Transversal: Martensita revenida (bonificado). Longitudinal: Martensita	No se mencionan	Deterioro corrosivo del cable por falta de lubricación. Corrosión localizada (picaduras) del alma y alambres exteriores por el ambiente marino agresivo.	Bibliografía

<p>alambres intermedios y centrales. <u>Cerca de fractura:</u> Alma expuesta y trenzada fuera de su posición habitual. Alambres externos del alma con excesivo desgaste por abuso mecánico. Rotura en algunos toroncillos por contacto con poleas u otro elemento consistente. Corrosión sobre la superficie exterior del cable, del tipo localizado (picaduras) – generalizado. Nivel de deterioro severo.</p>	<p>revenida bandeada (bonificado). Final de fractura forma por deformación plástica y fatiga.</p>	<p>Alma con signos de abuso mecánico (desgaste y rotura de alambres) en inmediaciones de la fractura. Alambres externos y del alma, con fractura tipo fatiga. Alambre de alto carbono. Microestructura de alambres de martensita revenida.</p>	<p>Norma AST 1023 tabla 14. UNE 36-713-74</p>
		<p>Fractura súbita se habría producido por el severo estado de fatiga, entorno corrosivo y exceso de carga.</p>	<p>Bibliografía</p>
		<p>Efectuar lubricación periódicamente con grasas impermeables. Utilizar cables galvanizados. Desplazar al cable a lo largo del sistema, de tal forma de cambiar la posición de la sección sometida a esfuerzos de flexión. Conviene cables de más alambres (6x36 o 4x41)</p>	<p>Buenas prácticas.</p>

Caso 7:**Tabla 37***Datos generales – Caso 7*

Ubicación	Diámetro/Configuración/Composición	Uso	Cómo falló	Otros
Talara	7/8" (21,3 – 21,9 mm) 6 x 19 (grupo 6 x 19) Seale (alma de acero) 1 – 9 – 9	En zona aérea de sistema de elevación de la pluma.	Se encontraba levantando un ancla de 13 500 lb.	1 año, 5 meses de servicio

Tabla 38*Datos cuantitativos – Caso 7*

Diámetro real (mm)	Microdureza	Carga rotura mínima
21,3 – 21,9	-----	-----

Tabla 39*Datos cualitativos – Caso 7*

Macrografía	Metalografía	Accesorios	Conclusiones	Referencia
<u>Zona de fractura:</u> Los alambres del alma y alambres de los torones, con mecanismo de fractura tipo súbita. El 82% de los alambres desflecados de los torones con morfología tipo fatiga mayormente por doblamiento. El 18% de alambres restantes tienen una morfología tipo deformación plástica. <u>Cerca de fractura:</u> Alambres con deformaciones por abuso mecánico	<u>Zona de fractura:</u> Final de fractura con fatiga (por doblamiento y dentada a 45°) y deformación plástica. <u>Cerca de fractura:</u> Alambres fisurados por fatiga, en proceso inminente de fractura.	Poleas en estado regular de conservación. El cable estuvo sometido a excesivos ciclos de doblamiento a través de las poleas del sistema de elevación.	Cable fracturado súbitamente por fatiga, por exceso de servicio en estado de doblamiento. Con signos de deformación (mellado) y de desgaste-corrosión (fretting corrosion) en estado incipiente, debido al contacto con poleas, tambores, etc., en un ambiente salino de alta corrosividad (brisa marina). Poleas no cumplen con el diámetro	Bibliografía API RP 9B

(mellado o martilleo) y corrosión en alambre externos. Desgaste de alambres externos y signos de fatiga. Nivel de deterioro leve.	mínimo estipulado por la norma.
	Alambres con fatiga en zona de Bibliografía fractura.
	Realizar inspección periódica profunda / detallada del estado del cable. Reemplazar las poleas por unas de diámetro mínimo de 21".
	Utilizar cable que cumpla con el manual del fabricante de la grúa. Buenas prácticas.
	Evaluar la conveniencia de utilizar cables de más alambres (6x36 o 6x41)

Caso 8

Tabla 40

Datos generales – Caso 8

Ubicación	Diámetro/Configuración/Composición	Uso	Cómo falló	Otros
Tumbes	1 1/2" (38,1 mm). 6 x 36 (grupo 6 x 36) Warrington Seale (alma de acero). 1 – 7 - (7 + 7) – 14.	En zona sumergida de fondeo unido a ancla.	No se indicó.	Cable PB con 7 meses de servicio y Cable PE con 18 meses de servicio

Tabla 41

Datos cuantitativos – Caso 8

Diámetro real (mm)	Microdureza	Carga rotura mínima
Corte Cable PB: 37,5 mm – 39,0 mm	357 HV, 36 HRc	Corte Cable PB: 41 278 kg
Corte Cable PE: 38,5 mm – 38,8 mm	359 HV, 36 HRc	Corte Cable PE: 62 236 kg

Tabla 42

Datos cualitativos – Caso 8

Macrografía	Metalografía	Accesorios	Conclusiones	Referencia
			Cable PB con alto desgaste 3.8% cercano al máximo del 4%	Norma AST A1023 – A1023 M 02 (ANEXO II)
<u>Zona de fractura:</u> Deterioro corrosivo externo de los alambres deflecados por la fractura Cable PB: 69 % de alambres con fretting-corrosion-fatiga y resto con deformación por sobre tensión. Cable PE: 63 % de alambres fractura por fatiga y el resto con deformación plástica. <u>Cerca de fractura:</u> Cable PB: Alambres con fretting-corrosion. Cable PE: alambres con morfología por exceso de carga. Nivel de deterioro moderado-muy severo.	<u>Zona de fractura:</u> Cable PB: Final de fractura tipo “desgaste abrasivo” (extremo del alambre muestra la finura del filo de un cuchillo) Cable PE: Final de fractura con fatiga (dentada y a 45°) y líneas de deformación plástica confirmado. Corrosión en los cables PB y PE es del tipo localizado (picaduras – pitting) <u>Cerca de fractura:</u> <u>Transversal:</u> Martensita revenida (Bonificado)	No se mencionan.	Ambos cables presentan corrosión generalizada por inadecuado programa de lubricación Cable PB con morfología fretting corrosion Remanente de lubricante entre el alma y los torones Microestructura de alambres de martensita revenida. Cable PB y PE de alto carbono. Carga mínima de rotura en ambos cables por debajo de la Norma.	Bibliografía
			Se recomienda buena lubricación con grasas impermeables, o el uso de cables galvanizados. Cables con mayor cantidad de alambres para mayor flexibilidad y resistencia a la	Buenas prácticas.

	rango mínimo de la Norma.	14. UNE 36-713-74
	Alambres con fatiga mayoritaria y sobretensión en zona de fractura.	Bibliografía
	Incrementar programa de inspección periódica de los cables Verificar tensión que se aplica a los cables de fondeo Se recomienda buena lubricación para crear barrera protectora contra la corrosión marina.	Buenas prácticas.

Caso 10**Tabla 46***Datos generales – Caso 10*

Ubicación	Diámetro/Configuración/Composición	Uso	Cómo falló	Otros
Talara	5 mm. CAB.AC.PLAST. G. 6 x 7 + 1 y 1 - 6.	No se indicó.	Sosteniendo tubo de 8m x 3"	Cuenta con 11 meses de servicio.

Tabla 47*Datos cuantitativos – Caso 10*

Diámetro real (mm)	Microdureza	Carga rotura mínima
5,4	-----	1520,0

Tabla 48*Datos cualitativos – Caso 10*

Macrografía	Metalografía	Accesorios	Conclusiones	Referencia
<p>Deterioro del recubrimiento plástico del cable, se encuentra indicios de lubricante entre los alambres y el recubrimiento plástico.</p> <p><u>Zona de fractura y Cerca de fractura:</u></p> <p>Deterioro superficial localizado de los alambres externos que coincide con las superficies de contacto con los elementos de izaje y almacenaje (rodete y poleas). Presencia de puntos de coloración marrón por corrosión.</p> <p>Nivel de deterioro leve.</p> <p>Deterioro del recubrimiento plástico del cable, se encuentra indicios de lubricante entre los alambres y el recubrimiento plástico.</p> <p><u>Zona de fractura y Cerca de fractura:</u></p> <p>Deterioro superficial localizado de los alambres externos que coincide con las superficies de contacto con los elementos de izaje y almacenaje (rodete y poleas). Presencia de puntos de coloración marrón por corrosión.</p>	<p>No se realizó.</p> <p>No se realizó.</p>	<p>No se mencionan.</p> <p>No se mencionan.</p>	<p>La fractura del cable según su mecanismo ha sido del tipo súbita.</p> <p>Alambres con morfología tipo “sobretensión” o “deformación plástica”, adicionalmente se han observado signos incipientes, de ataque localizado por corrosión.</p> <p>Alambres con y sin capa de recubrimiento, así como zonas con dicho recubrimiento deteriorado, deterioro por corrosión localizada en el alambre en forma de pits cavernizantes.</p> <p>Carga mínima de rotura está dentro de lo especificado por proveedor.</p>	<p>Bibliografía Norma AST 1023.</p> <p>Bibliografía</p>
			<p>La fractura del cable según su mecanismo ha sido del tipo súbita.</p>	<p>Bibliografía</p>

Nivel de deterioro leve.

Caso 11

Tabla 49

Datos generales – Caso 11

Ubicación	Diámetro/Configuración/Composición	Uso	Cómo falló	Otros
Tumbes	1 1/2" (38,1 mm). 6 x 36 (grupo 6 x 36) Warrington Seale (alma de acero). 1 – 7 - (7 + 7) – 14.	En zona sumergida sistema de fondeo de la barcaza.	No se indicó.	1 año de servicio.

Tabla 50

Datos cuantitativos – Caso 11

Diámetro real (mm)	Microdureza	Carga rotura mínima
-----	-----	79 112,18 kg (≈79,11 t) / 94 535,61 kg (≈103,0 t)

Tabla 51

Datos cualitativos – Caso 11

Macrografía	Metalografía	Accesorios	Conclusiones	Referencia
<p><u>Zona de fractura:</u> El cable presenta productos de corrosión, cúmulos de lubricante y productos marinos blanquecinos incrustados. Fracturas tipo "dentada" o formando ángulo de 45°(60%), en menor cuantía se ha encontrado morfología tipo</p>	No se realizó.	No se mencionan.	En el cable predomina la morfología típica de fatiga con fracturas tipo "dentada" o formando ángulo de 45° (60%), en menor cuantía se ha encontrado morfología tipo deformación plástica o sobretensión (40%).	Bibliografía

deformación

plástica o
sobretensión (40%).

Cerca de fractura:

Alambres externos y
alma con mayor
deterioro corrosivo.
Nivel de deterioro
moderado.

Hay deterioro corrosivo
hasta el interior del
cable, en condiciones de
servicio propias de la
ubicación del cable y las
cargas dinámicas del
entorno submarino
(vibraciones, tirones,
golpes, etc.)

Ausencia de un
adecuado programa
periódico de inspección,
limpieza y lubricación.

Considerando el mínimo
valor de carga de rotura
de la especificación del
fabricante, el cable ha
tenido una reducción
promedio de 8.2%,
siendo su zona de
máxima debilidad el
núcleo de soporte, es
decir el alma central del
cable

Norma UNE
36-713-74

4.3 Análisis de datos

Esta sección se basa en el procedimiento de organización y análisis de los resultados para el análisis de los casos de la muestra aplicando la metodología de casos múltiples descrita en el capítulo anterior donde se utilizan como instrumentos de recolección de datos, cuestionarios de preguntas, que permiten organizar la información útil por categorías o criterios sobre tablas de doble entrada. Primero a nivel de las características y parámetros generales de cada caso (datos de bajo nivel); y luego, con preguntas más específicas (datos de alto nivel); los casos por separado de cables no fracturados y fracturados.

La información útil se refiere a los datos que se seleccionan una vez realizadas las preguntas adecuadas para el cumplimiento de los objetivos de la investigación. Por ejemplo, en nuestro caso se deja de lado la medida de microdureza de los alambres por no ser significativo a este nivel de investigación.

Categoría: Aspectos generales

En respuesta a las preguntas del cuestionario se obtiene la Tabla de resultados siguiente:

Tabla 52

Datos generales

Caso	Ubicación	Diámetro/Configuración/Composición	Uso	¿Fracturado?	Tiempo de servicio
1	Tumbes	1 1/8" (28,575 mm). 6 x 31 (grupo 6 x 36) Warrington Seale.	No sumergido	Sí	No se conoce tiempo de servicio
2	Tumbes	1 3/8" (35 mm) 6 x 26 (grupo 6 x 19) Warrington Seale.	Corte A: Sumergido. Corte B: No sumergido.	No	No se conoce tiempo de servicio
3	Tumbes	1 1/8" (28,575 mm). 6 x 31 (grupo 6 x 36) Warrington Seale.	No sumergido	No	No se conoce tiempo de servicio
4	Talara	1 3/8" (35 mm). 6 x 36 (grupo 6 x 36) Warrington Seale.	Sumergido	Sí	20 días de servicio
5	Tumbes	1 1/2" (38,1 mm) 6 x 26 (grupo 6 x 19) Warrington Seale (alma de acero).	Sumergido	Sí	1 año, 8 meses de servicio (ya en servicio tiempo desconocido)
6	Tumbes	1 1/2" (38,1 mm) 6 x 26 (grupo 6 x 19) Warrington Seale (alma de acero)	No sumergido	Sí	1 año de servicio
7	Talara	7/8" (22,23 mm) 6 x 19 (grupo 6 x 19) Seale (alma de acero)	No sumergido	Sí	1 año, 5 meses de servicio
8	Tumbes	1 1/2" (38.1 mm). 6 x 36 (grupo 6 x 36) Warrington Seale (alma de acero).	Sumergido	Sí	Cable PB con 7 meses de servicio y Cable PE con 18 meses de servicio
9	Talara	1 3/8" (34.9 mm). 6 x 36 (grupo 6 x 36) Warrington Seale (alma de acero).	Sumergido	Sí	Menos de 01 año de servicio

10	Talara	5 mm. CAB.AC.PLAST. G. 6 x 7 + 1 y 1 - 6.	No se indicó	Sí	Cuenta con 11 meses de servicio
11	Tumbes	1 1/2" (38,1 mm). 6 x 36 (grupo 6 x 36) Warrington Seale (alma de acero).	Sumergido	Sí	1 año de servicio

Del conjunto de cables evaluados, dos de ellos no han llegado a la fractura y el resto se ha fracturado en servicio. Son los casos 2 y 3 donde sólo se evalúa el performance actual o estado de integridad de los cables; mientras los casos 1, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, y 11 se refieren a cables fracturados.

Categoría: Cables no fracturados

Subcategoría: Datos cualitativos:

En respuesta a las preguntas del cuestionario se obtienen la Tabla de resultados siguiente:

Tabla 53

Datos cualitativos – Cables no fracturados

Caso	Nivel de deterioro	¿Lubricación?	¿Elementos complementarios adecuados?	Evaluaciones individuales cualitativas
2	Corte A: Alambres con corrosión severa localizada. Sales marinas. Alma con corrosión moderada (Severo) Corte B: Alambres con corrosión moderada localizada. Alma con corrosión leve. (Moderado).	Corte A: Sin lubricación. Corte B: Rastros de lubricación.	No indica.	Algunas partes con y sin lubricación y nivel de deterioro entre moderado y severo.

En los cables no fracturados el nivel de deterioro se encuentra en nivel leve y severo. Se observa menor nivel de deterioro cuando el cable presenta rastros de lubricación.

Subcategoría: Datos cuantitativos:

En respuesta a las preguntas del cuestionario se obtiene la Tabla de resultados siguiente:

Tabla 54*Datos cuantitativos – Cables no fracturados*

Caso	Diámetro nominal / respecto a norma AST A1023 (máx. 4%)	Carga rotura mín. actual / mín. norma AST A1023 / respecto a norma	Tiempo servicio/medio operación	Evaluaciones individuales cuantitativas
2	Corte A: 34,1 mm – 34,8 mm / 35 mm / reducción 2,6%. Corte B: 34,5 mm – 35,0 mm / 35 mm / reducción 1,4%.	Corte A: 72 546 kg / 83 500 kg / reducción 14%. Corte B: 79 507 kg / 83 500 kg / reducción 5%.	No se sabe/ Corte A: Lado sumergido. Corte B: No sumergido	Diámetro en norma y carga mínima de rotura fuera de norma. Tiempo de servicio desconocido en zona sumergida y no sumergida.
3	29,0 – 29,9 mm / 28,6 mm / dato dudoso	61 967 kg / 65 000 kg / reducción del 4%.	No se sabe/No se sabe	Carga mínima de rotura fuera de norma. Tiempo de servicio desconocido en zona desconocida

En los cables no fracturados la reducción del diámetro no llega al máximo permitido del 4%. También se permite una reducción de la carga mínima de rotura (hasta el 14% no se fractura). Finalmente, los cables no fracturados evaluados han operado, tanto en un medio sumergido como en no sumergido.

Categoría: Cables fracturados

Subcategoría: Datos cualitativos:

En respuesta a las preguntas del cuestionario se obtiene la Tabla de resultados siguiente:

Tabla 55

Datos cualitativos – Cables fracturados

Caso	Nivel de deterioro	¿Lubricación?	Morfología o modo de falla	Material y microestructura	¿Elementos complementarios adecuados?	Evaluaciones individuales cualitativas
1	Alambres externos con pérdida de cilindridad, muy deteriorado. (muy severo)	Sin lubricación.	Mayoritaria por fatiga, con fretting corrosión, y sin evidencia de deformación plástica. (Fretting corrosion-fatiga)	No se analizó. Martensita revenida.	Diámetro de poleas adecuado para el servicio (mayor de 30").	Deterioro muy severo, sin lubricación. Modo de falla por fatiga y fretting corrosión. Microestructura típica y adecuadas poleas.
4	Alambres externos y alma con leve corrosión. (Leve)	Rastros de lubricación.	85% de alambres con sobretensión y resto con fractura a 45°. (Sobretensión y fatiga)	Acero de alto carbono. Martensita revenida.	Diámetro de poleas no adecuado para el servicio (menor de 30").	Deterioro leve, casi sin lubricación. Modo de falla por sobretensión. Material y microestructura típicas. Poleas inadecuadas.
5	Alambres del alma en corte A muy severamente corroídos y trozados. En el corte B hay ausencia del alma. (Corte A: Muy severo) (Corte B: Muy severo)	Sin lubricación.	Corte A: 70% de alambres con fatiga severa y resto con sobretensión Corte B: 55% de alambres con fatiga y resto con sobretensión (Fretting corrosion-fatiga y sobretensión)	Acero de alto carbono. Martensita revenida.	No se indican.	Deterioro muy severo, sin lubricación. Modo de falla por fretting corrosion-fatiga muy severa y sobretensión. Material y microestructura típicas.
6	Alma y alambres exteriores con corrosión localizada (picaduras) y alma con abuso	Sin lubricación	70% de alambres con deformación plástica. Resto de alambres con fractura tipo dentada a	Acero de alto carbono. Martensita revenida.	No se indican.	Deterioro severo, sin lubricación. Modo de falla por sobretensión, corrosión y fatiga.

	mecánico. (Severo)		45°. (sobretensión, fretting corrosion y fatiga)			Material y microestructura típicas.
7	Alambres con deformación por abuso mecánico (mellado o martilleo) y corrosión. (Leve)	Rastros de lubricación	82% de alambres con fatiga 45°. 18% de alambres con deformación plástica por sobretensión (Fatiga y sobretensión)	No se indican.	Diámetro de poleas no adecuado para el servicio (menor de 21").	Deterioro leve y rastros de lubricación. Modo de falla por fatiga, por exceso de servicio en estado de doblamiento. Poleas inadecuadas.
8	Alambres exteriores e interiores con ataque corrosivo. Presencia de productos de corrosión, cúmulos de lubricante semi seco y productos marinos blanquecinos incrustados. (Cable PB: Moderado Cable PE: Muy severo)	Rastros de lubricación	Cable PB: 69 % de alambres con fretting- corrosion- fatiga y resto con deformación por sobretensión Cable PE: 63 % de alambres fractura por fatiga y el resto con deformación plástica. (Fretting corrosion- fatiga y sobretensión)	Acero de alto carbono. Martensita revenida (bonificado)	No se indica	Deterioro moderado-muy severo y rastros de lubricación. Cable PB: Modo de falla por fretting corrosion-fatiga. Cable PE: Modo de falla por fatiga.
9	Alambres externos rotos por fatiga y con presencia de corrosión (Moderado)	Rastros de lubricación	60% de alambres deflecados morfología tipo fatiga con plano de fractura a 45° 40% alambres restantes con morfología "deformación plástica". (Fatiga y sobretensión)	No se indica	No se indica	Deterioro leve- moderado y rastros de lubricación. Modo de falla por fatiga.

10	Deterioro superficial localizado de los alambres externos, además de deformación y abuso mecánico. "Pits" incipientes. (Leve)	No requiere (cable con recubrimiento o plástico).	100% de los alambres con morfología tipo sobretensión · (Sobretensión)	No se indica	No se indica	Deterioro leve. Modo de falla por sobretensión.
11	Alambres exteriores e interiores con ataque corrosivo, especialmente el alma. Presencia de productos de corrosión, cúmulos de lubricante semi seco y productos marinos blanquecinos incrustado (Moderado)	Rastros de lubricación	Alambres deteriorados por corrosión y fracturados por fatiga del nivel severa. 60% Fatiga 45° y 40% sobretensión · (Fatiga y sobretensión)	Acero de alto carbono.	No se indican	Deterioro severo y rastros de lubricación. Modo de falla por fatiga y sobretensión.

En los cables fracturados el nivel de deterioro se encuentra el nivel leve y muy severo, mayoritariamente se encuentran rastros de lubricación (casos 4, 7, 8, 9 y 11). Para el caso 10 no se requiere lubricación, ya que el cable posee un recubrimiento polimérico.

La morfología de inicio de fractura de los alambres de los 9 cables evaluados puede ser, en igual preponderancia, de tres tipos (3 casos cada tipo): por fretting-corrosion, por fatiga y por sobretensionado de los alambres. Para los casos donde la fractura ha sido iniciada por fretting o fatiga (casos 01, 05, 07, 08, 09 y 11), el cable se termina de romper, mayoritariamente por sobretensión, debido a que el cable pierde sección hábil para soportar la carga actuante.

El material típico de los alambres de los cables de todos los casos evaluados es acero de alto carbono y su microestructura es martensita revenida.

En la columna del atributo "diámetro de poleas adecuados para el servicio", en dos de los tres casos no se tiene la medida de diámetro adecuado para sus cables correspondientes (casos 4 y 7).

Subcategoría: Datos cuantitativos:

En respuesta a las preguntas del cuestionario se obtiene la Tabla de resultados siguiente:

Tabla 56

Datos cuantitativos – Cables fracturados

Caso	Diámetro actual/ nominal / respecto a norma AST A1023 (máx. 4%)	Carga rotura mín. actual / mín. norma / respecto a norma	Tiempo servicio/medio operación	Evaluaciones individuales cuantitativas
1	27,2 – 29,0 mm / 28,6 mm / reducción 6%.	30 474 kg / 56 500 kg / reducción 40%.	No se sabe/No sumergido.	Diámetro (reducción 6%) y carga mínima de rotura (reducción 40%) fuera de norma. Tiempo de servicio incierto en zona no sumergida.
4	36,0 – 36,2 mm / 35 mm / dato dudoso	100 051 kg / 96 000 kg / No hay reducción.	20 días/ sumergido.	Diámetro dudoso (puede ser mal dato del cliente). Carga mínima en norma (no hay reducción). Pocos días de servicio en zona sumergida.
5	Corte A: 37,1 mm – 37,3 mm / 38,1 mm / reducción 2,4%. Corte B: 37,5 mm – 37,8 mm / 38,1 mm / reducción 1,1%.	Corte A: 76 808 kg / 98 900 kg / reducción 22,3%. Corte B: 83 427 kg / 98 900 kg / reducción 15,6%.	1 año 8 meses y más/ sumergido.	Diámetro en norma (2,4% y 1,1%) y carga mínima de rotura (22,3% y 15,6%) fuera de norma. Más de 1,8 años de servicio en zona sumergida.
6	No se registró / 38,1 mm / no aplica	93 800 kg / 114 000 kg / reducción 18%.	1 año/no sumergido.	Carga mínima de rotura fuera de norma (18% menor). 1 año de servicio en zona no sumergida.

7	21,3 – 21,9 mm / 22,2 mm / reducción 2,7%	No se realizó ensayo.	1 año, 5 meses/no sumergido.	Diámetro en norma (2,7%). 1,4 años de servicio en zona no sumergida.
8	Cable PB 37,5 - 39 mm/38,1 mm/ reducción 3,8% Cable PE 38,5-38,8 mm/38,1%/ reducción 0,7%	Cable PB 41 278 kg / 98 900 kg/ reducción 58,7% Cable PE 62 236 kg / 98 900 kg/ reducción 37,8%	Cable PB 7 meses de servicio Cable PE 18 meses de servicio/ ambos sumergidos.	Diámetro en norma (3,8% y 0,7%) y carga mínima de rotura (58,7% y 37,8%) fuera de norma. Más de 1,5 años de servicio en zona sumergida.
9	No se registró / 34,9 mm / no aplica	87 251 kg / 83 500 kg / No hay reducción	Menos de 1 año/sumergido.	Carga de rotura mínima sin reducción. Menos de 1 año de servicio en zona sumergida.
10	5,4 mm / 5,0 mm / sin reducción. (Cable recubierto).	1520 daN / 1470 daN / No hay reducción	11 meses/recubierto	Diámetro en norma y carga de rotura mínima sin reducción. 11 meses de servicio en zona no sumergida por estar recubierto.
11	No se sabe / 38,1 mm / no aplica.	94 535.61 kg/ 103 000 kg/ reducción 8.2%	1 año/sumergido.	Carga mínima de rotura fuera de norma (8,2% menor). 1 año de servicio en zona sumergida.

En general, en los cables fracturados, la reducción del diámetro no llega al máximo permitido del 4%, salvo el cable 01 que llega al 6%.

Por su parte, la carga mínima de rotura está en niveles desde reducción nula hasta el 58,7%.

En cuanto al tiempo de servicio, los cables se han fracturado con tiempos de servicio desde los 20 días (caso 04) hasta 1 año 8 meses (caso 05).

Finalmente, la mayoría de los cables fracturados han estado sumergidos (casos 04, 05, 08, 09 y 11).

4.4 Correlación de datos

Las correlaciones de los cables fracturados y no fracturados se realizan en dos etapas: En la primera etapa, se buscan correlaciones entre los casos individuales, utilizando preguntas específicas que van a permitir relacionar las categorías o criterios utilizados en las tablas de análisis de datos para obtener aspectos comunes y diferenciadores.

En la segunda etapa, se realiza el contraste global de los datos cualitativos y cuantitativos respectivos, para la obtención de líneas de discusión particulares. Esto consiste en analizar las características principales del primer caso; luego, se hace lo mismo con el segundo, buscando reforzar los aspectos comunes y diferenciadores respecto al primero; y así se continúa con el análisis del resto de casos, para finalmente, establecer unos comentarios generales que servirán de marco para la búsqueda de correlaciones particulares y globales.

Las correlaciones que agrupan a todos los cables, no fracturados y fracturados, también utilizan preguntas específicas que relacionan categorías o criterios para obtener aspectos comunes y diferenciadores.

El último grupo se refiere al diagnóstico del análisis de datos y las correlaciones individuales y globales realizadas previamente. Por último, se proponen algunas buenas prácticas a modo de delineamientos producto del diagnóstico realizado sobre la muestra seleccionada para esta investigación.

Categoría: Correlaciones particulares

Subcategoría: Cables no fracturados

- Primera etapa

Para el presente estudio se tiene sólo dos casos de cables no fracturados para lo cual se construye la Tabla 57, con las correlaciones a analizar seleccionadas a criterio de los investigadores respecto al atributo “nivel de deterioro”, debido a que algunas de las correlaciones posibles son redundantes; en ese sentido, se han seleccionado las correlaciones más significativas para el propósito del análisis. Asimismo, no se considera el atributo “elementos complementarios adecuados” y “tiempo de operación” por no contar con esos resultados en las tablas de la subcategoría “Datos cualitativos” de la categoría “CABLES NO FRACTURADOS”.

Tabla 57*Correlaciones a analizar – Cables no fracturados*

Correlación	Atributos			
	Nivel de deterioro	¿Lubricación?	Medio de operación	Diámetro actual/ nominal / respecto a norma AST A1023 (máx. 4%)
Primera	X	X		
Segunda	X		X	
Tercera	X	X	X	
Cuarta	X			X
Quinta	X			
Sexta	X			X

Primera correlación:

¿Qué relación tienen los cables no fracturados en cuanto al nivel de deterioro y el nivel de lubricación?

En respuesta a la pregunta se obtiene la Tabla de resultados siguiente:

Tabla 58*Correlación entre “nivel de deterioro” y “lubricación” – Cables no fracturados*

Caso	Nivel de deterioro	¿Lubricación?	Análisis correlacional global
2	Corte A: Alambres con corrosión severa localizada. Sales marinas. Alma con corrosión moderada (Severo) Corte B: Alambres con corrosión moderada localizada. Alma con corrosión leve. (Moderado).	Corte A: Sin lubricación. Corte B: Rastros de lubricación.	En los cables no fracturados el nivel de deterioro está entre leve y moderado, cuando tiene rastros de lubricante y severo cuando ya no lo tiene.
3	Corrosión leve externa. El alma aún conserva el galvanizado. (Leve).	Rastros de lubricación.	

En los cables no fracturados hay una relación directa entre el nivel de deterioro y el nivel de lubricación, ya que cuando los cables no presentan lubricación tiende a deteriorarse de manera más significativa.

Segunda correlación:

¿Qué relación tienen los cables no fracturados en cuanto al nivel de deterioro y el medio en que se usan?

En respuesta a la pregunta se obtiene la Tabla de resultados siguiente:

Tabla 59

Correlación entre “nivel de deterioro” y “medio de operación” – Cables no fracturados

Caso	Nivel de deterioro	Medio operación	Análisis correlacional global
2	Corte A: Alambres con corrosión severa localizada. Sales marinas. Alma con corrosión moderada (Severo) Corte B: Alambres con corrosión moderada localizada. Alma con corrosión leve. (Moderado).	Una parte sumergida y la otra no sumergida.	En los cables no fracturados el nivel de deterioro está entre leve y moderado cuando se usa en zona no sumergida, y severo en uso sumergido.
3	Corrosión leve externa. El alma aún conserva el galvanizado. (Leve).	No sumergido.	

Hay una relación directa entre la agresividad del medio y el nivel de deterioro, siendo el servicio en ambiente sumergido más agresivo para las superficies lubricadas del cable, debido al continuo “lavado” del lubricante que se produce en la intermitencia entre sumergido y aéreo. Como consecuencia de esto, se deja cada vez más expuesto al cable a la atmósfera marina, específicamente en las cercanías del nivel superficial del mar, donde se dan los mayores efectos de deterioro corrosivo. En resumen, se puede decir que cuando el cable está sumergido y sale a la superficie continuamente durante su uso sufrirá mayor deterioro que cuando no lo está.

Tercera correlación:

¿Qué relación tienen en los cables no fracturados el nivel de deterioro, el nivel de lubricación y el medio de operación?

En respuesta a la pregunta se obtiene la Tabla de resultados siguiente:

Tabla 60

Correlación entre “nivel de deterioro”, “lubricación” y “medio de operación” – Cables no fracturados

Caso	Nivel de deterioro	¿Lubricación?	Medio operación	Análisis correlacional global
2	Corte A: Alambres con corrosión severa localizada. Sales marinas. Alma con corrosión moderada (Severo). Corte B: Alambres con corrosión moderada localizada. Alma con corrosión leve. (Moderado).	Corte A: Sin lubricación. Corte B: Rastros de lubricación.	Una parte sumergida y otra no sumergida.	Nivel de deterioro leve a moderado cuando se usa en zona no sumergida y hay rastros de lubricación. Deterioro severo cuando se usa en zona sumergida y no tiene lubricación.
3	Corrosión leve externa. El alma aún conserva el galvanizado. (Leve).	Rastros de lubricación.	No sumergida.	

En los cables no fracturados el nivel de deterioro es leve a moderado cuando se usa en zona no sumergida y hay indicios de haber estado lubricado; sin embargo, será severo cuando está en una zona sumergida y no tiene lubricación.

Cuarta correlación:

¿Qué relación tienen los cables no fracturados en cuanto al nivel de deterioro y la reducción del diámetro actual?

En respuesta a la pregunta se obtiene la Tabla de resultados siguiente:

Tabla 61

Correlación entre “nivel de deterioro” y “diámetro actual” – Cables no fracturados

Caso	Nivel de deterioro	Diámetro actual / nominal / respecto a norma AST A1023 (máx. 4%)	Análisis correlacional global
2	Corte A: Alambres con corrosión severa localizada. Sales marinas. Alma con corrosión moderada (Severo)	Corte A: 34,1 mm – 34,8 mm / 35 mm / reducción 2,6%. Cumple norma.	Se observa una reducción del diámetro del cable desde el nivel de deterioro moderado hacia adelante.

	Corte B: Alambres con corrosión moderada localizada. Alma con corrosión leve. (Moderado).	Corte B: 34,5 mm – 35,0 mm / 35 mm / reducción 1,4%. Cumple norma.
3	Corrosión leve externa. El alma aún conserva el galvanizado. (Leve).	29,0 – 29,9 mm / 28,6 mm / dato dudoso. Cumple norma.

En los cables no fracturados se observa reducción del diámetro del cable desde el nivel de deterioro “moderado” hacia adelante; sin embargo, la reducción del diámetro no excede lo máximo permitido por la norma. Se advierte que incluso si el nivel de deterioro es severo, el diámetro del cable puede estar dentro del desgaste permitido por la norma.

Quinta correlación:

¿Qué relación tienen los cables no fracturados en cuanto al nivel de deterioro y el porcentaje de reducción de la carga de rotura mínima actual?

En respuesta a la pregunta se obtiene la Tabla de resultados siguiente:

Tabla 62

Correlación entre “nivel de deterioro” y “carga de rotura” – Cables no fracturados

Caso	Nivel de deterioro	Carga rotura mín. actual / mín. norma AST A1023 / respecto a norma	Análisis correlacional global
2	Corte A: Alambres con corrosión severa localizada. Sales marinas. Alma con corrosión moderada (Severo) Corte B: Alambres con corrosión moderada localizada. Alma con corrosión leve. (Moderado).	Corte A: 72 546 kg / 83 500 kg / reducción 14%. No cumple. Corte B: 79 507 kg / 83 500 kg / reducción 5%. No cumple.	El nivel de deterioro afecta directamente la resistencia a la carga de los cables. Esta deja de cumplir lo especificado por la norma a partir de nivel de deterioro “moderado” hacia adelante.
3	Corrosión leve externa. El alma aún conserva el galvanizado. (Leve).	61 967 kg / 65 000 kg / reducción del 4%. Cumple	

En los cables no fracturados se observa que el nivel de deterioro afecta directamente su resistencia a la carga. Esta deja de cumplir lo especificado por la norma a partir del nivel de deterioro “moderado” hacia adelante.

Sexta correlación:

¿Qué relación tienen en los cables no fracturados el nivel de deterioro y la reducción del diámetro actual y la reducción de la carga de rotura mínima?

En respuesta a la pregunta se obtiene la Tabla de resultados siguiente:

Tabla 63

Correlación entre “nivel de deterioro”, “diámetro actual” y “carga de rotura” – Cables no fracturados

Caso	Nivel de deterioro	Diámetro actual / nominal / respecto a norma AST A1023 (máx. 4%).	Análisis correlacional global
22	Corte A: Alambres con corrosión severa localizada. Sales marinas. Alma con corrosión moderada (Severo) Corte B: Alambres con corrosión moderada localizada. Alma con corrosión leve. (Moderado).	Corte A: 34,1 mm – 34,8 mm / 35 mm / reducción 2,6%. Corte B: 34,5 mm – 35,0 mm / 35 mm / reducción 1,4%.	Se observa que el diámetro del cable y la carga a la rotura se ve reduce cuando el nivel de deterioro es moderado o mayor. Asimismo, el parámetro que más se ve afectado es la carga a la rotura; sin embargo, el cable no se fracturó probablemente porque el nivel de carga no excedió la carga de rotura mínima.
33	Corrosión leve externa. El alma aún conserva el galvanizado. (Leve).	29,0 – 29,9 mm / 28,6 mm / dato dudoso	

Se observa que el diámetro del cable y la carga a la rotura se reduce cuando el nivel de deterioro es “moderado” o mayor. Asimismo, el parámetro que más se ve afectado es la “carga de rotura mínima”; sin embargo, el cable no se fracturó probablemente porque el nivel de carga no excedió este último parámetro. Adicionalmente, se puede afirmar que el parámetro de “carga de rotura mínima” se correlaciona mejor con el estado de deterioro del cable que el parámetro de “diámetro actual”.

- Segunda etapa

¿Qué relación existe entre los datos cualitativos y cuantitativos de los cables no fracturados?

En respuesta a la pregunta se obtiene la Tabla de resultados siguiente:

Tabla 64

Correlación entre datos cualitativos y cuantitativos - cables no fracturados

Caso	Evaluaciones individuales cualitativas	Evaluaciones individuales cuantitativas	Líneas de correlación
2	Algunas partes con rasgos de lubricación y otras sin ella y nivel de deterioro moderado-severo.	Diámetro en norma y carga mínima de rotura fuera de norma. Tiempo de servicio desconocido en zona sumergida y no sumergida.	El nivel de deterioro se correlaciona con la carga mínima de rotura. El nivel de deterioro está influenciado por el medio de uso del cable.
3	Con restos de lubricación y nivel de deterioro leve.	Carga mínima de rotura fuera de norma. Tiempo de servicio desconocido en zona no sumergida.	El diámetro actual del cable no es un parámetro que refleje el nivel de deterioro y su resistencia mínima de rotura.

El caso 2 nos enseña que un cable no se fractura, aunque esté sumergido en ambientes marinos (que es el peor de los casos porque entra y sale del agua), tampoco si la carga mínima de rotura se reduce, sin embargo, el diámetro no debe reducirse por encima del 4% y el nivel de deterioro no debe ser “muy severo”, lo cual podría ser consecuencia de los rasgos de lubricación con que todavía cuenta (esto se demuestra más adelante en las correlaciones).

El cable del caso 3 refuerza las deducciones del caso 1, ya que no se fractura por presentar menor nivel de deterioro y restos de lubricación, a pesar de la reducción de la carga mínima de rotura.

Comentarios generales:

Considerando sólo dos casos sin fractura, dentro del total de la muestra, se puede consolidar en primera instancia que estos tienen como características comunes: la existencia de algunos rastros de lubricación, por lo que el nivel de deterioro no llega a ser “muy severo” y sí es posible una reducción de la carga mínima de rotura.

Por otro lado, no son características concluyentes, la agresividad del medio en que se han utilizado los cables y que la reducción del diámetro se encuentre en norma, aunque es lógico suponer que mientras más agresivo es el medio en que se usa es posible que el nivel de deterioro aumente y llegue a ser muy severo.

Subcategoría: Cables fracturados

- Primera etapa:

Para el presente estudio se tienen nueve (09) casos de cables fracturados para lo cual se construye la Tabla 65, con las correlaciones a analizar seleccionadas a criterio de los investigadores respecto al atributo “nivel de deterioro”, debido a que algunas de las correlaciones posibles son redundantes; en ese sentido, se han seleccionado las correlaciones más significativas para el propósito del análisis. Cabe precisar que no se considera el atributo “Elementos complementarios adecuados” por no contar con esos resultados en las tablas de la subcategoría “Datos cualitativos” de la categoría “CABLES FRACTURADOS “. Por último, tampoco se considera el atributo “material y microestructura”, ya que, por lo general todos los cables poseen las mismas características o resultados en este atributo.

Tabla 65

Correlaciones a analizar – Cables fracturados

Correlación	Atributos						
	Nivel de deterioro	¿Lubric.?	Medio de operación	Morfología de fractura o modo de falla	Diámetro actual/nominal / respecto a norma AST A1023 (máx. 4%)	Carga rotura mín. actual / mín. norma AST A1023 / respecto a norma	Tiempo de servicio
Primera	X	X					
Segunda	X		X				
Tercera	X	X	X				
Cuarta	X			X			
Quinta	X		X	X			
Sexta	X				X		
Séptima	X			X	X		
Octava	X					X	
Novena	X				X	X	
Décima	X						X
Undécima	x					X	X

Primera correlación:

¿Qué relación tienen los cables fracturados en cuanto al nivel de deterioro y el nivel de lubricación?

En respuesta a la pregunta se obtiene la Tabla de resultados siguiente:

Tabla 66

Correlación entre “nivel de deterioro” y “lubricación” – Cables fracturados

Caso	Nivel de deterioro	¿Lubricación?	Análisis correlacional global
1	Alambres externos con pérdida de cilindridad, muy deteriorado. (muy severo)	Sin lubricación.	
4	Alambres externos y alma con leve corrosión. (Leve)	Rastros de lubricación.	
5	Alambres del alma en corte A muy severamente corroídos y trozados. En el corte B hay ausencia del alma. (Muy severo)	Sin lubricación.	
6	Alma y alambres exteriores con corrosión localizada (picaduras) y alma con abuso mecánico. (Severo)	Sin lubricación	
7	Alambres con deformación por abuso mecánico (mellado o martilleo) y corrosión. (Leve)	Rastros de lubricación	En los cables fracturados se observa que el deterioro es muy severo cuando no hay lubricación, mientras que se reduce incluso hasta leve en presencia de lubricación.
8	Alambres exteriores e interiores con ataque corrosivo. Presencia de productos de corrosión, cúmulos de lubricante semi seco y productos marinos blanquecinos incrustados. (Moderado-muy severo)	Rastros de lubricación	
9	Alambres externos rotos por fatiga y con presencia de corrosión (Leve-moderado)	Rastros de lubricación	
10	Deterioro superficial localizado de los alambres externos, además de deformación y abuso mecánico. “Pits” incipientes. (Leve)	No requiere (cable con recubrimiento plástico).	
11	Alambres exteriores e interiores con ataque corrosivo, especialmente el alma. Presencia de productos de corrosión, cúmulos de lubricante semi seco y productos marinos	Rastros de lubricación	

blanquecinos incrustado (Moderado - muy severo)

Hay una relación inversa entre el grado de lubricación de los cables y el nivel de deterioro en la fractura. Se puede decir que cuando el cable no ha sido lubricado el nivel de deterioro es muy severo, sin embargo, en presencia de lubricación este deterioro del cable puede incluso ser leve.

Segunda correlación:

¿Qué relación tienen los cables fracturados en cuanto al nivel de deterioro y el medio en que se usan?

En respuesta a la pregunta se obtiene la Tabla de resultados siguiente:

Tabla 67

Correlación entre “nivel de deterioro” y “medio de operación” – Cables fracturados

Caso	Nivel de deterioro	Medio operación	Análisis correlacional global
1	Alambres externos con pérdida de cilindridad, muy deteriorado. (muy severo)	En grúa.	
4	Alambres externos y alma con leve corrosión. (Leve)	En zona sumergida.	
5	Alambres del alma en corte A muy severamente corroídos y trozados. En el corte B hay ausencia del alma. (Muy severo)	En zona sumergida.	
6	Alma y alambres exteriores con corrosión localizada (picaduras) y alma con abuso mecánico. (Severo)	En zona aérea.	En los cables fracturados por lo general el nivel de deterioro y el medio de operación no tienen una relación con patrón definido.
7	Alambres con deformación por abuso mecánico (mellado o martilleo) y corrosión. (Leve)	En zona aérea.	
8	Alambres exteriores e interiores con ataque corrosivo. Presencia de productos de corrosión, cúmulos de lubricante semi seco y productos marinos blanquecinos incrustados. (Moderado-muy severo)	Ambos en zona sumergida.	
9	Alambres externos rotos por fatiga y con presencia de corrosión (Leve-moderado)	En zona sumergida.	

10	Deterioro superficial localizado de los alambres externos, además de deformación y abuso mecánico. "Pits" incipientes. (Leve)	Recubierto.
11	Alambres exteriores e interiores con ataque corrosivo, especialmente el alma. Presencia de productos de corrosión, cúmulos de lubricante semi seco y productos marinos blanquecinos incrustado (Moderado - muy severo)	En zona sumergida.

En los cables fracturados, el nivel de deterioro y el medio de operación no tienen una relación con un patrón definido. Hay cables que trabajan en zonas no sumergidas y el deterioro va de leve a muy severo, a su vez hay cables que sí trabajan en zonas sumergidas y el deterioro también va de leve a muy severo. Así el nivel de deterioro del cable se ve influenciado mínimamente por su medio de operación.

Tercera correlación:

¿Qué relación tienen en los cables fracturados el nivel de deterioro, el nivel de lubricación y el medio de operación?

En respuesta a la pregunta del cuestionario se obtiene la Tabla de resultados siguiente:

Tabla 68

Correlación entre "nivel de deterioro", "lubricación" y "medio de operación" – Cables fracturados

Caso	Nivel de deterioro	¿Lubricación?	Medio operación	Análisis correlacional global
1	Alambres externos con pérdida de cilindridad, muy deteriorado. (muy severo)	Sin lubricación.	No sumergido.	En los cables fracturados se observa mayor probabilidad de deterioro leve cuando hay rastros de lubricación y no está sumergido.
4	Alambres externos y alma con leve corrosión. (Leve)	Rastros de lubricación.	Sumergido.	
5	Alambres del alma en corte A muy severamente corroídos y trozados. En el corte B hay ausencia del alma. (Muy severo)	Sin lubricación.	Sumergido.	
6	Alma y alambres exteriores con corrosión localizada	Sin lubricación	No sumergido.	

	(picaduras) y alma con abuso mecánico. (Severo)			
7	Alambres con deformación por abuso mecánico (mellado o martilleo) y corrosión. (Leve)	Rastros de lubricación	de No sumergido.	
8	Alambres exteriores e interiores con ataque corrosivo. Presencia de productos de corrosión, cúmulos de lubricante semi seco y productos marinos blanquecinos incrustados. (Moderado-muy severo)	Rastros de lubricación	de Ambos sumergidos.	
9	Alambres externos rotos por fatiga y con presencia de corrosión (Leve-moderado)	Rastros de lubricación	de Sumergido.	
10	Deterioro superficial localizado de los alambres externos, además de deformación y abuso mecánico. "Pits" incipientes. (Leve)	No requiere (cable con recubrimiento plástico).	Recubierto.	
11	Alambres exteriores e interiores con ataque corrosivo, especialmente el alma. Presencia de productos de corrosión, cúmulos de lubricante semi seco y productos marinos blanquecinos incrustado (Moderado - muy severo)	Rastros de lubricación	de Sumergido.	

En los cables fracturados el deterioro va de leve a muy severo cuando hay lubricación y está sumergido. En el caso que no haya lubricación y no esté sumergido, el cable presenta deterioro entre severo y muy severo. Se aprecia que no hay un patrón que permita definir específicamente el nivel de deterioro para estas combinaciones.

Sin embargo, es muy probable que si el cable no tiene lubricación y está sumergido el deterioro es muy severo. Cómo también es probable que, si el cable tiene rastros de lubricación y no está sumergido, el nivel de deterioro es leve.

Cuarta correlación:

¿Qué relación tienen los cables fracturados en cuanto al nivel de deterioro y el modo de falla de los alambres del cable?

En respuesta a la pregunta del cuestionario se obtiene la Tabla de resultados siguiente:

Tabla 69

Correlación entre “nivel de deterioro” y el “modo de falla” – Cables fracturados

Caso	Nivel de deterioro	Modo de falla	Análisis correlacional global
1	Alambres externos con pérdida de cilindridad, muy deteriorado. (muy severo)	Fretting corrosion y fatiga.	
4	Alambres externos y alma con leve corrosión. (Leve)	85% sobretensión y resto fatiga 45°	
5	Alambres del alma en corte A muy severamente corroídos y trozados. En el corte B hay ausencia del alma. (Muy severo)	60% fretting corrosion, fatiga y 40% sobretensión.	
6	Alma y alambres exteriores con corrosión localizada (picaduras) y alma con abuso mecánico. (Severo)	70% sobretensión, 30% corrosión y fatiga 45°	En los cables fracturados el nivel de deterioro se ve impactado en mayor grado por el modo de falla denominado fretting corrosion
7	Alambres con deformación por abuso mecánico (mellado o martilleo) y corrosión. (Leve)	82% fatiga y 18% sobretensión	
8	Alambres exteriores e interiores con ataque corrosivo. Presencia de productos de corrosión, cúmulos de lubricante semi seco y productos marinos blanquecinos incrustados. (Moderado-muy severo)	65% fretting corrosion y fatiga, y 35% sobretensión.	
9	Alambres externos rotos por fatiga y con presencia de corrosión (Leve-moderado)	60% Fatiga 45° y 40% sobretensión	
10	Deterioro superficial localizado de los alambres externos, además de	100% sobretensión	

	deformación y abuso mecánico. “Pits” incipientes. (Leve)
11	Alambres exteriores e interiores con ataque corrosivo, especialmente el alma. Presencia de productos de corrosión, cúmulos de lubricante semi seco y productos marinos blanquecinos incrustado (Moderado - muy severo)

En los cables fracturados el deterioro es leve si es que no se presenta el modo de falla denominado fretting corrosion. Siempre que se presenta el fretting corrosion el nivel de deterioro del cable va de moderado a muy severo.

Cuando el modo de falla es la combinación de fatiga y sobretensión, el nivel de deterioro del cable puede ir de leve a muy severo.

Tabla 70

Correlación entre “nivel de deterioro” y el “modo de falla” – Cables fracturados

Modo de falla	Fretting corrosion	Fatiga	Sobretensión	%
			1	11%
	1		1	11%
			4	44%
		3		33%
Total	4	8	8	
%	44%	89%	89%	100%

La información mostrada en la Tabla precedente evidencia que la corrosión estuvo presente en el 44% de los casos, la fatiga en el 89% de los casos y la sobretensión también en el 89% de los casos analizados.

Asimismo, se observa que en el 89% de los casos concurren más de un mecanismo de falla, siendo el más frecuente la falla por fatiga y sobretensión (44% de los casos). Lo anterior se explica dado que el mecanismo de falla inicia con la fractura de los alambres exteriores por fatiga para luego progresar a la fractura del resto del cable por sobretensión debido a que los alambres restantes son rebasados en su capacidad de soportar la carga actuante.

Quinta correlación:

¿Qué relación tienen en los cables fracturados el nivel de deterioro, el medio en que opera y el modo de falla de los alambres del cable?

En respuesta a la pregunta del cuestionario se obtiene la Tabla de resultados siguiente:

Tabla 71

Correlación entre “nivel de deterioro”, “medio de operación” y “modo de falla” – Cables fracturados

Caso	Nivel de deterioro	Medio operación	Modo de falla	Análisis correlacional global
1	Alambres externos con pérdida de cilindridad, muy deteriorado. (muy severo)	No sumergido.	Fretting corrosion - fatiga.	
4	Alambres externos y alma con leve corrosión. (Leve)	Sumergido.	85% Sobretensión y resto fatiga 45°	
5	Alambres del alma en corte A muy severamente corroídos y trozados. En el corte B hay ausencia del alma. (Muy severo)	Sumergido.	60% Fretting corrosion- fatiga y 40% sobretensión.	En los cables fracturados no hay un patrón definido entre el nivel de deterioro, el medio de operación y el modo de falla.
6	Alma y alambres exteriores con corrosión localizada (picaduras) y alma con abuso mecánico. (Severo)	No sumergido.	70% sobretensión, 30% Corrosión- fatiga 45°	
7	Alambres con deformación por abuso mecánico (mellado o martilleo) y corrosión. (Leve)	No sumergido.	82% Fatiga y fatiga 45°, 18% sobretensión	
8	Alambres exteriores e interiores con ataque corrosivo. Presencia de productos de corrosión, cúmulos de lubricante semi seco y productos marinos blanquecinos incrustados. (Moderado-muy severo)	Ambos sumergidos.	65% Fretting corrosion- fatiga y 35% sobretensión.	

9	Alambres externos rotos por fatiga y con presencia de corrosión (Leve-moderado)	Sumergido.	60% Fatiga 45° y 40% sobretensión
10	Deterioro superficial localizado de los alambres externos, además de deformación y abuso mecánico. "Pits" incipientes. (Leve)	Recubierto.	100% sobretensión
11	Alambres exteriores e interiores con ataque corrosivo, especialmente el alma. Presencia de productos de corrosión, cúmulos de lubricante semi seco y productos marinos blanquecinos incrustado (Moderado - muy severo)	Sumergido.	60% Fatiga 45° y 40% sobretensión

No hay un patrón definido entre el nivel de deterioro, el medio de operación y el modo de falla del cable. En el cable en general el medio de operación no impacta en gran medida en el modo de falla del mismo ni en el nivel de deterioro.

Sexta correlación:

¿Qué relación tienen los cables fracturados en cuanto al nivel de deterioro y si el porcentaje de reducción del diámetro actual está en norma?

En respuesta a la pregunta del cuestionario se obtiene la Tabla de resultados siguiente:

Tabla 72

Correlación entre "nivel de deterioro" y "diámetro actual" – Cables fracturados

Caso	Nivel de deterioro	Diámetro actual/ nominal / respecto a norma AST A1023 (máx. 4%).	Análisis correlacional global
1	Alambres externos con pérdida de cilindridad, muy deteriorado. (muy severo)	27,2 – 29,0 mm / 28,6 mm / reducción 6%.	En los cables fracturados un porcentaje de reducción de diámetro por encima de la norma nos lleva, en general, a un nivel de deterioro muy severo.
4	Alambres externos y alma con leve corrosión. (Leve)	36,0 – 36,2 mm / 35 mm / dato dudoso	

5	Alambres del alma en corte A muy severamente corroídos y trozados. En el corte B hay ausencia del alma. (Muy severo)	Corte A: 37,1 mm – 37,3 mm / 38,1 mm / reducción 2,4%. Corte B: 37,5 mm – 37,8 mm / 38,1 mm / reducción 1,1%.
6	Alma y alambres exteriores con corrosión localizada (picaduras) y alma con abuso mecánico. (Severo)	No se registró / 38,1 mm / no se puede calcular reducción
7	Alambres con deformación por abuso mecánico (mellado o martilleo) y corrosión. (Leve)	21,3 – 21,9 mm / 22,2 mm / reducción 2,7%
8	Alambres exteriores e interiores con ataque corrosivo. Presencia de productos de corrosión, cúmulos de lubricante semi seco y productos marinos blanquecinos incrustados. (Moderado-muy severo)	Cable PB 37,5 - 39 mm/38,1 mm/ reducción 3,8% Cable PE 38,5-38,8 mm/38,1%/ reducción 0,7%
9	Alambres externos rotos por fatiga y con presencia de corrosión (Leve-moderado)	No se registró / 34,9 mm / no se puede calcular reducción
10	Deterioro superficial localizado de los alambres externos, además de deformación y abuso mecánico. "Pits" incipientes. (Leve)	5,4 mm / 5,0 mm / sin reducción. (Cable recubierto).
11	Alambres exteriores e interiores con ataque corrosivo,	No se sabe / 38,1 mm / no se puede calcular reducción.

especialmente el alma.
 Presencia de productos
 de corrosión, cúmulos
 de lubricante semi seco
 y productos marinos
 blanquecinos
 incrustado (Moderado -
 muy severo)

En el cable fracturado se observa que, si el porcentaje de reducción del diámetro está por encima del máximo permitido por la norma, el nivel de deterioro es muy severo. También se aprecia que, si no hay reducción en el diámetro, el nivel de deterioro en general es leve.

Para porcentajes de reducción del diámetro dentro de la norma, los niveles de deterioro van de leve a muy severo incluso.

Séptima correlación:

¿Qué relación tienen los cables fracturados en cuanto al nivel de deterioro, el modo de falla y si el porcentaje de reducción del diámetro actual está en norma?

En respuesta a la pregunta del cuestionario se obtiene la Tabla de resultados siguiente:

Tabla 73

Correlación entre “nivel de deterioro”, “modo de falla” y “diámetro actual” – Cables fracturados

Caso	Nivel de deterioro	Modo de falla	Diámetro actual/nominal / respecto a norma AST A1023 (máx. 4%)	Análisis correlacional global
1	Alambres externos con pérdida de cilindridad, muy deteriorado. (muy severo)	Fretting corrosion - fatiga	27,2 – 29,0 mm / 28,6 mm / reducción 6%.	En los cables fracturados un porcentaje de reducción del diámetro por encima de la norma combinado con el modo de falla fretting corrosion,
4	Alambres externos y alma con leve corrosión. (Leve)	85% Sobretensión y resto fatiga 45°	36,0 – 36,2 mm / 35 mm / dato dudoso	
5	Alambres del alma en corte A muy severamente	60% Fretting corrosion -	Corte A: 37,1 mm – 37,3	

	corroídos y trozados. En el corte B hay ausencia del alma. (Muy severo)	fatiga y 40% sobretensión.	mm / 38,1 mm / reducción 2,4%. Corte B: 37,5 mm – 37,8 mm / 38,1 mm / reducción 1,1%.	en general, garantiza un nivel de deterioro muy severo.
6	Alma y alambres exteriores con corrosión localizada (picaduras) y alma con abuso mecánico. (Severo)	70% sobretensión, 30% Corrosión-fatiga 45°	No se registró / 38,1 mm / no se puede calcular reducción	
7	Alambres con deformación por abuso mecánico (mellado o martilleo) y corrosión. (Leve)	82% Fatiga y fatiga 45°, 18% sobretensión	21,3 – 21,9 mm / 22,2 mm / reducción 2,7%	
8	Alambres exteriores e interiores con ataque corrosivo. Presencia de productos de corrosión, cúmulos de lubricante semi-seco y productos marinos blanquecinos incrustados. (Moderado-muy severo)	65% Fretting corrosion - fatiga y 35% sobretensión.	Cable PB 37,5 - 39 mm/38,1 mm/ reducción 3,8% Cable PE 38,5-38,8 mm/38,1%/ reducción 0,7%	
9	Alambres externos rotos por fatiga y con presencia de corrosión (Leve-moderado)	60% Fatiga 45° y 40% sobretensión	No se registró / 34,9 mm / no se puede calcular reducción	
10	Deterioro superficial localizado de los alambres externos, además de deformación y abuso	100% sobretensión	5,4 mm / 5,0 mm / sin reducción.	

	mecánico. “Pits” incipientes. (Leve)	(Cable recubierto).
11	Alambres exteriores e interiores con ataque corrosivo, especialmente el alma. Presencia de 60% productos de corrosión, y cúmulos de lubricante semi seco y productos marinos blanquecinos incrustado (Moderado - muy severo)	No se sabe / 38,1 mm / no se puede calcular reducción.

En los cables fracturados un porcentaje de reducción del diámetro por encima de la norma, combinado con el modo de falla fretting corrosion, en general, garantiza un nivel de deterioro muy severo.

Para porcentajes de reducción del diámetro dentro de la norma los niveles de deterioro son distintos y van desde leve a muy severo pudiendo los modos de falla ser variados.

Octava correlación

¿Qué relación tienen los cables fracturados en cuanto al nivel de deterioro y si el porcentaje de reducción de la carga de rotura mínima actual está en norma?

En respuesta a la pregunta del cuestionario se obtiene la Tabla de resultados siguiente:

Tabla 74

Correlación entre “nivel de deterioro” y “carga de rotura mín. actual” – Cables fracturados

Caso	Nivel de deterioro	Carga rotura mín. actual / mín. norma AST A1023 / respecto a norma	Análisis correlacional global
1	Alambres externos con pérdida de cilindridad, muy deteriorado. (muy severo)	30 474 kg / 56 500 kg / reducción 40%.	En los cables fracturados el nivel de deterioro es probable sea leve cuando no hay reducción en la carga de rotura mínima respecto a la indicada por norma.
4	Alambres externos y alma con leve corrosión. (Leve)	100 051 kg / 96 000 kg / No hay reducción.	
5	Alambres del alma en corte A muy severamente corroídos y	Corte A: 76 808 kg / 98 900 kg / reducción 22,3%.	

	trozados. En el corte B hay ausencia del alma. (Muy severo)	Corte B: 83 427 kg / 98 900 kg / reducción 15,6%.
6	Alma y alambres exteriores con corrosión localizada (picaduras) y alma con abuso mecánico. (Severo)	93 800 kg / 114 000 kg / reducción 18%.
7	Alambres con deformación por abuso mecánico (mellado o martilleo) y corrosión. (Leve)	No se realizó ensayo.
8	Alambres exteriores e interiores con ataque corrosivo. Presencia de productos de corrosión, cúmulos de lubricante semi seco y productos marinos blanquecinos incrustados. (Moderado-muy severo)	Cable PB 41 278 kg / 98 900 kg/ reducción 58,7% Cable PE 62 236 kg / 98 900 kg/ reducción 37,8%
9	Alambres externos rotos por fatiga y con presencia de corrosión (Leve-moderado)	87 251 kg / 83 500 kg / No hay reducción
10	Deterioro superficial localizado de los alambres externos, además de deformación y abuso mecánico. "Pits" incipientes. (Leve)	1520 daN / 1470 daN / No hay reducción
11	Alambres exteriores e interiores con ataque corrosivo, especialmente el alma. Presencia de productos de corrosión, cúmulos de lubricante semi seco y productos marinos blanquecinos incrustado (Moderado - muy severo)	94 535.61 kg/ 103 000 kg/ reducción 8.2%

En los cables fracturados se observa que el nivel de deterioro es leve si no hay reducción en la carga mínima de rotura respecto a lo indicado por norma. Cuando hay reducción en la carga mínima de rotura, es decir está por debajo de lo indicado por norma, el nivel de deterioro varía entre moderado y muy severo.

Novena correlación:

¿Qué relación tienen los cables fracturados en cuanto al nivel de deterioro, carga de rotura mínima y si el porcentaje de reducción del diámetro actual está en norma?

En respuesta a la pregunta del cuestionario se obtiene la Tabla de resultados siguiente:

Tabla 75

Correlación entre “nivel de deterioro”, “diámetro actual” y “carga de rotura mín. actual” – Cables fracturados

Caso	Nivel de deterioro	Diámetro actual/ nominal / respecto a norma AST A1023 (máx. 4%).	Carga rotura mín. actual / mín. norma AST A1023 respecto a norma	Análisis correlacional global
1	Alambres externos con pérdida de cilindridad, muy deteriorado. (muy severo)	27,2 – 29,0 mm / 28,6 mm / reducción 6%.	30 474 kg / 56 500 kg / reducción 40%.	
4	Alambres externos y alma con leve corrosión. (Leve)	36,0 – 36,2 mm / 35 mm / dato dudoso	100 051 kg / 96 000 kg / No hay reducción.	
5	Alambres del alma en corte A muy severamente corroídos y trozados. En el corte B hay ausencia del alma. (Muy severo)	Corte A: 37,1 mm – 37,3 mm / 38,1 mm / reducción 2,4%. Corte B: 37,5 mm – 37,8 mm / 38,1 mm / reducción 1,1%.	Corte A: 76 808 Kg / 98 900 Kg / reducción 22,3%. Corte B: 83 427 kg / 98 900 kg / reducción 15,6%.	En los cables fracturados el nivel de deterioro es muy severo si la reducción del diámetro y la carga mínima de rotura están fuera de norma.
6	Alma y alambres exteriores con corrosión localizada (picaduras) y alma con abuso mecánico. (Severo)	No se registró / 38,1 mm / no se puede calcular reducción	93 800 kg / 114 000 kg / reducción 18%.	

7	Alambres con deformación por abuso mecánico (mellado o martilleo) y corrosión. (Leve)	21,3 – 21,9 mm / 22,2 mm / reducción 2,7%	No se realizó ensayo.
8	Alambres exteriores e interiores con ataque corrosivo. Presencia de productos de corrosión, cúmulos de lubricante semi seco y productos marinos blanquecinos incrustados. (Moderado-muy severo)	Cable PB 37,5 - 39 mm/38,1 mm/ reducción 3,8% Cable PE 38,5- 38,8 mm/38,1%/ reducción 0,7%	Cable PB 41 278 kg / 98 900 kg/ reducción 58,7% Cable PE 62 236 kg / 98 900 kg/ reducción 37,8%
9	Alambres externos rotos por fatiga y con presencia de corrosión (Leve-moderado)	No se registró / 34,9 mm / no se puede calcular reducción	87 251 kg / 83 500 kg / No hay reducción
10	Deterioro superficial localizado de los alambres externos, además de deformación y abuso mecánico. "Pits" incipientes. (Leve)	5,4 mm / 5,0 mm / sin reducción. (Cable recubierto).	1520 daN / 1470 daN / No hay reducción
11	Alambres exteriores e interiores con ataque corrosivo, especialmente el alma. Presencia de productos de corrosión, cúmulos de lubricante semi seco y productos marinos blanquecinos incrustado (Moderado - muy severo)	No se sabe / 38,1 mm / no se puede calcular reducción.	94 535.61 kg/ 103 000 kg/ reducción 8.2%

En los cables fracturados no existe un patrón único de nivel de deterioro en función de una determinada reducción del diámetro o de la carga mínima de rotura, lo que sí se observa es que el deterioro es muy severo si la reducción del diámetro está por encima de lo permitido por norma y la carga mínima de rotura está por debajo de lo indicado por norma.

Décima correlación:

¿Qué relación tienen los cables fracturados en cuanto al nivel de deterioro y el tiempo de servicio?

En respuesta a la pregunta del cuestionario se obtiene la Tabla de resultados siguiente:

Tabla 76

Correlación entre “nivel de deterioro” y “tiempo de servicio” – Cables fracturados

Caso	Nivel de deterioro	Tiempo servicio	Análisis correlacional global
1	Alambres externos con pérdida de cilindridad, muy deteriorado. (muy severo)	No se sabe	
4	Alambres externos y alma con leve corrosión. (Leve)	20 días	
5	Alambres del alma en corte A muy severamente corroídos y trozados. En el corte B hay ausencia del alma. (Muy severo)	1 año 8 meses y más	
6	Alma y alambres exteriores con corrosión localizada (picaduras) y alma con abuso mecánico. (Severo)	1 año	
7	Alambres con deformación por abuso mecánico (mellado o martilleo) y corrosión. (Leve)	1 año, 5 meses	En los cables fracturados el nivel de deterioro es indistinto del tiempo de servicio, no hay una influencia significativa.
8	Alambres exteriores e interiores con ataque corrosivo. Presencia de productos de corrosión, cúmulos de lubricante semi seco y productos marinos blanquecinos incrustados. (Moderado-muy severo)	Cable PB 7 meses de servicio Cable PE 18 meses de servicio	
9	Alambres externos rotos por fatiga y con presencia de corrosión (Leve-moderado)	Menos de 1 año	
10	Deterioro superficial localizado de los alambres externos, además de deformación y abuso mecánico. “Pits” incipientes. (Leve)	11 meses	
11	Alambres exteriores e interiores con ataque corrosivo, especialmente el alma.	1 año	

Presencia de productos de corrosión, cúmulos de lubricante semi seco y productos marinos blanquecinos incrustado (Moderado - muy severo)

En los cables fracturados el nivel de deterioro es indistinto del tiempo de operación, se aprecia tiempos de servicio de 1 año a más con niveles de deterioro leves y muy severos lo que nos indica que otras variables son las que tienen mayor impacto o lo que es lo mismo, que la influencia del tiempo de operación no es significativa en el nivel de deterioro.

Undécima correlación

¿Qué relación tienen los cables fracturados en cuanto al nivel de deterioro, si el porcentaje de reducción de la carga de rotura mínima actual está en norma y el tiempo de servicio?

En respuesta a la pregunta del cuestionario se obtiene la Tabla de resultados siguiente:

Tabla 77

Correlación entre “nivel de deterioro”, “carga de rotura mín.” y “tiempo de servicio” – Cables fracturados

Caso	Nivel de deterioro	Carga rotura mín. actual / mín. norma AST A1023 respecto a norma	Tiempo servicio	Análisis correlacional global
1	Alambres externos con pérdida de cilindridad, muy deteriorado. (Muy severo)	30 474 kg / 56 500 kg / reducción 40%.	No se sabe	En los cables fracturados el nivel de deterioro es muy severo si la reducción de la carga mínima de rotura está fuera de norma y el tiempo de operación es mayor a 1 año.
4	Alambres externos y alma con leve corrosión. (Leve)	100 051 kg / 96 000 Kg / No hay reducción.	20 días	
5	Alambres del alma en corte A muy severamente corroídos y trozados. En el corte B hay ausencia del alma. (Muy severo)	Corte A: 76 808 kg / 98 900 kg / reducción 22,3%. Corte B: 83 427 kg / 98 900 kg / reducción 15,6%.	1 año 8 meses y más	

6	Alma y alambres exteriores con corrosión localizada (picaduras) y alma con abuso mecánico. (Severo)	93 800 kg / 114 000 kg / reducción 18%.	1 año
7	Alambres con deformación por abuso mecánico (mellado o martilleo) y corrosión. (Leve)	No se realizó ensayo.	1 año, 5 meses
8	Alambres exteriores e interiores con ataque corrosivo. Presencia de productos de corrosión, cúmulos de lubricante seco y productos marinos blanquecinos incrustados. (Moderado-muy severo)	Cable PB 41 278 kg / 98 900 kg/ reducción 58,7% Cable PE 62 236 kg / 98 900 kg/ reducción 37,8%	Cable PB 7 meses de servicio Cable PE 18 meses de servicio
9	Alambres externos rotos por fatiga y con presencia de corrosión (Leve-moderado)	87 251 kg / 83 500 kg / No hay reducción	Menos de 1 año
10	Deterioro superficial localizado de los alambres externos, además de deformación y abuso mecánico. "Pits" incipientes. (Leve)	1520 daN / 1470 daN / No hay reducción	11 meses
11	Alambres exteriores e interiores con ataque corrosivo, especialmente el alma. Presencia de productos de corrosión, cúmulos de lubricante semi seco y productos marinos blanquecinos incrustados. (Moderado - muy severo)	94 535.61 kg/ 103 000 kg/ reducción 8.2%	1 año

En los cables fracturados no existe un patrón único de nivel de deterioro en función de, si la carga mínima de rotura está en norma o la existencia de un tiempo de servicio

determinado; lo que sí es muy probable que el deterioro sea muy severo si la carga mínima de rotura está debajo de lo indicado por norma y el tiempo de operación es mayor a 1 año.

Segunda etapa

¿Qué relación existe entre los datos cualitativos y cuantitativos de los cables fracturados?

Tabla 78

Correlación entre datos cualitativos y cuantitativos - cables fracturados

Caso	Evaluaciones cualitativas	individuales	Evaluaciones cuantitativas	individuales	Líneas de correlación
1	Deterioro muy severo, sin lubricación. Modo de falla por fretting corrosión-fatiga. Microestructura típica y adecuadas poleas.		Diámetro (reducción 6%) y carga mínima de rotura (reducción 40%) fuera de norma. Tiempo de servicio incierto en zona no sumergida.		
4	Deterioro leve, casi sin lubricación. Modo de falla por sobretensión. Material y microestructura típicas. Poleas inadecuadas.		Diámetro dudoso (puede ser mal dato del cliente). Carga mínima en norma (no hay reducción). Pocos días de servicio en zona sumergida.		No es una limitante el ambiente en que se usan, ni el tiempo de servicio. El nivel de deterioro es muy severo o leve si es sobrecarga.
5	Deterioro muy severo, sin lubricación. Modo de falla por fretting corrosión-fatiga muy severa y sobretensión. Material y microestructura típicas.		Diámetro en norma (2,4% y 1,1%) y carga mínima de rotura (22,3% y 15,6%) fuera de norma. Más de 1,8 años de servicio en zona sumergida.		El % de reducción del diámetro puede estar dentro o fuera de la norma cuando el deterioro es muy severo.
6	Deterioro severo, sin lubricación. Modo de falla por corrosión-fatiga severo y exceso de carga. Material y microestructura típicas.		Carga mínima de rotura fuera de norma (18% menor). 1 año de servicio en zona no sumergida		La carga mínima de rotura se reduce salvo que haya sobrecarga.
7	Deterioro leve y rastros de lubricación.		Diámetro en norma (2,7%). 1,4 años de servicio en zona no sumergida.		

	Modo de falla por fatiga, por exceso de servicio en estado de doblamiento. Poleas inadecuadas.	
8	Deterioro moderado-muy severo y rastros de lubricación. Cable PB: Modo de falla por por fretting corrosion-fatiga. Cable PE: Modo de falla por por fatiga.	Diámetro en norma PB (3,8%) y PE (0,7%) y carga mínima de rotura PB (58,7%) y PE (37,8%) fuera de norma. Más de 1,5 años de servicio en zona sumergida.
9	Deterioro leve-moderado y rastros de lubricación. Modo de falla por fatiga.	Carga de rotura mínima sin reducción. Menos de 1 año de servicio en zona sumergida.
10	Deterioro leve. Modo de falla por sobretensión.	Diámetro en norma y carga de rotura mínima sin reducción. 11 meses de servicio en zona no sumergida por estar recubierto.
11	Deterioro moderado-muy severo y rastros de lubricación. Modo de falla por fatiga y sobretensión.	Carga mínima de rotura fuera de norma (8,2% menor). 1 año de servicio en zona sumergida.

El cable del caso 1, nos muestra que un cable se fractura, cuando la carga mínima de rotura se reduce, el diámetro baja más de 4% y el nivel de deterioro es muy severo, no obstante, no hace falta que el cable esté sumergido en el ambiente marino.

El cable del caso 4, por el contrario, no tiene deterioro muy severo, ni reducción de la carga de rotura y ni un mes de servicio, pero sí evidencias notorias de que el cable fue sometido a una sobrecarga abrupta y esto lo hizo colapsar.

El cable del caso 5, fracturado, no muestra diámetro fuera de norma, pero sí un deterioro muy severo, así como la reducción de la carga de rotura mínima y más de 1,5 años de servicio.

El cable del caso 6, fracturado, nos muestra un daño severo por corrosión, fatiga y exceso de carga. La carga de rotura se ha reducido en 18%.

El cable del caso 7, tiene un deterioro leve, el diámetro se encuentra en norma, pero ha sido sometido a excesos de servicio sumado al uso de unas poleas inadecuadas, lo que conllevó a su fractura.

En el caso 8, tenemos dos cables, uno con deterioro moderado (PB) por fretting corrosion y fatiga, y el otro muy severo (PE) por fatiga. En ambos casos el diámetro se ha mantenido en norma y por el contrario la carga de rotura ha disminuido fuera de norma.

En el cable del caso 9, tiene un deterioro leve a moderado, su carga de rotura se ubica en el rango mínimo, con menos de un año de servicio, pero evidencia que ha sido sometido a excesos de cargas en servicio.

En el cable del caso 10, tiene un deterioro leve, diámetro y carga de rotura en norma, cable sometido a abuso mecánico, motivo de la falla.

En el cable del caso 11, presenta un deterioro moderado a muy severo, la carga mínima de rotura se encuentra fuera de norma, el cable presenta elevada corrosión y fracturado por fatiga, por cargas dinámicas violentas.

Comentarios generales:

Según el análisis de los casos fracturados, se puede concluir que hay diversos modos de fallas. Tenemos: fretting corrosion, fatiga y sobretensión. Asimismo, encontramos que el tiempo de servicio varía en cada falla y en algunos casos no contamos con esa información. Se concluye que el tiempo de servicio no es determinante en los casos analizados.

Las propiedades técnicas de los materiales, en este caso del acero, en la zona de fractura se ve afectada y deteriorada por los accionamientos externos, entre ellos la corrosión, el trabajo mecánico, el funcionamiento del cable con el sistema de poleas, entre otros. Las propiedades mecánicas en la mayoría de casos se salen de las normas específicas.

Categoría: Correlaciones globales (no fracturados y fracturados)

Para las correlaciones globales se consideran todos los cables, fracturados y no fracturados, para lo cual se construye la Tabla 79, con las mismas correlaciones utilizadas en la categoría "CABLES NO FRACTURADOS", para la debida contrastación con la categoría "CABLES FRACTURADOS".

Tabla 79*Correlaciones globales - No fracturados y fracturados*

Correlación	Atributos					
	¿Fracturado?	Nivel de deterioro	¿Lubric.?	Medio de operación	Diámetro actual/ nominal / respecto a norma AST A1023 (máx. 4%)	Carga rotura mín. actual / mín. norma AST A1023 / respecto a norma
Primera	X	X	X			
Segunda	X	X		X		
Tercera	X	X	X	X		
Cuarta	X	X			X	
Quinta	X	X				X
Sexta	X	X			X	X

Primera correlación

¿Hay relación entre los cables fracturados y no fracturados respecto al nivel de deterioro y el nivel de lubricación?

Tabla 80

Correlación entre cables fracturados y no fracturados respecto al “nivel de deterioro” y “lubricación”

Caso	¿Fracturado?	Nivel de deterioro	¿Lubricación?	Análisis correlacional global
1	Sí	Muy severo	Sin lubricación.	
2	No	Moderado-severo.	Rastros de lubricación	Deterioro entre Leve y severo para los cables no fracturados debido a ligera presencia de lubricante.
3	No	Leve.	Rastros de lubricación	
4	Sí	Leve.	Rastros de lubricación	

5	Sí	Muy severo	Sin lubricación.	Deterioro muy severo en los fracturados donde casi no existe lubricante.
6	Sí	Severo	Sin lubricación	
7	Sí	Leve	Rastros de lubricación	
8	Sí	Moderado-muy severo	Rastros de lubricación	
9	Sí	Leve-moderado	Rastros de lubricación	
10	Sí	Leve	No requiere (cable con recubrimiento plástico).	
11	Sí	Moderado-muy severo	Rastros de lubricación	

Sí hay una relación clara entre el nivel de deterioro, el nivel de lubricación y la posibilidad de fractura del cable. Cuando el nivel de deterioro está entre leve y severo y hay rasgos de cierta lubricación no es típico que el cable se fracture. Por el contrario, para niveles de deterioro muy severo, donde casi no existe lubricación es muy probable la fractura del mismo.

Segunda correlación

¿Hay relación entre los cables fracturados y no fracturados respecto al nivel de deterioro y el medio de operación?

Tabla 81

Correlación entre cables fracturados y no fracturados respecto al “nivel de deterioro” y “medio de operación”

Caso	¿Fracturado?	Nivel de deterioro	de Medio de operación	de Análisis correlacional global
1	Sí	Muy severo	No sumergido.	
2	No	Moderado-severo.	Una parte sumergida y otra no sumergida	Deterioro entre leve y severo para los cables no fracturados en operación no sumergidos o parcialmente.
3	No	Leve.	No sumergida.	
4	Sí	Leve.	Sumergido.	Deterioro entre leve y muy severo en los cables fracturados estando sumergidos o no.
5	Sí	Muy severo	Sumergido.	
6	Sí	Severo	No sumergido.	

7	Sí	Leve	No sumergido.
8	Sí	Moderado- muy severo	Ambos sumergidos.
9	Sí	Leve- moderado	Sumergido.
10	Sí	Leve	Recubierto.
11	Sí	Moderado- muy severo	Sumergido.

No hay una relación clara entre el nivel de deterioro, el medio de operación y la posibilidad de fractura del cable. Se evidencia que cuando el nivel de deterioro está entre leve y severo y el cable no está sumergido o no completamente sino parcial, no se llegaría a fracturar. Sin embargo, si el nivel de deterioro está entre leve y muy severo pudiendo el cable estar no sumergido, parcialmente sumergido o completamente sumergido; también hay evidencia de que éste sí podría llegar a fracturarse.

También en los casos de estudio se evidencia que siempre que el cable estuvo sumergido completamente era muy probable que se llegase a fracturar sin importar su nivel de deterioro.

Tercera correlación

¿Hay relación entre los cables fracturados y no fracturados respecto al nivel de deterioro, el nivel de lubricación y el medio de operación?

Tabla 82

Correlación entre cables fracturados y no fracturados respecto al “nivel de deterioro”, “lubricación” y “medio de operación”

Caso	¿Fracturado?	Nivel de deterioro	¿Lubricación?	Medio de operación	Análisis correlacional global
1	Sí	Muy severo	Sin lubricación.	No sumergido.	Deterioro entre Leve y severo para los cables no fracturados debido a ligera presencia de lubricante, a pesar de que pueden estar sumergidos o no.
2	No	Moderado-severo.	Rastros de lubricación	Una parte no sumergida y otra sumergida	
3	No	Leve.	Rastros de lubricación	No sumergida.	
4	Sí	Leve.	Rastros de lubricación	Sumergido.	

5	Sí	Muy severo	Sin lubricación.	Sumergido.	Deterioro entre leve y muy severo en los fracturados donde casi no existe lubricante y el cable ha estado sumergido o no.
6	Sí	Severo	Sin lubricación	No sumergido.	
7	Sí	Leve	Rastros de lubricación	No sumergido.	
8	Sí	Moderado-muy severo	Rastros de lubricación	Ambos sumergidos.	
9	Sí	Leve-moderado	Rastros de lubricación	Sumergido.	
10	Sí	Leve	No requiere (cable con recubrimiento plástico).	Recubierto.	
11	Sí	Moderado-muy severo	Rastros de lubricación	Sumergido.	

Un cable que tiene un nivel de deterioro entre leve y severo y, en el cuál, se evidencia que hay rasgos de lubricación; es poco probable que se fracture no importando si está sumergido o no.

En contraste, un cable que tiene un nivel de deterioro entre severo y muy severo sin rastros de lubricación es muy probable se fracture independientemente de si está sumergido o no.

Se puede inferir que tiene mayor peso en la fractura o no del cable la lubricación del mismo que las condiciones de operación o nivel de deterioro.

Cuarta correlación

¿Hay relación entre los cables fracturados y no fracturados respecto al nivel de deterioro y si el porcentaje de reducción del diámetro actual está en norma?

Tabla 83

Correlación entre cables fracturados y no fracturados respecto al “nivel de deterioro” y “diámetro actual”

Caso	¿Fracturado?	Nivel de deterioro	Diámetro actual/ nominal / respecto a norma AST A1023 (máx. 4%).	Análisis correlacional global
1	Sí	Muy severo	27,2 – 29,0 mm / 28,6 mm / reducción 6%.	
2	No	Moderado-severo.	Corte A: 34,1 mm – 34,8 mm / 35 mm / reducción 2,6%. Corte B: 34,5 mm – 35,0 mm / 35 mm / reducción 1,4%.	Deterioro entre leve y severo para los cables no fracturados con una reducción de diámetro dentro de norma.
3	No	Leve.	29,0 – 29,9 mm / 28,6 mm / dato dudoso	
4	Sí	Leve.	36,0 – 36,2 mm / 35 mm / dato dudoso	Deterioro entre leve y muy severo para cables fracturados, independientemente de si porcentaje de reducción del diámetro está dentro de norma o no.
5	Sí	Muy severo	Corte A: 37,1 mm – 37,3 mm / 38,1 mm / reducción 2,4%. Corte B: 37,5 mm – 37,8 mm / 38,1 mm / reducción 1,1%.	
6	Sí	Severo	No se registró / 38,1 mm / no se puede calcular reducción	

7	Sí	Leve	21,3 – 21,9 mm / 22,2 mm / reducción 2,7%
8	Sí	Moderado- muy severo	Cable PB 37,5 - 39 mm/38,1 mm/ reducción 3,8% Cable PE 38,5- 38,8 mm/38,1%/ reducción 0,7%
9	Sí	Leve- moderado	No se registró / 34,9 mm / no se puede calcular reducción
10	Sí	Leve	5,4 mm / 5,0 mm / sin reducción. (Cable recubierto).
11	Sí	Moderado- muy severo	No se sabe / 38,1 mm / no se puede calcular reducción.

Un cable que tiene un nivel de deterioro entre leve y severo y además su porcentaje de reducción del diámetro está dentro de la norma tiene posibilidades de que no se fracture, aunque, como se evidencia en los casos; la mayoría de las veces sí termina fracturándose.

No existe mayor evidencia para poder concluir fehacientemente la fractura o no del cable, respecto de si el porcentaje de reducción del diámetro está dentro de la norma o no.

Quinta correlación

¿Hay relación entre los cables fracturados y no fracturados respecto al nivel de deterioro y si el porcentaje de reducción de la carga mínima de rotura actual está en norma?

Tabla 84

Correlación entre cables fracturados y no fracturados respecto al “nivel de deterioro” y “carga mínima de rotura”

Caso	¿Fracturado?	Nivel de deterioro	Carga rotura mín. actual / mín. norma AST A1023 / respecto a norma	Análisis correlacional global
1	Sí	Muy severo	30 474 kg / 56 500 kg / reducción 40%.	
2	No	Moderado-severo.	Corte A: 72 546 kg / 83 500 kg / reducción 14%. Corte B: 79 507 kg / 83 500 kg / reducción 5%.	
3	No	Leve.	61 967 kg / 65 000 kg / reducción del 4%.	Deterioro entre leve y severo para los cables no fracturados con una reducción respecto a la carga mínima señalada por norma del 4% al 14%.
4	Sí	Leve.	100 051 kg / 96 000 kg / No hay reducción.	Deterioro entre leve y muy severo para cables fracturados, independientemente de si carga de rotura mínima está por debajo o no de la especificada por norma.
5	Sí	Muy severo	Corte A: 76 808 kg / 98 900 kg / reducción 22,3%. Corte B: 83 427 kg / 98 900 kg / reducción 15,6%.	
6	Sí	Severo	93 800 kg / 114 000 kg / reducción 18%.	
7	Sí	Leve	No se realizó ensayo.	
8	Sí	Moderado-muy severo	Cable PB 41 278 kg / 98 900	

			kg/ reducción 58,7%
			Cable PE 62 236 kg / 98 900 kg/ reducción 37,8%
9	Sí	Leve- moderado	87 251 kg / 83 500 kg / No hay reducción
10	Sí	Leve	1520 daN / 1470 daN / No hay reducción
11	Sí	Moderado- muy severo	94 535.61 kg/ 103 000 kg/ reducción 8.2%

No se aprecia un único comportamiento de los cables no fracturados o fracturados, respecto de las cargas mínimas que soportan. Es decir, se aprecia en los casos de estudio, que un cable con niveles de deterioro entre leves y muy severos, tiene posibilidad de fracturarse o no, sin que sea un factor relevante si la carga de rotura mínima que soporta está dentro de la norma o no.

Sexta correlación

¿Hay relación entre los cables fracturados y no fracturados respecto al nivel de reducción del diámetro y la carga de rotura mínima?

Tabla 85

Correlación entre cables fracturados y no fracturados respecto al “nivel de deterioro”, “diámetro actual” y “carga mínima de rotura”

Caso	¿Fracturado?	Nivel de deterioro	Reducción de diámetro respecto a norma AST A1023 (máx. 4%)	Reducción carga mínima respecto a norma AST A1023	Análisis correlacional global
1	Sí	Muy severo	6% (fuera de norma)	40% (fuera de norma)	Los cables fracturados no necesariamente tienen reducción de diámetro y
2	No	Moderado-severo.	1,4% y 2,6%	5% y 14% (fuera de norma)	

3	No	Leve.	Dato dudoso	4% (fuera de norma)	carga de rotura mínima fuera de norma.
4	Sí	Leve.	Dato dudoso	No hay reducción.	Los cables no fracturados pueden tener carga de rotura mínima fuera de norma, pero sí una reducción de diámetro dentro de norma.
5	Sí	Muy severo	1,1% y 2,4%	15,6% y 22,3% (fuera de norma)	
6	Sí	Severo	Sin dato	18% (fuera de norma)	
7	Sí	Leve	2.7%	Sin dato	
8	Sí	Moderado-muy severo	3,8% y 0,7%	37,8% y 58,7% (fuera de norma)	
9	Sí	Leve-moderado	Sin dato	No hay reducción	
10	Sí	Leve	Sin reducción	No hay reducción	
11	Sí	Moderado-muy severo	Sin dato	8,2% (fuera de norma)	

Sí hay una relación directa entre la reducción del diámetro y la carga de rotura mínima respecto a la posibilidad de fractura del cable. Del análisis de datos de la Tabla precedente, se aprecia que en general, mientras mayor sea la reducción del diámetro respecto al máximo permitido por norma, mayor será la reducción de la carga de rotura mínima y por ende se favorece la posibilidad de fractura del cable, siendo en su mayoría el nivel de deterioro entre moderado y muy severo. Esto se puede notar en los mayores valores de reducción de carga que se presentan en los cables que se han fracturado.

Por otro lado, en los cables no fracturados la reducción de diámetro no rebasa el máximo permitido, a pesar de que sí hay una reducción de la carga mínima de rotura.

4.5 Diagnóstico de los casos evaluados

Como resultado de la recolección, análisis y correlaciones de la información cualitativa y cuantitativa de los casos de cables no fracturados y fracturados, se obtiene el diagnóstico del trabajo de investigación, a modo de conclusiones cruzadas agrupado en dos bloques: uno dedicado a los aspectos generales y el otro a las características directamente relacionados con los modos de falla, para los casos de cables de fracturados. Asimismo, para continuar con la secuencia hasta ahora desarrollada, se ordenan los lineamientos obtenidos según se refieran a cables “no fracturados”, “fracturados” y “fracturados-no fracturados”.

4.5.1 Aspectos generales

Cables no fracturados:

De los dos (2) cables no fracturados se encontró lo siguiente:

- Se consideran como características comunes: la existencia de algunos rastros de lubricación, por lo que el nivel de deterioro se encuentra entre los niveles leve y severo (no llega a ser “muy severo”), y que sí es posible una reducción de la carga mínima de rotura sin que se produzca la fractura de un cable.
- Se observa menor nivel de deterioro cuando el cable presenta rastros de lubricación.
- La reducción del diámetro no llega al máximo permitido del 4%.
- Se observa una reducción de la carga mínima de rotura hasta del 14%.
- El medio de operación ha sido tanto en medio sumergido como no sumergido.
- Hay una relación inversa entre el nivel de deterioro y el nivel de lubricación, ya que cuando los cables no presentan lubricación tienden a deteriorarse de manera más significativa; y una relación directa entre la agresividad del medio y el nivel de deterioro, siendo el servicio en ambiente sumergido (es decir, cuando el cable está sumergido y sale a la superficie continuamente) el más agresivo.
- Cuando el cable se usa en zona no sumergida el nivel de deterioro que se alcanza se encuentra entre leve y moderado, siempre y cuando hallan indicios de lubricación; sin embargo, será severo cuando está en una zona sumergida y no tiene lubricación.
- La reducción del diámetro del cable se presenta a partir del nivel de deterioro “moderado”; sin embargo, ésta no excede el máximo permitido por la norma ASTM A1023 de 4%. Incluso se advierte que, con un nivel de deterioro “severo”, el diámetro del cable podría seguir estando dentro del desgaste permitido por dicha norma.
- Las reducciones en paralelo del diámetro del cable y la carga a la rotura mínima se presentan cuando el nivel de deterioro llega a ser “moderado” o mayor. La reducción de la carga mínima de rotura esta mejor relacionada con el aumento del nivel de deterioro del cable en comparación con la reducción del diámetro.
- No es concluyente la agresividad del medio en que se han utilizado los cables, aunque es lógico suponer que mientras más agresivo es el medio en que se usa, es posible que el nivel de deterioro aumente y llegue a ser muy severo

Cables fracturados:

De los nueve (9) cables fracturados se encontró lo siguiente:

- El nivel de deterioro se encuentra entre leve y muy severo, y mayoritariamente se encuentran rastros de lubricación.
- El material típico de los alambres de la mayoría de los cables evaluados (5 de los 9 cables fracturados) es acero de alto carbono y su microestructura es martensita revenida.
- En los casos en que se tiene el dato del diámetro de las poleas en servicio con el cable, dos de los tres casos no poseen el diámetro adecuado que recomienda las normas y las buenas prácticas indicadas en el marco teórico, lo cual evidencia un descuido sobre este aspecto crítico que incide en la preservación de la integridad de los cables.
- Respecto a la carga mínima de rotura, se observan niveles de reducción desde nula hasta el 58,7%.
- En cuanto al tiempo de servicio, los cables se han fracturado con tiempos de servicio desde los 20 días (caso N° 4) hasta 1 año 8 meses (caso N° 5), lo que indica que la magnitud de este atributo no es concluyente para el diagnóstico de fallas en los cables de acero.
- La mayoría de los cables fracturados han estado operando en ambiente sumergido (5 casos de los 9 fracturados).
- En los cables fracturados, el nivel de deterioro y el medio de operación no están relacionados directa o inversamente. Hay cables que operan en zonas no sumergidas y el deterioro se encuentra entre “leve” y “muy severo”; y otros que trabajan en zonas sumergidas y el deterioro también se encuentra entre “leve” y “muy severo”. En consecuencia, el nivel de deterioro del cable no se ve significativamente influenciado por el medio en el que opera.
- Al igual que en los cables no fracturados, el nivel de lubricación está inversamente relacionado con el nivel de deterioro; es decir, si el cable no tiene lubricación y está sumergido el deterioro se presenta de modo “muy severo”; al contrario, si el cable tiene una adecuada lubricación y no está sumergido, el nivel de deterioro es leve.
- No hay una relación definida entre el nivel de deterioro, el medio de operación y el modo de falla del cable. En general, el medio de operación no impacta en gran medida en el modo de falla del cable ni en el nivel de deterioro.
- Si el porcentaje de reducción del diámetro está por encima del máximo permitido por la norma (4%), el nivel de deterioro puede ser “muy severo”. Por otro lado, si no hay reducción en el diámetro, el nivel de deterioro por lo general es “leve”.
- El nivel de deterioro es “leve” en los casos en que no hay reducción de la carga mínima de rotura. Una reducción en la misma coincide con un nivel de deterioro entre “moderado” y “muy severo”.

- No existe un patrón único entre el nivel de deterioro y una determinada reducción del diámetro o de la carga mínima de rotura; lo que sí se observa es que el deterioro es “muy severo” si la reducción del diámetro está por encima de lo permitido por norma y la carga mínima de rotura está por debajo de lo indicado por norma.

- El nivel de deterioro es indiferente respecto del tiempo de operación, ya que se aprecian tiempos de servicio de 1 año a más con niveles de deterioro leves y muy severos, lo que nos indica que “sólo” la influencia del tiempo de operación no es concluyente para la predicción de la falla del cable de acero.

- No existe un patrón único de nivel de deterioro en función de la carga mínima de rotura y el tiempo de servicio; sin embargo, se observa que el deterioro es “muy severo” cuando la carga mínima de rotura está debajo del mínimo indicado por norma y el tiempo de operación es mayor a 1 año.

Cables no fracturados y fracturados:

- Se observa una relación evidente entre el nivel de deterioro, el nivel de lubricación y la posibilidad de fractura del cable. Cuando el nivel de deterioro está entre “leve” y “severo” y hay rastros de cierta lubricación, no es típico que el cable se fracture. Por el contrario, para niveles de deterioro “muy severo”, donde casi no existe lubricación, es muy probable la fractura del mismo.

- No hay una relación clara entre el nivel de deterioro, el medio de operación y la posibilidad de fractura del cable. Se evidencia que cuando el nivel de deterioro está entre “leve” y “severo” y el cable no está sumergido, no se llegaría a fracturar. Sin embargo, si el nivel de deterioro sube hasta “muy severo”, con el cable no sumergido o sumergido; hay evidencia de que éste sí podría llegar a fracturarse.

- Los cables que han operado en medio sumergido completamente, se llegan a fracturar sin importar su nivel de deterioro.

- El nivel de lubricación es de vital influencia en la posibilidad de fractura o no del cable, a diferencia de otros atributos como las condiciones de operación o el nivel de deterioro.

- Un cable con nivel de deterioro entre “leve” y “severo”, aún con porcentaje de reducción del diámetro dentro de la norma, podría terminar fracturándose, según la mayoría de los cables fracturados evaluados (casos 5, 7, 8 y otros).

- No es concluyente la fractura o no de un cable, cuando confluyen el nivel de deterioro y la reducción o no de la carga de rotura. Es decir, que un cable puede tener niveles de deterioro entre “leve” y “muy severo”, con carga de rotura mínima en norma o no, y no tener claridad en la posibilidad de fractura o no.

- Sí hay una relación directa entre la reducción del diámetro y la carga de rotura mínima respecto a la posibilidad de fractura del cable. Se aprecia que, en general, mientras mayor sea la reducción del diámetro respecto al máximo permitido por norma, mayor será la reducción de la carga de rotura mínima y por ende se favorece la posibilidad de fractura del cable, siendo en su mayoría el nivel de deterioro entre “moderado” y “muy severo”. Esto se puede notar en los mayores valores de reducción de carga que se presentan en los cables que se han fracturado.

- Mayoritariamente, en los cables fracturados, la reducción del diámetro no llega al máximo permitido del 4% (8 casos de los 9 fracturados), pero sí es mayor que los casos de cables no fracturados.

4.5.2 Modos de falla

En referencia sólo a los nueve (9) cables fracturados evaluados, se tiene lo siguiente:

- Se han presentado tres tipos de morfologías o modos de falla en los alambres de los cables evaluados: por fretting-corrosion, por fatiga y por sobretensión; siendo el modo de fractura primario, aquel que muestra mayor porcentaje de alambres desflecados en la zona de fractura. El resto de modos de falla con menor preponderancia serán de niveles secundarios.

- Para los casos donde el modo de falla primario es por fretting-corrosion o fatiga (casos 1, 5, 7, 8, 9 y 11), el cable se termina de romper, mayoritariamente por sobretensión, debido a que el cable pierde sección hábil para soportar la carga actuante.

- El modo de falla por fretting-corrosion, estuvo presente en el 44% de los casos; la fatiga se presentó en un 89% de los casos; y finalmente, la sobretensión en el 89% de los casos analizados.

- En el 89% de los casos analizados concurren más de un modo de falla, siendo el más frecuente la falla por fatiga y sobretensión (44% de los casos). Lo anterior se explica dado que el mecanismo de falla inicia con la fractura de los alambres exteriores por fatiga para luego progresar a la fractura del resto del cable por sobretensión, debido a que los alambres restantes son rebasados en su capacidad de soportar la carga actuante.

- El modo de falla por sobretensión como fractura primaria y única, es decir, sin otros modos de fractura secundarios, se ha presentado en un solo caso (caso 10), el cual coincide con un caso de falla en un cable recubierto o protegido de los efectos agresivos atmosféricos, más no del abuso mecánico posible durante su manipulación.

- Cuando el modo de falla es la combinación de fatiga y sobretensión, el nivel de deterioro del cable puede ir desde “leve” a “muy severo”, ya que, a pesar de no presentar, necesariamente, fretting-corrosion, si puede presentar deterioro corrosivo generalizado (por ejemplo, el caso 11).

- No hay una relación definida entre el nivel de deterioro, el medio de operación y el modo de falla del cable que pueda presentar.
- En el cable fracturado se observa que, si el porcentaje de reducción del diámetro está por encima del máximo permitido por la norma y el modo de falla es el fretting corrosion, el nivel de deterioro es muy severo. También se aprecia que, si no hay reducción del diámetro y el modo de falla es sobretensión, el deterioro es leve.
- Para porcentajes de reducción del diámetro dentro de la norma los niveles de deterioro son distintos y van desde “leve” a “muy severo” pudiendo los modos de falla ser variados.

4.6 Buenas prácticas para el diagnóstico de modos de falla de los cables evaluados

Finalmente, se presenta un resumen o reporte de buenas prácticas para el apoyo inicial en el diagnóstico de modos de falla de cables de acero, con el soporte adicional de ser de utilidad para operar de manera preventiva también en las etapas previas a la fractura:

- Los cables que poseen rasgos de lubricación, tienen muchas posibilidades de no llegar a niveles de deterioro “muy severo” y por ende muchas posibilidades de no llegar a la fractura. A su vez es posible una reducción de la carga mínima de rotura. A mayor nivel de lubricación menos tendencia a la rotura.
- Una reducción del diámetro menor al máximo permitido del 4% no asegura la fractura o no del cable. Sin embargo, siempre la reducción es mayor en los cables fracturados.
- Mientras mayor sea la reducción de la carga mínima de rotura del cable, mayor será la tendencia a la fractura (como referencia, los cables no fracturados evaluados llegan a reducciones de la carga mínima de rotura hasta el 14%, mientras que los fracturados llegan hasta el 58,7% de reducción).
- Se observa una relación evidente entre el nivel de deterioro, el nivel de lubricación y la posibilidad de fractura del cable. Cuando el nivel de deterioro está entre “leve” y “severo” y hay rasgos de cierta lubricación, no es típico que el cable se fracture. Por el contrario, para niveles de deterioro “muy severo”, donde casi no existe lubricación es muy probable la fractura del mismo.
- El nivel de lubricación es de vital influencia en la posibilidad de fractura o no del cable, a diferencia de otros atributos como las condiciones de operación o el nivel de deterioro.
- La reducción del diámetro del cable se presenta a partir del nivel de deterioro “moderado”; sin embargo, esta reducción no excede el máximo permitido por la norma ASTM A1023, incluso con un nivel de deterioro “severo”.

- Las reducciones en paralelo del diámetro del cable y la carga a la rotura mínima se presentan cuando el nivel de deterioro llega a ser “moderado” o mayor.
- La reducción de la carga mínima de rotura esta mejor relacionada con el aumento del nivel de deterioro del cable en comparación con la reducción del diámetro.
- No es concluyente, la agresividad del medio en que se han utilizado los cables, aunque se ha comprobado que mientras más agresivo es el medio en que se usa, es posible que el nivel de deterioro aumente y llegue a ser muy severo. La mayoría de los cables se fracturan cuando operan en ambiente sumergido.
- El nivel de deterioro y el medio de operación no están relacionados con la posibilidad directa de llegar a la fractura, ni tampoco si se incluye a algún modo de falla definido; sin embargo, si el nivel de deterioro sube hasta “muy severo”, con el cable no sumergido o sumergido, hay evidencia de que éste sí podría llegar a fracturarse.
- El material típico de los alambres de un cable de acero trenzado, basados en una muestra de 11 cables, es acero de alto carbono con microestructura típica de martensita revenida.
- El atributo referido al tiempo de servicio no es concluyente para el diagnóstico de fallas en los cables de acero.
- No existe un patrón único entre el nivel de deterioro y una determinada reducción del diámetro o de la carga mínima de rotura; tampoco entre nivel de deterioro en función de la carga mínima de rotura y el tiempo de servicio; sin embargo, se observa que el deterioro es “muy severo” cuando la carga mínima de rotura está debajo del mínimo indicado por norma y el tiempo de operación es mayor a 1 año.
- El nivel de deterioro de un cable es indiferente respecto del tiempo de operación, no siendo concluyente para la predicción de fallas de cables de acero.
- No es concluyente la fractura o no de un cable, cuando confluyen el nivel de deterioro y la reducción o no de la carga de rotura.
- En general, mientras mayor sea la reducción del diámetro respecto al máximo permitido por norma, mayor será la reducción de la carga de rotura mínima y por ende se favorece la posibilidad de fractura del cable, siendo en su mayoría el nivel de deterioro entre “moderado” y “muy severo”.
- En zonas de operación con atmósfera salina agresiva son típicas las morfologías o modos de falla por fretting-corrosion, por fatiga y por sobretensión. En nuestra investigación el fretting-corrosion, estuvo presente en el 44% de los casos, la fatiga en un 89%, y la sobretensión en el 89% de los casos analizados.

- Para los casos donde el modo de falla primario es por fretting-corrosion o fatiga el cable se termina de romper, mayoritariamente por sobretensión, debido a que el cable pierde sección hábil para soportar la carga actuante.
- Un cable recubierto es protegido de los efectos agresivos atmosféricos, más no del abuso mecánico posible durante su manipulación.
- Cuando el modo de falla es la combinación de fatiga y sobretensión, el nivel de deterioro del cable puede ir desde “leve” a “muy severo”, ya que, a pesar de no presentar necesariamente, fretting-corrosion, si puede presentar deterioro corrosivo generalizado.
- En diámetro adecuado de las poleas de los cables es un atributo importante para evitar la reducción del diámetro y deterioro del cable. Esta indicación está contenida en las normas y buenas prácticas referidas al buen tratamiento de los cables de acero.
- Tomando en cuenta que en el 89% de los casos estuvo presente la fatiga del cable, es necesario implementar medidas para su prevención y detección temprana, la cual incluye necesariamente la ausencia de cualquier tipo de abuso mecánico.



Conclusiones

Los cables de acero trenzado son elementos mecánicos de amplio uso, que operan acompañados de otros elementos mecánicos, siendo relativamente fáciles de manipular, lo que los deja muy expuestos a ser mal utilizados (abuso mecánico). En esta línea, la evidente casuística internacional documentada y la de nuestro país poco documentada (pero muy observada en los diversos tipos de industria nacionales), según los antecedentes descritos al inicio de la presente investigación, han conllevado a rescatar y refrescar la extensa normativa internacional referida al buen tratamiento de dichos elementos mecánicos. Para esto, también ha sido necesario recopilar la información necesaria sobre diagnóstico, análisis de falla y las herramientas metodológicas para el procesamiento de informes técnicos históricos relacionados a una muestra de once (11) evaluaciones de cables de acero fracturados, incluidos algunos casos de cables no fracturados como una apuesta para enriquecer la presente investigación.

La variabilidad de la data técnica proveniente de los resultados de ensayos y análisis, debe contribuir a aumentar la credibilidad del proceso de análisis, correlaciones y delineamientos obtenidos sobre el deterioro hasta la falla de los cables de acero y puedan ser tomados con un alto grado de confianza por parte de los profesionales que están a cargo del mantenimiento preventivo de este tipo de elementos mecánicos. Las correlaciones y propuestas de esta investigación sirven de línea base para el diagnóstico, no sólo de los diversos modos de falla, sino de algunas líneas de prevención que alarguen en lo posible el tiempo de vida del cable sin llegar a la fractura abrupta, la cual se ha indicado como muy peligrosa.

El método de tratamiento de información denominado de “estudio de casos múltiples” (Yin, 2009), ha sido el modelo adecuado para la organización, análisis y correlación de la información de tipo cualitativa y cuantitativa contenida en la muestra seleccionada; sin embargo, se han aplicado algunas adaptaciones durante el tratamiento de la información por tratarse de informes netamente ingenieriles. Esto se demuestra, por ejemplo, con el uso de cuestionarios de preguntas para el recojo y análisis de la información, los cuales han requerido el reconocimiento previo de criterios o atributos tecnológicos propios de la estructura de un informe técnico de mecánica forense utilizado en el rubro de la Ingeniería Mecánico Eléctrica.

Como un aporte de la presente investigación al análisis cualitativo de un cable de acero siguiendo el método indicado previamente, se ha propuesto una tabla empírica sobre el atributo “nivel de deterioro” (tabla 5), teniendo en cuenta sus características macroscópicas más visibles como son: tiempo de servicio, apariencia superficial (que incluye una visión macro del deterioro corrosivo) y nivel de lubricación. El tiempo de servicio se obtiene del informe técnico, mientras la apariencia superficial y nivel de lubricación son fruto netamente de la experiencia del asesor del trabajo de investigación (15 años en el rubro). Este atributo ha sido utilizado como eje principal para el análisis correlacional causal, del cual resultan los lineamientos del diagnóstico, dado el impacto que establece en los primeros instantes en que se determinan, tanto el estado del cable aún no fracturado, como los diversos modos de falla de los cables fracturados.

Como una selección de los rubros más importantes que aborda el diagnóstico y las buenas prácticas propuestas se puede indicar lo siguiente:

- El nivel de lubricación es de vital importancia, tanto así que sólo la existencia de rastros en el cable aumenta su tiempo de vida. Esto es un factor común en los casos de cables no fracturados donde no se llega a niveles de deterioro “muy severo”.
- Siendo el máximo permitido para el uso de cables la pérdida 4% de diámetro, no se asegura la fractura o no de los mismos incumpliendo esta norma. Esto debido a la contribución favorable o no del resto de atributos tecnológicos.
- Es casi inevitable, en el tiempo de servicio del cable, cumplir con el sostenimiento de la carga mínima de rotura, si no se realiza mantenimiento preventivo en lo referido a la lubricación. Si no se lubrica el cable (menor lubricación), los alambres se deterioran (mayor deterioro), perdiendo sección transversal (menor diámetro) y por ende resistencia mecánica (menor carga de rotura mínima).
- La agresividad del medio no es concluyente cuando se necesita predecir el tiempo de vida de un cable. Si se presenta el ambiente más agresivo como es el sumergido, con períodos de secado y lavado, se puede reponer la lubricación y seguir controlando el nivel de deterioro. Por otro lado, si se encuentra en un ambiente no tan agresivo y no se mantiene lubricado por negligencia o desconocimiento, el nivel de deterioro aumenta.
- El atributo “nivel de deterioro” enmarcado en la presente investigación y referido a los cables fracturados, es indiferente al tiempo de operación que han podido tener; ya que, como en otras correlaciones efectuadas, existen otros atributos, como en este caso el modo de falla (por ejemplo, por sobretensión), que afectan la correlación.
- En atmósferas costeras, como las de la presente investigación, con un nivel de agresividad muy alto, incluso si el cable no está sumergido, son típicas las morfologías o modos de falla por fretting-corrosion, por fatiga, por sobretensión; además existirán zonas alrededor de las zonas fracturadas con corrosión localizada tipo picaduras e inclusiones de sales.

- Los modos de falla de los alambres desflecados pueden ser, por un lado, primarios, cuando la cantidad de estos representa el mayor porcentaje; y secundarios, cuando se refieren al resto de modos de falla presentes en la zona de fractura.
- Para los casos donde el modo de falla primario es por fretting corrosion o fatiga, el cable se termina de romper, mayoritariamente por sobretensión, debido a que el cable pierde sección hábil para soportar la carga actuante.
- El modo de falla más frecuente en una muestra de casos de cables que operan en una zona costera es la combinación fatiga y sobretensión (44% de los casos). La falla inicia con la fractura de los alambres exteriores por fatiga para luego progresar a la fractura del resto del cable por sobretensión; sin embargo, es casi imposible que en los alrededores a la fractura no existan zonas con corrosión localizada incluso generalizada.
- Es necesario adecuar el diámetro de las poleas por donde van a circular los cables para evitar la reducción del diámetro y el deterioro del cable. Esta indicación está contenida en las normas y buenas prácticas referidas al buen tratamiento de los cables de acero.
- Tomando en cuenta que en el 89% de los casos estuvo presente la fatiga, como modo de falla del cable, es necesario implementar medidas para su prevención y detección temprana, la cual incluye necesariamente la ausencia de cualquier tipo de abuso mecánico.

La inclusión de dos casos de cables no fracturados en la muestra permite aproximar lineamientos preventivos al período previo a la fractura abrupta, la cual casi nunca permite determinar la causa exacta del modo de falla, observado en el elemento postfalla. Así mismo, la inclusión de un cable recubierto fracturado, corrobora el nivel de protección a la atmósfera o medio circundante, que se adquiere con esta configuración; sin embargo, también se comprueba el nivel de sobrecarga o de abuso mecánico que puede llegar a presentarse sobre un cable de dichas características.

A modo de insistencia y corroboración, las buenas prácticas propuestas en la presente investigación están referidas a una muestra de 11 casos de evaluación de cables de acero, 09 fracturados y 02 no fracturados, que han operado en un ambiente costero en la zona norte del país y en diversas sollicitaciones mecánicas. Si bien es cierto, el tamaño de la muestra parece algo significativa y se analiza siguiendo una metodología reconocida mundialmente, no se pretenden generalizar los aportes sobre muestras similares en otras regiones del mundo.



Referencias bibliográficas

- Acciona. (2020). https://www.acciona.com/es/energias-renovables/?_adin=02021864894.
- American Petroleum Institute [API] (1999). *API RP9B-99, Recomendado Practice on Application, Care, and Use of Wire Rope for Oilfield Service*.
- Castejón, A. & Santamaria, G. (2010). *Instalaciones solares fotovoltaicas*. Madrid: Editex S.A.
- Castro, E. (2010). El estudio de casos como metodología de investigación y su importancia en la dirección y administración de empresas. *Revista nacional de administración*, 1(2), 31-54. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3693387>
- Ceballos-Herrera, F. (2009). El Informe de Investigación con Estudio de Casos. *Magis. Revista Internacional de Investigación en Educación*, 1(2). 413-423. Pontificia Universidad Javeriana. Colombia. ISSN: 2027-1174. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=281021548015>.
- Cía. Ítalo Percossi e Hijos [IPH] (2017). Cables de acero para uso general. <https://www.iphglobal.com/uploads/downloads/296763001513024041.pdf>
- Cía. Productos de Acero S.A. [Prodinsa] (2020). Información técnica de cables de acero (1). <https://prodinsa.cl/wp-content/uploads/2020/12/Catalogo-Cables-acero.pdf>
- Cía. Transportes y Trincajes del Mediterráneo S.I [TTM] (s.f.). Cables de acero guía definitiva. <https://www.ttmediterraneo.com/cables-de-acero-guia-definitiva/>
- Diccionario de la lengua española (2022). <https://dle.rae.es>. Consultada el 24.11.2022
- Durán, M. (2014). El Estudio de Caso en la Investigación Cualitativa. *Revista Nacional de Administración*, 3(1), 121–134. <https://doi.org/10.22458/rna.v3i1.477>
- Erena, D. (2019). Paliativo frente a fatiga por fretting y análisis del proceso de fatiga en cordones metálicos. Sevilla, España.
- Escuela de Dirección de la Universidad de Piura [PAD] (s.f.). Aprende Cómo Hacer Un Diagnóstico Organizacional Altamente Efectivo. [Entrada de blog]. <https://blog.pad.edu/como-realizar-un-diagnostico-completo-de-tu-organizacion>.
- Espejo, E. & Martínez, J. (abril de 2007). Caracterización de modos de falla típicos en cables de transmisión mecánica. *Revista Ingeniería e Investigación*, 77-83. Obtenido de

http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0120-56092007000100010&lng=en&nrm=is&tlng=en

- Feldman, A., Kalech, M. y Provan, G. (2013). *Forewords*. Proceedings of The 24th International Workshop on Principles of Diagnosis, Jerusalem. P. 5
- Ford Motor Company (2011). *Failure Mode and Effects Analysis. FMEA Handbook* (Versión 4.2). Ford Motor Company.
- Gestiopolis (2022). <https://www.gestiopolis.com/herramientas-para-el-diagnostico-organizacional/>. Consultada el 24.11.2022.
- Gomez, H., & Wilches, J. (2003). Mecanismos y modos de falla en cables metálicos estructurales. (U. D. Norte, Ed.). *Revista Ingeniería y Desarrollo* (14), 125-140.
- González, C. (2008). En Palma, J. y Marín, J. (Eds.) *Inteligencia Artificial. Métodos, Técnicas y Aplicaciones*. McGraw-Hill, España. p. 473.
- Guerrero, R. (2011). Integridad Estructural y Modos de Fallas. *Curso de Materiales en la Industria de la Maestría en Ingeniería Mecánico-Eléctrica, Universidad de Piura*.
- International Electrotechnical Commission [IEC] (2015). *Electropedia: The World's Online Electrotechnical Vocabulary*. <https://www.electropedia.org/>
- International Organization for Standardization [ISO] (2016). *ISO-14224, Petroleum and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment*.
- Jaramillo H., Alba N., Canizales J. & Toro A. (2008). *Introducción a la Mecánica de la Fractura y Análisis de Fallas* (1.a ed.). Dirección de Investigaciones y Desarrollo Tecnológico de la Universidad Autónoma de Occidente – Colombia
- Jiménez, V. & Comet, C. (2016). Los estudios de casos como enfoque metodológico. *ACADEMO Revista de Investigación en Ciencias Sociales y Humanidades*, 3(2). Artículo aceptado para Publicación. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5757749>
- Jiménez, V. (2012). El estudio de caso y su implementación en la investigación. *Revista de Investigación en Ciencias Sociales*, 8(1), 141-150.
- Lameda, C. (2015). Métodos Relacionados con Diagnósticos de Fallas con Síntomas Imprecisos Mediante Comparación de Casos. *Revista Digital de Investigación y Postgrado*, 5(3). 851-865. Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre”, Vicerrectorado Barquisimeto. Venezuela. ISSN: 2244-7393. <http://redip.bqto.unexpo.edu.ve>.
- Martínez, P. (2006). El método de estudio de caso: estrategia metodológica de la investigación científica. *Revista Pensamiento & Gestión*, (20), 165-193. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=64602005>

- Moubray, J. (1997). *Reliability-Centred Maintenance* (2da ed.). Butterworth-Heinemann.
- Moy, J. (2003). *Seminario Aspectos Metodológicos para el Análisis de Fallas*, Universidad del Valle. Escuela de Ingeniería Mecánica.
- National Aeronautics and Space Administration [NASA] (2000). *Reliability Centered Maintenance Guide for Facilities and Collateral Equipment*. NASA
- Nota Técnica de Prevención [NTP] 155 (s.f.). Cables de acero. Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo del gobierno español.
- Ossa, A., & Paniagua, M. (2005). Analisis de falla en cable de axcero. *INGENIERIA Y CIENCIA*, 1(2), 97-103.
- Pérez Serrano, G. (1994). *Investigación cualitativa. Retos, interrogantes y métodos*. La Muralla. España.
- Peterka, P., Kresak, J., Kropuch, S., Fedorko, G., Molnar, V., & Vojtko, M. (2014). Failure analysis of hoisting steel wire rope. *Engineering Failure Analysis*, 45, 96-105. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350630714001897>
- Rivera, J. (2008). Análisis de falla del cable de un sistema sincroelevador de barcos (Tesis de Pregrado). Universidad de los Andes, Bogota, Colombia.
- Rumiche, F. (2020). *Análisis de Falla Metalúrgico Casos de Aplicación en la Industria Peruana* (Trabajo de grado). Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Serrano, J. C. (2016). *Configuración de Instalaciones Solares Fotovoltaicas*. España: Paninfo SA.
- Society of Automotive Engineering [SAE] (2002). *SAE J1739: Potential Failure Mode and Effects Analysis in Design (Design FMEA) and Potential Failure Mode and Effects Analysis in Manufacturing and Assembly Processes (Process FMEA) and Effects Analysis for Machinery (Machinery FMEA)*. SAE International.
- Sotelo-Rosas, O. & Ramírez-Carrera, L. (2004). Del método científico al diagnóstico de problemas de ingeniería en México. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 6(2), 139-146. División de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de Orizaba, Maestría en Ciencias en Ingeniería Administrativa.
- Vallejos Díaz, Y. A. (2008). Forma de hacer un diagnóstico en la investigación científica. Perspectiva holística. *Revista Teoría y Praxis Investigativa*, 3(2), 11-21. Septiembre - diciembre de 2008. Centro de Investigación y Desarrollo (CID). Fundación Universitaria del Área Andina.
- Vega de Kuyper, J. C., & Ramirez, S. (2014). *Fuentes de energía, renovables y no renovables. Aplicaciones*. México: Alfa Omega.
- Vignolo Cueva, G. (s.f.). Recursos Energéticos Renovables: aproximaciones conceptuales y determinación de su necesidad de implementación en el Perú. *Recursos Energéticos*

Renovables: aproximaciones conceptuales y determinación de su necesidad de implementación en el Perú.

- Villareal, O. & Landeta, J. (2010). El estudio de casos como metodología de investigación científica en dirección y economía de la empresa. Una aplicación a la internacionalización. *Revista de Investigaciones Europeas de Dirección y Economía de la Empresa*, 16(3), 31-52, ISSN: 1135-2523.
- Wang, D., Zhang, D., & Shirong, G. (2014). Effect of terminal mass on fretting and fatigue parameters of a hoisting rope during a lifting cycle in coal mine. *Engineering Failure Analysis*, 36, 407-422. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350630713003634>
- Yin, R. K. (2009). *Case Study Research. Design and Methods*. Applied Social Research Methods Series, v. 5 (4.a Ed.). Sage Publications.
- Zhang, D., Chen, K., Jia, X., Wang, D., Wang, S., Luo, Y., & Ge, S. (octubre de 2013). Bending fatigue behaviour of bearing ropes working around pulleys of different materials. *Engineering Failure Analysis*, 33, 37-47. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350630713001544>

