

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**ANÁLISIS DE FALLA DE UN CABLE METÁLICO DE 7/16” DE
DIÁMETRO DE ARREGLO 6 X 36 CON ALMA DE ACERO USADO EN
EL IZAJE DE CARGAS.**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Mecánico

AUTOR:

RODRIGO ALEJANDRO FLORES ZÚÑIGA

ASESOR:

MG. ING. RAÚL CARLOS HURTADO ESPEJO

Lima, Octubre, 2023

Informe de Similitud

Yo, **RAÚL CARLOS HURTADO ESPEJO**, docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis titulada: **ANÁLISIS DE FALLA DE UN CABLE METÁLICO DE 7/16" DE DIÁMETRO DE ARREGLO 6 X 36 CON ALMA DE ACERO USADO EN EL IZAJE DE CARGAS**, del autor **RODRIGO ALEJANDRO FLORES ZÚÑIGA**, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de **10%**. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el **13/10/2023**.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: Lima 13 de octubre de 2023.

| | |
|---|---|
| Apellidos y nombres del asesor / de la asesora: <u>HURTADO ESPEJO, RAÚL CARLOS</u> | |
| DNI: 10610827 | Firma  |
| ORCID: 0000-0002-8511-1767 | |

RESUMEN

La presente tesis considera las principales actividades llevadas a cabo durante el análisis de falla de un cable metálico de 7/16” de diámetro de arreglo 6 x 36 con alma de acero, cuya fractura se dio durante el izaje de una carga de 1 tonelada como parte del proceso de triturado de mineral de una empresa minera, en un puente grúa de 10 toneladas de capacidad nominal. Las muestras del cable recogidas llegaron al Laboratorio de Materiales de la PUCP con señales de desgaste y exceso de grasa.

Este estudio describe la falla y las circunstancias que la rodean, examina la naturaleza de la rotura, evalúa la composición química y propiedades mecánicas del cable para comprobar que sus características cumplan las que se indican en las normas. Además, centra su atención, en las principales actividades llevadas a cabo durante el análisis de falla del cable de acero: inspección visual, análisis fractográfico, análisis metalográfico, ensayos de tracción y de análisis químico.

Finalmente, los resultados indican que la causa más probable de falla es sobrecarga. Esto debido a las fracturas de tipo dúctil, encontradas en las superficies de fractura de los alambres, de los cuales está compuesto el cable. Esta sobrecarga indica que la falla es por el izaje de una carga de mucho mayor peso que la que indica el usuario. Asimismo, se plantean conclusiones y recomendaciones.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia por todo el amor y el apoyo que me supieron dar a lo largo de mi vida, en especial a mis padres sin cuyo apoyo económico y moral no podría haber culminado esta tesis. A mi madre por su amor incondicional, el cual es la más grande motivación de mi día a día y de mi buen humor. A mi papá por enseñarme a cumplir con mis deberes sin importar las dificultades. A mis hermanos, quienes nunca permiten que me sienta solo o triste. A mi hermano Alvaro por enseñarme a tener un carácter férreo al tomar decisiones difíciles y a mi hermana Lorena que tiene la cualidad de hacerme reír de cualquier cosa en cualquier momento. A mis abuelos por darme los valores bajo los cuales tomo las decisiones más importantes de mi vida. A mi “Mamá Chavelita”, todo lo lejos que pueda llegar en mi vida ha sido gracias al cariño, paciencia y entrega que haz tenido conmigo desde que nací, todos mis logros son también tuyos. A mi abuelo Juan “El Chugas” Zúñiga, el mejor mecánico de motores Diesel de Hualgayoc. A mis amigos de la universidad y de trabajo, cuyas amenas conversaciones hicieron pasable los trabajos más tediosos. A la sección de ingeniería mecánica, en especial al Laboratorio de Materiales por darme todas las facilidades para el desarrollo de esta tesis. A mi asesor el Ing. Raúl Hurtado por su paciencia y ejemplo de profesionalismo. Y por último a mi perro Apolo, mi mejor amigo, por despertarme todas las mañanas a hacer ejercicio, terminar la tesis y respirar aire puro.

TEMA DE TESIS

| | |
|-------------------|---|
| PARA OPTAR | : Título profesional de Ingeniero Mecánico |
| TEMA | : "ANÁLISIS DE FALLA DE UN CABLE METÁLICO DE 7/16" DE DIÁMETRO DE ARREGLO 6 X 36 CON ALMA DE ACERO USADO EN EL IZAJE DE CARGAS" |
| ÁREA | : Materiales |
| ASESOR | : Mg. Ing. Raúl Carlos Hurtado Espejo |
| ALUMNO(S) | : Rodrigo Alejandro Flores Zúñiga |
| CÓDIGO | : 20105788 |
| FECHA | : 13/03/2023 |
| MÁXIMO | : 100 páginas |

DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS:

En los últimos años, una de las actividades económicas más importantes en el Perú ha sido la minería. En el 2019, la demanda interna del sector de minería metálica aumentó en un 50% en comparación con la del 2007 según el BCRP. Actualmente, a pesar del contexto pos pandemia, las empresas mineras tienen como una de sus principales prioridades que las operaciones extractivas y de procesamiento mineral cuenten con maquinaria moderna, segura y eficiente. En el caso específico de una compañía minera del medio, la cual se dedica a la extracción de plomo, zinc, cobre y plata, emplea sistemas de izaje para trasladar el material minero entre los diferentes procesos. En alguna ocasión, el cable metálico, uno de los elementos de mayor importancia en estos sistemas de izaje, falló durante la maniobra de traslado de carga en el proceso de triturado. Por lo expuesto, la presente tesis tiene como objetivo determinar la causa más probable de la falla de un cable metálico de 7/16" de diámetro y de arreglo 6 x 36 empleado en sistemas de izaje de material minero. Para ello, se empleará inspección visual, análisis fractográfico, análisis metalográfico, ensayos de tracción y análisis químico. Finalmente, la tesis expondrá los resultados de los ensayos y presentará el análisis de los mismos para determinar la causa más probable de la falla del cable.



FACULTAD DE
**CIENCIAS E
INGENIERÍA**



PONTIFICIA
**UNIVERSIDAD
CATÓLICA**
DEL PERÚ

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

**“ANÁLISIS DE FALLA DE UN CABLE METÁLICO DE 7/16” DE DIÁMETRO DE
ARREGLO 6 X 36 CON ALMA DE ACERO USADO EN EL IZAJE DE CARGAS”**

Introducción

1. Revisión de la literatura.
2. Metodología del análisis de falla.
3. Análisis y Discusión de resultados.

Conclusiones y recomendaciones

Bibliografía

Anexos



Mg. Ing. Raúl Carlos Hurtado Espejo
Asesor

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | Pág. |
|---|------|
| RESUMEN | I |
| INDICE DE TABLAS | VI |
| INDICE DE FIGURAS | VII |
| INTRODUCCIÓN | XI |
| OBJETIVOS | XII |
| CAPÍTULO 1. REVISIÓN DE LA LITERATURA | 1 |
| 1.1. ¿QUÉ ES UN EQUIPO DE ELEVACIÓN DE CARGA? | 1 |
| 1.2. ¿QUÉ ES UN CABLE?..... | 2 |
| 1.3. ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DE LOS CABLES DE ACERO | 4 |
| 1.3.1. Definiciones de torón, alma y cable: | 4 |
| 1.3.2. Alambres usados en cables: | 7 |
| 1.3.3. Definición de diámetros: | 12 |
| 1.3.4. Grados de resistencia del cable:..... | 13 |
| 1.4. SISTEMAS DE FABRICACIÓN DE TORONES Y CABLES..... | 14 |
| 1.4.1. Sistema de torcido de torones y cables:..... | 14 |
| 1.4.2. Construcciones de torones:..... | 17 |
| 1.5. NOTACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS DE LOS CABLES DE ACERO..... | 20 |
| 1.5.1. Familia de cables. | 20 |
| 1.5.1. Elaboración de la notación. | 22 |
| 1.6. SOLICITACIONES COMUNES ENCONTRADAS EN LOS CABLES DE ACERO..... | 23 |
| 1.6.1. Tracción en los cables..... | 23 |
| 1.6.2. Flexión en los cables..... | 25 |
| 1.6.3. Fatiga de los alambres | 25 |
| 1.6.4. Aplastamiento..... | 25 |
| 1.6.5. Abrasión en el cable | 27 |
| 1.6.6. Resistencia a la rotación | 28 |
| 1.6.7. Lubricación de los cables | 29 |
| 1.6.8. Aflojamiento de los alambres exteriores | 30 |
| 1.6.9. Defectos del montaje | 30 |
| 1.6.10. Corrosión | 32 |
| 1.7. ANÁLISIS DE FALLA..... | 33 |
| 1.7.1. ¿Cómo se define una falla?..... | 33 |
| 1.7.2. ¿Qué es un Análisis de falla?..... | 33 |
| 1.7.3. Fases del análisis de falla..... | 34 |
| 1.8. FRACTOGRAFÍA | 36 |
| 1.8.1. Tipos de Fractografía..... | 36 |

| | |
|---|-----------|
| 1.8.2. Tipos de fracturas: | 36 |
| CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS DE FALLA | 44 |
| 2.1. INSPECCIÓN VISUAL..... | 45 |
| 2.2. CONTROL DIMENSIONAL..... | 46 |
| 2.3. ANÁLISIS FRACTOGRÁFICO..... | 48 |
| 2.4. ANÁLISIS METALOGRÁFICO..... | 49 |
| 2.5. ENSAYO DE TRACCIÓN..... | 53 |
| 2.6. ANÁLISIS QUÍMICO..... | 55 |
| 2.6.1. Análisis de carbono y azufre por combustión..... | 55 |
| 2.6.2. Espectrometría por absorción atómica..... | 59 |
| CAPÍTULO 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS..... | 63 |
| 3.1. INSPECCIÓN VISUAL..... | 63 |
| 3.2. CONTROL DIMENSIONAL..... | 69 |
| 3.3. ANÁLISIS FRACTOGRÁFICO..... | 72 |
| 3.4. ANÁLISIS METALOGRÁFICO..... | 76 |
| 3.5. ENSAYO DE TRACCIÓN..... | 79 |
| 3.6. ANÁLISIS QUÍMICO:..... | 82 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 83 |
| CONCLUSIONES..... | 83 |
| RECOMENDACIONES..... | 84 |
| BIBLIOGRAFÍA | 85 |
| ANEXO A: PROCESO DE TREFILADO DE ALAMBRES..... | 90 |
| ANEXO B: TIPOS DE CABLES SEGÚN SU FABRICACIÓN..... | 91 |
| ANEXO C: PREFORMACIÓN DE CABLES | 93 |
| ANEXO D: FOTOGRAFÍAS DEL CONTROL DIMENSIONAL..... | 96 |
| ANEXO E: RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE CARBONO Y AZUFRE EN EL ANALIZADOR POR COMBUSTIÓN | 99 |

INDICE DE TABLAS

| | Pág. |
|---|------|
| Tabla 1. Resistencias mínimas a la rotura de alambres según su diámetro..... | 7 |
| Tabla 2. Grados o niveles de resistencia de los alambres según la resistencia del cable en el que se van a usar..... | 8 |
| Tabla 3. Masa aproximada, fuerza mínima de rotura y rango de diámetro de los cables de la clasificación 6x36 con alma de acero..... | 13 |
| Tabla 4. Rangos de los diámetros según la clasificación de los cables de acero según su construcción..... | 21 |

| | |
|--|----|
| Tabla 5. Arreglos de pruebas de fatiga en alambres con sus respectivas zonas de máximo esfuerzo en su sección..... | 24 |
| Tabla 6. Holgura (espacio extra) en las ranuras de las poleas en base al diámetro nominal del cable metálicos..... | 27 |
| Tabla 7. Rangos de diámetros (en mm) para cada tipo de alambre encontrado en el cable. ... | 71 |
| Tabla 8. Resultados del análisis fractográfico del cable de acero con falla..... | 74 |
| Tabla 9. Valores de las probetas con falla y sin falla de máxima fuerza de tensión y deformación máxima..... | 82 |
| Tabla 10. Porcentajes en peso de los componentes químicos del cable metálico..... | 82 |

INDICE DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|------|
| Figura 1. Partes de una grúa puente..... | 1 |
| Figura 2. Modelo que muestra el recorrido del cable a lo largo de las poleas en un puente grúa. | 2 |
| Figura 3. Esquema de los distintos usos que se le dan al cable. | 3 |
| Figura 4. Sección de un torón de capa simple..... | 4 |
| Figura 5. Tipos de almas..... | 5 |
| Figura 6. Partes principales de un cable de torones trenzados..... | 6 |
| Figura 7. Elementos de un cable de acero..... | 11 |
| Figura 8. Sección transversal de un cable en donde se le acota el diámetro..... | 12 |
| Figura 9. Direcciones de torcido de los cables compuestos de torones. | 14 |
| Figura 10. Longitud de torcido de un torón y de un cable compuesto de torones. | 15 |
| Figura 11. Torcidos regulares (ordinarios) y Torcidos lang en sus sentidos izquierdo y derecho..... | 16 |
| Figura 12. Sección de un torón tipo “seale” y el valle en donde se asientan los alambres de la segunda capa. | 17 |
| Figura 13. Sección de un torón con alambres “filler” y el valle en donde se colocan estos alambres. | 18 |
| Figura 14. Sección de un torón del tipo warrington..... | 19 |
| Figura 15. Sección de un torón de patrón combinado en donde se usan patrones de tipo seale y warrington en su construcción. | 20 |
| Figura 16. Ejemplos de aplastamiento..... | 26 |
| Figura 17. Ejemplos de una superficie gastada, y otra con martilleo. | 28 |

| | |
|--|----|
| Figura 18. Duración de los cables con respecto a su resistencia para distintos tipos de engrases..... | 29 |
| Figura 19. Desenrollamientos de cables defectuoso y correctos. | 31 |
| Figura 20. Al estirar el cable con rizo o bucle (izquierda) se pueden producir cocas (derecha). | 31 |
| Figura 21. Fractura de un rizo que se da cuando intenta pasar por la polea | 32 |
| Figura 22. Superficie de fractura dúctil “copa-cono”..... | 38 |
| Figura 23. Superficie de fractura dúctil “fractura a 45°”..... | 39 |
| Figura 24. Fractura frágil por “clivaje”, separación a través de los granos e “intergranular”, separación en los límites de grano. | 40 |
| Figura 25. Superficie de fractura frágil lisa y perpendicular al esfuerzo aplicado. | 41 |
| Figura 26. Superficie de fractura frágil que se dio por clivaje y en donde se puede apreciar las marcas de “chevron”..... | 42 |
| Figura 27. Superficie de fractura por fatiga en donde se ven las “marcas de playa” y la “fractura final”..... | 43 |
| Figura 28. Aerosoles de líquido removedor que se usaron para limpiar los trozos de cable...45 | |
| Figura 29. Cortadora de disco “labotom-5” de la marca “struers” usado en la extracción de muestras de los segmentos del cable..... | 46 |
| Figura 30. Estereoscopio modelo “s6d” de la marca “leica” usado para realizar la inspección de muestras hasta con aumentos de 50x..... | 47 |
| Figura 31. Máquina de fabricación de briquetas modelo modelo “simplimet ii” marca “buehler”, usado en este análisis de falla..... | 50 |
| Figura 32. Discos para acabado fino con pasta de diamante de la marca “struers”..... | 51 |
| Figura 33. Microscopio modelo “dmi 5000” de la marca “leica”, con aumentos de 50 a 1000 usado en el ensayo de metalografía..... | 51 |
| Figura 34. Microestructura típica de los alambres, perlita alargada en un aumento de 100x..52 | |
| Figura 35. Máquina de ensayo de tracción marca zwick/roell, modelo z 250. | 54 |
| Figura 36. Injertos para elementos cilíndricos, usados para la mordaza de la maquina de ensayo de tracción de Zwick/Roell modelo Z 250, durante el ensayo de tracción. Este injerto es usado para elemento con diámetros entre 6 a15 mm..... | 54 |
| Figura 37. Balanza electrónica con la cual se pesaron los crisoles..... | 56 |
| Figura 38. Probeta para el analizador de carbono con el gramo de alambre cortado y el catalizador a base de tungsteno..... | 57 |
| Figura 39. Analizador de carbono y azufre por combustión usado en el laboratorio de materiales pupc. | 57 |
| Figura 40. Base cerámica que sostiene al crisol y por medio del cual se introduce en el horno. | 58 |

| | |
|---|----|
| Figura 41. Espectrometro de absorción atómica usado en el análisis químico..... | 59 |
| Figura 42. Muestras del cable junto con soluciones estandarizadas de manganeso, silicio y un “blanco”..... | 60 |
| Figura 43. Vista general del cable como fue recibido. Arriba se pueden apreciar los dos segmentos cortos unidos con cinta adhesiva y el segmento largo fijado con alambres..... | 63 |
| Figura 44. Exceso de grasa encontrado en el exterior del cable y como este propicia la acumulación de polvo y suciedad. | 64 |
| Figura 45. Exceso de grasa encontrado en el interior del cable y como este propicia la acumulación de polvo y suciedad. | 64 |
| Figura 46. Segmento “A”, las fracturas en sus extremos. La fractura de la derecha tiene una deformación plástica propia de un rizo que trató de pasar por una polea..... | 65 |
| Figura 47. Segmento “A”, las fracturas en sus extremos y una leve deformación plástica en el izquierdo..... | 66 |
| Figura 48. Segmento “C”..... | 67 |
| Figura 49. Doble permanente en el tramo “c” en donde se ven algunos alambres rotos en la periferia del cable debido a la formación de la coca..... | 68 |
| Figura 50. Uno de los extremos del segmento c, que presenta corte por máquina..... | 68 |
| Figura 51. Fractura encontrada en uno de los extremos del segmento c, que presenta un torón y un alambre alejado del resto del cable. | 69 |
| Figura 52. Muestra extraída del tramo “b” del extremo cortado por máquina en donde se ve la composición normal del cable en cuanto alambres..... | 70 |
| Figura 53. Sección transversal de la muestra tomada del tramo b aumentada a 10x, que corresponde con la configuración warrington seale con alma de acero a su derecha. | 71 |
| Figura 54. Sección transversal con los 4 tipos diferentes de calibres de alambres encontrados y denominados “1”, “2”, “3”, “4”..... | 71 |
| Figura 55. El extremo del tramo “a1” etiquetado, este extremo iba unido al tramo “c”. La fractura que comparten el tramo a y c será evaluada. | 73 |
| Figura 56. Torones separados junto con el alma del cable para su análisis fractográfico. | 73 |
| Figura 57. Imagen de alambre con rotura dúctil, que muestra la estricción típica de este tipo de rotura: copa-cono, vista con un aumento de 25x..... | 75 |
| Figura 58. Imagen de alambre con rotura tenaz, que muestra un plano de rotura de 45° con el eje longitudinal del alambre, vista con un aumento de 25x..... | 75 |
| Figura 59. Briqueta con la sección de los dos alambres a analizar en el ensayo de metalografía. | 76 |
| Figura 60. Inclusiones solidas tipo d serie gruesa de 1,5 a un aumento de 100x del alambre en una zona alejada de cualquier fractura en la briqueta antes de colocarle el nital al 2%. | 77 |
| Figura 61. Microestructura del alambre en una parte sin falla, constituida por una matriz de perlita fina y presencia de ferrita fina. Nital 2% en un aumento de 500x..... | 77 |

| | |
|--|-----|
| Figura 62. Microestructura del alambre en una parte con falla dúctil, constituida por una matriz de perlita fina y presencia de ferrita fina. Nital 2% con un aumento de 100x..... | 78 |
| Figura 63. Microestructura del alambre en una parte con falla tenaz, constituida por una matriz de perlita fina y presencia de ferrita fina. Nital 2% con un aumento de 100x..... | 78 |
| Figura 64. Probetas usadas en el ensayo de tracción: una con falla, asignada como “C1”, y otra sin falla, asignada como “C2”, ambas obtenidas del segmento “C” | 79 |
| Figura 65. Probeta C1 después del ensayo de tracción..... | 80 |
| Figura 66. Probeta C2 después del ensayo de tracción..... | 80 |
| Figura 67. Las curvas de las dos probetas se muestran en contraposición. La roja es la probeta sin falla y la celeste es la con falla. Se relaciona la fuerza en kn y el alargamiento en mm. ... | 81 |
| Figura A1. Proceso de estirado en donde se reduce la sección transversal. | 90 |
| Figura C1. Torón con alambres preformados que queda modelado antes de terminar de formar el cable | 93 |
| Figura D1. Sección del alma metálica y las medidas de los diámetros del alambre “1” | 96 |
| Figura D2. Sección del cable metálico y las medidas de los diámetros del alambre “2” | 96 |
| Figura D3. Sección del cable metálico y las medidas de los diámetros del alambre “2” | 97 |
| Figura D4. Sección de un torón lateral y las medidas de los diámetros del alambre “3” | 97 |
| Figura D5. Sección de un torón lateral y las medidas de los diámetros del alambre “4” | 98 |
| Figura E1. Resultados del primer ensayo realizado en el analizador por combustión..... | 99 |
| Figura E2. Resultados del segundo ensayo realizado en el analizador por combustión..... | 100 |
| Figura E3. Resultados del segundo ensayo realizado en el analizador por combustión..... | 101 |

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, una de las actividades económicas más importantes en el Perú ha sido la minería. En el 2019, La demanda interna del sector de Minería Metálica en términos reales según el BCRP (2019) aumento en un 50% en comparación con la del 2007. Actualmente, a pesar del contexto del COVID-19, las empresas extractoras de minerales tienen como una de sus principales prioridades facilitar las diversas operaciones de mina a través de la adquisición de la maquinaria más moderna, segura y eficiente. En vista de esto, el análisis de falla de los elementos involucrados en la extracción y procesamiento de minerales es de suma importancia para esta industria, la cual promueve el desarrollo económico del Perú. La compañía Minera Raura S.A. es una empresa peruana dedicada a desarrollar actividades de exploración y explotación de minerales. Raura está ubicada entre los distritos de San Miguel de Cauri (provincia Lauricocha, región Huánuco) y de Oyón (provincia Oyón, región Lima), a una altura de 4700 msnm. Inició operaciones en 1960 y desde 1985 opera bajo el liderazgo del grupo Breca. Las extracciones de esta mina polimetálica se centran en el plomo, zinc, cobre y plata. En las minas cuando se quiere introducir materiales en los procesos siguientes a la extracción de los minerales, como el de “chancado”, se recurre a la utilización de maquinaria de izaje. La variedad de maquinarias de izaje, potencia del motor y requerimientos de las operaciones, son de suma importancia en la selección de los elementos del sistema de izaje. Uno de los elementos de mayor importancia en estos sistemas es el cable metálico. La siguiente tesis plantea un caso real de análisis de falla de un cable, perteneciente a un sistema de izaje de un puente grúa usado en el proceso de “chancado” de la compañía Minera Raura S.A.

Objetivos

Objetivo general

Determinar la causa de la falla del cable metálico con alma de acero de arreglo de 6x36 usado en el izaje de cargas de un puente grúa.

Objetivos específicos

- Caracterizar el material del cable.
- Determinar la influencia de los defectos producidos en el cable durante su servicio.
- Determinar el modo de falla de las fracturas del cable analizado.

Capítulo 1. Revisión de la literatura

1.1. ¿Qué es un equipo de elevación de carga?

Un equipo de elevación de carga es definido por Jamieson (2002), como aquel que es usado para elevar, bajar o transportar materiales, partes y equipos, dentro de un área limitada. Estos equipos están normalmente compuestos por engranajes, ejes, tambores, poleas, frenos, acoples, cables de acero y ganchos. En suma, la función principal de un equipo de elevación de carga es la de *izar*. Los sistemas que permiten un correcto izaje, según Decreto supremo N° 024-2016-EM. (17 de agosto del 2017), son equipos tales como elevadores eléctricos, hidráulicos, grúas móviles, winches, tecles y puentes grúa como se muestra en la Figura 1.

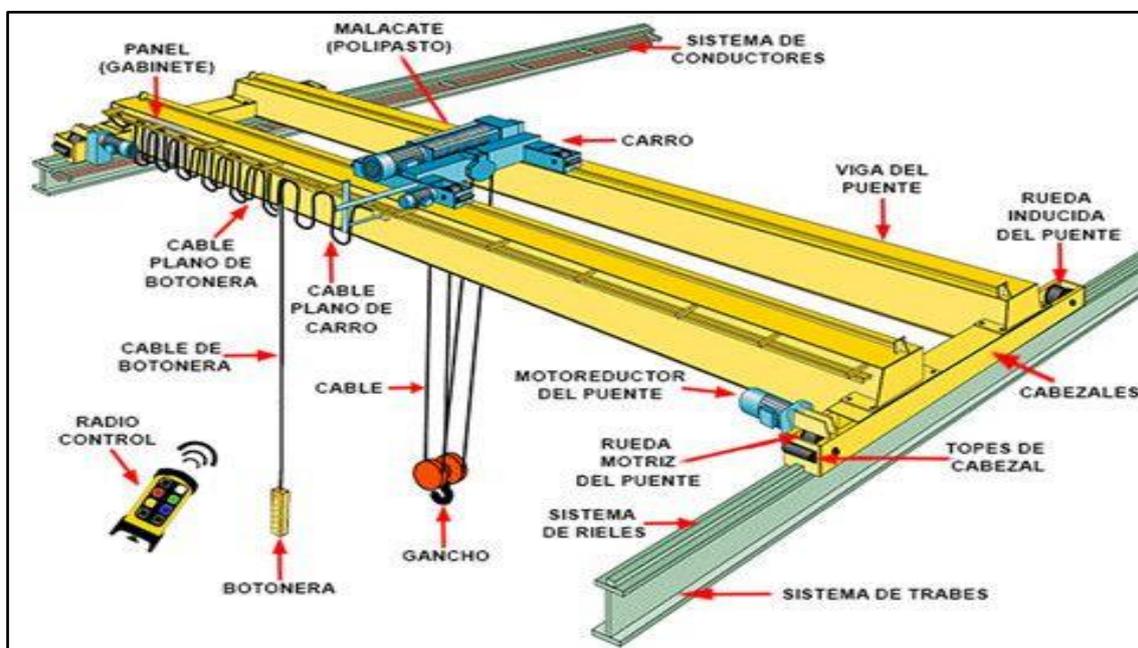


Figura 1. Partes de una grúa puente.

Tomado el 24/11/2022 de <https://proelevacion.com/tipos-de-puente-gruas/>

Para el caso analizado en esta tesis se tiene esquemáticamente la misma disposición de poleas, tambor y cable que la mostrada en la Figura 2, en donde se ve que el tambor tiene varias capas de cable arrollado sobre este y un soporte en el otro extremo del cable, el cual, a su vez, cuenta con un acople que lo une al cable.



Figura 2. Modelo que muestra el recorrido del cable a lo largo de las poleas en un puente grúa.

Adaptada de la ISO 4309 *Cranes — Wire ropes — Care and maintenance, inspection and discard* (2017)

1.2. ¿Qué es un cable?

Un cable de acero, según lo comentado por Feyrer K. (2015) en su libro *Wire Ropes Tension, Endurance, Reliability*, es un elemento cilíndrico flexible al que se le pueden dar diversas utilidades. Los usos principales se muestran en la Figura 3.

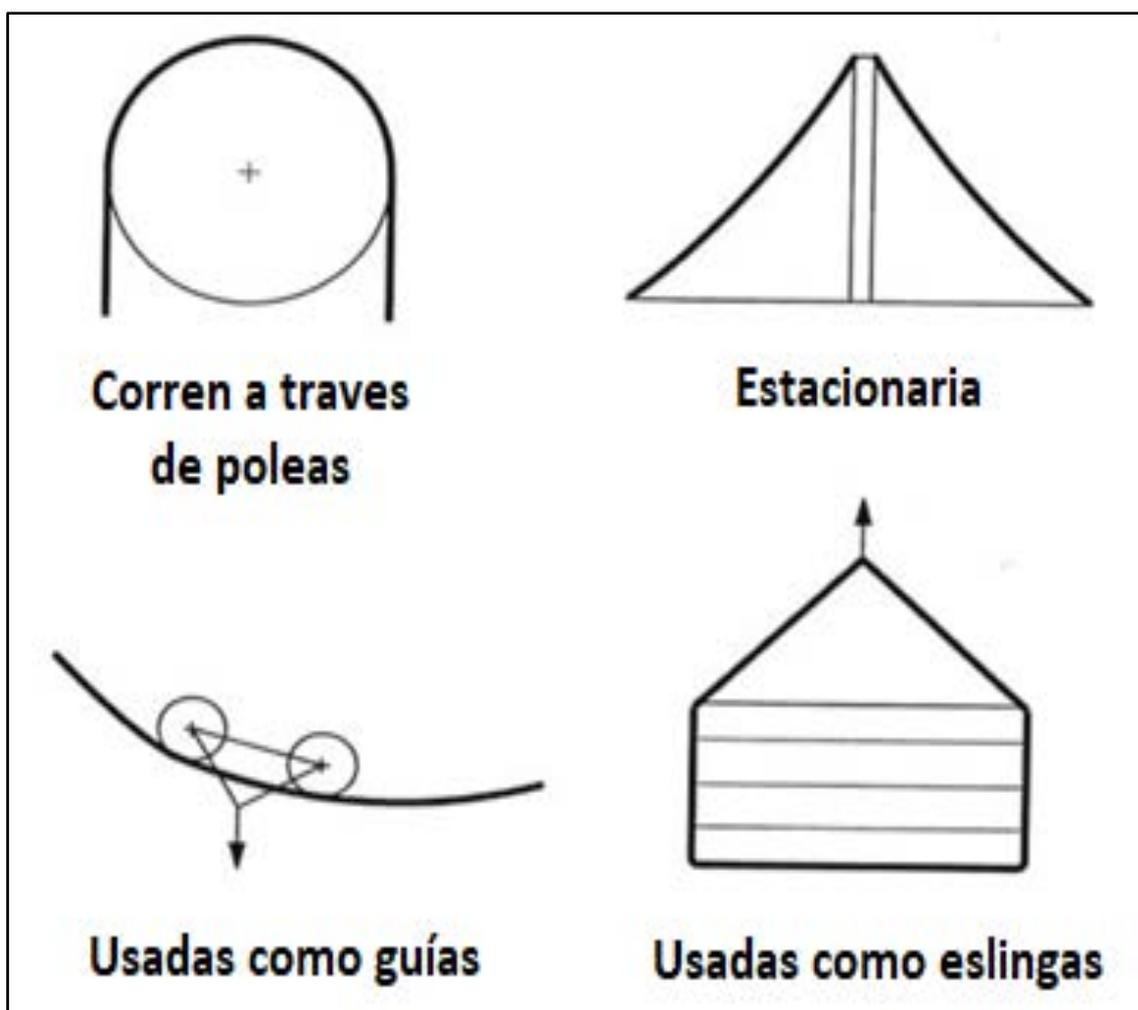


Figura 3. Esquema de los distintos usos que se le dan al cable.

Adaptado de Feyrer K. en su libro *Wire Ropes Tension, Endurance, Reliability* (2015)

Aquí se ven que aquellos que “corren a través de poleas” sirven para transmitir potencia o izar cargas. Luego están los “estacionarios”, que no tienen movimiento relativo como los anteriores y están tensados permanentemente. Por otro lado, también están los que son “usados como guías”, que actúan como rieles para los rodillos de cabinas u otras cargas en teleféricos y grúas de cable. Por último, están los cables metálicos “usados como eslingas”, que son los elementos de unión entre el equipo de izaje y la misma carga durante la operación.

1.3. Elementos constitutivos de los cables de acero

1.3.1. Definiciones de torón, alma y cable:

Según la norma ASTM A1023M (2021), la definición de los siguientes elementos es la que sigue.

Torón: Un elemento de cable que normalmente consiste en un ensamble de alambres torcidos helicoidalmente en una o más capas alrededor de un centro. Este centro consiste en un alambre redondo. En la Figura 4 se muestra la sección de un torón de capa simple, el diseño más sencillo que se puede encontrar de un torón.

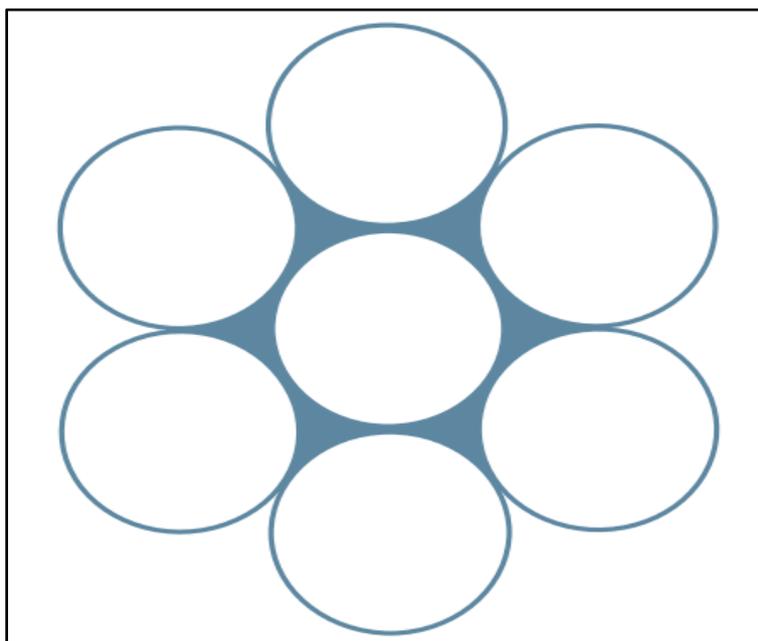


Figura 4. Sección de un torón de capa simple.

Tomado del *Wire Rope User's Handbook*. (2016).

Alma del cable: Elemento central, usualmente de fibra o metal (aunque también puede ser una combinación de ambos), de un cable metálico redondo alrededor del cual se tuercen helicoidalmente los torones de un cable. Los distintos tipos de almas pueden ser las siguientes.

- **Alma de fibra:** Un elemento hecho de fibras naturales o sintéticas.
- **Alma de polímero sólido:** Un elemento individual de material polimérico que es cilíndrico o moldeado (acanalado) y que puede incluir elementos de alambres o fibras.
- **Alma de acero:** Puede ser un cable de acero independiente en sí mismo, con torones y un alma propios, denominado *IWRC* por sus siglas en inglés (*Independent Wire Rope Core*) o un torón redondo con una determinada construcción denominado *WSC* (*Wire Strand Core*). El torón redondo, el cable independiente y/o los torones exteriores de este, pueden estar cubiertos y rellenos con fibra o un polímero sólido. La Figura 5 muestra 3 tipos de almas encontradas en catálogos.



Figura 5. Tipos de almas.

Adaptado del Wire Rope User's Handbook (2016).

Capas de alambres: Un ensamble de alambres que tienen un diámetro primitivo, es decir en una misma capa de alambres todos estos están a una misma distancia del alambre central. La primera capa de alambres es la que se coloca sobre el centro del torón.

Cable de torones trenzados: Se le denomina así al ensamble de torones arrollados helicoidalmente en una o más capas alrededor del alma. Los cables que consisten en 4 torones exteriores o menos, que pueden o no estar arrollados alrededor de un alma, no entran dentro de esta definición. Los elementos del cable de torones trenzados se muestran en la Figura 6.

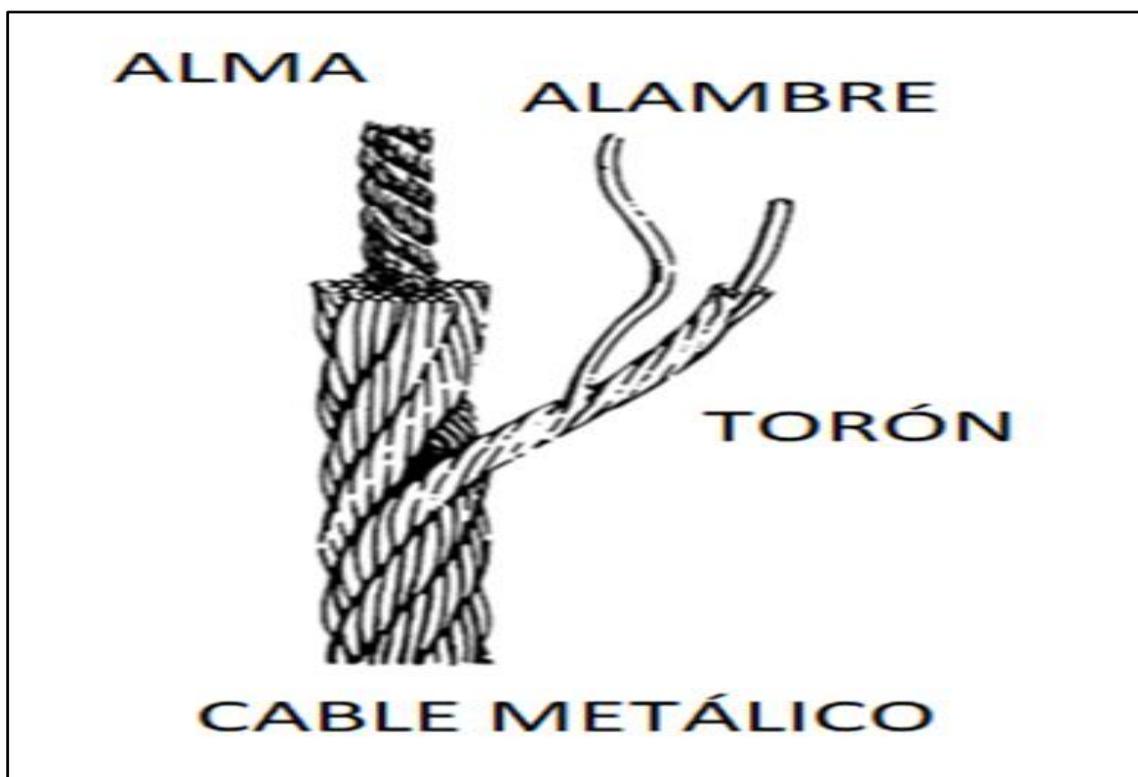


Figura 6. Partes principales de un cable de torones trenzados.

Adaptado de ASM International Metals Handbook Vol. 11 (2002).

Acabado y calidad de recubrimiento: La condición del acabado de la superficie del alambre, la cual puede estar recubierta, como también puede no estarlo, de zinc o una aleación de zinc.

1.3.2. Alambres usados en cables:

De acuerdo con la Norma ASTM A 1007 (2022), el acero para la fabricación de los alambres usados en cables de torones trenzados puede ser obtenido por fundición de lingotes o de hilos. Además, el alambre debe ser trefilado en frío para conseguir las propiedades deseadas (Ver Anexo A). La Tabla 1 muestra los niveles de resistencia máxima a la tracción de cada diámetro de alambre.

Tabla 1

Resistencias mínimas a la rotura de alambres según su diámetro.

| Diámetro del alambre | | Resistencia mínima a la rotura de los alambres | | | | |
|----------------------|------------|--|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Pulgadas | Milímetros | Nivel 1 (N) | Nivel 2 (N) | Nivel 3 (N) | Nivel 4 (N) | Nivel 5 (N) |
| 0,015 | 0,381 | 180 | 180 | 200 | 220 | 240 |
| 0,016 | 0,408 | 180 | 200 | 230 | 250 | 270 |
| 0,017 | 0,432 | 200 | 230 | 260 | 290 | 300 |
| 0,018 | 0,467 | 230 | 250 | 290 | 320 | 340 |
| 0,019 | 0,483 | 250 | 260 | 320 | 360 | 380 |
| 0,020 | 0,508 | 280 | 310 | 360 | 390 | 420 |
| 0,021 | 0,533 | 310 | 340 | 390 | 430 | 450 |
| 0,022 | 0,559 | 340 | 360 | 430 | 490 | 490 |
| 0,023 | 0,584 | 370 | 410 | 450 | 540 | 540 |
| 0,024 | 0,610 | 400 | 450 | 490 | 580 | 580 |
| 0,025 | 0,635 | 430 | 490 | 540 | 630 | 670 |
| 0,026 | 0,680 | 450 | 540 | 560 | 670 | 720 |
| 0,027 | 0,686 | 490 | 580 | 630 | 720 | 730 |
| 0,028 | 0,711 | 540 | 580 | 670 | 760 | 810 |
| 0,029 | 0,737 | 580 | 630 | 760 | 810 | 890 |
| 0,030 | 0,782 | 630 | 670 | 810 | 850 | 940 |
| 0,031 | 0,787 | 670 | 720 | 850 | 940 | 960 |
| 0,032 | 0,813 | 720 | 810 | 890 | 980 | 1070 |

Nota. Tomado de la norma ASTM A1007 (2022).

Por otro lado, tomando en cuenta a la norma ASTM A1023M (2021), el material de los alambres deberá ser aquel que cumpla con las limitaciones de la Tabla 2, según el máximo esfuerzo de tracción que se quiera conseguir en el cable en el que se van a usar.

Tabla 2

Grados o niveles de resistencia de los alambres según la resistencia del cable en el que se van a usar.

| Grado del cable | Grado (N/mm ²) o nivel de resistencia de los alambres que se deben usar | |
|-----------------|---|----------------|
| | Mínimo | Máximo |
| IPS | Nivel 2 / 1570 | Nivel 4 / 1960 |
| EIP | Nivel 3 / 1770 | Nivel 5 / 2160 |
| EEIP | Nivel 4 / 1960 | Nivel 5 / 2160 |
| 1770 | 1570 / Nivel 2 | 1960 / Nivel 4 |
| 1960 | 1770 / Nivel 3 | 2160 / Nivel 5 |
| 2160 | 1960 / Nivel 4 | 2160 / Nivel 5 |

Nota. Adaptado de la norma ASTM A1023M (2021)

Los alambres pueden ser clasificados de acuerdo con su acabado, función y posición dentro del cable.

1.3.2.1. Alambres según el acabado del cable.

Alambre de acero negro: Es un alambre con alto contenido de carbono. Este es trefilado de diversas maneras para obtener la mejor combinación de resistencia a la tracción, a la fatiga y al desgaste.

Alambre galvanizado: Es un alambre con alta resistencia a la corrosión. Existen 3 procesos diferentes para fabricar un alambre con esta característica:

- Alambre galvanizado al tamaño final: En donde el alambre de acero negro es trefilado a un tamaño menor que el tamaño final esperado. Luego se le hace pasar por una línea de galvanización hasta que el revestimiento de zinc resultante aumenta el diámetro del alambre hasta que alcance el tamaño deseado. El alambre resultante tiene una resistencia 10% menor que el del acero negro del mismo tamaño y tipo, y es por esto que los alambres galvanizados tienen una resistencia mínima a la rotura un 10% menor que su equivalente en acero negro. Según la norma ASTM A 1007 (2022), Los cables de acero galvanizado al tamaño final estirado deben fabricarse con un revestimiento uniforme, continuo y fuertemente adherente.
- Alambre galvanizado trefilado: Es cuando antes de pasar por el último trefilado, se le galvaniza. Esto ocasiona que la capa de revestimiento de zinc sea más delgada. Por otro lado, los alambres galvanizados trefilados tienen la misma resistencia que su equivalente en acero negro, lo que a su vez permite que el cable formado por este tipo de alambre galvanizado sea de una resistencia igual a la de su equivalente en acero negro sin galvanizar.
- Alambre de acero inoxidable: Son alambres hechos de una aleación de acero, que aproximadamente contiene un 18% de cromo y 8% de Níquel. Este alambre resiste a la corrosión en una mayor variedad de ambientes. Se le suele usar en yates y cables de control.

1.3.2.2. Alambres según la función que cumplen en el cable.

Dependiendo de la función de los alambres la norma ASTM A1023 (2021), también los agrupa de la siguiente manera.

- **Alambres Filler:** Alambres relativamente pequeños usados en ciertas construcciones de cables de arrollamiento paralelo para crear el número necesario de intersticios para soportar la próxima capa de alambres cobertores.

- **Alambres de carga (alambres principales):** Alambres en un cable que se considera que contribuyen a aumentar la fuerza de rotura del cable.

- **Alambres que no soportan la carga:** Aquellos alambres en un cable que se considera que no contribuyen a aumentar la fuerza de rotura del cable.

- **Alambres o torones para sujetar (servir):** Alambres o torones individuales usados para hacer una espiral de enrollamiento cerrado, que sirve para retener a los elementos del cable en su posición de ensamble.

1.3.2.3. Alambres según la posición que ocupan en el cable:

Alambres centrales: Alambres posicionados en el centro de un torón perteneciente a un cable trenzado.

Alambres del alma: Todos los alambres que comprenden el alma de un cable trenzado.

Alambres interiores: Todos los alambres excepto los del centro, los Filler, los del alma y los exteriores en un cable trenzado.

Alambres exteriores: Todos los alambres en la capa exterior de los torones exteriores de un cable trenzado. La Figura 7 muestra a los alambres según su posición en el cable.

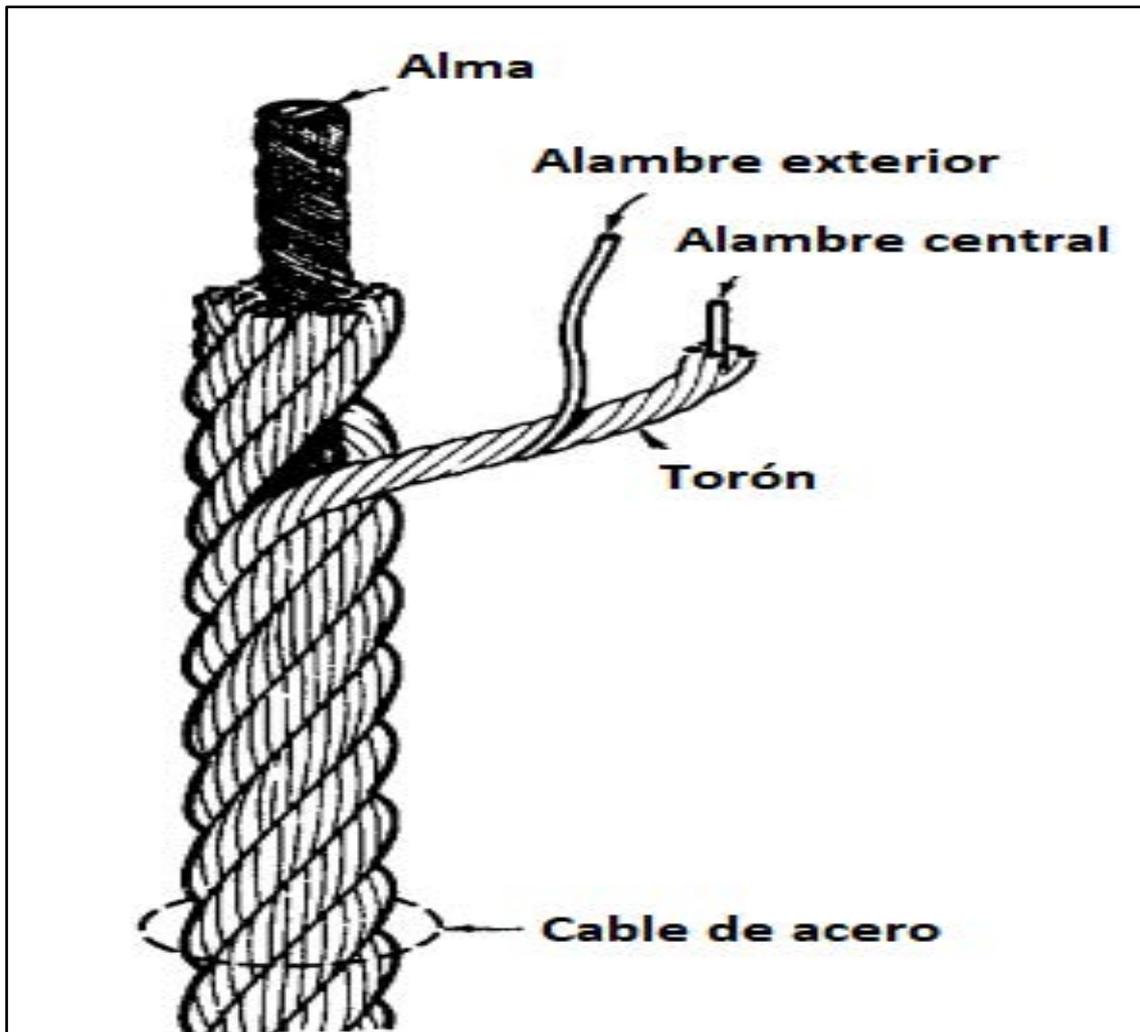


Figura 7. Elementos de un cable de acero.

Adaptado de la norma ASTM A1023M (2021)

1.3.3. Definición de diámetros:

- **Diámetro de un cable recubierto de plástico:** Es el diámetro que circunscribe la sección transversal del cable incluida la cobertura de plástico, seguido del diámetro que circunscribe al cable trenzado debajo del plástico. El diámetro está expresado en pulgadas o milímetros, por ejemplo, $3/4 \times 5/8$ pulgadas, es un cable recubierto de plástico con un diámetro exterior de $3/4$ de pulgada que tiene en su interior un cable trenzado de $5/8$ de pulgada en su interior.

- **Diámetro de un cable redondo:** El diámetro que circunscribe a la sección transversal del cable. El diámetro está expresado en pulgadas o milímetros, según la ASTM A1023M (2021). La Figura 8, muestra un ejemplo del diámetro de un cable redondo.

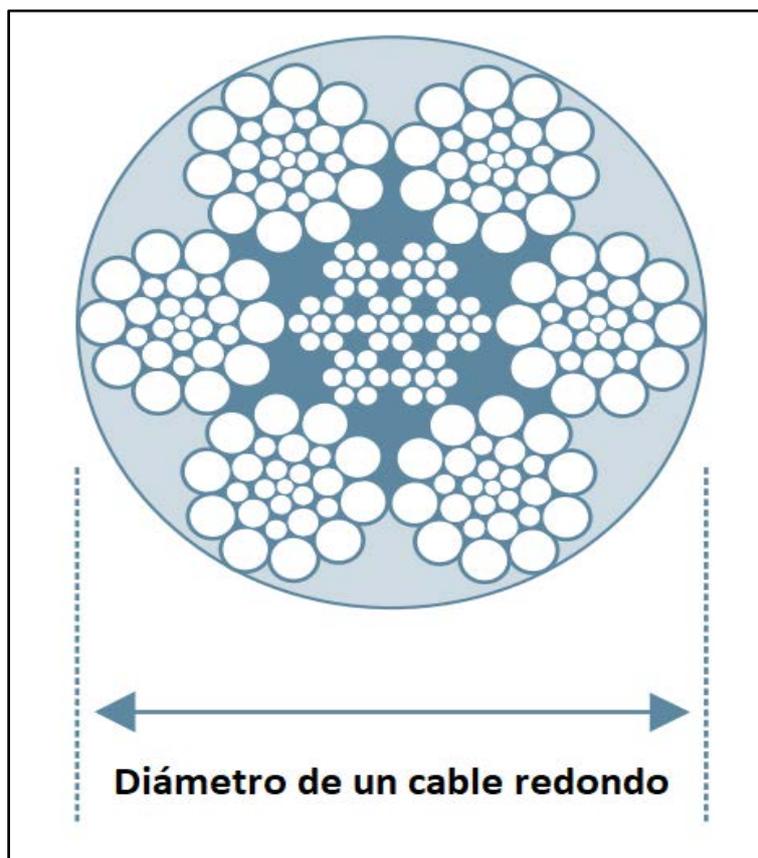


Figura 8. Sección transversal de un cable en donde se le acota el diámetro.

Adaptado del Wire Rope User's Handbook (2016).

1.3.4. Grados de resistencia del cable:

Es el nivel de requerimiento de la fuerza de rotura, que es designado por un número (por ejemplo 1770 o 1960) o por una serie de letras (por ejemplo, IPS o EIP). El grado del cable no implica que la resistencia a la tracción de los alambres en el cable sea necesariamente de este mismo grado. Los distintos grados de un cable se ven en la Tabla 3. En donde, se debe considerar una Mínima Fuerza a la rotura un 10% menor al valor de la tabla para los alambres que tienen acabado de galvanizado. Para obtener los valores en kN se debe multiplicar a los valores que están en toneladas por 8,896, según lo especificado en la norma ASTM A1023M (2021).

Tabla 3

Masa aproximada, Fuerza mínima de rotura y rango de diámetro de los cables de la clasificación 6x36 con alma de acero.

| Diámetro (pulgadas) | Masa Aproximada | | Mínima Fuerza de rotura según el grado del alambre (Tons) | | | Rango de diámetros | |
|------------------------|--------------------|-------|---|------|------|--------------------|-----------------|
| | libra/pie | kg/m | IPS | EIP | EEIP | Min. (pulg.) | Max. (pulg.) |
| 1/4 | 0,12 | 0,172 | 2,94 | 3,40 | | 0,25 | 0,265 |
| 5/16 | 0,18 | 0,268 | 4,58 | 5,27 | | 0,313 | 0,331 |
| 3/8 | 0,26 | 0,386 | 6,56 | 7,55 | 8,3 | 0,375 | 0,394 |
| 7/16 | 0,35 | 0,526 | 8,89 | 10,2 | 11,2 | 0,438 | 0,459 |
| 1/2 | 0,46 | 0,687 | 11,5 | 13,3 | 14,6 | 0,5 | 0,525 |
| 9/16 | 0,58 | 0,87 | 14,5 | 16,8 | 18,5 | 0,563 | 0,591 |

Nota. Adaptada de la Norma ASTM A1023M (2021).

1.4. Sistemas de fabricación de torones y cables.

1.4.1. Sistema de torcido de torones y cables:

Según la norma ASTM A1023M, el sistema de torcido de torones y cables establece las siguientes definiciones.

- **Dirección del torcido del torón:** Es la dirección, derecha o izquierda, correspondiente al sentido en que fueron torcidos los alambres externos entorno al eje longitudinal del torón, como se ve en la Figura 9.

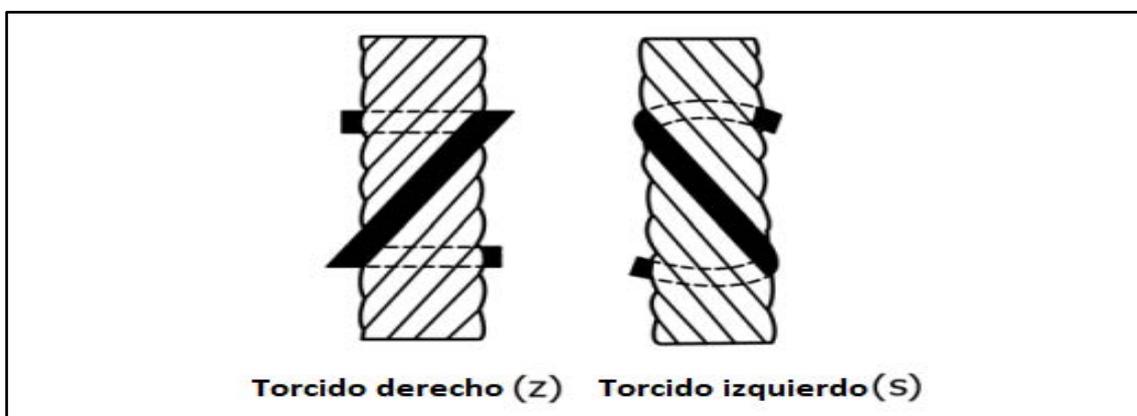


Figura 9. Direcciones de torcido de los cables compuestos de torones.

Adaptado de la Norma ASTM A1023M (2021).

- **Longitud de torcido del cable:** La distancia medida de manera paralela al eje longitudinal del cable en la cual los torones exteriores de un cable trenzado o los cables exteriores en el caso de cables compuesto de cables menos complejos hacen una vuelta completa (o hélice) alrededor del eje de un cable, como se ve en lado derecho de la Figura 10.

• **Longitud de torcido de un torón:** Es la distancia medida paralelamente al eje de un torón, en donde un alambre exterior en el torón hace una vuelta completa (o hélice) alrededor del eje de un torón, como se ve en lado izquierdo de la Figura 10.

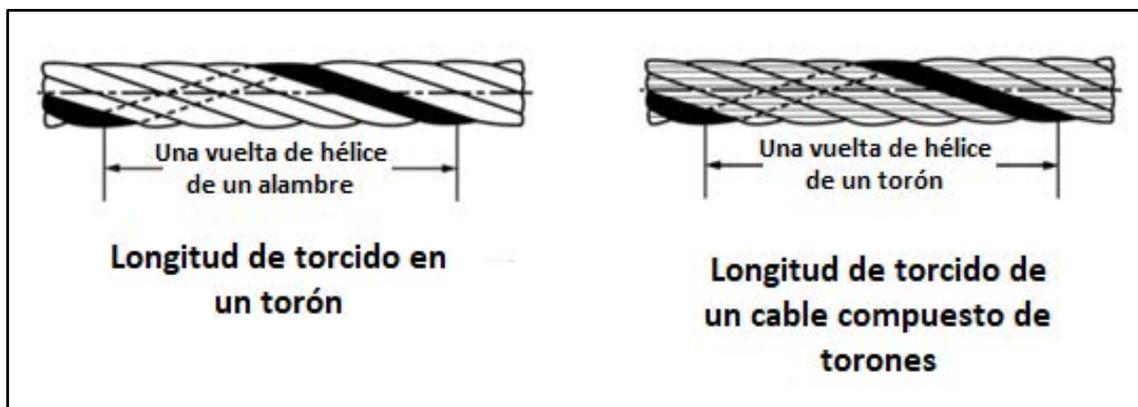


Figura 10. Longitud de torcido de un torón y de un cable compuesto de torones.

Adaptado de la Norma ASTM A1023M (2021).

• **Torcido cruzado:** Torón en donde los alambres de las capas adyacentes son torcidas en direcciones opuestas, cruzándose unas a otras, de tal forma que el contacto de ambas se da en un solo punto.

• **Torcido paralelo:** Torón que contiene por lo menos 2 capas de alambres, de las cuales todas son torcidas en la misma dirección. La longitud del torcido de todas las capas de alambres es igual, y los alambres de cualquier par de capas superpuestas son paralelas entre ellas, resultando en un contacto lineal.

• **Sentido del torcido del cable:** El sentido derecho, denotado por la letra “z” o izquierdo, denotado por la letra “s”, correspondiente al sentido del arrollamiento en el cable trenzado en relación con el eje longitudinal del cable. La letra minúscula denota la dirección del torcido de los alambres en el torón (“z” o “s”); la mayúscula (“Z” o “S”) denota la dirección del torcido de los torones en el cable.

- **Contra – torcido:** Describe a un cable en donde por lo menos alguna de las capas de torones es colocada en el sentido de torcido opuesto al de las otras capas de torones en el cable.

- **Torcido Lang:** Describe un cable trenzado en donde el sentido de torcido de los torones exteriores es igual al sentido de los alambres de estos torones, como se ve en la Figura 11.

- **Torcido regular (ordinario):** Describe cables trenzados en donde el sentido del torcido de los alambres en los torones exteriores está en el sentido opuesto al torcido de los torones exteriores en el cable, como se ve en la Figura 11.

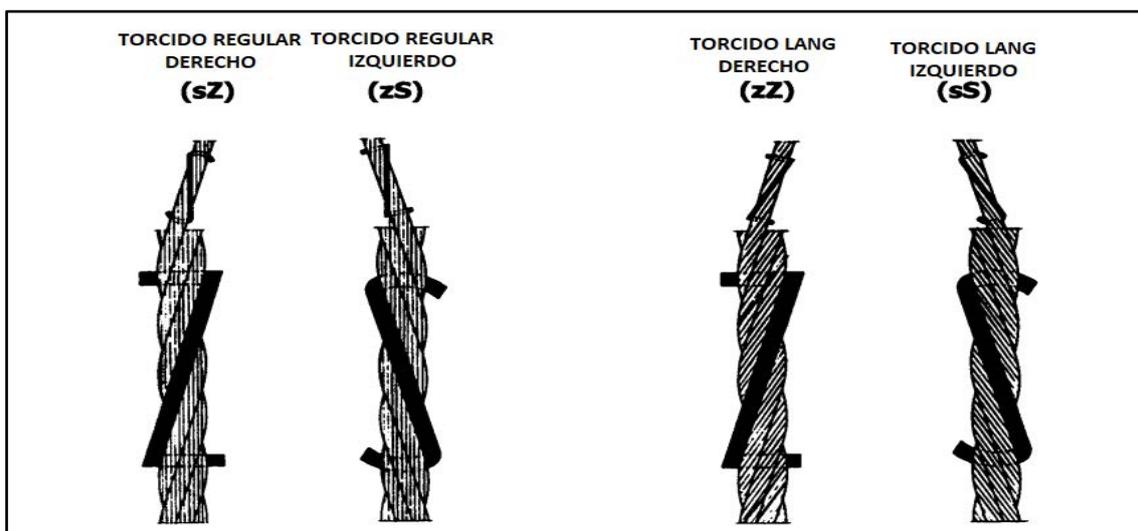


Figura 11. Torcidos regulares (ordinarios) y Torcidos Lang en sus sentidos izquierdo y derecho. Adaptado de ASTM A1023 M (2021).

- **Torcido alternado:** Describe un cable trenzado en donde el tipo de torcido de los torones exteriores es alternado entre un torcido regular y un torcido Lang, de tal forma, que la mitad de los torones exteriores son de torcido regular y la otra mitad es de torcido Lang. El sentido de estos cables puede ser derecho (AZ) o izquierdo (AS), haciendo referencia al sentido de los torones exteriores. El torcido alternado también puede ser suministrado con dos torones de torcido Lang y uno de torcido regular en un patrón repetitivo. Para el caso del cable analizado por esta tesis se tiene un torcido regular derecho (sZ).

1.4.2. Construcciones de torones:

Según la norma ASTM A1023M (2021), los tipos de construcción de un torón, es decir, el orden en que se colocan alambres de distintos diámetros en cada capa, son los siguientes.

- **Seale (S):** Describe a una construcción que tiene el mismo número de alambres en cada capa, por ejemplo, un cable con 9 alambres en la segunda y 9 en la primera capa exterior que rodean al alambre central. Cada capa es de un diámetro diferente siendo los alambres de la capa más externa, la segunda, los de mayor diámetro y entrando en contacto con la primera en los *Valles*, es decir, en el espacio entre dos alambres adyacentes, pertenecientes a una misma capa como se muestra en la Figura 12.

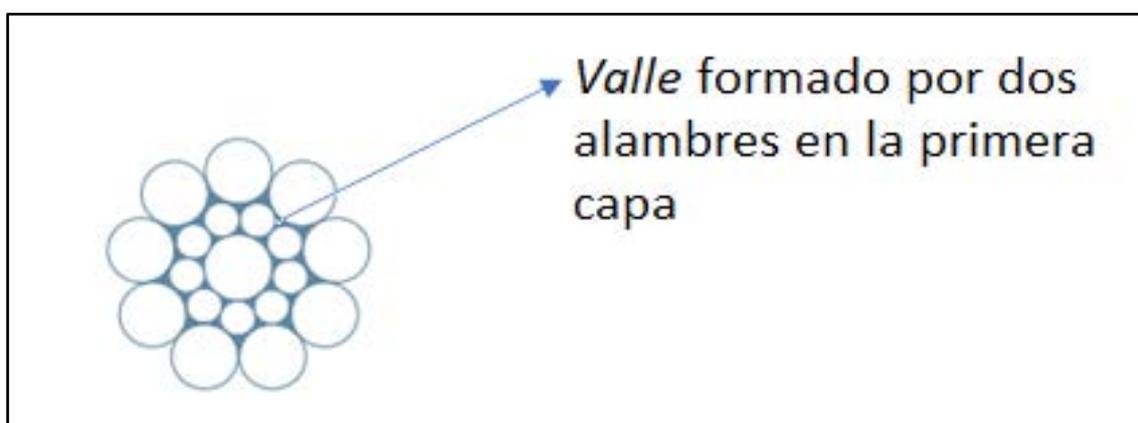


Figura 12. Sección de un torón tipo “Seale” y el Valle en donde se asientan los alambres de la segunda capa.

Tomado del Wire Rope User’s Handbook (2016).

- **Relleno o Filler (F):** El que describe a una construcción con una capa exterior que tiene 2 veces el número de alambres que la capa interior, con los alambres de relleno o Filler arrollados en los intersticios que hay entre estas dos capas, como se ve en la Figura 13. Los alambres *Filler* son designados con la letra “F”.

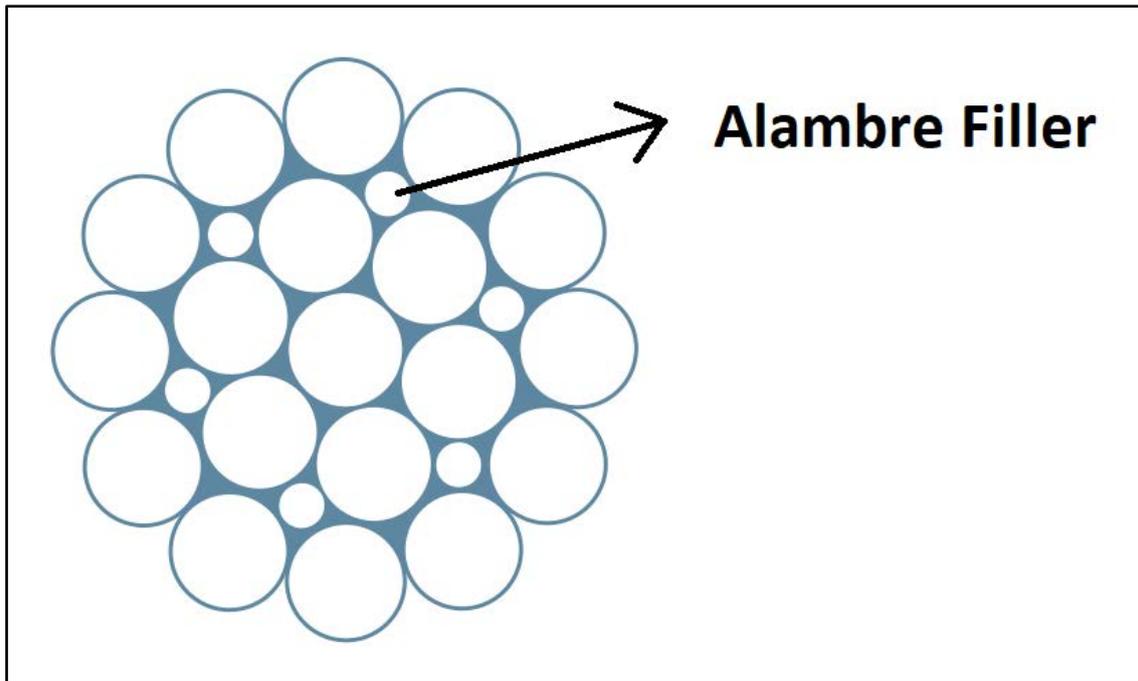


Figura 13. Sección de un torón con alambres “Filler” y el Valle en donde se colocan estos alambres. Tomado del Wire Rope User’s Handbook (2016).

- **Warrington (W):** Describe a una construcción que tiene una capa exterior que contiene alambres grandes y pequeños alternadamente y 2 veces el número de alambres de la capa interior, como se ve en la Figura 14. Las capas de Warrington son designadas nombrando el número de alambres grandes y pequeños (diámetro) con un signo “+” entre ellos y encerrados en un paréntesis, por ejemplo, la capa (6+6) es una capa Warrington, en ella hay 6 alambres pequeños alternados en una misma capa con alambres grandes.

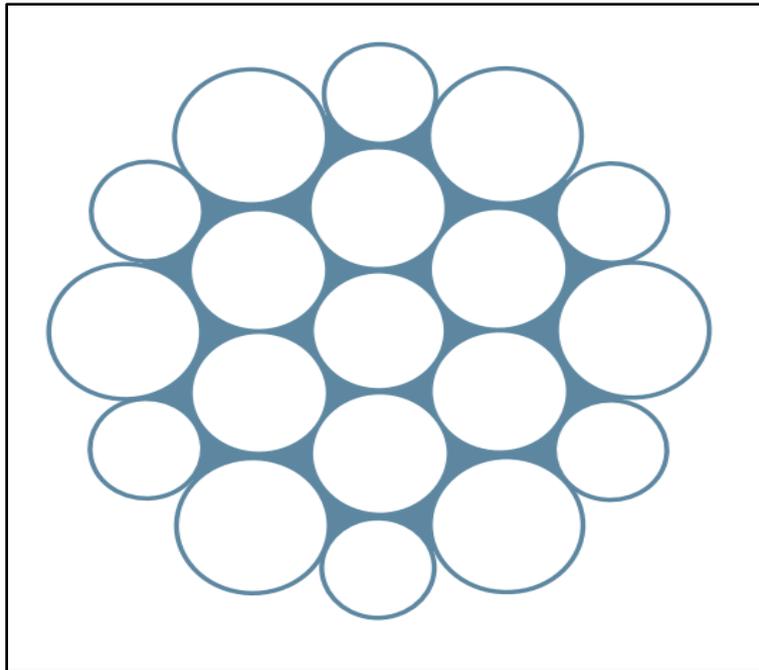


Figura 14. Sección de un torón del tipo Warrington.

Tomado del Wire Rope User's Handbook (2016).

- **Capa única:** Torón que solo está conformado por una sola capa de alambres de un mismo diámetro.

- **Combinado:** El cual describe una construcción de torcido paralelo que tiene 3 o más capas enrolladas en 1 misma operación (fabricación) y están formados por una combinación de las siguientes construcciones, como, por ejemplo, la construcción Warrington – Seale. En la Figura 15 se ve un ejemplo de un cable que consta de varios tipos de construcciones en cada una de sus capas.

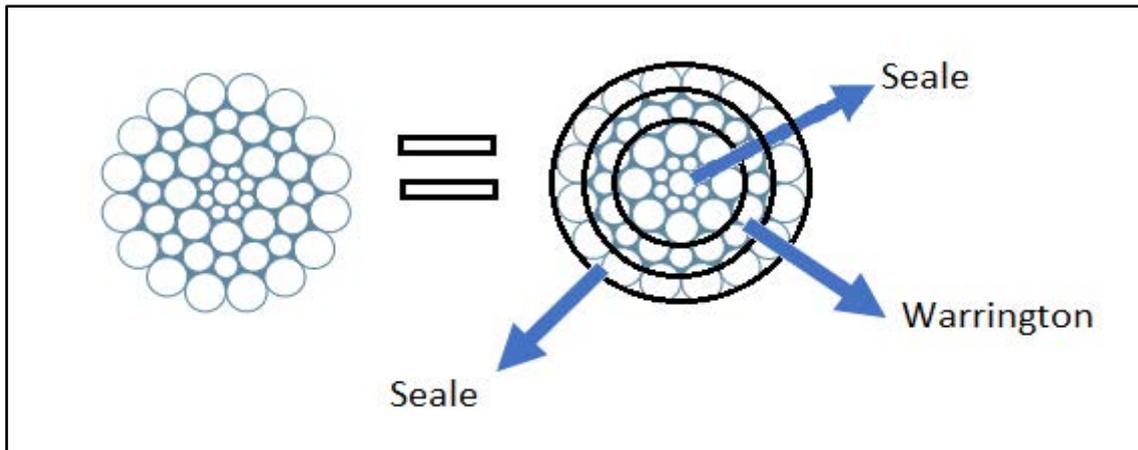


Figura 15. Sección de un torón de *Patrón combinado* en donde se usan patrones de tipo Seale y Warrington en su construcción.

Adaptado del Wire Rope User's Handbook (2016).

1.5. Notación de las estructuras de los cables de acero.

1.5.1. Familia de cables.

Se pueden agrupar cables con similares características en grupos denominados *familias de cables* en cuanto al número de torones exteriores, al número de alambres en los torones exteriores, procesos de compactado y características especiales como la resistencia al giro. En este sentido la Tabla 4 muestra las clasificaciones mencionadas en la norma ASTM A1023. En cuanto a la fabricación en el Anexo B se detallan otros tipos de cables.

Tabla 4

Rangos de los diámetros según la clasificación de los cables de acero según su construcción. Las siglas SR se refieren a resistencia al giro, TS a torones triangulares, CS a torones compactados, SW a cables estampados.

| Clasificación | Diámetro (pulgadas) | Diámetro (milímetros) |
|---------------|---------------------|-----------------------|
| 6x7 | 1/4 - 1 1/2 | 6-36 |
| 6x19 | 1/4 - 2 3/8 | 6-60 |
| 6x36 | 1/4 - 2 3/8 | 6-60 |
| 7x19 | 1/4 - 2 3/8 | 6-60 |
| 7x36 | 1/4 - 2 3/8 | 6-60 |
| 8x19 | 1/4 - 2 3/8 | 6-60 |
| 8x36 | 1/4 - 2 3/8 | 8-60 |
| 8x19 SR | 1/2 - 1 1/2 | 12-38 |
| 19x7 | 1/4 - 1 1/2 | 6-36 |
| 34x7 | 1/4 - 1 5/8 | 8-40 |
| 35x7 | 3/8 - 1 5/8 | 8-40 |
| 6x12 | 5/16 - 1 | 8-25 |
| 6x12 | 5/16 - 1 | 8-25 |
| 6x24 | 3/8 - 2 | 9.5-51 |
| 6x25 TS | 1/2 - 2 3/8 | 12-60 |
| 6x19 CS | 3/8 - 2 1/4 | 10-56 |
| 6x36 CS | 3/8 - 2 1/4 | 10-56 |
| 6x19 SW | 1/2 - 1 1/2 | 12-38 |
| 6x36 SW | 1/2 - 1 1/2 | 12-38 |
| 19x7 CS | 1/4 - 1 | 6-24 |

Nota. Adaptado de la norma ASTM A1023M (2021)

1.5.1. Elaboración de la notación.

La notación empleada en la norma ASTM A1023M (2021) sigue los pasos mostrados a continuación.

1. Primero, se indica el número de torones en el cable, seguido por una "x" y el número de alambres en cada torón. Por ejemplo, 6x19 indica que hay 6 torones, cada uno compuesto de 19 alambres.
2. A continuación, se puede indicar la forma de construcción de los torones. Por ejemplo, "W" indica la construcción Warrington, mientras que "S" indica la construcción Seale.
3. Después se puede colocar las siglas que indiquen procesos de fabricación específicos como torones compactados (CS), resistencia al giro (SR), torones triangulares (TS), cables estampados (SW)
4. Luego, Si el cable tiene un alma, se puede indicar la construcción de esta. Por ejemplo, "IWRC" indica que el alma es de acero y que está construida en forma de torón.
5. Finalmente, se pueden agregar otros caracteres para indicar características de los torones exteriores, colocando el número de alambres de cada capa comenzando desde el centro y espaciando cada capa con un guión, también para el caso de los torones Warrington, se coloca un paréntesis para la capa en donde coexistan 2 tamaños de alambres intercalados, y dentro se coloca el número de alambres dos veces, separados por un signo "+", como por ejemplo la notación 6x26 WS IWRC 1-5-(5+5)-10, el cual indica un cable con 6 torones exteriores Warrington- Seale de alma independiente de acero, en donde cada uno de los torones exteriores tienen un alambre central cubierto de una segunda capa de 5 alambres, una tercera capa

Warrington en donde hay 5 alambres de un diámetro particular intercalados con otros 5 alambres de otro diámetro y finalmente una cuarta capa de 10 alambres.

1.6. Solicitaciones comunes encontradas en los cables de acero

Los cables están sometidos a distintas sollicitaciones, que acortan su tiempo de vida, ya sea por su construcción, mantenimiento o carga de trabajo. A continuación, se mencionan algunas de las más importantes.

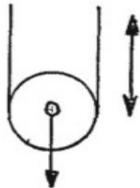
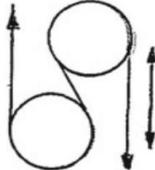
1.6.1. Fatiga en los cables

Los cables trabajan bajo una fuerza que tiende a estirarlos denominada tensión. La resistencia a esta fuerza se especifica en los catálogos y normas de cables como *Resistencia mínima a la rotura* o MBF por sus siglas en inglés (*Minimum Breaking Force*). Esta resistencia es la mínima que se debe encontrar en los ensayos de tracción efectuados sobre los cables, siempre que estos se efectúen sobre cables nuevos (ASTM, 2021). Según Ernst (1970), a medida que se aplican esfuerzos de tracción sobre los cables, su resistencia se reduce debido a la fatiga efectuada en este y según Hokkanen H. (2017), la fatiga es el mecanismo de degradación que inevitablemente causará la falla de cualquier cable en uso, si es que se le usó correctamente y tuvo un buen mantenimiento. La resistencia a la fatiga de los cables depende de su material y método de fabricación. Los tipos de sollicitaciones por los cuales se da la fatiga en los alambres, según Feyrer K. (2015) son la fluctuante tensión, flexión, presión y torsión que se dan en el cable, Al respecto se muestra la Tabla 5, que muestra la concentración de esfuerzo según el tipo de carga fluctuante bajo la cual es sometido el alambre.. Es por esto por lo que los cables nunca deben ser usados para cargas cercanas a su *Resistencia mínima a la rotura*, sino que deben ser usados bajo factores de seguridad. La norma ASME B30.2 (2022)

especifica un factor de seguridad de 5 para el caso de cables usados en izaje por medio de puentes grúas.

Tabla 5

Arreglos de pruebas de fatiga en alambres con sus respectivas zonas de máximo esfuerzo en su sección.

| | Tensión | Flexión en un solo sentido | Flexión en sentido opuesto | Torsión |
|---|---|--|---|--|
| Arreglo de las pruebas en los alambres para las pruebas de fatiga |  |  |  |  |
| Zona de la máxima fluctuación de esfuerzo en el alambre |  |  |  |  |

Nota. Adaptado de *Ropes Tension, Endurance, Reliability*, por Feyrer K. Wire, 2015.

Para aumentar la resistencia a la fatiga se suele incrementar la cantidad de alambres en el cable. Los cables con alambre más pequeños y numerosos tienen una mayor resistencia a la fatiga, dado que tienen mayor capacidad para doblarse a medida que pasan por las poleas o tambores. También juega un papel importante, en este mejoramiento, la metalurgia básica de los alambres y el diámetro de estos.

1.6.2. Flexión en los cables

La flexión en los cables se da cuando estos son doblados o curvados. Según Pino (2021), los cables metálicos pueden ser modelados como una viga Euler-Bernoulli hasta una determinada curvatura, a partir de la cual se requiere de un análisis de elementos finitos, que tenga en cuenta el deslizamiento relativo de los alambres y torones. Las flexiones normalmente se dan cuando el cable pasa por poleas y tambores. Para enumerar las flexiones en el cable, se sigue la condición de que una flexión completa es pasar por una polea del estado recto al curvo y de nuevo al estado recto, con excepción del paso del cable por un tambor, el cual es considerado como la mitad de una flexión completa, dado que las poleas son de diámetros más pequeños que los tambores, y por lo mismo, crean una concentración de esfuerzos mayor (Ernst, 1970). Por otro lado, según las pruebas de laboratorio realizadas por Jamieson (2002), mientras se reduzca la relación del *diámetro de polea entre diámetro del cable*, mucho menor será el tiempo de vida del cable en ciclos de flexión (cantidad de veces que se le puede doblar), por lo cual, siempre se recomienda usar la polea de mayor diámetro disponible.

1.6.4. Aplastamiento

A la presión externa sobre un cable, que distorsiona la sección transversal del mismo cable, sus torones o el alma, se le denomina aplastamiento. En la Figura 16 se muestra un cable con aplastamiento en los torones. Al dañarse por aplastamiento, el cable y sus componentes pierden la movilidad que necesitan para garantizar su funcionamiento normal. Los cables de alma metálica independiente (IWRC) son más resistentes al aplastamiento que los de alma de fibra. Por otro lado, los cables de torcido regular son más resistentes al aplastamiento que los cables de torcido *Lang*. Además, el número de torones es igualmente importante, los cables de 6 torones, por ejemplo, tienen mayor resistencia al aplastamiento que los de 8 o 19 torones.



Figura 16. Ejemplos de aplastamiento.

Adaptada del Wire Rope User's Handbook (2016).

Al igual como con el esfuerzo por flexión, la presión radial en el cable aumenta a medida que el tamaño de la polea disminuye. La presencia de altos esfuerzos de flexión en los cables, generalmente, indican la necesidad de una construcción de cable más flexible, que requiera de alambres más delgados en el cable, lo que disminuye la capacidad de resistencia a la presión radial que causa el aplastamiento, dado que para este se requieren alambres más gruesos. Por lo tanto, se deben tener en cuenta estos dos factores al seleccionar la mejor construcción de cable. Por otra parte, las distorsiones de aplastamiento pueden ser controladas en gran medida por un maquinado apropiado de la ranura de la polea, dado que el contacto del cable y la ranura de la polea resulta siempre en el desgaste de estos. Para que el cable pueda durar un mayor tiempo, es importante que las ranuras de las poleas sean de un diámetro lo suficientemente grande para brindar y mantener una holgura lo suficientemente grande. La Tabla 6 muestra las holguras recomendadas en las ranuras para las aplicaciones usuales de las poleas. En esta tabla el diámetro de la ranura de la polea recomendada es igual al diámetro nominal del cable más la holgura de la ranura recomendada.

Tabla 6

Holgura (Espacio extra) en las ranuras de las poleas en base al diámetro nominal del cable metálicos.

| Rangos de diámetros nominales del cable metálico | | Holgura en la ranura de la polea para colocar el cable | |
|---|--------------------------------|---|----------------|
| mm | pulgada | mm | pulgada |
| 6,4 - 7,9 | $\frac{1}{4} - \frac{5}{16}$ | 0,4 | $\frac{1}{64}$ |
| 9,5 - 19 | $\frac{3}{8} - \frac{3}{4}$ | 0,8 | $\frac{1}{32}$ |
| 20,6 - 28,6 | $\frac{13}{16} - 1\frac{1}{8}$ | 1,2 | $\frac{3}{64}$ |
| 30 - 38 | $1\frac{3}{16} - 1\frac{1}{2}$ | 1,6 | $\frac{1}{16}$ |
| 40 - 57 | $1\frac{9}{16} - 2\frac{1}{4}$ | 2,4 | $\frac{3}{32}$ |
| 59 - 76 | $2\frac{5}{16} - 3$ | 3,2 | $\frac{1}{8}$ |
| > 76 | > 3 | 4,0 | $\frac{5}{32}$ |

Nota. Adaptado del *ASM Metals Handbook. Volume 11, 2002.*

1.6.5. Abrasión en el cable

Durante el funcionamiento de los cables se da un desgaste de la superficie de los alambres exteriores del cable, también se da una deformación del metal cambiando la forma de los alambres exteriores de un cable. A la capacidad de resistir la pérdida del metal por la abrasión anteriormente mencionada, se le denomina resistencia a la abrasión. Además de los alambres gastados, la abrasión puede dar lugar al *martilleo*, nombrado de esta forma, dado que los alambres parecen haber sido *martillados* en la superficie como se ve en la Figura 17. Este

martilleo ocurre normalmente en los tambores a causa del contacto del cable consigo mismo, aunque también puede ocurrir en las poleas. Este fenómeno promueve la fatiga en los alambres.

Al modificar la forma del alambre, también se cambia la microestructura de los alambres realineando su grano y cambiando la resistencia del material. Además, dado que los alambres pierden su forma circular, dificultan el movimiento del cable cuando se flexiona.

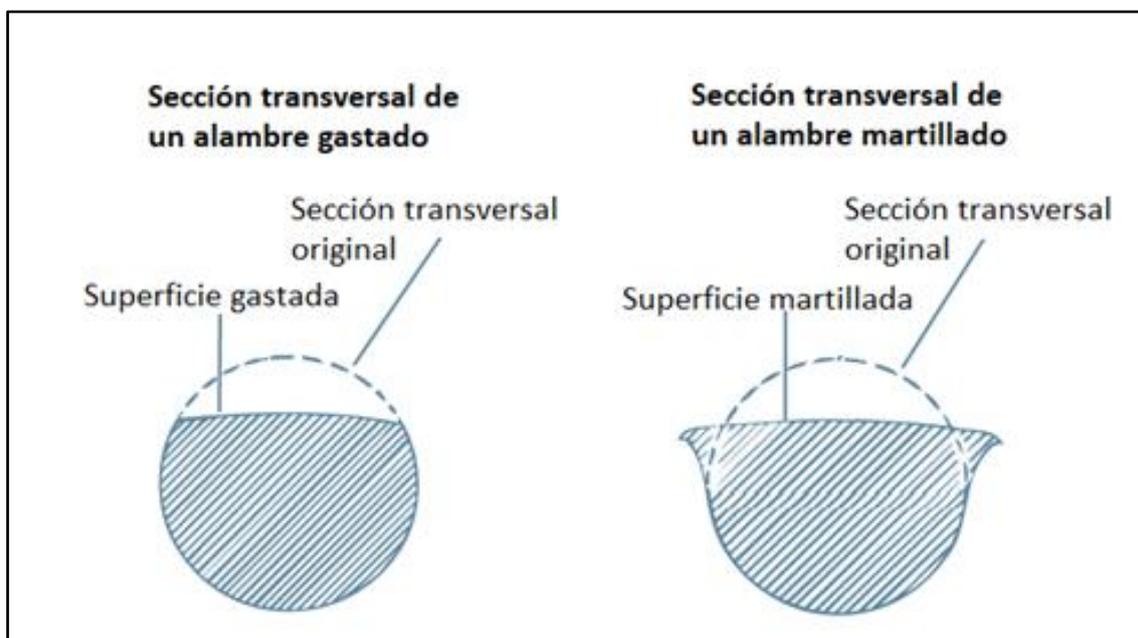


Figura 17. Ejemplos de una superficie gastada, y otra con martilleo.

Adaptada del Wire Rope User's Handbook (2016).

1.6.6. Resistencia a la rotación

Al colocar cargas en los cables existe un componente de torsión dentro del mismo cable, que los alambres y torones tratan de enderezar. Los cables están diseñados para resistir esta torsión provocada por la carga, pero a pesar de esto se puede dar un giro en la carga, mientras la elevan. Es por esto que existen cables diseñados para reducir esta rotación. Normalmente, en el caso de los cables estándar de 6 a 8 torones las torsiones causadas por los torones exteriores y el alma metálica independiente (IWRC) son en el mismo sentido y se suman entre sí. Es por esto que, al diseñarse cables resistentes a la rotación, el torcido de los torones exteriores se hace en dirección opuesta al de los torones internos y de esta forma se consiguen torsiones opuestas

que se sustraen una de la otra. En el Anexo C se detalla el proceso del preformado, que ayuda a evitar la rotación causada los esfuerzos residuales.

1.6.7. Lubricación de los cables

La lubricación sirve para proteger al cable de la corrosión y también para reducir la fricción entre los alambres y torones del mismo cable, así como la fricción entre el cable con las poleas y tambores, dado que esto resulta en una mayor duración de la vida del cable, por lo cual los cables deben de engrasarse durante su fabricación. Según Vereet (2017), las fábricas entregan al cliente los cables intensamente engrasados, pero a pesar de haber sido engrasados intensamente esta protección tiene una duración limitada por lo que es necesario volver a engrasar el cable periódicamente con grasa adhesiva y no ácida durante su mantenimiento. En la Figura 18 se ve la influencia del engrasado sobre la vida del cable.

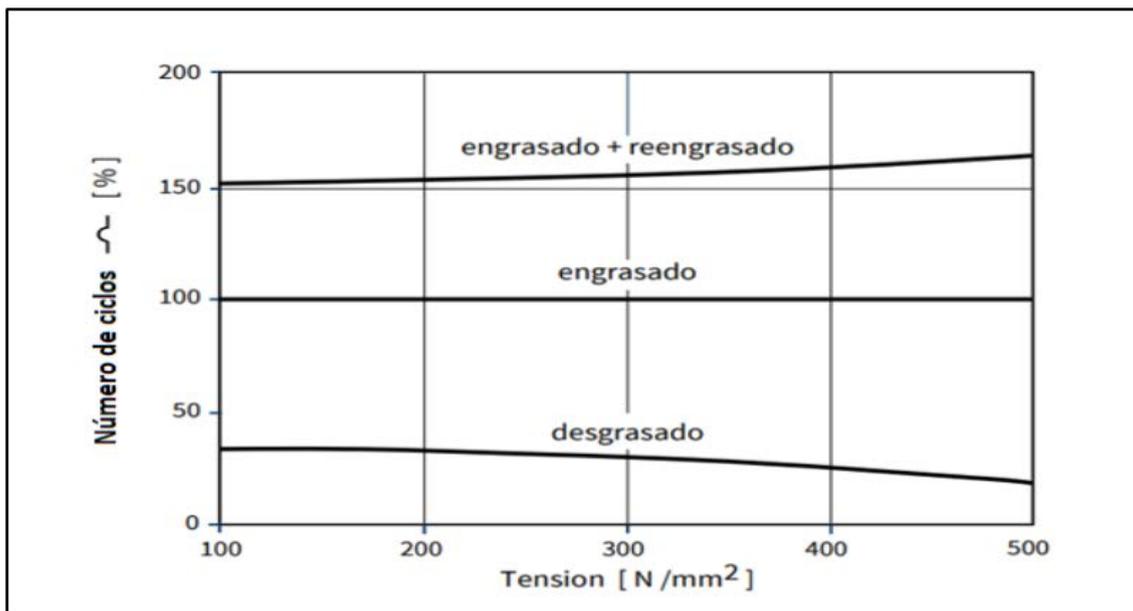


Figura 18. Duración de los cables con respecto a su resistencia para distintos tipos de engrases.

Adaptado de Vereet R. (2017) Wire rope technology Aachen: Manipulación, montaje y mantenimiento de los cables de acero).

También es importante tener cuidado con la limpieza del cable, dado que la acumulación de polvo y suciedad durante o después del proceso de lubricación puede ocasionar un aumento en la abrasión y de desgaste del cable impidiendo que la lubricación funcione correctamente, además, al no limpiarse el cable cada vez que se lubrica, la grasa colocada puede atrapar humedad, lo que puede ocasionar que se corroan los alambres rápidamente.

1.6.8. Aflojamiento de los alambres exteriores

Según Ernst H. “Aparatos de Elevación y transporte” (1970), se debe tener cuidado de que la distorsión de los alambres exteriores no ocasione que estos se aflojen. Si estos alambres se desplazan fácilmente al intentar moverlos con una herramienta, como por ejemplo, un destornillador, significara que estos no están resistiendo ninguna carga al tensarse el cable, lo que resultará en una sobrecarga de esfuerzo en las capas internas. Esto sucede principalmente en los cables Lang cuando sufren una ligera abrasión. Por otra parte, en los cables con alambres exteriores flojos, la humedad penetra fácilmente, lo que hará que el cable se deteriore más rápido.

1.6.9. Defectos del montaje

La disposición en la cual se maneja al cable al retirarlo del carrete puede generar rizos que distorsionen el funcionamiento normal del cable. El desarrollamiento correcto e incorrecto del cable se muestra en la Figura 19.

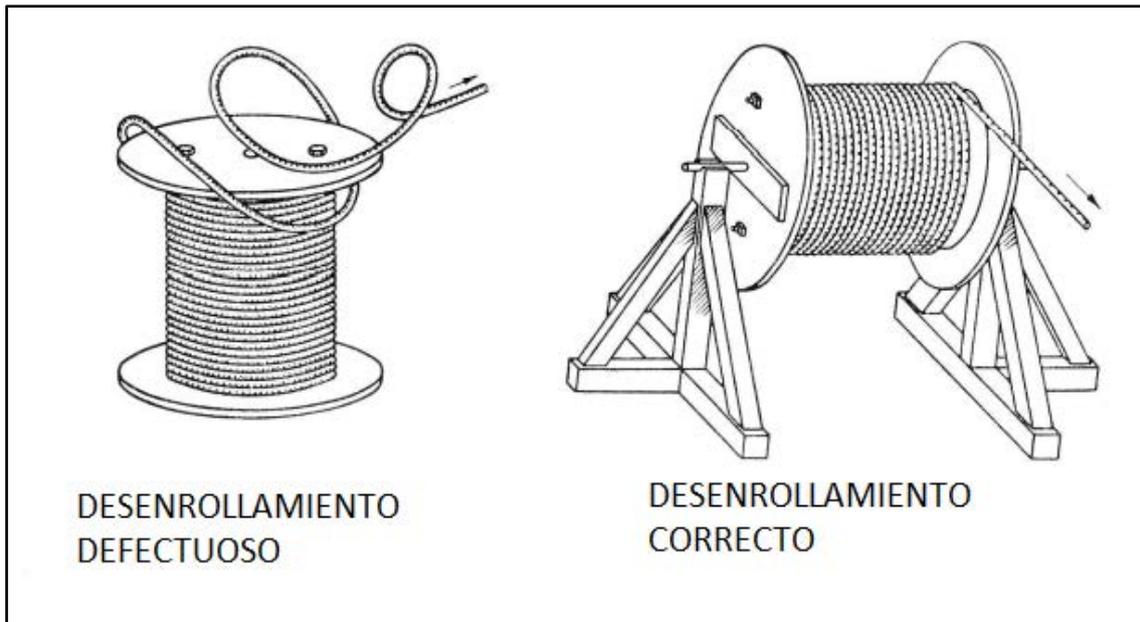


Figura 19. Desenrollamientos de cables defectuoso y correctos.

Adaptado de Ernst H. "Aparatos de Elevación y transporte" (1970)

Los rizos son perjudiciales para el cable dado que durante la operación de este favorecen a la formación de cocas. Las cocas, como la que se ve en la Figura 20, son deformaciones plásticas que se crean al traccionar el cable mientras este tiene rizos. Esta deformación plástica causa la destrucción prematura del cable.

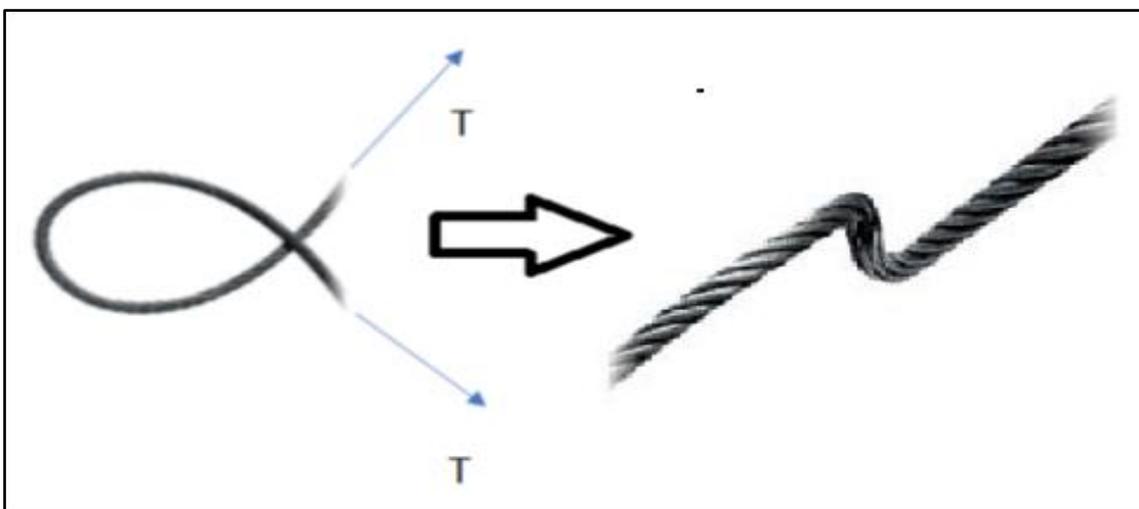


Figura 20. Al estirar el cable con rizo o bucle (izquierda) se pueden producir cocas (derecha).

Adaptado del Wire Rope User's Handbook (2016).

También, según la norma ISO 4309 (2017), los rizos que llegan hasta las poleas generan fracturas como las que se ven en la Figura 21, dado que se produce un desequilibrio en la longitud de la torcedura, lo que provoca un desgaste excesivo y una disminución de su resistencia original.



Figura 21. Fractura de un rizo que se da cuando intenta pasar por la polea
Adaptado del Wire Rope User's Handbook (2016).

1.6.10. Corrosión

La corrosión en el cable se puede evitar por medio de la galvanización de sus alambres, aumentando el tiempo de vida de este, pero a cambio su resistencia queda un poco disminuida. En el artículo de Frank L. Jamieson, escrito en *ASM Metals Handbook Volume 11* (2002) la corrosión es una de las causas más comunes de fallas en cables, debido a las atmósferas corrosivas en las que operan los cables de acero.

1.7. Análisis de falla.

1.7.1. ¿Cómo se define una falla?

Para la discusión de un análisis de falla, el término “falla” implica una condición para la cual un componente no puede desarrollar sus funciones de manera normal. Una falla en este sentido puede ser una pérdida de función, es decir que no necesariamente el componente está destruido, pero no cumple las condiciones necesarias para su puesta en funcionamiento dentro de un sistema; También puede ser una condición en donde se da el uso funcional del sistema, pero no cumple con los estándares de seguridad adecuados que el usuario requiere; Finalmente, otro nivel de falla, es la fractura completa del componente analizado, que por lo mismo, impide la operabilidad del sistema (Scutti, 2002). El caso más crítico de falla en esta tesis será el de la fractura completa, es decir el de la fractura de todos los alambres de una sección que separe al cable en segmentos.

1.7.2. ¿Qué es un Análisis de falla?

Según James J. Scutti (2002), El análisis de falla es el examen de las características y causas de la falla del equipo o componente. En la mayoría de los casos, esto implica la aplicación de pruebas físicas y el uso de principios científicos y de ingeniería, así como de herramientas analíticas. Los análisis de falla se realizan para caracterizar las causas de las fallas y evitar la repetición de fallas similares. Estas fallas pueden darse por los siguientes factores o por una combinación de estos (Vander, 2002).

- Defectos de diseño
- Imperfecciones en el material debido a una falla en el procesamiento o fabricación.
- Sobrecarga u otros abusos de su trabajo en el servicio.

- Mal mantenimiento o reparación.
- Interacciones con el ambiente.

1.7.3. Fases del análisis de falla.

Según Vander Voort (2002), se recomienda que los principales pasos de este análisis sean los que se muestran a continuación, y que sean realizados según se les necesite, por lo tanto, su uso y el orden en que se realizan variara dependiendo del componente, del tipo de falla y de la experiencia del analista. Estas fases son:

Para la recopilación de información inicial:

1. Recolección de información previa.
2. Inspección visual del área de la falla y las áreas adyacentes para determinar las zonas a las cuales se les deban realizar fotografías, que luego puedan ayudar a los pasos posteriores del análisis y a la selección de muestras.
3. Ensayos no destructivos.

Evaluación de los daños y las condiciones de la falla:

4. Selección de muestras de las superficies de falla o adyacentes.
5. Análisis fractográfico en las superficies de las fallas para determinar los tipos de fracturas que tienen.
6. Determinación de las propiedades mecánicas por medio de ensayos mecánicos y compararlas con especificaciones del material o normas.

Para representar la condición del material

7. Realización de un ensayo metalográfico para evaluar la microestructura del elemento, determinar la dirección de las deformaciones en las fallas y la relación de estas con las solicitudes del trabajo de la pieza y sus esfuerzos residuales.
8. Análisis químico del elemento y comparar el resultado con normas o las especificaciones respectivas.
9. Realización un ensayo de micro dureza para evaluar el trabajo en frío, la calidad de la soldadura y como ayuda para identificar las fases de la microestructura.
10. Realización de micro pruebas sobre cualesquiera otras anomalías críticas, como inclusiones y segregaciones, que no pueden visualizarse en el análisis macroscópico.
11. Utilización de técnicas de rayos X para determinar el nivel de estrés residual y la cantidad relativa de las fases.
12. Realización de pruebas de simulación para evaluar el material en situaciones críticas para determinar el grado de fragilidad o confirmar el método de tratamiento térmico utilizado.
13. Resumen y análisis de la información pertinente y consulta con expertos cuando sea necesario.
14. Reporte y publicación para que se tengan en cuenta estos problemas encontrados al momento de analizar futuros problemas. El reporte debe de incluir recomendaciones.
15. Utilización de las recomendaciones puestas en el reporte.
16. Almacenaje de las evidencias del reporte para que las puedan usar otros analistas.

1.8. Fractografía

La fractografía es la ciencia que se dedica a la observación y análisis de las superficies de fractura. Con ella se pueden identificar el tipo y las condiciones de esfuerzo, las condiciones del ambiente de trabajo y el comportamiento del material.

1.8.1. Tipos de Fractografía

Según Rumiche (2017), existen 2 modos de fractografía:

- **Macro – fractografía** : En la cual se observa y analiza la superficie de fractura a “ojo desnudo”, pero también se pueden usar lentes de magnificación de hasta 40 aumentos (40x). La macrofractografía es útil para identificar características y marcas típicas a nivel macro, además de permitir relacionar las marcas encontradas con sus respectivos mecanismos de fractura. La información que se suele obtener son datos como el o los tipos de fractura, el origen de esta, su zona final, su dirección de propagación, y el tipo y magnitud de la carga.

- **Micro - fractografía**: Es la observación y análisis “micro”, normalmente haciendo uso de un microscopio óptico que tiene hasta 1000 aumentos, aunque en algunos casos también se pueden usar microscopios de barrido electrónico (SEM, por sus siglas en inglés) con el cual se pueden lograr aumentos mucho mayores. Con este tipo de fractografía se pueden identificar características, evaluar su efecto en la fractura y analizar los mecanismos de orden microscópico.

1.8.2. Tipos de fracturas:

Fractura dúctil: Es la fractura que se da de forma transgranular (a través de los granos que conforman la microestructura del metal), lo cual denota que el material tiene una buena

ductilidad y tenacidad. En la zona de fractura se presenta, normalmente, la deformación de un cuello, un entallamiento o estricción localizada. Esta deformación sucede antes de la fractura final. Este tipo de fracturas son causadas, usualmente, por sobrecargas simples o al aplicar un esfuerzo demasiado grande al elemento analizado. Al realizarse un ensayo de tracción simple, este tipo de fractura comienza con la nucleación, que luego conlleva al crecimiento y a la coalescencia de micro – huecos en el centro de la barra de ensayo. Estos micro – huecos se forman cuando un gran esfuerzo logra separar el metal en los límites de grano o en las interfaces entre el metal y las inclusiones, que son pequeñas partículas de impurezas. Conforme aumentan los esfuerzos, los micro – cavidades crecerán y coalescerán formando cavidades más grandes. Finalmente, la sección de la probeta se hará muy pequeña como para soportar la carga y se generará la rotura completa. Por otra parte, la deformación por deslizamiento, que se da cuando el esfuerzo cortante resultante llega a su valor crítico en un ángulo de 45° respecto al esfuerzo de tensión aplicado, contribuye a la fractura dúctil del metal. Estos dos mecanismos se muestran en la apariencia de la superficie de falla. Para el caso de elementos de sección más gruesa, se suele encontrar la formación de un cuello en cuya superficie de fractura se encuentra una cara plana que es en donde se dio la primera nucleación y coalescencia de los micro – huecos, y una superficie lateral, o también llamada “labio de corte”, que esta inclinada en 45° con respecto a la carga aplicada. Este “labio de corte” es señal de que hubo deformación por deslizamiento y de esta forma se obtiene la apariencia “copa y cono” como se ve en la Figura 22 .

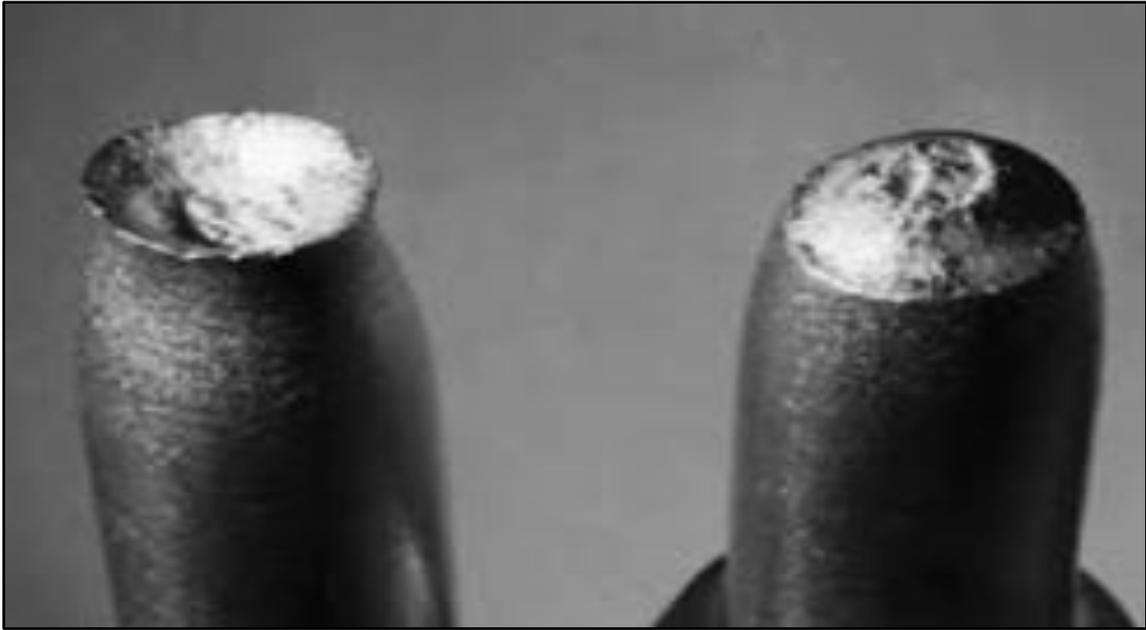


Figura 22. Superficie de fractura dúctil “Copa-cono”.

Tomado el 28/01/2023 de <http://dualmetalurgia.com/introduccion/propiedades/propiedades-mecanicas/>

Esta se visualiza meramente a un nivel macroscópico y es evidencia suficiente de que se ha dado una fractura dúctil. Si se usa un microscopio de barrido electrónico, se pueden revelar los hoyuelos de las superficies de la fractura tipo “copa y cono”, estos son las huellas de los micro – huecos que aparecieron durante la fractura. Los hoyuelos en el cuello, es decir, en la zona de las primeras nucleaciones y coalescencias de los micro – huecos se presentan, al ser una respuesta a un esfuerzo normal de tensión, redondos o equiaxiales; por otra parte, en el “labio de corte”, es decir, en donde se dio la deformación por deslizamiento, los hoyuelos son ovalados o alargados, y estos están alineados apuntando hacia el origen de la fractura. En el caso de secciones delgadas hay menor formación de cuello o entallamiento, y la superficie de la fractura puede tener una sola apariencia de cara cortante a 45° con el eje longitudinal, que también es conocida como “Fractura Tenaz” y que se muestra en la Figura 23. En este tipo de fractura todos los hoyuelos encontrados son alargados, lo que indica una prevalencia de

deformación por deslizamiento en comparación con las de fracturas de metales de sección gruesa, anteriormente mencionadas.

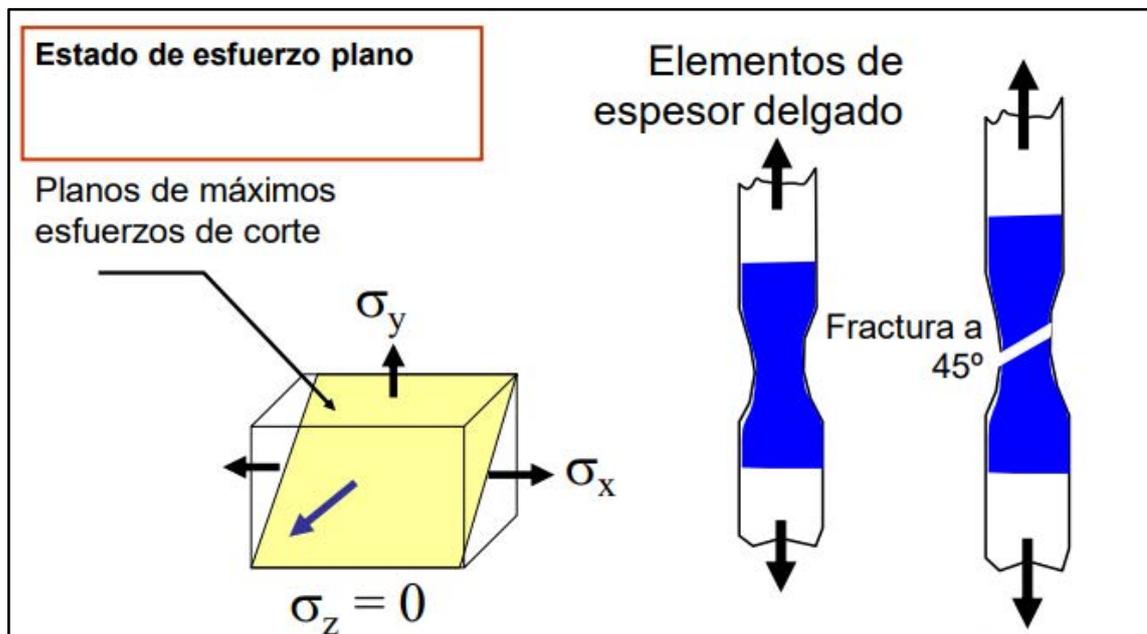


Figura 23. Superficie de fractura dúctil “Fractura a 45° ”.

Tomado de las diapositivas de clase de Lean P. (2014).

Fractura frágil: Las fracturas frágiles se dan normalmente en metales y aleaciones de alta resistencia, en los de mala ductilidad y tenacidad, en los dúctiles a baja temperaturas, en secciones gruesas a altas velocidades de deformación (impacto) y cuando las imperfecciones tienen una mayor influencia. Es más común encontrar una fractura frágil en una falla por impacto que una de sobrecarga. Las fracturas frágiles tienen poca o ninguna deformación plástica. En este tipo de fractura se inicia, comúnmente, en las concentraciones de esfuerzo causadas por imperfecciones pequeñas. La grieta que se abre en esta fractura lo hace a la velocidad del sonido en el metal. Esta grieta se extiende, comúnmente, con más facilidad por medio de planos cristalográficos, que normalmente, son los planos productos del clivaje. En estos planos la fractura se propaga cambiando su orientación de grano a grano y aparecen escalones que tratan de acomodar diferencias producto de las imperfecciones de la aleación.

Por otra parte, hay casos en los que las grietas toman trayectorias intergranulares (en los límites de grano), más que nada cuando hay segregación, que se entiende como la marcada separación de elementos diferentes, o inclusiones que debiliten los límites de grano como se ve en la Figura 24.

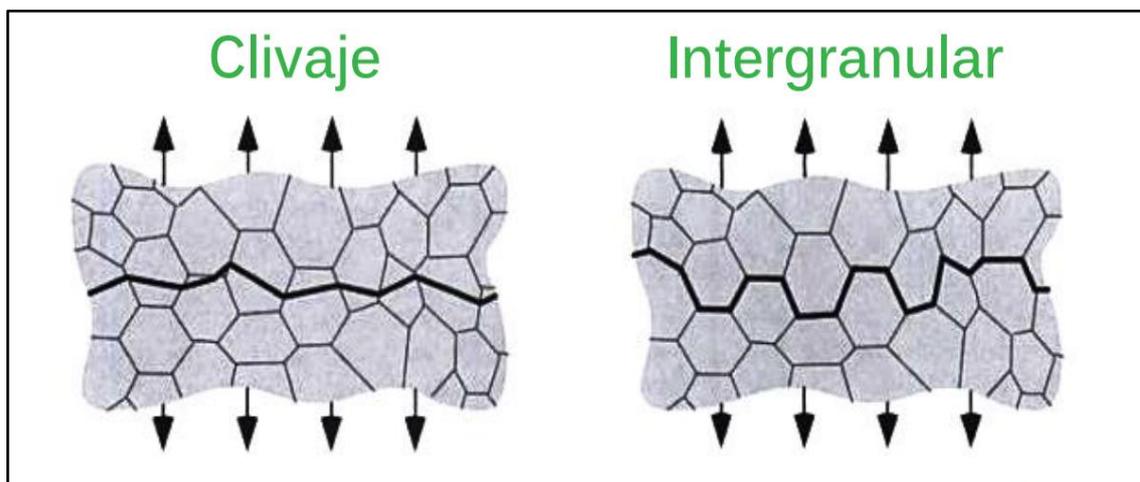


Figura 24. Fractura frágil por “Clivaje”, separación a través de los granos e “Intergranular”, separación en los límites de grano.

Tomado de las diapositivas de clase de Lean P. (2014).

Macroscópicamente, las fracturas frágiles intergranulares son identificables como una superficie de fractura lisa y perpendicular al esfuerzo aplicado como se ve en la Figura 25.



Figura 25. Superficie de fractura frágil lisa y perpendicular al esfuerzo aplicado.

Tomado el 28/01/2023 de <http://dualmetalurgia.com/introduccion/propiedades/propiedades-mecanicas/>

Si la fractura se da a través de los granos, es decir por clivaje, la superficie de fractura es lisa con granos de diferente orientación. En este caso, la superficie tiene un aspecto cristalino parecido a un “caramelo macizo roto”. A los frentes separados de grieta que se propagan a distintos niveles en el material se le denomina como “patrón de Chevron”. En este patrón, las marcas o lomos superficiales se irradian alejándose del origen de la grieta. Este se puede apreciar a simple vista y es una señal clara de una fractura frágil y ayuda a conocer el origen de esta, como se ve en la Figura 26.

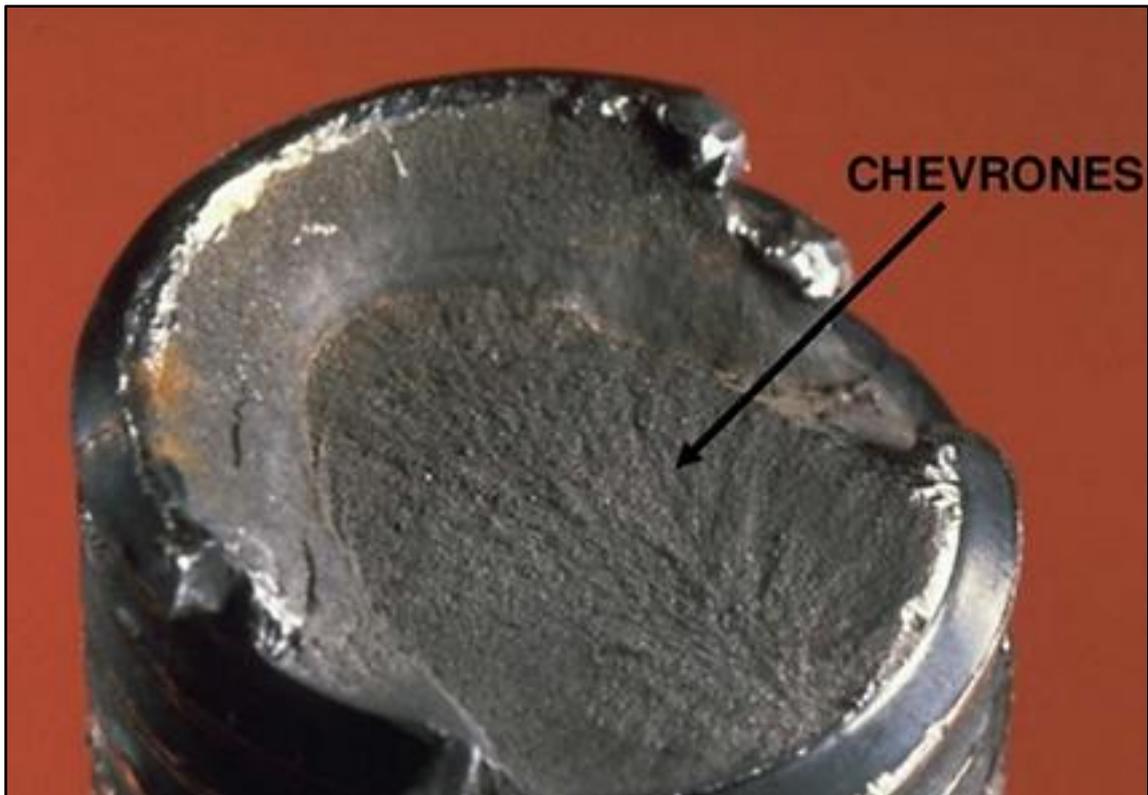


Figura 26. Superficie de fractura frágil que se dio por clivaje y en donde se puede apreciar las marcas de “Chevron”.

Tomado el 28/01/2023 de <https://www.areametalurgia.com/post/cuatro-tipos-b%C3%A1sicos-de-mecanismos-de-fractura>

Falla por Fatiga: La fatiga se da cuando esfuerzos repetitivos disminuyen la resistencia de un material. Es importante tener en cuenta este fenómeno, por que debido a este, el esfuerzo aplicado repetitivamente, que es menor que la resistencia a la fluencia del material. Es decir, siempre que se someta a un componente a una carga mecánica, eléctrica, térmica, o magnética o de cualquier otra naturaleza de manera cíclica, se debe tener cuidado de los efectos de estas sollicitaciones a largo plazo. La primera etapa de la falla por fatiga se da cuando se abre o nuclea una grieta diminuta, normalmente en la superficie y mucho después de aplicada la carga, aunque también pueden estar cerca de la superficie. Y es en esta grieta en donde el esfuerzo es máximo, además, se encuentran defectos superficiales como rayaduras, picaduras, cantos vivos productos de un diseño o manufactura deficiente, así como, inclusiones, límites de grano o

concentraciones de dislocaciones. Luego, la grieta, gradualmente, se propaga debido a que sigue siendo afectada por la carga cíclica y, finalmente, se da la fractura definitiva del material, debido a que la sección transversal restante no es lo suficientemente grande como para sostener la carga aplicada. Es necesario que parte del esfuerzo en el material sea de tensión. Una forma, común, de identificar una fractura por fatiga es por medio de su superficie de fractura, la cual es normalmente lisa cerca de su origen y se vuelve más áspera a medida que la grieta aumenta de tamaño e incluso puede llegar a ser fibrosa en la propagación final de la grieta. Al realizarse exámenes microscópicos y macroscópicos las superficies de fractura suelen mostrar un patrón de marcas parecido al mar en la orilla de la playa a las que se le denominan “marcas de playa” como se muestra en la Figura 27. Estas marcas se forman al haber sollicitaciones alternantes entre las cuales puede haber espacio para la corrosión dentro de la grieta. En las estriaciones de las “marcas de playa” se ven como fueron las puntas de las grietas después de cada ciclo de la carga alternante. Este patrón no siempre aparece en las fallas por fatiga.

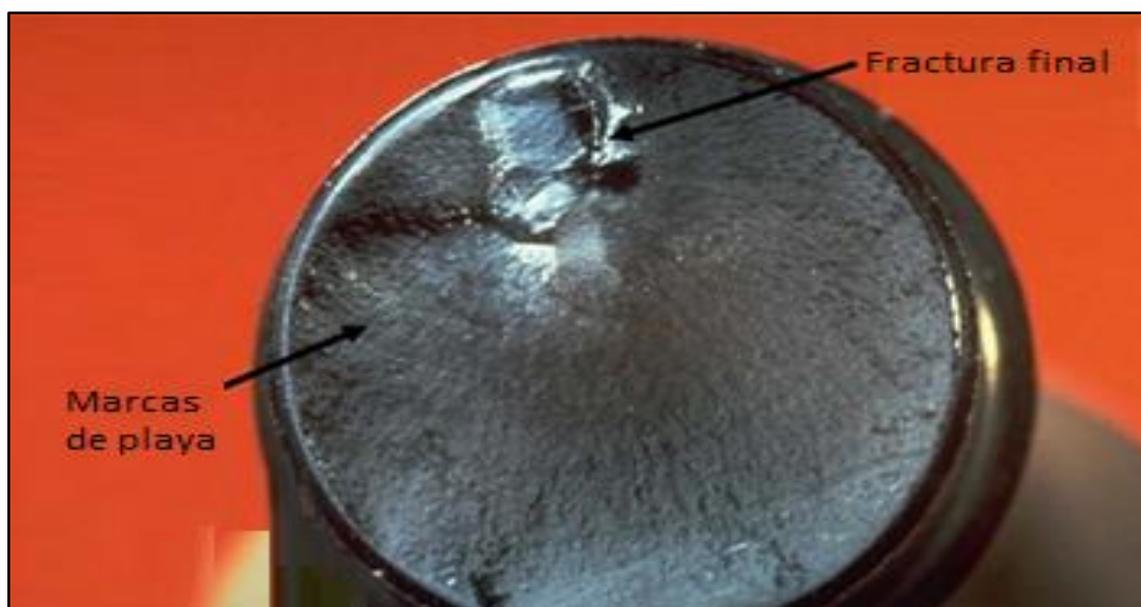


Figura 27. Superficie de fractura por fatiga en donde se ven las “Marcas de playa” y la “Fractura final”. Tomado el 28/01/2023 de <https://www.areametalurgia.com/post/cuatro-tipos-b%C3%A1sicos-de-mecanismos-de-fractura>

Capítulo 2. Metodología del análisis de falla

La metodología seguida para el análisis de falla efectuado sobre el cable fracturado se detalla en este capítulo. De las fases del análisis de falla mostradas en el capítulo anterior recomendadas en *ASM METALS HANDBOOK* Volumen 11 por Vander Voort (2002) y también teniendo en cuenta la metodología del análisis de falla de algunos artículos de investigación como lo son los análisis de falla efectuados por Mukhopadhyay (2018), Peterka, Krešák, Kropuch, Fedorko, Molnar y Vojtko (2014) y Gómez y Wilches (2003), que tratan sobre fallas producidas en cables del mismo material de estudio, se eligieron los ensayos necesarios para la determinación de la causa de la falla de la cual trata esta tesis:

1. Inspección visual.
2. Control Dimensional.
3. Análisis Fractográfico.
4. Análisis Metalográfico.
5. Análisis Químico.
6. Ensayo de Tracción.

A continuación, se explicará cada uno de ellos detallando su objetivo, probeta o muestra, procedimiento de análisis o ensayo y criterio de aceptación de acuerdo con el código o norma aplicable.

2.1. Inspección visual.

La inspección visual es un ensayo no destructivo que tiene como fin la observación detallada del componente, usando al ojo humano como sensor y la luz como fuente de energía. Este tiene como objetivo principal encontrar las partes del elemento analizado de las cuales se tomarán las muestras para los siguientes ensayos.

Para el desarrollo de este ensayo se tomaron las siguientes consideraciones:

- i. **Objetivo:** Identificar y anotar defectos superficiales de los segmentos del cable que falló en el izaje de carga de minerales.
- ii. **Muestra o probeta:** Segmentos del cable sobre los cuales se desarrolla el análisis de falla antes y después de recibir una limpieza superficial.
- iii. **Procedimiento:** Se observaron y tomaron fotos de los segmentos, tal y como fueron entregados al laboratorio y se tomó nota de las características y fallas encontradas en el cable, antes y después de una limpieza superficial. Esta limpieza se realizó con un limpiador y removedor en aerosol de la marca “Magnaflux”, que se puede apreciar en la figura 28.



Figura 28. Aerosoles de líquido removedor que se usaron para limpiar los trozos de cable.

iv. **Criterio de aceptación:** Se debe prestar atención a los defectos típicos del cable: alambres rotos, superficies gastadas por abrasión, superficies “martilladas”, “aplastamiento”, deformaciones plásticas cerca de la rotura, “cocas”, aflojamientos de los alambres exteriores del cable, exceso de grasa y corrosión, tal como se explican en la sección 1.6 de esta tesis.

2.2. Control Dimensional.

El control dimensional consiste en la evaluación de la geometría y construcción del cable y sus alambres para ubicar las normas y recomendaciones que le correspondan en base a las características de diseño del cable.

i. **Objetivo:** Identificar el tipo de construcción que recibió el cable y sus dimensiones para poder clasificarlo.

ii. **Muestras o probetas:** Se usó la máquina de disco de corte “Labotom-5” de la marca “Struers”, que se ve en la Figura 29, para cortar una sección del cable.



Figura 29. Cortadora de disco “Labotom-5” de la marca “Struers” usado en la extracción de muestras de los segmentos del cable.

La muestra extraída fue un segmento de aproximadamente 2 cm cortado de uno de los extremos sin fallas de los segmentos analizados en la inspección visual y que permitió la visualización de los diámetros de los alambres bajo el estereoscopio modelo S6D de la marca “Leica” del Laboratorio de Materiales como se ve en la Figura 30.



Figura 30. Estereoscopio modelo “S6D” de la marca “Leica” usado para realizar la inspección de muestras hasta con aumentos de 50X.

iii. **Procedimiento:** Se tomo la muestra de un extremo de uno de los segmentos y se midió el diámetro del cable redondo, luego se evaluó la clasificación y el tipo de construcción del cable, así como el diámetro de los alambres usando el estereoscopio “Leica”, el cual cuenta con un software y una cámara digital integrados. Se identifico los calibres de los alambres, así como la ubicación a la que pertenecían (torones exteriores o alma del cable). Finalmente, se identificó el rango de resistencias que podría tener el cable, según las normas ASTM A1007 (2022) y ASTM A1023M (2021).

iv. **Criterio de aceptación:** Se busca que los alambres este dentro del rango de diámetro utilizados en la norma ASTM A1007 (2022), entre 0,381 mm y 0,813 mm. De esta forma, y también teniendo en cuenta el diámetro del cable redondo, se verifica que sus características

estén determinadas por la norma ASTM A 1023M (2021), dado que esta norma rige sobre todos los cables de acero para propósitos generales. Una vez confirmada la utilización de esta norma, se determina en la norma ASTM A1023M (2021) el rango de resistencia que debe tener el cable. Esta resistencia puede ser IPS, EIP o EEIP, como se mostró en la Tabla 3. Los tipos de construcción se evaluarán según sean de tipo Seale, Warrington, Filler o una combinación de estos, tal y como se vio en la Sección 1.4.2.

2.3. Análisis Fractográfico.

Para analizar las características de las fracturas de los alambres se debe de realizar un análisis fractográfico de tal forma que se pueda identificar la morfología de las fracturas de cada alambre y determinar los mecanismos y causas probables de la falla del cable. El análisis fractográfico se aplica únicamente a los componentes que han fallado por fractura, en cualquiera de sus formas: Dúctil, Tenaz y Frágil, como bien se explicó en la Sección 1.8.2 de esta tesis.

i. **Objetivo:** Determinar cuál es el tipo de fractura predominante en los alambres fracturados en la falla más representativa de los tres segmentos recibidos del cable.

ii. **Muestra o probeta:** Alma y torones separados de uno de los segmentos con fractura para facilitar su manipulación bajo el estereoscopio. Usar la máquina de disco de corte para cortar los extremos con alambres fracturados y separar el cable en torones y alma.

iii. **Procedimiento:** De la muestra que se separó, se tomaron los alambres agrupados en torones y se les colocó debajo del estereoscopio y se anotó el tipo de fractura de la superficie de cada uno de los alambres. Además, se tomaron fotos de los alambres, haciendo uso de la cámara digital integrada del estereoscopio, de aquellas fallas que mostraron con mayor claridad el tipo de falla o fallas más comunes dentro de las encontradas. Luego dentro de estos alambres

fotografiados se eligieron los que irían a ser colocados en una briqueta para el ensayo de metalografía.

iv. **Criterio de evaluación:** La fractura en los alambres debe de ser descrita como dúctil (copa-cono), tenaz (plano en 45°) o frágil (Perpendicular a la dirección del esfuerzo) según lo comentado en la Sección 1.6 de esta tesis.

2.4. Análisis Metalográfico.

El análisis metalográfico es la observación de la microestructura de los materiales y la identificación de la forma del grano, las inclusiones no metálicas, las fases y las fracturas a nivel microestructural.

i. **Objetivo:** Este ensayo busca observar la microestructura de la muestra, así como también la presencia de inclusiones no metálicas para determinar errores en el procesamiento del material y en la fabricación del componente.

Estas últimas deben de visualizarse primero, dado que no se les podrá ver una vez la muestra reciba el ataque químico por lo mismo se debe de tomar un registro de lo que se vea, antes y después del ataque químico, de tal forma que se pueda obtener un registro claro de ambos aspectos de la muestra.

ii. **Muestra o probeta:** Se colocaron 2 alambres con las fallas características encontradas en el análisis de fractografía en la superficie de una briqueta cilíndrica de 4 cm de diámetro y 2 cm de alto. La briqueta se elaboró en base a la norma ASTM E3 *Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens* (2017) haciendo uso de la máquina briquetadora modelo “SimpliMet II” de la marca “Buehler”, que se ve en la Figura 31.



Figura 31. Máquina de fabricación de briquetas modelo modelo “SimpliMet II” marca “Buehler”, usado en este análisis de falla.

La elaboración consistió en colocar las muestras y la resina en polvo para briquetas en la máquina briquetadora. Luego se comprimio manualmente todo para después calentarse por inducción por 25 minutos y se retiró después de 25 minutos de haberse apagado el sistema de calentamiento, aplicando nuevamente presión por el sistema hidráulico. Finalmente, se realizó el desbaste fino sobre la briqueta por medio de lijas para agua, hechas de carburo de silicio de números 400 y 600 y, además, se usaron platos giratorios con alúmina en suspensión de 1 micra y otros con pasta de diamante de 1 a 0.3 micras como se ve en la Figura 32.



Figura 32. Discos para acabado fino con pasta de diamante de la Marca “Struers”.

iii. **Procedimiento:** Se colocó la briqueta en un microscopio óptico modelo “DMI 5000” de la marca “Leica”, el cual que se ve en la Figura 33, que puede realizar aumentos discretos desde 50x hasta 1000x.



Figura 33. Microscopio modelo “DMI 5000” de la marca “Leica”, con aumentos de 50 a 1000 usado en el ensayo de metalografía.

Se tomaron fotos de las inclusiones no metálicas y su distribución de un tramo sin falla del alambre según lo estipulado en la norma ASTM A247 *Standard Test Method for Evaluating*

the Microstructure of Graphite in Iron Castings (2019). Para visualizar la microestructura bajo el lente del microscopio se recibió un ataque químico con Nital al 2% (50 ml de etanol al 96% por cada ml de HNO₃ concentrado), siguiendo la norma ASTM E407-07 *Standard Practice for Microetching Metals and Alloys* (2015), en la superficie que se desbasto y luego se limpió con alcohol, teniendo cuidado de que no quede Nital entre los límites entre el alambre y la resina. Finalmente, se tomaron fotos de la microestructura de las partes fracturadas, así como un tramo sin fractura.

iii. **Criterio de aceptación:** Las inclusiones deben de ser mínimas, según lo determinado en la ASTM A247 (2019). La microestructura debe de ser una matriz de perlita fina con presencia de ferrita fina alargada por el trefilado realizado sobre los alambres, y también correspondiente con el alto contenido de carbono según lo visto en *Handbook of Materials Failure Analysis With Case Studies from the Construction Industries* (Mukhopadhyay, 2018) como se ve en la Figura 34.

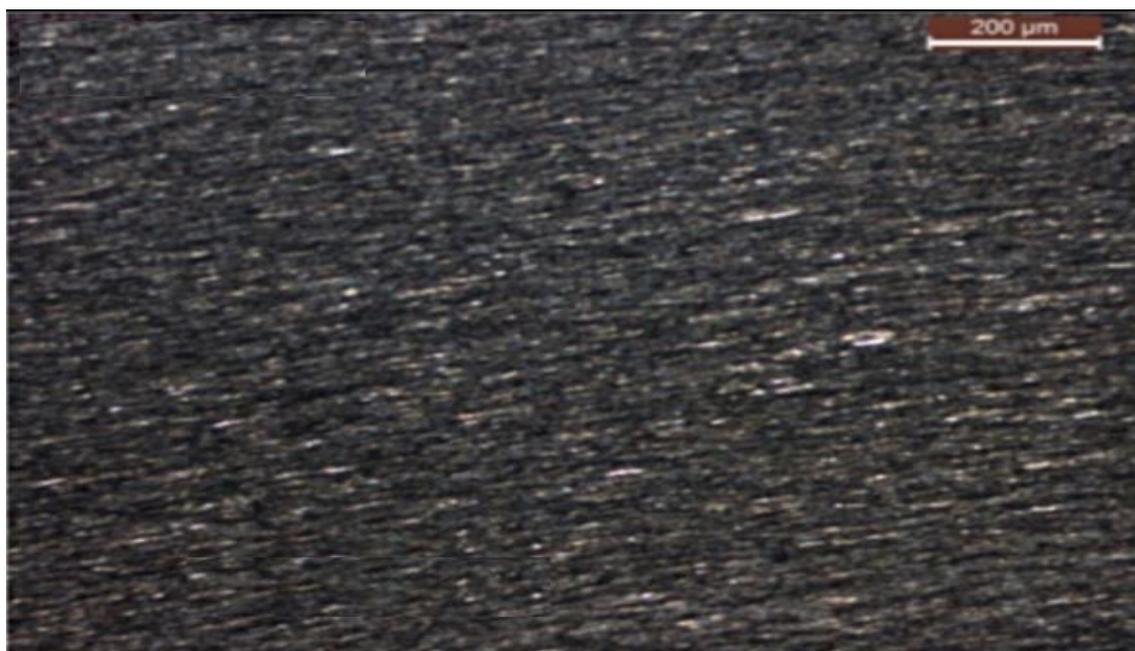


Figura 34. Microestructura típica de los alambres, perlita alargada en un aumento de 100X.

Adaptado de *Handbook of Materials Failure Analysis With Case Studies from the Construction Industries* (Mukhopadhyay.G, 2018).

2.5. Ensayo de tracción.

Este ensayo consiste en la aplicación de una carga axial de tracción en una probeta, de manera creciente y a velocidad aproximadamente constante, hasta ocasionar la rotura de la misma. La medición de los esfuerzos aplicados en la probeta determina la resistencia a esfuerzos estáticos del componente. En el caso del cable evaluado, se tomaron los valores de una probeta con una deformación plástica y una sin ninguna deformación para probar la disminución de la resistencia del cable al verse afectado con una deformación plástica, denominada como *coca*.

- i. **Objetivo:** Verificar que la resistencia del cable cumpla con la mínima indicada en la norma haciendo uso de una probeta con deformación plástica y otra sin ningún deterioro, obteniendo su esfuerzo de tracción máximo en cada caso, y luego, hacer una comparación entre ambas probetas para determinar el porcentaje en que queda reducida la resistencia del cable debido a la deformación plástica.
- ii. **Muestra o probeta:** 2 segmentos de 500 mm, uno con una coca y otro sin coca. La probeta con falla tenía una *coca* a la mitad de su longitud.
- iii. **Procedimiento:** Las normas que se siguieron para este ensayo son la ASTM A931 *Standard Test Method for Tension Testing of Wire Ropes and Strand* (2018) y la ASTM A370 *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products* (2021), según las cuales se deben tener las siguientes consideraciones:
 - La máquina de ensayos de tracción usada fue la de modelo Z 250 de la marca Zwick/Roell, que se ve en la Figura 35. Se colocaron las probetas en las mordazas para elementos circulares de la máquina de tracción como las de la Figura 36, sujetadas de tal forma que entre la mordaza superior e inferior quedó un espacio de 254 mm (10 pulgadas).



Figura 35. Máquina de ensayo de tracción Marca Zwick/Roell, modelo Z 250.

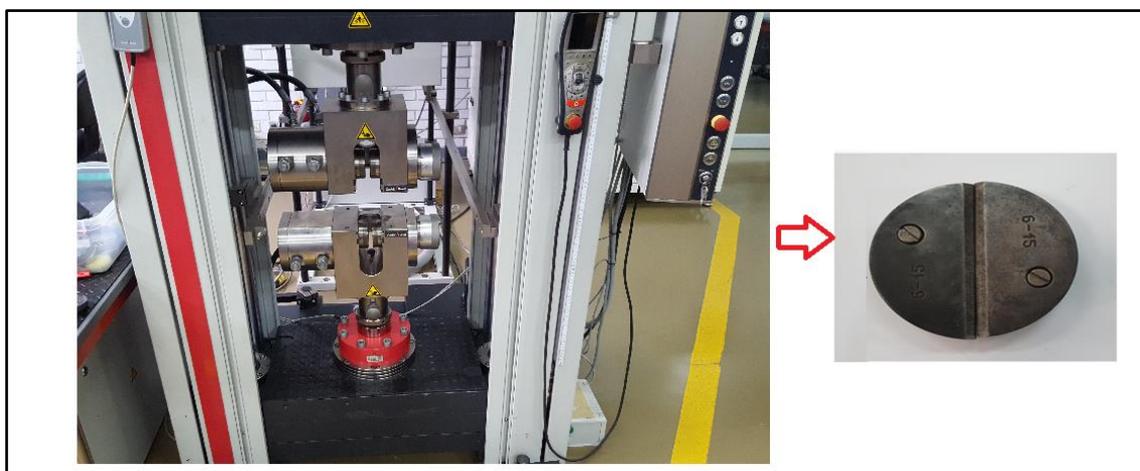


Figura 36. Injertos para elementos cilíndricos, usados para la mordaza de la maquina de ensayo de tracción de Zwick/Roell modelo Z 250, durante el ensayo de tracción. Este injerto es usado para elemento con diámetros entre 6 a15 mm.

- Se ajustaron las mordazas con una presión de 300 bar para evitar el deslizamiento
- Se estiraron las probetas a una velocidad constante de 5” pulgada por minuto hasta que se aplicó el esfuerzo máximo de tracción de la probeta, es decir hasta que el esfuerzo aplicado llegó al pico máximo, lo cual ocurrió sin que todos los alambres se tuvieran que romper y un momento después de que comenzaron a sonar las primeras roturas de alambres y torones.

iv. **Criterio de evaluación:** Según la ASTM A931, La fuerza máxima de tracción de la probeta sin falla debe de estar muy por encima de la que tiene una coca. La resistencia mínima del cable sin coca debe ser de una fuerza de rotura mínima a la tracción cercana al valor de la resistencia correspondiente con el diámetro de cable redondo que se obtuvo en el control dimensional, según indica la norma ASTM A1023 (2021) y que se puede encontrar en la Tabla 3.

2.6. Análisis Químico.

En este ensayo se busca obtener el porcentaje en masa de la composición química de la muestra. Para esto se realizarán dos tipos de análisis, el de combustión para determinar el contenido de carbono y el azufre del cable, y el de espectrometría por absorción atómica para determinar el contenido de Manganeso y Silicio:

2.6.1. Análisis de carbono y azufre por combustión.

En esta prueba se utilizó el analizador de carbono y azufre, en el cual, por medio de la inyección de una corriente de oxígeno se induce a una combustión. Durante esta se analiza la

cantidad de carbono y azufre midiendo la energía absorbida de la forma oxidada de estos dos elementos durante este proceso.

i. **Objetivo:** Conocer el porcentaje de Carbono y Azufre que hay en el material con el que se fabricó el cable y determinar si la falla estuvo relacionada con su manufactura.

ii. **Muestra o probeta:** Se cortó transversalmente 1.5 gramos de alambre limpio y sin corrosión en trozos de 1 cm. Luego, se colocó la muestra en 3 crisoles de 3 cm de diámetro y 5 cm de alto, dividiendo la muestra extraída en tres partes de 0.5 gramos de alambre cada una dado que se realizarían tres pruebas, según se indica en la norma ASTM E1806 *Standard Practice for Sampling Steel and Iron for Determination of Chemical Composition* (2018).. Para comprobar su peso se usó la balanza electrónica que se ve en la Figura 37.



Figura 37. Balanza electrónica con la cual se pesaron los crisoles.

Finalmente, se agregó el fundente de tungsteno “Alphacel Tungsten”, el cual viene en la presentación de granos y se colocó 1.5 gramos, aproximadamente 2 cucharadas, de este fundente en cada crisol. Uno de estos crisoles se ve en la Figura 38.



Figura 38. Probeta para el analizador de carbono con el gramo de alambre cortado y el catalizador a base de tungsteno.

iii. **Procedimiento:** Después, se ingresaron los datos del peso de la primera muestra en el software del analizador de carbono. El analizador es un modelo “G4 ICARUS” de la marca “Brucker”, y se puede apreciar en la Figura 39.

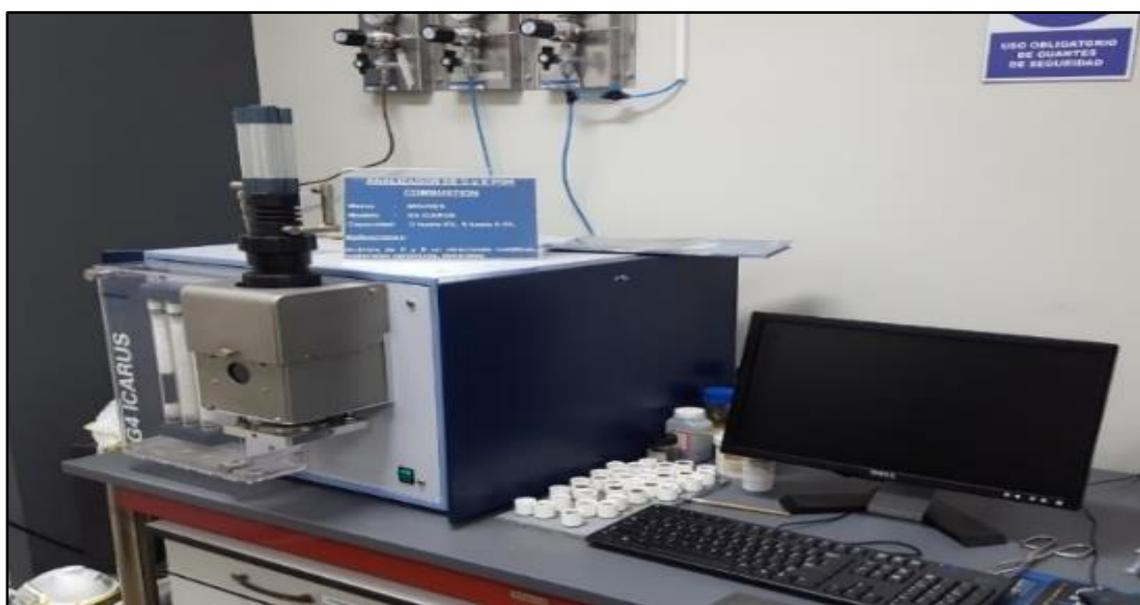


Figura 39. Analizador de Carbono y Azufre por combustión usado en el Laboratorio de Materiales PUCP.

Una vez ingresados los datos, se colocó el crisol con la primera muestra y el fundente en una base cerámica y ambos fueron colocados dentro del horno del analizador como se ve en la Figura 40.



Figura 40. Base cerámica que sostiene al crisol y por medio del cual se introduce en el horno.

Finalmente, se presionó en el botón “Empezar análisis”, que estaba en la interfaz del equipo y de esta forma se empezó a estabilizar el flujo del Oxígeno, y se empezó el calentamiento por inducción, el horno fundió la muestra y la quemó de tal forma que el espectro del contenido de Azufre y Carbono se fue mostrando en la pantalla. Se repitió lo mismo para otras dos probetas iguales y se promedió la concentración de azufre y carbono de las 3 muestras.

iv. **Criterio de evaluación:** El contenido de carbono y azufre debe de estar dentro del rango de 0.65-0.75% de Carbono y 0.05% de Azufre como máximo para un acero AISI SAE 1070, según se indica en la Ficha técnica de este metal tomada de Aceros Industriales (2009).

2.6.2. Espectrometría por absorción atómica.

Para determinar el porcentaje en peso del Manganeso y el Silicio en el cable, se usó un espectrómetro de absorción atómica, el cual se ve en la Figura 41. Este equipo analiza las muestras aspirándolas, atomizándolas y quemándolas en una flama, y luego un haz de luz de una lampara de cátodo hueco, correspondiente con el elemento analizado, es proyectada a través de las partículas en la flama hacia un monocromador que mide la cantidad de luz absorbida y en base a esta se determina el porcentaje del componente analizado.



Figura 41. Espectrometro de absorción atómica usado en el análisis químico

i. **Objetivo:** Conocer el porcentaje de Mn y Si del material del alambre del cable analizado y determinar si la falla estaba relacionada con su fabricación.

ii. **Muestra o probeta:** Se tomaron segmentos de alambre sin fallas, limpio y sin corrosión de 1 cm para conseguir dos muestras de 0.5 g cada una, que se solubilizaron para el análisis. Además, para la calibración se utilizaron 3 soluciones estandarizadas de Manganeso y Silicio en distintos porcentaje de estos elementos, denominados Mn1 Si20, Mn2 Si50 y Mn3 Si100, y

una mezcla denominada “Blanco”, que en este caso fue agua desionizada. En la Figura 42 se ven las soluciones anteriormente mencionadas, todas en probetas de 100 ml.



Figura 42. Muestras del cable junto con soluciones estandarizadas de Manganeso, Silicio y un “blanco”.

El blanco y las soluciones estándar no requieren de ninguna preparación, pues se les puede encontrar comercialmente ya listas para su uso, pero las 2 muestras solubilizadas del cable para ser analizadas en el espectrómetro de absorción atómica en busca de Manganeso y Silicio fueron hechas siguiendo la metodología descrita por Perkin Elmer. PE-MT-6R (1994) encontrado en *Analytical Methods for Atomic Absorption Spectrometry*:

Para la muestra del análisis de Manganeso: Tomar 0,5 g de la muestra de alambre en estado sólido y se le coloco en un recipiente de 100 ml de capacidad. Luego adherir 10 ml de (1+1) HCL (relación volumétrica de 1 a 1 entre HCL concentrado y un volumen de agua), y calentar hasta que todo el material a analizar se haya disuelto. Después oxidar por la adición, gota a gota, de HNO_3 concentrado hasta obtener una solución naranja clara, lo cual suele darse al colocarse 10 gotas aproximadamente. Luego calentar hasta hervir la solución naranja para que expulsara los óxidos de nitrógeno. Finalmente se espera a que se enfrié a temperatura ambiente estándar y colocar agua desionizada hasta conseguir los 100 ml de volumen total.

Para la muestra del análisis del Silicio: Tomar 0,5 g de la muestra de alambre en estado sólido y se colocar en un recipiente de 100 ml de capacidad. Luego adherir 25 ml de 3N H₂SO₄ (1.5 moles de H₂SO₄) . Luego calentar hasta que se homogenice la solución y adherir 10 ml de una solución con 12% de persulfato de amonio. Después hervir por 1 min de tal forma que la solución se aclare. Finalmente, esperar a que se enfrié a temperatura ambiente estándar y colocar agua desionizada hasta conseguir los 100 ml de volumen total.

iii. **Procedimiento:** La metodología usada fue la descrita por Baird, R., y Bridgewater, L. en su libro *Standard methods for the examination of water and wastewater* (2017). Primero se calibro la maquina y se creó una curva con las concentraciones estándar para después realizar el análisis de las muestras.

Calibración y creación de la curva: El equipo llevó el contenido del “Blanco” por medio de un tubo capilar hacia una llama prendida con acetileno por 5 minutos. De esta forma se dice que el equipo queda calibrado, pues recibe una limpieza en sus conductos. Luego, se realizó lo mismo con los recipientes de las concentraciones estándar de Manganeso y Silicio, pero además se instaló una linterna de cátodo hueco y se colocó un valor de longitud de onda en la máquina de 279 nm y de 251.6 nm para el Manganeso y el Silicio, respectivamente. De esta manera, la luz de las linternas eran proyectadas sobre el sensor de la máquina pasando a través de la llama que quemaba las soluciones conforme eran absorbidas y atomizadas. La luz que llegaba al sensor era restada de la emitida por la linterna y la maquina devolvía la cantidad de luz absorbida por las partículas atomizadas en la llama, y dado que se conocían los valores de las concentraciones estándar, se pudieron crear 2 curvas (una de Manganeso y una de Silicio) que relacionaban la radiación absorbida por el espectrómetro y el porcentaje de las concentraciones estándar de Manganeso y Silicio.

Análisis de las muestras: Se repitió el mismo procedimiento que el realizado con las concentraciones estándar de Manganeso y Silicio, pero esta vez usando las muestras tomadas del alambre del cable. Luego, por medio de una interpolación en las curvas anteriormente creadas, se determinó la cantidad de Manganeso y Silicio que había en el cable.

iv. Criterio de evaluación: El contenido de carbono y azufre debe de estar dentro del rango de 0.6-0.9% de Manganeso y 0.35% de Silicio como máximo para un acero AISI SAE 1070, según se indica en la Ficha técnica de este metal tomada de Aceros Industriales (2009).

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

En este capítulo se desarrollará el análisis y la discusión de los resultados hallados en los ensayos efectuados sobre los segmentos del cable, siguiendo la metodología descrita en el capítulo anterior.

3.1. Inspección Visual

En la Figura 43 se aprecia como fue recibido el cable. Este fue cubierto de plástico para su entrega y los segmentos estaban enrollados al momento de abrir la bolsa.

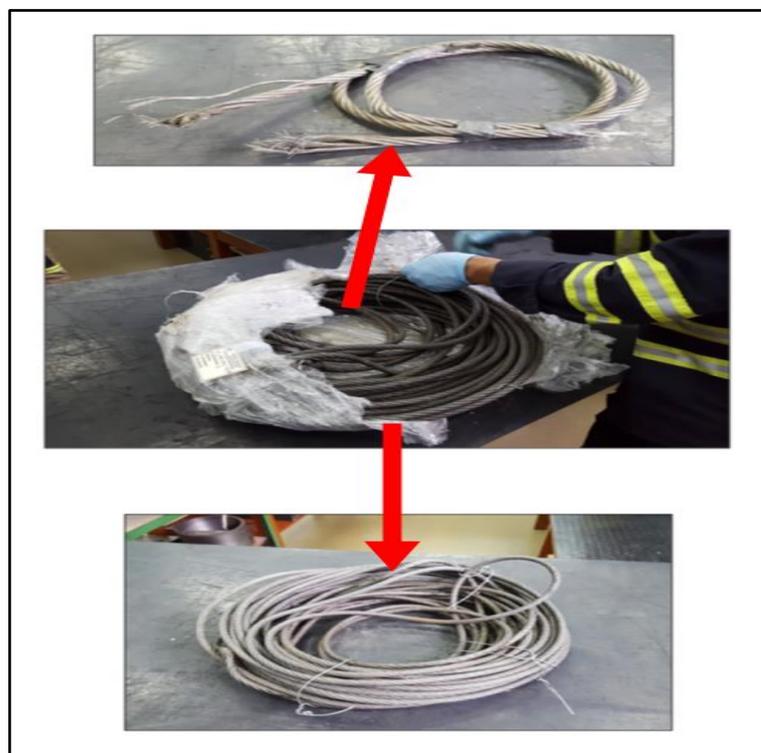


Figura 43. Vista general del cable como fue recibido. Arriba se pueden apreciar los dos segmentos cortos unidos con cinta adhesiva y el segmento largo fijado con alambres

En las Figuras 44 y 45, se ve el exceso de grasa que se encontró tanto al exterior del cable como en el interior de este, respectivamente. El exceso de grasa predispuso al cable a ensuciarse

fácilmente, dado que el ambiente en el que se encontraba era un área de molido de minerales. Esto constituye un mal criterio de mantenimiento porque no considera la limpieza del cable como parte de este y se propicia la acumulación de polvo y suciedad que reducen el tiempo de vida del cable (Vereet, 2017).



Figura 44. Exceso de grasa encontrado en el exterior del cable y como este propicia la acumulación de polvo y suciedad.



Figura 45. Exceso de grasa encontrado en el interior del cable y como este propicia la acumulación de polvo y suciedad.

Los tres segmentos encontrados fueron nombrados “A”, “B” y “C”. Siendo el segmento C el más largo (50 metros) y los segmentos “A” y “B” los más cortos (30 centímetros cada uno).

• **Segmento A:**

En la Figura 46 se muestran dos fracturas en el tramo “A”. La fractura de la derecha tiene una deformación plástica que es igual a la mencionado en la en la *Sección 1.6*, y corresponde a la fractura que se da al tratar de pasar un rizo por una polea.

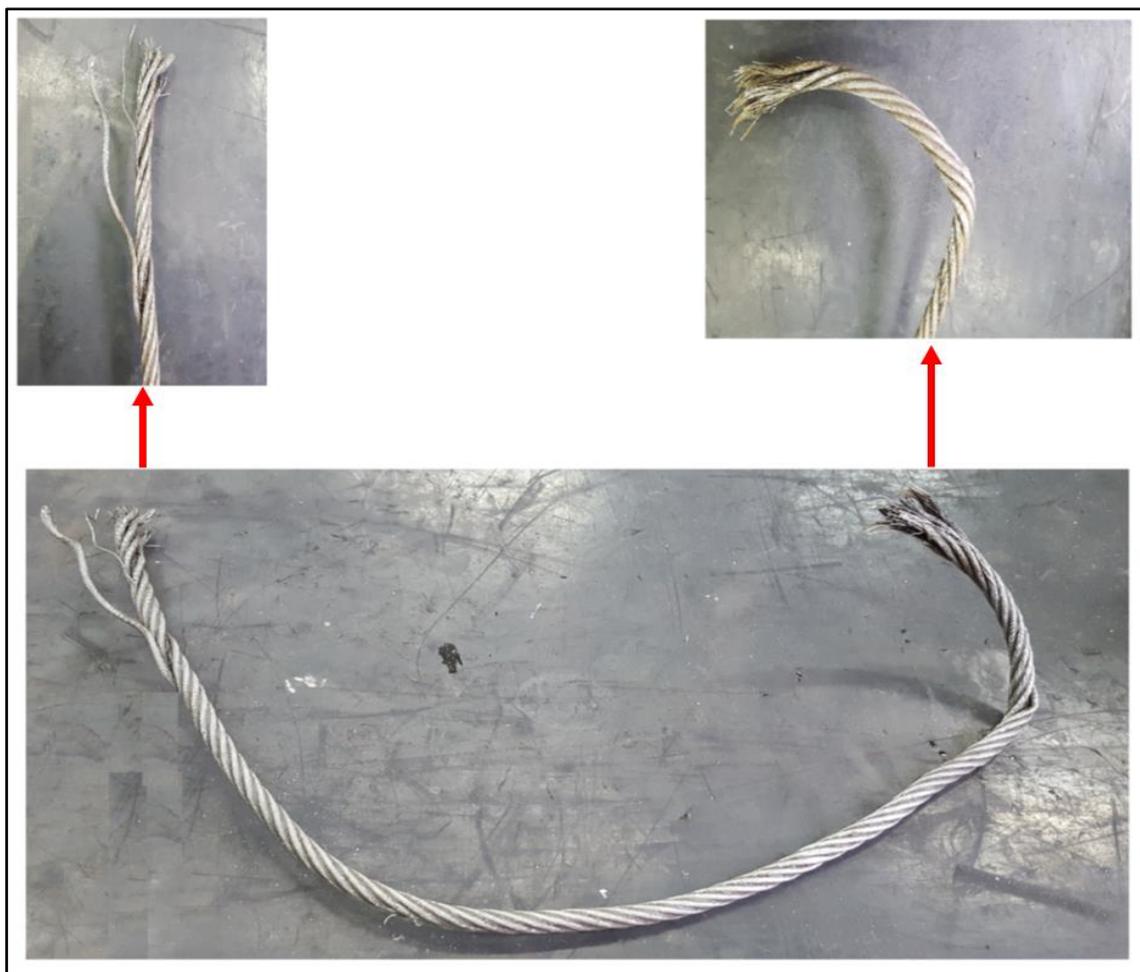


Figura 46. Segmento “A”, las fracturas en sus extremos. La fractura de la derecha tiene una deformación plástica propia de un rizo que trató de pasar por una polea.

El lado izquierdo del segmento “A”, como se ve en la Figura 46, tiene a uno de los torones más alejado del resto, lo que podría indicar que su rotura se dio primero que la de los demás torones, que al quedar disminuidos en número terminaron por fracturarse bajo el peso de la carga.

• Segmento B

En la Figura 47 se muestra el segmento “B”, su lado izquierdo tiene un doblez parecido al derecho del segmento A. Lo cual indica que estos extremos son de una misma fractura y fueron producto de un rizo que trato de pasar por una polea. También se aprecia a la derecha el corte del otro extremo, que es propio de un corte con maquina y que por lo comprimido, iba unido a un soporte fijo en el equipo de elevación por medio de un accesorio.



Figura 47. Segmento “B”, las fracturas en sus extremos y una leve deformación plástica en el izquierdo.

- **Segmento C:**

El segmento “C”, que se ve en la Figura 48, contenía una deformación plástica, como se muestra en la Figura 49. Esta deformación, según lo revisado en la literatura especializada constituye una “coca”, en donde, además, los alambres exteriores de la parte cóncava están rotos.



Figura 48. Segmento “C”.

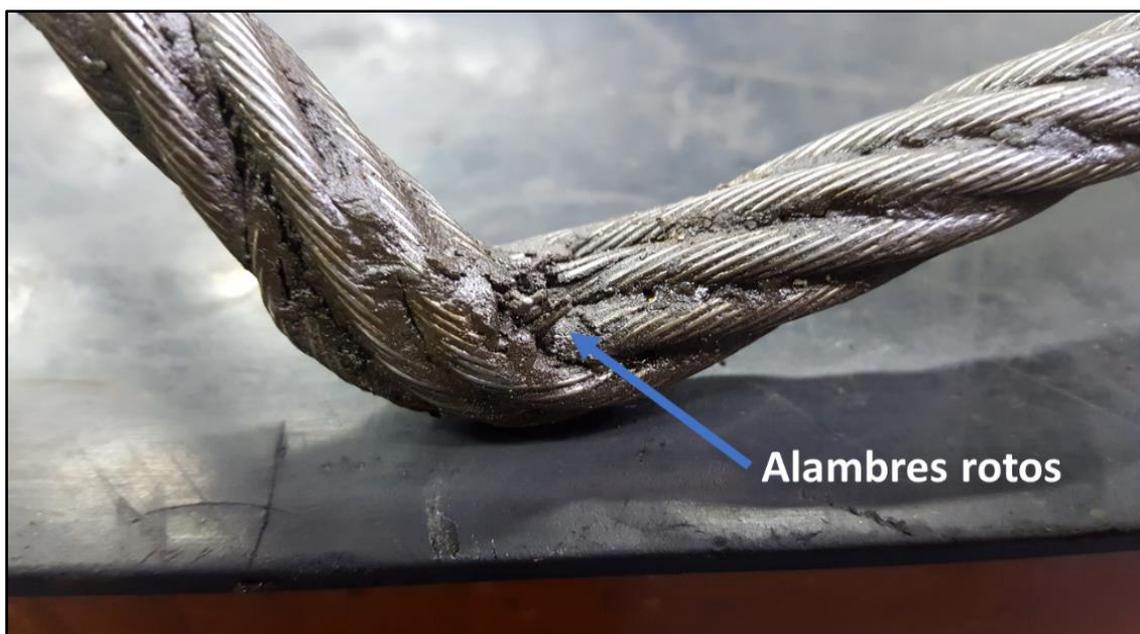


Figura 49. Doble permanente en el tramo “C” en donde se ven algunos alambres rotos en la periferia del cable debido a la formación de la *coca*.

Dado que un extremo del cable C está cortado por máquina, como se ve en la Figura 50, el lado que se conecta con los segmentos A y B es el otro que se muestra en la Figura 51.



Figura 50. Uno de los extremos del segmento C, que presenta corte por máquina.



Figura 51. Fractura encontrada en uno de los extremos del segmento C, que presenta un torón y un alambre alejado del resto del cable.

La fractura mostrada en la Figura 51 tenía un alambre y un torón separado del resto, lo cual indica que este torón y alambre se pudieron fracturar primero, de manera muy parecida a la fractura del lado izquierdo en el segmento A. Por lo tanto, este extremo del segmento C iba unido al segmento A y es ahí en donde se debe analizar el tipo de fractura por medio del análisis fractográfico.

3.2. Control dimensional.

Se cortó el segmento B como se muestra en la Figura 52, y se tomó una sección alejada de la fractura y de la deformación plástica. Se extrajo una muestra, denominada “B1”, con ayuda de la máquina de corte especificada en la *Sección 2.2*. Una vez cortada la muestra se pudo apreciar su sección transversal y realizar el control dimensional.

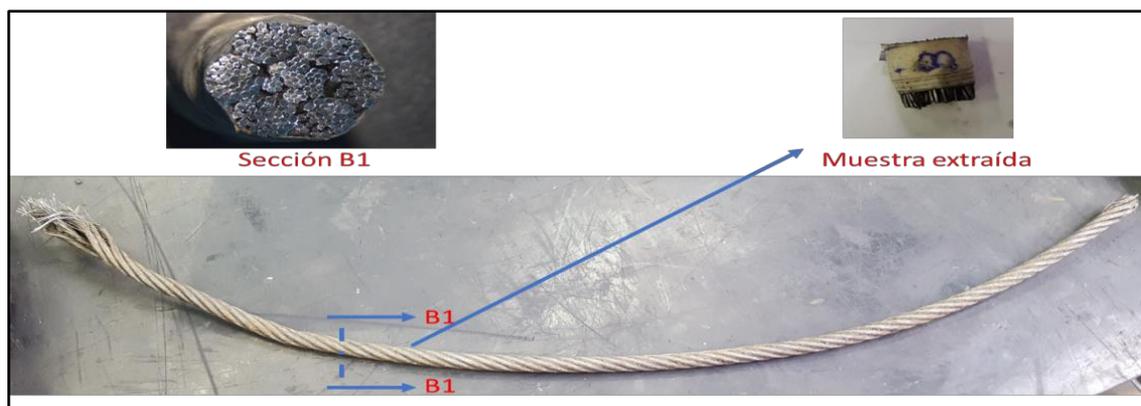


Figura 52. Muestra extraída del tramo “B” del extremo cortado por máquina en donde se ve la composición normal del cable en cuanto alambres.

Se midió el diámetro del cable redondo y se obtuvo una medida de $7/16$ ". Luego la muestra fue vista a través del estereoscopio en un aumento de 10X. En este se pudo ver la construcción del arreglo de alambres y se midieron los diámetros de los distintos calibres de alambres. El arreglo es descrito, como se indicó en la *Sección 1.5*, por la notación $6x36 WS IWRC(1 - 7 - (7 + 7) - 14)$, en donde se describe a los 6 torones exteriores de arreglo Warrington-Seale de 37 alambres (36 que rodean uno central) y a un alma metálica independiente, que es un cable en sí mismo,. Los torones exteriores tienen una construcción de un alambre central, seguido de 7 alambres que los cubren y luego, a su vez, cubiertos por una capa de alambres de 7 alambres de un diámetro intercalados con otros 7 alambres de otro diámetro y finalmente una capa exterior de 14 alambres, como también lo muestra la Figura N°53.

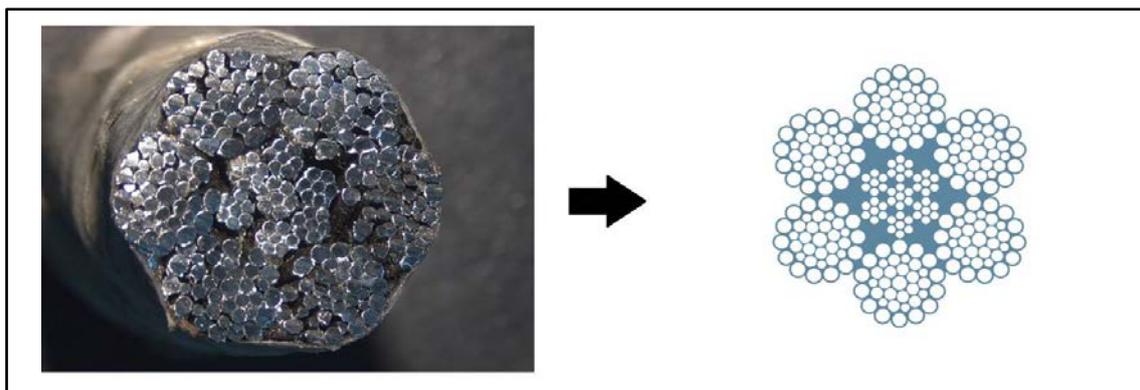


Figura 53. Sección transversal de la muestra tomada del tramo B aumentada a 10X, que corresponde con la configuración *Warrington Seale* con alma de acero a su derecha.

Imagen de la derecha adaptada del *Wire Rope User's Handbook* (2016).

Además, se separaron los rangos de los diámetros de los alambres en cuatro grupos de calibres: "1", "2", "3" y "4", como se ve en la Figura 54. Los rangos de sus diámetros se ven en la Tabla 7.

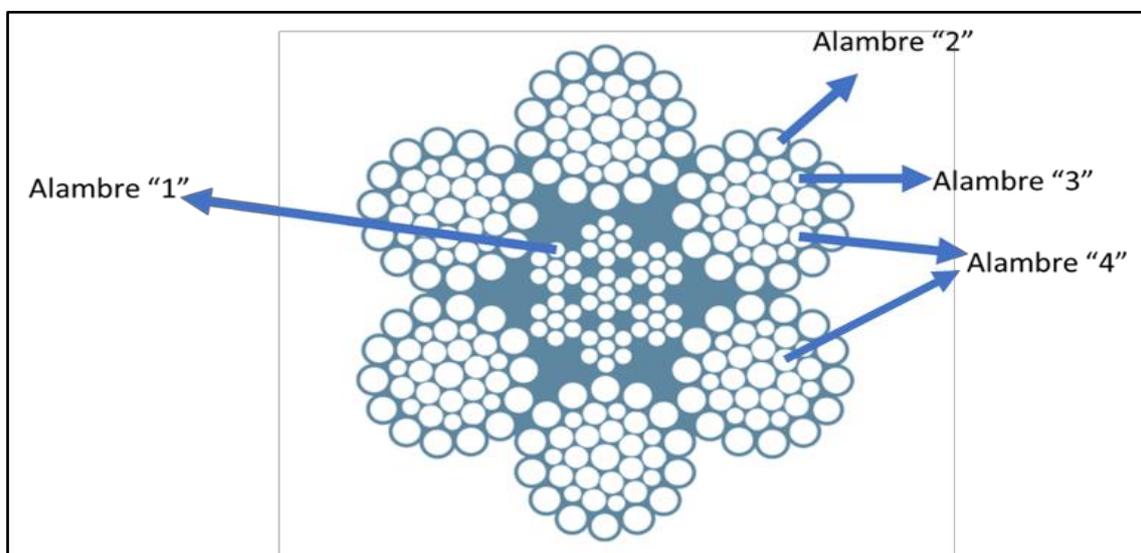


Figura 54. Sección transversal con los 4 **tipos diferentes de** calibres de alambres encontrados y denominados "1", "2", "3", "4".

Imagen adaptada del *Wire Rope User's Handbook* (2016).

Tabla 7

Rangos de diámetros (en mm) para cada tipo de alambre encontrado en el cable.

| | Alambre 1 | Alambre 2 | Alambre 3 | Alambre 4 |
|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Alma | 0,44-0,56 | | | |
| Torón | | 0,64-0,80 | 0,41-0,44 | 0,51-0,62 |

A pesar de que muchos de estos alambres presentan deformaciones propias del efecto abrasivo de la máquina de corte y quizás también debido a las sollicitaciones del cable hasta antes de su falla como se explicó en la Sección 1.6, los rangos de los diámetros encontrados de cada uno de los calibres estan dentro de los considerados por las normas ASTM A1007 (2022) y ASTM A1023 (2021). Las fotografías dadas por el software de *Leica* se pueden apreciar en el Anexo D. Por otra parte, se sabe que el diámetro de la ranura de la polea en la cual trabajaba el cable era de 1/2 pulgada, y por lo tanto, estaba dentro de lo que recomienda la Tabla 6, que para las 7/16 pulgada de diámetro nominal del cable analizado se debe adherir una holgura de 1/32 pulgada, es decir 15/32 pulgada de diámetro en la ranura. Finalmente, al ser un cable 6x36 de 7/16 pulgada, la resistencia mínima buscada en el ensayo de tracción de la probeta sin falla tendrá que ser cercana a la mínima fuerza de rotura de grado IPS que es 8,89 Tons, según lo exige la norma ASTM A1023 (2021).

3.3. Análisis Fractográfico

Para este análisis se eligió el extremo izquierdo del segmento “A”, al cual se le separo y se le etiqueto como el elemento “A1” como se ve en la Figura 55. Este extremo fracturado era la unión entre el segmento “A” con el segmento “C” y más allá de lo visto en la inspección visual, fue necesario hallar el tipo de fractura predominante en los alambres en este punto para determinar el mecanismo de fractura del cable.



Figura 55. El extremo del tramo “A1” etiquetado, este extremo iba unido al tramo “C”. La fractura que comparten el tramo A y C será **evaluada**.

Por eso se separaron en torones al elemento “A1”, como se ve en la Figura 56 y se les denominó de “T1”, “T2”, “T3”, “T4”, “T5” y “T6” a los torones exteriores y al alma de acero, se le denominó “TA”.



Figura 56. Torones separados junto con el alma del cable para su análisis fractográfico.

Las muestras para el análisis fractográfico fueron analizadas por el estereoscopio mencionado en la *Sección 2.3* y se obtuvieron las imágenes de las fallas de los alambres teniendo como criterio de búsqueda el tipo de fractura: frágil, dúctil o tenaz, como bien se explicó en la *Sección 1.9.3*. La cantidad y los tipos de fracturas encontradas se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8

Resultados del análisis fractográfico del cable de acero con falla

| Extremo “A1” | Número de alambres | | |
|-----------------|--------------------|-------------|--------------|
| | Dúctil (copa-cono) | Tenaz (45°) | Frágil (90°) |
| Torón 1 | 20 | 16 | 0 |
| Torón 2 | 24 | 12 | 0 |
| Torón 3 | 24 | 12 | 0 |
| Torón 4 | 28 | 8 | 0 |
| Torón 5 | 21 | 15 | 0 |
| Torón 6 | 31 | 5 | 0 |
| Alma | 30 | 18 | 0 |

En la Tabla 8 se observa que no hay ninguna fractura del tipo frágil en ningún alambre del cable y que los tipos de fracturas que se encontraron fueron del tipo dúctil y tenaz. Por lo tanto, la evidencia fractográfica apunta a que la causa más probable de la fractura entre los segmentos “A” (30 cm) y “C” (50 m) fue una sobrecarga, es decir, se excedieron sus valores de resistencia máxima a la tracción. Por otro lado, según lo visto en los ejemplos del *ASM Metals Handbook. Volume 11* (2002), al no haber fracturas frágiles, se descarta una falla por fatiga.

En la Figura 57 se muestra un alambre representativo de fractura dúctil (copa-cono) y en la Figura 58 uno representativo de una fractura tenaz (45° con respecto al eje longitudinal del alambre).



Figura 57. Imagen de alambre con rotura dúctil, que muestra la estricción típica de este tipo de rotura: copa-cono, vista con un aumento de 25X.



Figura 58. Imagen de alambre con rotura tenaz, que muestra un plano de rotura de 45° con el eje longitudinal del alambre, vista con un aumento de 25X.

3.4. Análisis metalográfico.

Con los 2 alambres de las fracturas representativas del análisis fractográfico se siguieron los pasos mencionados en la *Sección 2.4* y se obtuvo la briqueta que se muestra en la Figura 59. Con el objetivo de analizar ambas fracturas a un nivel microestructural.

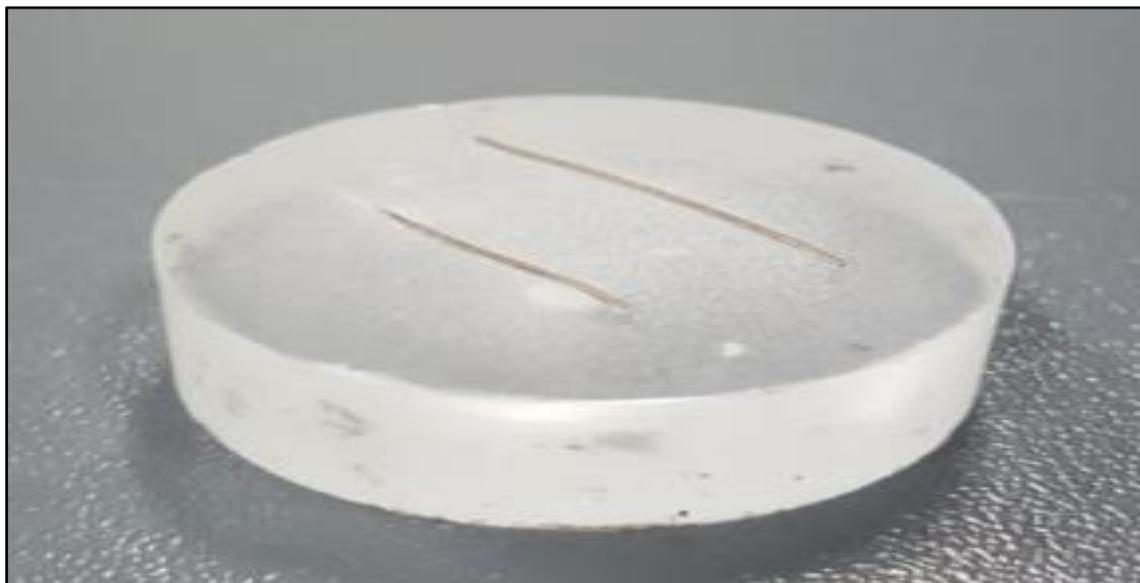


Figura 59. Briqueta con la sección de los dos alambres a analizar en el ensayo de metalografía.

Se colocó bajo el microscopio óptico del laboratorio y se tomaron las fotos de la briqueta sin ser expuesta al nital en un aumento de 100X para visualizar las inclusiones como se ve en la figura 60, que corresponde a una zona alejada de una fractura. en donde se pueden observar las inclusiones solidas de Tipo D, óxidos globulares, serie gruesa con severidad de 1,5 según lo indicado en la norma ASTM A247 (2019), lo cual corresponde a un nivel adecuado de estas mismas.

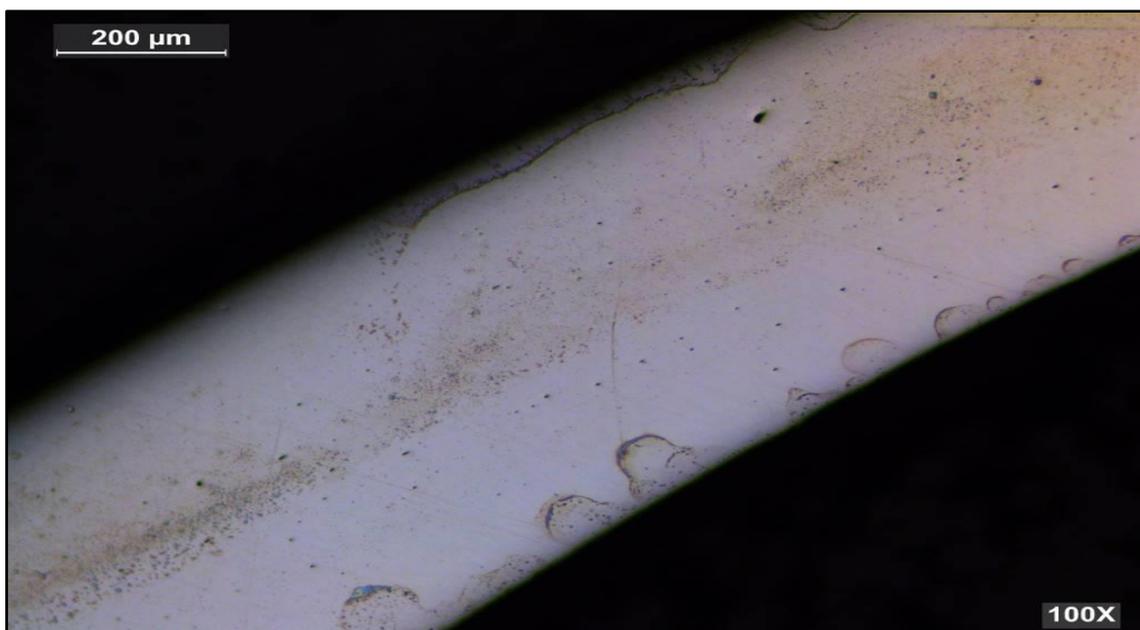


Figura 60. Inclusiones solidas Tipo D serie gruesa de 1,5 a un aumento de 100X del alambre en una zona alejada de cualquier fractura en la briqueta antes de colocarle el Nital al 2%.

Se uso una solución de Nital al 2%, y se tomaron fotos. Se pudo apreciar la microestructura de una parte alejada de la falla, como se ve en la Figura 61, en donde se puede apreciar que la microestructura del alambre en un aumento de 500X es el de una matriz de perlita fina con presencia de ferrita fina alargada por el trefilado, igual a la que se espera en un acero trefilado de alto contenido de carbono como se menciona en la *Sección 2.4*.



Figura 61. Microestructura del alambre en una parte lejana a la fractura, constituida por una matriz de perlita fina y presencia de ferrita fina. Nital 2% en un aumento de 500X.

Luego se tomaron fotos de las zonas correspondientes a la fractura dúctil como de la fractura tenaz de los alambres, que se ven en las figuras 62 y 63. Se pudo apreciar que en ambos la microestructura continuaba siendo la misma y no había presencia de martensita. Por lo tanto, la evidencia metalográfica apunta a que esta fractura del cable corresponde a una probable sobrecarga.



Figura 62. Microestructura del alambre en una parte con falla dúctil, constituida por una matriz de perlita fina y presencia de ferrita fina. Nital 2% con un aumento de 100X.

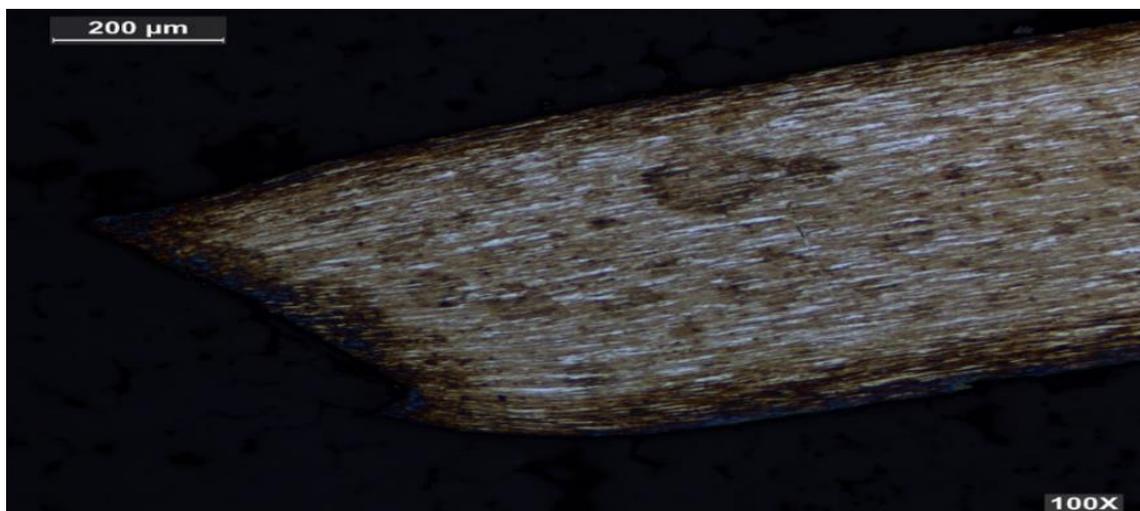


Figura 63. Microestructura del alambre en una parte con falla tenaz, constituida por una matriz de perlita fina y presencia de ferrita fina. Nital 2% con un aumento de 100X.

3.5. Ensayo de tracción.

Para este ensayo se cortaron 2 probetas del segmento “C”, cada una de 500 mm.. A la probeta con deformación plástica, en este caso una coca, se le denominó “C1” y a la que no tenía ninguna, “C2”. Ambas probetas se ven en la figura 64.



Figura 64. Probetas usadas en el ensayo de tracción: Una con una deformación plástica (coca), asignada como “C1”, y otra sin ninguna deformación “C2”, ambas obtenidas del segmento “C”.

Se realizaron los ensayos de tracción en ambas probetas, según el procedimiento explicado en la *Sección 2.5*. El resultado del ensayo de tracción de la probeta “C1” se ve en la Figura 65 y el de la probeta “C2”, se ve en la Figura 66.



Figura 65. Probeta C1 después del ensayo de tracción.



Figura 66. Probeta C2 después del ensayo de tracción.

Como se ve en la figura 65, la probeta “C1” presenta un mayor deterioro, dado que tiene la mayoría de torones fracturados y separados del resto del cable, mientras que la probeta “C2” presenta solo algunos torones exteriores fracturados y el resto aún unidos. Esto evidencia que el estado de una falla en un cable con *coca* es más estrepitoso, rápido y notorio, que en el caso de una sobrecarga en un cable sin falla.

Finalmente, la Figura 67 muestra la gráfica formada entre la fuerza y el alargamiento de las dos probetas. Siendo la curva roja correspondiente a la probeta “C2” y la celeste a la “C1”.

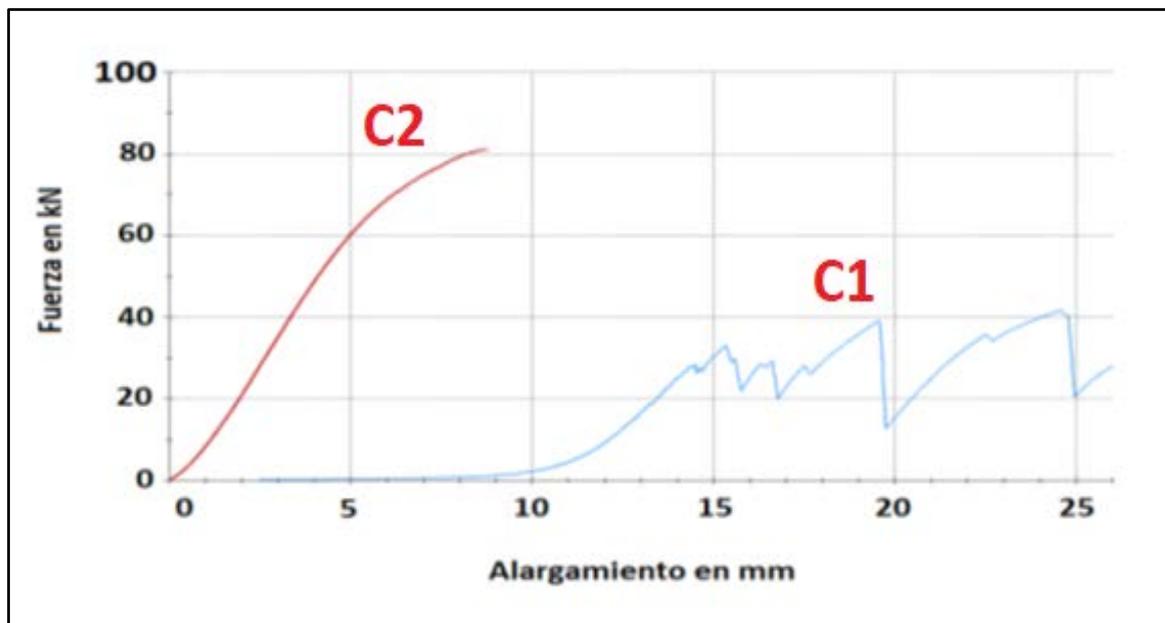


Figura 67. Las curvas de las dos probetas se muestran en contraposición. La roja es la probeta sin coca y la celeste es la con coca. Se relaciona la fuerza en kN y el alargamiento en mm.

En la tabla 9 se muestran ambas resistencias máximas a la tracción de las probetas con sus respectivos alargamientos. Se ve que el valor de la probeta “C2” (sin deformaciones) es cercano a los 79,085 kN, que es el valor de resistencia mínima a la rotura de grado IPS (8,89 Tons), según la norma ASTM A1023 (2021) y por lo tanto su resistencia es la esperada; en cambio, la probeta “C1” con una *coca* a la mitad, tiene una disminución del 50% en su resistencia aproximadamente, con lo cual se confirma que una deformación plástica como una *coca*, puede disminuir hasta a la mitad la resistencia normal del cable.

Tabla 9

Valores de las probetas con falla y sin falla de máxima fuerza de tensión y deformación máxima.

| | Última fuerza de tensión | Deformación máxima |
|----|--------------------------|--------------------|
| | kN | mm |
| C2 | 80,95 | 8,71 |
| C1 | 41,58 | 22,09 |

3.6. Análisis Químico:

Una vez realizados los análisis de carbono (Ver Anexo E) y azufre por combustión y de espectrometría por absorción atómica, según los procedimientos descritos en la *Sección 2.6*, se elaboró la Tabla 10, en donde se ve que los valores de los análisis químicos están dentro del rango esperado, siendo ese un acero AISI/SAE 1070, y por lo mismo, no evidenciando ningún fallo en su fabricación.

Tabla 10

Porcentajes en peso de los componentes químicos del cable metálico.

| | Porcentaje en Peso | | | |
|---------------|--------------------|----------|-----------|----------|
| | %C | %Si | %Mn | %S |
| Muestra B | 0,65 | 0,21 | 0,6 | 0,011 |
| AISI/SAE 1070 | 0,65 – 0,75 | 0,35 máx | 0,6 – 0,9 | 0,05 máx |

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

De los ensayos realizados se puede concluir lo siguiente:

1. La microestructura de los alambres es perlita y ferrita finas y su composición química corresponde a un acero de alto carbono (AISI/SAE 1070), lo cual es compatible con la microestructura y composición normal de un alambre que forma parte de un cable de acero, según lo indica Mukhopadyay. G (2018)

2. Los ensayos de tracción demuestran que de existir una deformación plástica en algún punto del cable como la coca hallada en el segmento C la resistencia de este queda reducido notoriamente en este caso en un 50% de lo que era la resistencia del segmento C.

3. Hay un mantenimiento deficiente en el cable, que se hace visible en el exceso de grasa y la suciedad atrapada en esta, así como cocas y deformaciones plásticas, lo cual reduce la vida útil y la capacidad de carga del cable.

4. El análisis fractográfico muestra que las fracturas de los alambres fueron un 67% dúctiles y un 33% tenaces. Lo cual indica una rotura general del tipo dúctil.

5. La causa más probable de la falla del cable es una sobrecarga mecánica, que aunado a factores que reducen la capacidad de carga del cable produjeron la fractura total.

Recomendaciones

- Se debe verificar que las cargas que se están izando no superen las capacidades del equipo de izaje, ni las del cable.

- Se debe mejorar la limpieza y la lubricación del cable para evitar que este se ensucie y disminuya su tiempo de vida útil. Para esto se recomienda la utilización de cepillos de alambre al realizar una limpieza exterior y el engrase periódico de mantenimiento.

- Se deben realizar inspecciones periódicas para evaluar la integridad del cable.

- Durante las inspecciones se deben buscar alambres rotos en la periferia de los cables y cambiar el cable si la cantidad de alambres rotos supera a los 12 alambres por longitud de torcido del cable o si hay 4 alambres rotos en un solo torón, según lo indica la norma ASME/B30.2.

- Durante las inspecciones se debe cambiar el cable si se encuentra una *coca*, puesto que la resistencia de los cables queda reducida drásticamente.

- Si se quieren izar cargas mayores a 2 toneladas, entonces se recomienda usar otro equipo de elevación junto con otro cable que puedan soportar una carga mayor a 10 toneladas, dado que el Factor de seguridad debe ser de por lo menos 5, según lo recomienda la norma ASME/B30.2.

Bibliografía

- Aceros Industriales. (20/03/2009). *Ficha Técnica/Aceros para maquinaria/Aceros de alto carbono/AISI SAE 1070*. Disponible el 10 de Febrero de 2023, <https://acerosindustriales.com/images/stories/pdfs/Fichas/ACERO DE ALTO CARBONO SAE 1070.pdf>
- Askeland D. R. Romo Muñoz Jorge Humberto Fulay P. P. Wright W. J. & Hernández Lanto Jorge. (2017). *Ciencia e ingeniería de materiales* (Séptima edición). Mexico D.F: Cengage Learning.
- American Society for Testing and Materials. (2015). *Standard Practice for Microetching Metals and Alloys* (E407-07). Recuperado de <https://www.astm.org/e0407-07r15e01.html>
- (2017). *Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens* (E3-11). Recuperado de <https://www.astm.org/e0003-11r17.html>
- (2018). *Standard Practice for Sampling Steel and Iron for Determination of Chemical Composition* (E1806). Recuperado de <https://www.astm.org/e1806-18.html>
- (2018). *Standard Test Method for Tension Testing of Wire Ropes and Strand* (A931). Recuperado de <https://www.astm.org/a0931-18.html>
- (2019). *Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings* (A247). Recuperado de <https://www.astm.org/a0247-19.html>
- (2021). *Standard Specification for Carbon Steel Wire Ropes for General Purposes* (A1023). Recuperado de https://www.astm.org/a1023_a1023m-21.html

(2022). *Standard Specification for Carbon Steel Wire for Wire Rope (A1007)*. Recuperado de <https://www.astm.org/a1007-22.html>

(2022). *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products (A370)*. Recuperado de <https://www.astm.org/a0370-22.html>

American Society of Mechanical Engineers. (2022). -2016: *Overhead and gantry cranes (Top running bridge, single or multiple girder, top running trolley hoist)*. (ASME B30.2) New York, NY: ASME. Recuperado de <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/b30-2-overhead-gantry-cranes>

Baird, R., Bridgewater, L. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. (23 Ed.). Washington, D.C., EE.UU: American Public Health Association.

Decreto Supremo N.º 024-2016-EM. (17 de Agosto de 2017). Normas Legales, N° 28964. Diario Oficial El Peruano, 18 de Agosto de 2017.

Díaz Cáceres J. (2017). *Determinación mediante la realización análisis de falla de las causas más comunes de falla en ejes de equipos industriales*. [Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Mecánico, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio Institucional – Pontificia Universidad Católica del Perú.

Deutsches Institut für Normung (2016) *Wire ropes; general requirements*. (DIN 3055). Beuth Verlag GmbH, Berlín, Alemania,.

Dual Metalurgia. (21/07/2019). Disponible el 28 de Enero de 2023, <http://dualmetalurgia.com/introduccion/propiedades/propiedades-mecanicas/>

Elmer, P. (1996) *Atomic Absorption Spectroscopy: Analytical Methods*, Waltham-Massachusetts, EE.UU: The Perkin Elmer Corporation.

EMCOCABLES S.A.S. (2003) Disponible 12 de diciembre de 2022, de <https://www.emcocables.co/2022/wp-content/uploads/2022/06/Manual-de-cables.pdf>

Ernst, H (1972) *APARATOS DE ELEVACIÓN Y TRANSPORTE, TOMO 1 PRINCIPIOS Y ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS*

(Segunda edición). Barcelona, España: Blume.

Feyrer, K (2015) *Wire Ropes Tension, Endurance, Reliability* (Segunda edición). Stuttgart, Alemania: Springer-Verlag.

Gómez H. y Wilches J. (2003). Mecanismos y modos de falla en cables metálicos estructurales.

Ingeniería y Desarrollo Barranquilla, Colombia, 14, pp. 125–140.

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=85201407>

International Organization for Standardization.. (2017). *Cranes — Wire ropes — Care and maintenance, inspection and discard* (4309). Génova, Suiza. Recuperado de <https://www.iso.org/standard/66759.html>

(2017). *Steel wire ropes — Requirements* (2408). Génova, Suiza. Recuperado de <https://www.iso.org/standard/66635.html>

(2010). *Steel wire ropes - Vocabulary, designation and classification* (17893:2004/Amd 1:2010). Génova, Suiza. Recuperado de <https://www.iso.org/standard/50607.html>

Rumiche, F. (2017) Fracturas y diferentes mecanismos de fractura. [Diapositiva de Powerpoint].

Laboratorio De Materiales De La Pontificia Universidad Católica Del Perú (2019) *Informe técnico: AFA Cable de acero* (MAT-JUN-0725-2019).

- Lean, P. (2014) Sesión 2: Mecanismo de falla en los materiales. [Diapositiva de Powerpoint].
- Instituto De Corrosión Y Protección De La Pontificia Universidad Católica Del Perú (2019) *Informe de ensayo: Análisis químico en 01 (una) muestra de aleación de alambre de acero* (ICP/INF-169/2019).
- Jamieson, F. (2002) Failures of Lifting Equipment. *ASM Metals Handbook – Failure Analysis and Prevention Volume 11*. (10 Ed., pp. 1094- 1104). Ohio, EE.UU: ASM International
- Mukhopadhyay, G. (2018) Chapter 5: Failures of construction equipment and accessories: metallurgical root-cause analysis. *Handbook of Materials Failure Analysis With Case Studies From the Construction Industries*. (10 Ed., pp. 684- 703). Oxford, United Kingdom: Elsevier.
- Peterka P., Krešák J., Kropuch S., Fedorko G., Molnar V. y Vojtko M. (2014). Failure analysis of hoisting steel wire rope. *Engineering Failure Analysis* 96–105. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.06.005>
- Pino Vidal S. (2013). *RIGIDEZ A FLEXIÓN EN CABLES: ANÁLISIS NUMÉRICO*. [Disertación para obtener el título profesional de Ingeniero Civil, Universidad De Chile Facultad De Ciencias Físicas Y Matemáticas]. Repositorio Institucional – Universidad De Chile Facultad De Ciencias Físicas Y Matemáticas.
- Proelevación. (08/09/2021). Disponible el 24 de Noviembre de 2022, <https://proelevacion.com/tipos-de-puente-gruas/>
- Scutti J. (2002) Introduction to Failure Analysis and Prevention. *ASM Metals Handbook – Failure Analysis and Prevention Volume 11*. (10 Ed., pp. 3- 23). Ohio, EE.UU: ASM International

Stamatis, D. (2003) *Failure Mode and Effect Analysis FMEA from Theory to Execution* (Segunda edición). Wisconsin, EE.UU: American Society for Quality Quality Press.

Vander Voort, G. (2002) Conducting a Failure Examination. *ASM Metals Handbook – Failure Analysis and Prevention Volume 11*. (10 Ed., pp. 333- 342). Ohio, EE.UU: ASM International

Vega Guerovich R. (2013). *Análisis de la falla en pernos de bombas ksb de 800 hp*. [Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Mecánico, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio Institucional – Pontificia Universidad Católica del Perú.

Verreet, R. (2017) *Manipulacion, montaje y mantenimiento de los cables de acero*.
https://www.ropetechnology.com/bro_es/Bro_Handhabung_es.pdf

WireCo. (2016) *Wire Rope User's Handbook*.
<https://www.unionrope.com/Portals/0/Documents/Technical/Wire-Rope-Basics/wire-rope-handbook.pdf>

Xiang-dong C. Yu-xing P. Zhen-cai Z. Chun-ming X. Sheng-yong Z. & Xian-sheng G. (2019). Effect of wear scar characteristics on the bearing capacity and fracture failure behavior of winding hoist wire rope. *Tribology International* V130 (2019 02 01): 270-283.
<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.09.023>

Zapata Velarde E. (2013). *Análisis de falla de cojinetes de biela de camiones de 2300 hp para minería*. [Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Mecánico, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio Institucional – Pontificia Universidad Católica del Perú.

ANEXO A

PROCESO DE TREFILADO DE ALAMBRES.

La primera etapa en la construcción de cables es el trefilado de alambres. El trefilado es un proceso mediante el cual la sección transversal de una barra, varilla o alambre se reduce por medio de los esfuerzos de tracción generados al tirar del material a través de un troquel como se muestra en la Figura A1 (Groover, 2007).

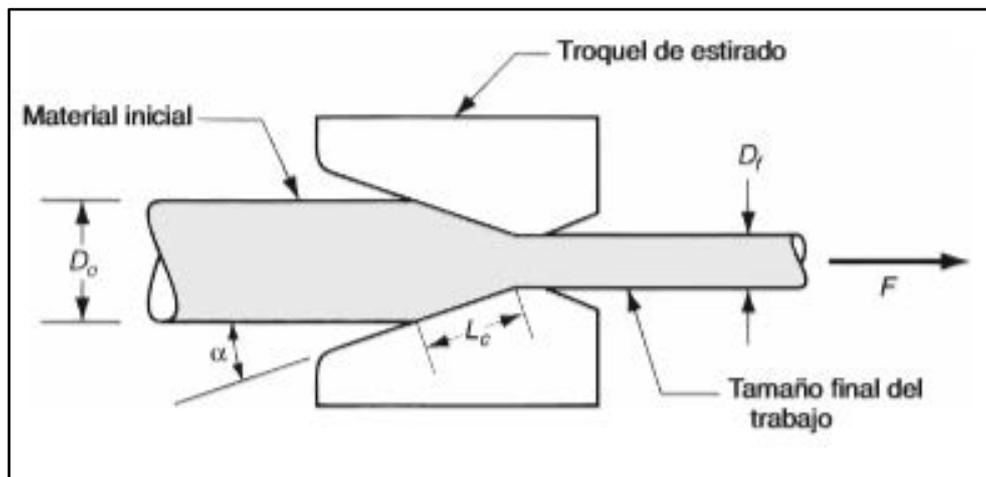


Figura A1. Proceso de estirado en donde se reduce la sección transversal.

Tomado de Groover 3era edición (2007).

Normalmente, el “hilo maquinado” se entrega arrollado en un carrete cuando aún está caliente y sin decapar (Higgins, 1971). Para decapar este material, se le carga arrollado en carretes de forma suelta, usando los ganchos suspendidos de una grúa. Sumergiéndoseles sucesivamente a lo largo de una línea de tanques que contienen soluciones acidas que son progresivamente más fuertes.

ANEXO B

TIPOS DE CABLES SEGÚN SU FABRICACIÓN

➤ **Cable compuesto por más cables:** Un ensamble de varios, usualmente 6, cables trenzados arrollados helicoidalmente sobre un alma (usualmente un séptimo cable). Los requerimientos del cable compuesto de otros cables no están cubiertos por la norma ASTM A1023 (2021).

➤ **Cables que incorporan materiales de relleno y de cobertura: Estos pueden agruparse de la siguiente manera**

• **Cuerda acolchada:** Cable en el cual las capas internas, torones internos o torones del alma son cubiertos con un polímero sólido o fibras para formar un cojín entre torones adyacentes o las capas superpuestas.

• **Cable de alma cubierta de plástico:** Cable en donde el alma esta cubierto, o relleno y cubierto, un polímero sólido.

• **Cable cubierto de plástico:** Cable en donde la superficie exterior esta recubierta con un polímero sólido.

• **Cable relleno de plástico:** Cable en donde los espacios libres en todo el diámetro del cable son rellenos con un polímero sólido.

➤ **Cable resistente a la rotación:** Cables trenzados diseñados para generar niveles reducidos de torque y rotación cuando tienen carga y comprenden un ensamble de dos o más capas de torones exteriores arrollados helicoidalmente alrededor de un centro, el sentido del torcido de los torones exteriores es opuesto a los de la capa debajo de estos. Hay tres categorías de cables resistentes a la rotación.

- **Categoría 1:** Describe un cable trenzado construido de manera que muestra muy poca o ninguna tendencia a rotar, o, si es guiado, transmite poco o ningún torque, tiene por lo menos 15 torones exteriores y comprende un ensamble de por lo menos 3 capas de torones arrollados helicoidalmente alrededor de un centro colocados por medio de 2 operaciones, el sentido del torcido de los torones exteriores siendo opuesto al sentido de la capa de torones que esta debajo.

- **Categoría 2:** Cable trenzado de tal manera que tiene una resistencia significativa a rotar, tiene por lo menos 10 torones externos y comprende un ensamble de 2 o más capas de torones arrollados helicoidalmente alrededor de un centro en 2 o 3 operaciones, el sentido del torcido de los torones externos debe ser opuesto a los de la capa debajo.

- **Categoría 3:** Cable trenzado construido de tal manera que tiene una resistencia limitada a la rotación, tiene como máximo 9 torones externos, y comprende un ensamble de 2 capas de torones arrollados helicoidalmente alrededor de un centro en 2 operaciones, el sentido del torcido de los torones externos es opuesto al de los torones de la capa debajo.

Los cables resistentes a la rotación han sido previamente mencionados como cables multi – torón y anti – rotación. Los cables de 3 o 4 torones pueden ser diseñados para exhibir propiedades de resistencia a la rotación.

ANEXO C

PREFORMACIÓN DE CABLES

Según Ernst (1970), el preformado tuerce a los alambres de tal manera que obtienen la forma que tendrían después del cableado, lo que logra reducir la tendencia a destorcerse y evita que se destuerzan cuando se corta el cable durante la instalación de este. Los cables preformados duran mucho más que los no preformados, además tienen menor tendencia a formar cocas o a girar. Los cables “Lang” funcionan mejor en maquinarias de elevación si se encuentran preformados. Cabe acotar que no es lo mismo un cable preformado, que uno anti giratorio. Por otro lado, según el Wire Rope User’s Handbook (2016), este proceso mejora el manejo y la resistencia a la formación de dobleces, un ejemplo de torón preformado se muestra en la Figura C1. Los alambres y torones preformados se encuentran en reposo, dado que quedan disminuidos los esfuerzos internos residuales del cable. Actualmente, prácticamente todos los cables pasan por un proceso de preformado, aunque algunos cables de construcción muy particulares pueden no ser preformados.

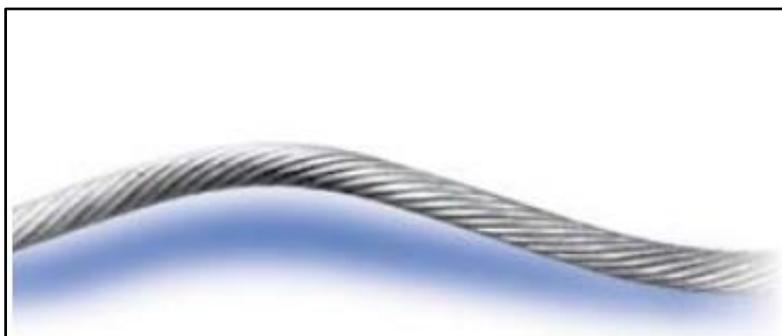


Figura C1. Torón con alambres preformados que queda modelado antes de terminar de formar el cable

Según la ASTM A1023 (2021), los cables pueden tener procesos antes de su forma final bajo la siguiente consigna.

- **Cable no preformado:** Cable en el cual los alambres y los torones en el cable pueden, después de remover los extremos, desenrollarse perdiendo la formación de fabricación del cable.

- **Cable preformado:** Cable en donde los alambres y torones en el cable no se desenrollarán fuera de su formación de fabricación, luego de haberse removido los elementos de sujeción de sus extremos. Los cables trenzados deberán ser preformados a menos que se especifique lo contrario, excepto que los cables multi – capas, incluidos los resistentes a la rotación y de baja rotación, pueden no estar preformados.

- **Preestiramiento:** Es el nombre dado a un proceso que resulta en la remoción de una cantidad limitada de elasticidad constructiva. Los cables trenzados no estarán preestirados a menos que se especifique lo contrario. Cuando se especifique, los cables podrán ser preestirados usando un proceso estático o dinámico de carga. Las cargas de preestiramiento no deberán exceder al 55% de la fuerza mínima a la rotura del cable. Un ejemplo de preestiramiento estático es un cable sometido a 3 ciclos de cargas de tracción de un 40% de la fuerza mínima a la rotura del cable por 5 min, retornando al 5% de la fuerza mínima a la rotura del cable entre ciclos. Después del último ciclo la carga de tracción es liberada completamente.

Ventajas del Preformado:

En general, las ventajas de los cables preformados son las siguientes.

- Mayor resistencia a la fatiga por flexión, dado que precisa de un menor esfuerzo para adaptarse a un diámetro específico de cable, lo que también facilita el enrollamiento en las poleas y el número de vueltas que se pueden dar a esta.

- Más duración del factor de seguridad, por que distribuyen uniformemente las cargas, lo que permite que se mantenga, por más tiempo, la vigencia del factor de seguridad con el que se ha trabajado.

- Soportan mejor las vibraciones y sacudidas.
- Soportan mejor el autogiro.
- Tienen todas las ventajas del cable Lang descrito anteriormente.

ANEXO D

FOTOGRAFÍAS DEL CONTROL DIMENSIONAL

Alambre "1":

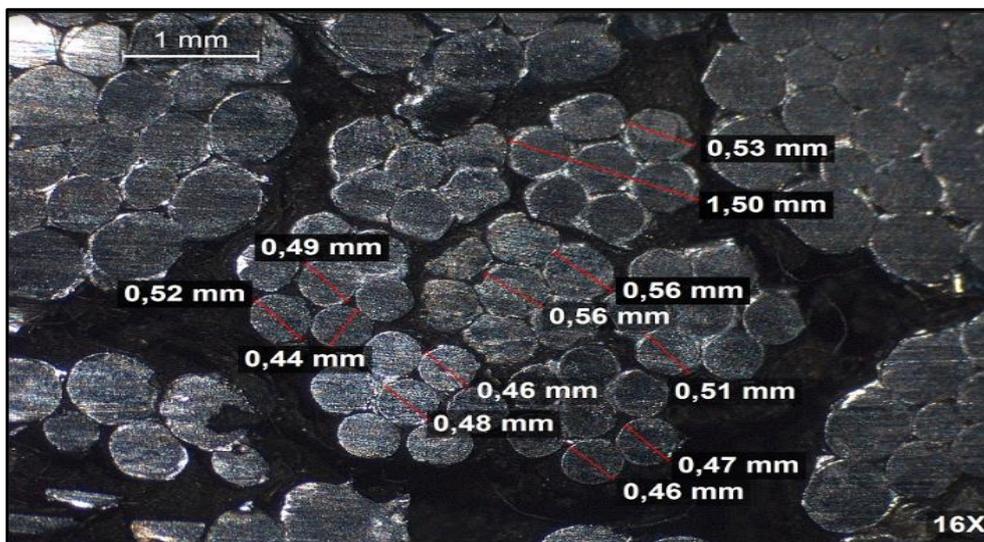


Figura D1. Sección del alma metálica y las medidas de los diámetros del alambre "1".

Alambre "2":

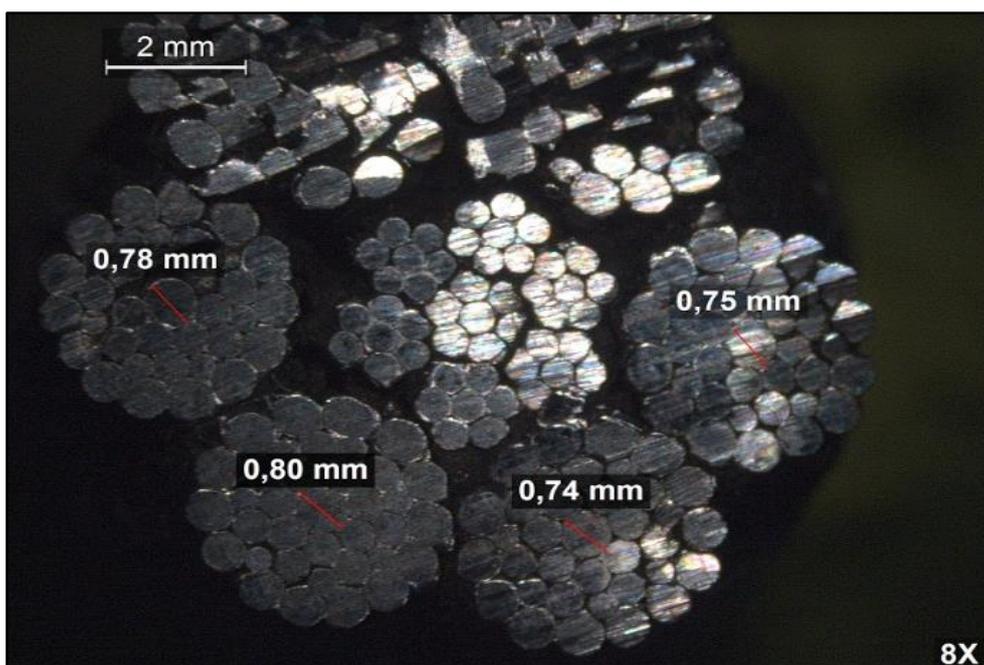


Figura D2. Sección del cable metálico y las medidas de los diámetros del alambre "2".

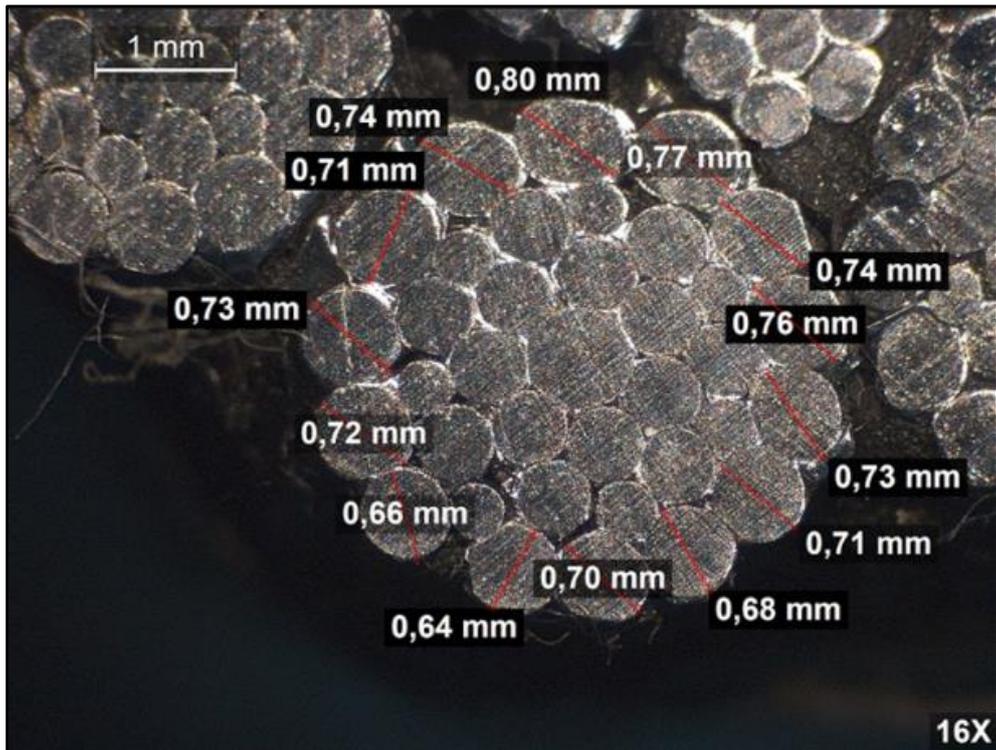


Figura D3. Sección del cable metálico y las medidas de los diámetros del alambre “2”.

Alambre “3”:

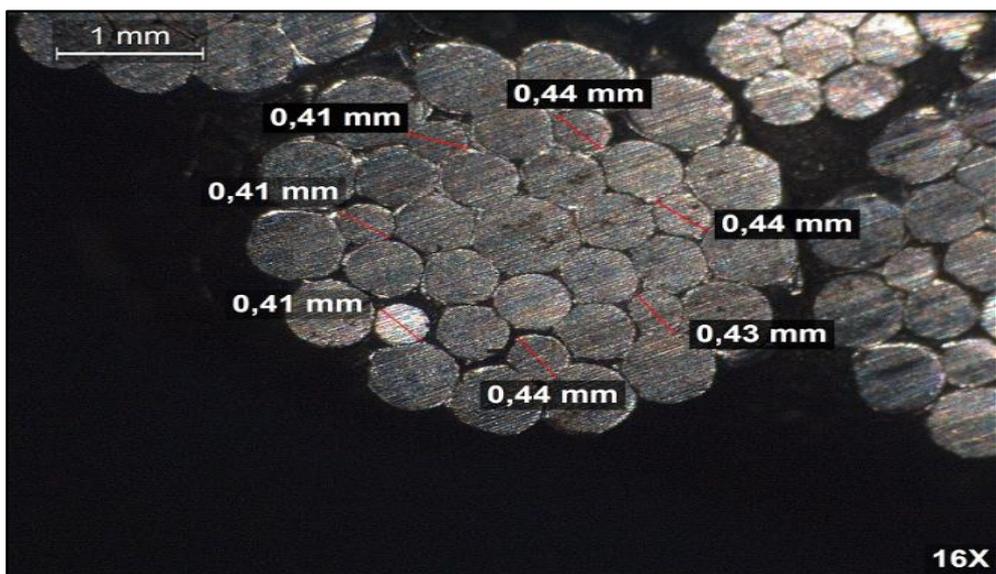


Figura D4. Sección de un torón lateral y las medidas de los diámetros del alambre “3”.

Alambre "4":

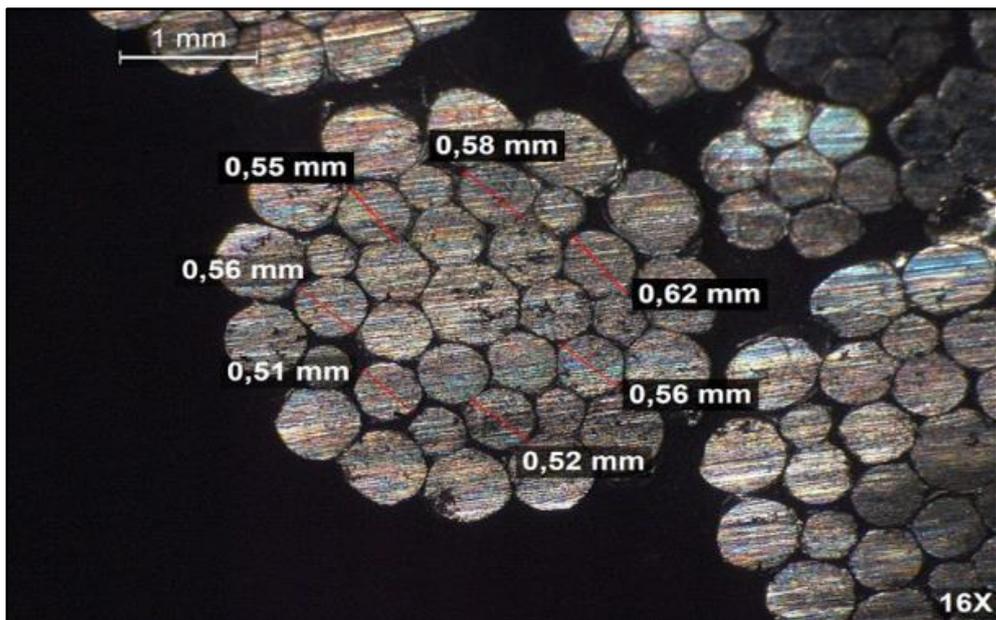


Figura D5. Sección de un torón lateral y las medidas de los diámetros del alambre "4".

ANEXO E

RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE CARBONO Y AZUFRE EN EL ANALIZADOR POR COMBUSTIÓN

Primer ensayo:

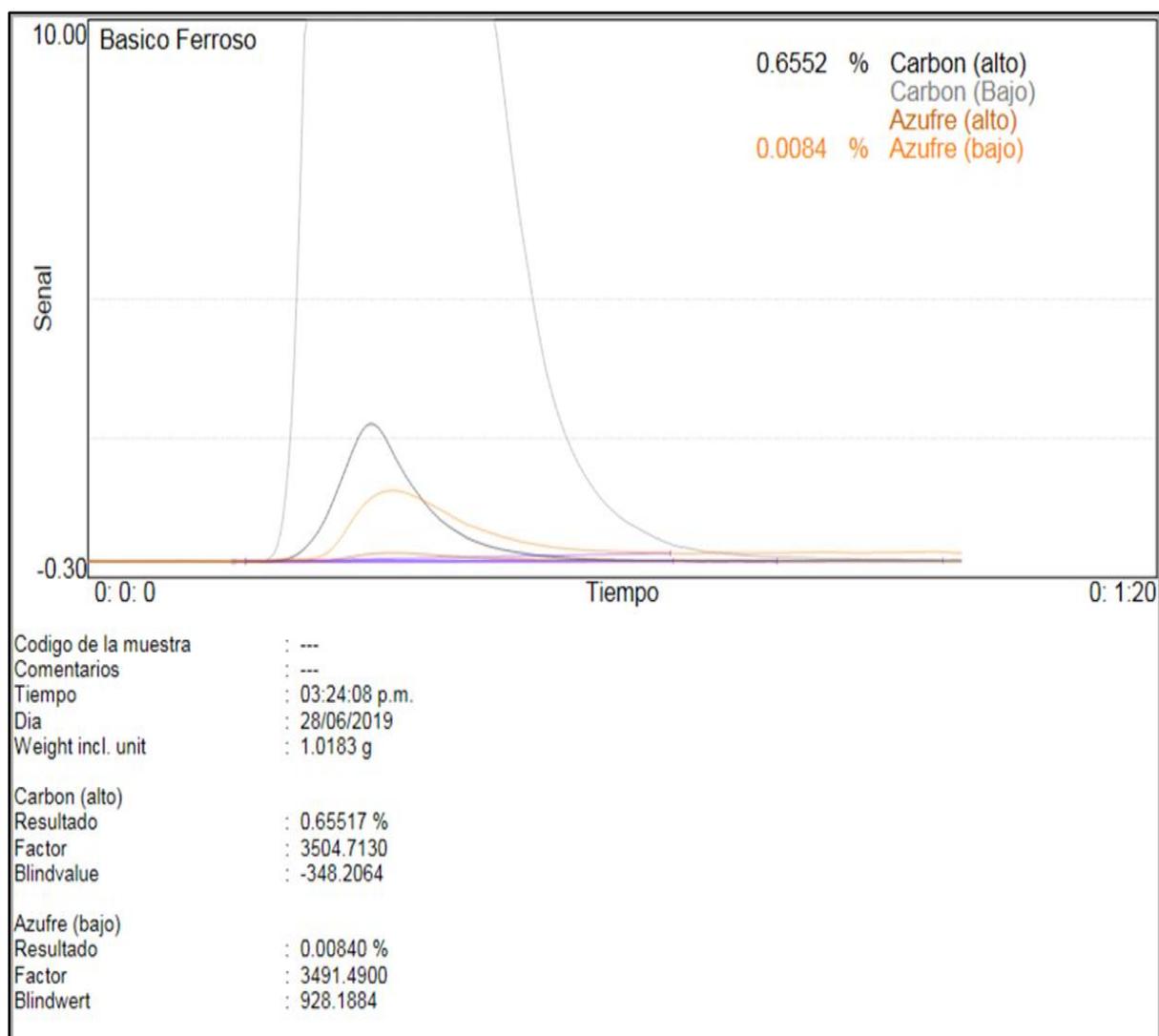


Figura E1. Resultados del primer ensayo realizado en el analizador por combustión

Segundo ensayo:

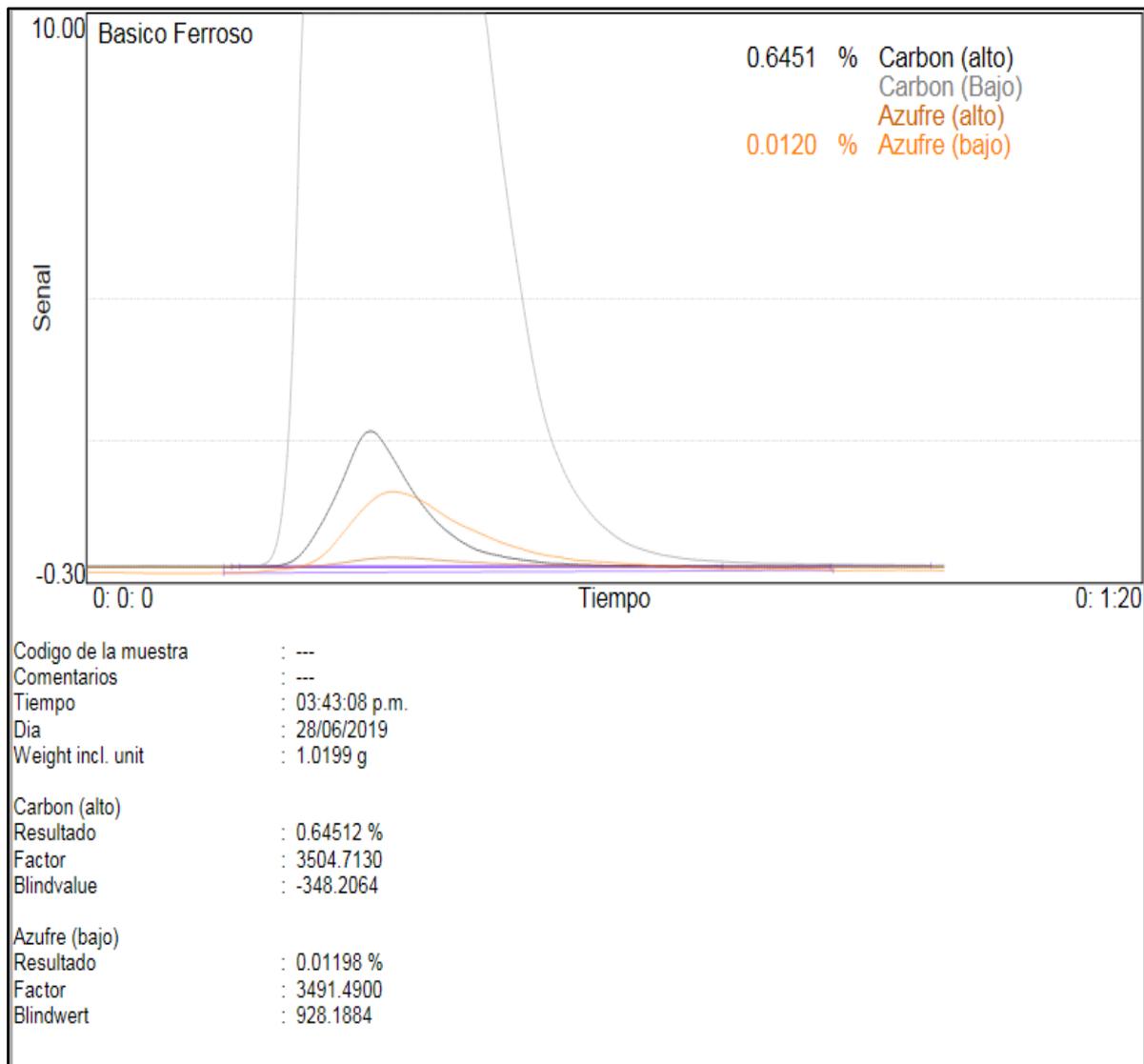


Figura E2. Resultados del segundo ensayo realizado en el analizador por combustión

Tercer ensayo:

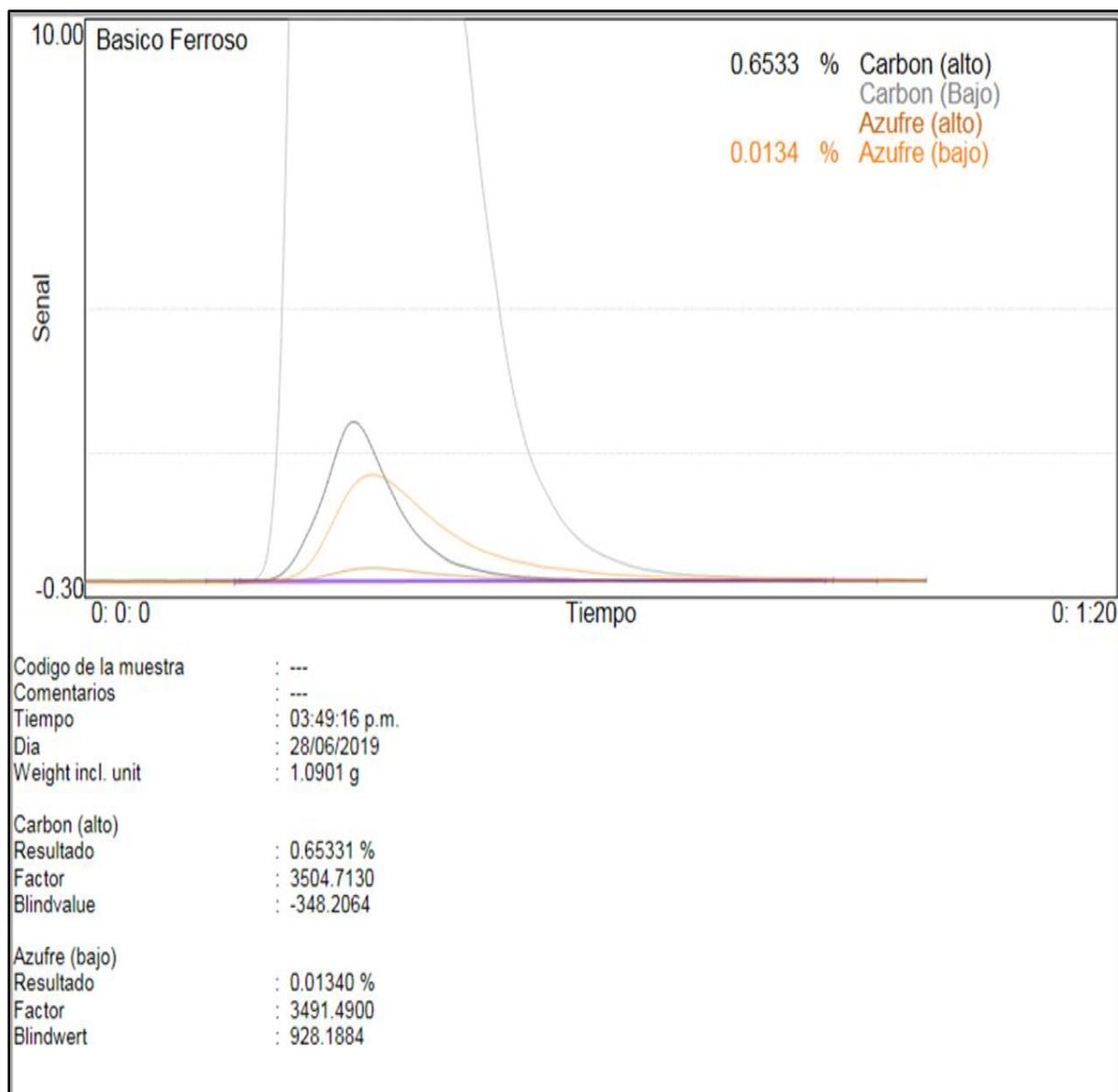


Figura E3. Resultados del segundo ensayo realizado en el analizador por combustión