



Carlos Manga.  
TRABAJO DE GRADO. UTB. CARTAGENA

**Universidad Tecnológica de Bolívar  
Facultad de Ingeniería  
Programa de Ingeniería Mecánica**

# **DETERMINACIÓN DE CAUSAS DE FALLA EN EL ELEVADOR DE CANGILONES DEL TRANSPORTADOR DE CLÍNKER DE ARGOS.**

**CARLOS ANDRÉS MANGA RODRÍGUEZ**

**DIRIGIDO POR:  
PhD. LUIS MARCOS CASTELLANOS GONZÁLEZ.**

**COTUTOR:  
PhD. HERNÁN HERNÁNDEZ HERRERA**

**COLOMBIA, OCTUBRE DEL 2014.**



C. Andrés Manga.  
TRABAJO DE GRADO. UTB. CARTAGENA

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DETERMINACIÓN DE LAS CAUSAS DE FALLA EN EL ELEVADOR DE  
CANGILONES DEL TRANSPORTADOR DE CLÍNKER DE ARGOS.**

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADA A EL COMITÉ EVALUADOR  
DE TRABAJOS DE GRADO  
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA**

**POR:**

**CARLOS ANDRÉS MANGA RODRÍGUEZ**

**DIRIGIDO POR:**

**PhD. LUIS MARCOS CASTELLANOS GONZÁLEZ.**

**COTUTOR:**

**PhD. HERNÁN HERNÁNDEZ HERRERA**

**PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO.**

**CARTAGENA DE INDIAS D.T. Y C.  
COLOMBIA  
2014**

Señores

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR**

Facultad de Ingeniería Mecánica  
Comité Evaluador de Trabajos de Grado.

Cordial saludo.

Por medio de la presente, me permito someter a su consideración el trabajo de grado titulado **“DETERMINACIÓN DE LAS CAUSAS DE FALLA EN EL ELEVADOR DE CANGILONES DEL TRANSPORTADOR DE CLÍNKER DE ARGOS.”**, del estudiante CARLOS ANDRÉS MANGA RODRÍGUEZ, para optar por el título de ingeniero mecánico.

Cordialmente,

---

**CARLOS ANDRÉS MANGA RODRÍGUEZ**  
**C.C. 1.047.436.473**

Señores

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR**  
Facultad de Ingeniería Mecánica  
Comité Evaluador de Trabajos de Grado

Cordial saludo.

Por medio de la presente, me permito someter a consideración el trabajo de grado con título **“DETERMINACIÓN DE LAS CAUSAS DE FALLA EN EL ELEVADOR DE CANGILONES DEL TRANSPORTADOR DE CLÍNKER DE ARGOS.”**, elaborado por el estudiante CARLOS ANDRÉS MANGA RODRÍGUEZ, en el que me desempeño como Director.

Cordialmente,

---

**PHD. LUIS MARCOS CASTELLANOS GONZÁLEZ.**  
Director de Trabajo de grado

Yo CARLOS ANDRÉS MANGA RODRÍGUEZ, mayor de edad y domiciliado en la ciudad de Cartagena D. T y C. e identificado como consta al pie de la presente, de manera libre y espontánea, manifiesto en este documento nuestra voluntad de ceder a la **UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR** los derechos patrimoniales, consagrados en el artículo 72 de la Ley 23 de 1982 sobre Derechos de Autor, del trabajo final denominado **“DETERMINACIÓN DE LAS CAUSAS DE FALLA EN EL ELEVADOR DE CANGILONES DEL TRANSPORTADOR DE CLÍNKER DE ARGOS.”** producto de mi actividad académica para optar el título de **INGENIERO MECÁNICO** de la Universidad Tecnológica de Bolívar.

La Universidad Tecnológica de Bolívar, entidad académica sin ánimo de lucro, queda por lo tanto facultada para ejercer plenamente los derechos anteriormente cedidos en su actividad ordinaria de investigación, docencia y extensión. La cesión otorgada se ajusta a lo que establece la Ley 23 de 1982. Con todo, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada con arreglo al artículo 30 de la Ley 23 de 1982. En concordancia suscribo este documento que hace parte integral del trabajo antes mencionado y entregamos al Sistema de Bibliotecas de la Universidad Tecnológica de Bolívar.

Dado en la ciudad de Cartagena de Indias D. T y C., a los 6 días del mes de octubre del 2014.

---

**CARLOS ANDRÉS MANGA RODRÍGUEZ**  
**C.C. 1.047.436.473**

Nota de Aceptación

---

---

---

---

---

\_\_\_\_\_  
Firma del Presidente del Jurado

\_\_\_\_\_  
Firma del Jurado

\_\_\_\_\_  
Firma del Jurado

Cartagena de Indias D.T. y C., 6 de octubre del 2014.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Tecnológica de Bolívar, alma mater, santuario del conocimiento donde abracé la academia de la mano de brillantes profesores y excepcionales compañeros.

Le agradezco profundamente al profesor Luis Marcos Castellanos quien me apoyó e incentivó, despertando el interés investigativo en mí, mostrándome la importancia de esta disciplina en nuestro oficio de ingeniero y que realizar un trabajo de tesis de primer nivel para optar por el título de ingeniero ofrece una gran oportunidad de desarrollo personal y académico, por el voto de confianza depositado al permitirme desarrollar este trabajo de grado.

Al Profesor Hernán Hernández Herrera, quien siempre estuvo atento a mis avances e inquietudes para asesorarme y darme siempre con presteza sus comentarios y recomendaciones, sin su ayuda, conocimientos y experiencia no habría sido posible alcanzar esta meta satisfactoriamente.

Al profesor Edgardo William Arrieta quien ha sido testigo de la gran lucha para llegar a este punto y fue exigente siempre con sus alumnos para llevarnos a la excelencia como estudiantes y futuros ingenieros.

A todos los docentes de la Universidad Tecnológica de Bolívar que compartieron sus conocimientos conmigo durante el transcurso del pregrado.

A mi familia, motor que me impulsa en todos los aspectos de la vida, a mi madre y mi hermana, a quienes les merezco toda mi admiración por ser un modelo a seguir íntegras, fuente de consejos y sabiduría siempre que la he necesitado y a mi padre quien se esforzó por apoyar mi crecimiento académico.

A todos mis amigos, testigos de esta etapa, compañeros de luchas y experiencias.

A la empresa Argos quien abrió sus puertas para la investigación y me permitió el desarrollo de este proyecto que ha sido una gran experiencia para mí.

## Tabla de contenido

	Pag.
1 JUSTIFICACIÓN.....	13
2 PROBLEMA CIENTÍFICO .....	14
3 OBJETIVO GENERAL.....	15
<b>3.1 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....</b>	<b>16</b>
4 ESTADO DEL ARTE .....	17
<b>4.1 Sistemas de Transporte.....</b>	<b>17</b>
<b>4.2 Elevadores por cangilones:.....</b>	<b>21</b>
4.2.1 <b>Unidad de Accionamiento:.....</b>	<b>23</b>
4.2.2 <b>Tambor/catarinas de Accionamiento: .....</b>	<b>24</b>
4.2.3 <b>Freno: .....</b>	<b>24</b>
4.2.4 <b>Órgano de tracción: .....</b>	<b>25</b>
4.2.5 <b>Dispositivo de Estiramiento: .....</b>	<b>27</b>
4.2.6 <b>Cangilones:.....</b>	<b>28</b>
4.2.7 <b>Tambor de reenvío .....</b>	<b>29</b>
4.2.8 <b>Estructura:.....</b>	<b>29</b>
4.2.9 <b>Rieles:.....</b>	<b>31</b>
<b>4.3 Principales modos de falla en transportadores por cangilones.....</b>	<b>34</b>
<b>4.4 Problema latente en el sistema. ....</b>	<b>37</b>
<b>4.5 Fatiga Mecánica.....</b>	<b>37</b>
4.5.1 <b>Manifestación y Proceso de Falla:.....</b>	<b>37</b>
4.5.2 <b>Análisis del origen de las Fallas por Fatiga. ....</b>	<b>40</b>
4.5.3 <b>Cargas que originan fatiga mecánica. ....</b>	<b>44</b>
4.5.4 <b>Naturaleza probabilística de la fatiga mecánica.....</b>	<b>46</b>
4.5.5 <b>Factores que afectan la fatiga mecánica.....</b>	<b>47</b>
4.5.6 <b>Remedio y prevención de fallas; mantenimiento; normas de diseño y especificaciones.....</b>	<b>48</b>
<b>4.6 Método de los Elementos Finitos: .....</b>	<b>49</b>
4.6.1 <b>Análisis de elementos Finitos:.....</b>	<b>49</b>

5	Análisis de causa raíz de falla en elevador por cangilones planta Argos Cartagena.....	52
5.1	<b>Antecedentes:</b> .....	52
5.2	<b>Evidencias:</b> .....	53
5.2.1	<b>Aparición de grietas y rotura en la unión entre el eje de la rueda y la “U” soldada a la base de los cangilones.</b> .....	53
5.2.2	<b>Desgaste y deformación en la superficie de rodadura de uno de los rieles.</b> ....	57
5.3	<b>Hipótesis:</b> .....	60
5.4	<b>Pruebas y justificación de hipótesis:</b> .....	61
6	Conclusiones y sugerencias.....	75
7	Anexos.....	77
7.1	<b>Transportador de Tornillo Helicoidal:</b> .....	77
7.2	<b>Transportadores de Banda.</b> .....	81
7.3	<b>Transportadores de cadena:</b> .....	84
7.4	<b>Transportadores de rodillos:</b> .....	85
7.5	<b>Transportadores Vibratorios u Oscilantes también llamados de sacudidas o de Inercia:</b> .....	87
7.5.1	<b>Transportadores por Vibraciones Eléctricas:</b> .....	89
7.5.2	<b>Transportadores Vibratorios por motores desequilibrados:</b> .....	89
7.5.3	<b>Transportadores por vibraciones mecánicas:</b> .....	90
7.5.4	<b>Transportadores por vibraciones causadas por medios hidráulicos y neumáticos:</b> .....	90
7.5.5	<b>Aplicación especial para transportadores vibratorios:</b> .....	91
7.6	<b>Transportadores Neumáticos.</b> .....	92
7.6.1	<b>Componentes de un sistema neumático.</b> .....	93
7.7	<b>Transportador de banda cerrada:</b> .....	93
7.8	<b>Transportadores de paleta:</b> .....	95

**Tabla de ilustraciones:**

<i>Imagen 1: partes que conforman un transportador helicoidal:</i>	78
<i>Imagen 2: Tornillo sinfín helicoidal:</i>	78
<i>Imagen 3: Tornillo sinfín de paletas tipo cintas</i>	79
<i>Imagen 4: Tornillo sinfín de paletas con palas: <a href="http://micesa.net/productos.htm">http://micesa.net/productos.htm</a></i>	79
<i>Imagen 5: Tornillo sinfín con diámetros variables</i>	79
<i>Imagen 6: Transportador de Banda</i>	81
<i>Imagen 7: Banda transportadora (1900-260 High Capacity Mass Flow Spiral. De Ryson)</i>	82
<i>Imagen 8: Transportador de cadena</i>	84
<i>Imagen 9: Transportador de rodillos</i>	85
<i>Imagen 10: Elementos que componen un transportador vibratorio.</i>	87
<i>Imagen 11: Transportador vibratorio</i>	88
<i>Imagen 12: Motor desequilibrado</i>	89
<i>Imagen 13: Separador vibratorio</i>	91
<i>Imagen 14: Transportador Neumático</i>	93
<i>Imagen 15: Transportador de banda cerrada</i>	94
<i>Imagen 16: Transportador de paletas</i>	95
<i>Imagen 17: Partes que componen un elevador por cangilones</i>	22
<i>Imagen 18: Sistema de accionamiento de un elevador de cangilones</i>	23
<i>Imagen 19: Catarina de accionamiento de un elevador por cangilones</i>	24
<i>Imagen 20: Cadena (órgano de tracción de un Elevador por cangilones).</i>	25
<i>Imagen 21: Cadena (órgano de tracción de un Elevador por cangilones).</i>	26
<i>Imagen 22: Elevador de cangilones con banda como órgano de tracción</i>	26
<i>Imagen 23: Elevador de cangilones con cadenas como órgano de tracción</i>	27
<i>Imagen 24: Cangilones</i>	28
<i>Imagen 25: Dimensiones de los cangilones</i>	28
<i>Imagen 26: Cabeza del elevador</i>	29
<i>Imagen 27: Ramales de subida y bajada</i>	30
<i>Imagen 28: Pie del elevador</i>	31
<i>Imagen 29: Tipos de carga de los cangilones</i>	32
<i>Imagen 30: Tipos de descarga del producto en los elevadores por cangilones</i>	33
<i>Imagen 31: Cangilones con señales de falla en el fondo de los cubos</i>	34
<i>Imagen 32: Sproket con falla por fluencia en superficie de contacto</i>	35
<i>Imagen 33: Sproket con falla por fluencia en superficie de contacto</i>	35
<i>Imagen 34: Detalle de la fluencia en la superficie de contacto del Sproket.</i>	36
<i>Imagen 35: Riel desgastado producto de los ciclos de carga.</i>	36
<i>Imagen 36: Evolución de la falla por fatiga</i>	38
<i>Imagen 37: Ilustración de cristales débiles dentro de la estructura cristalina.</i>	40
<i>Imagen 38: Modelo mecánico, que ilustra el progresivo endurecimiento por deformación de un cristal débil.</i>	41
<i>Imagen 39: Ilustración de cómo la grieta crece en la dirección de los planos de deslizamiento.</i>	42
<i>Imagen 40: espectro de carga de una aeronave (a) Real, (b) simplificado.</i>	45
<i>Imagen 41: Ilustración de los estados tensionales y deformación.</i>	51
<i>Imagen 42: Soldadura de la "U" de soporte del eje al fondo del cubo.</i>	53
<i>Imagen 43: La "U" va abierta hacia el frente.</i>	54

<i>Imagen 44: Detalle de la manera en que se suelda al fondo del cubo.</i>	54
<i>Imagen 45: Evidencia de la manifestación de la grieta.</i>	55
<i>Imagen 46: Evidencia de Cubo que falló, desprendimiento del fondo.</i>	55
<i>Imagen 47: Propuesta de solución del fabricante, refuerzo del fondo del cubo.</i>	56
<i>Imagen 48: Soldadura del refuerzo.</i>	56
<i>Imagen 49: Evidencia de fluencia en la superficie de rodadura del riel.</i>	57
<i>Imagen 50: Detalle de la fluencia del riel desgastado.</i>	58
<i>Imagen 51: Detalle del riel desgastado.</i>	58
<i>Imagen 52: Ilustración del riel no deformado.</i>	59
<i>Imagen 53: Probeta para ensayos de dureza del riel.</i>	64
<i>Imagen 54: Micro estructura del riel sin ataque.</i>	65
<i>Imagen 55: Micro estructura del riel con ataque, aumento de 200x.</i>	65
<i>Imagen 56: Micro estructura del fondo del cangilón sin ataque.</i>	66
<i>Imagen 57: Micro estructura del fondo del cangilón con ataque, aumento 100x.</i>	67
<i>Imagen 58: Modelo de SolidEdge donde se aprecian las zonas más afectadas por la carga.</i>	<b>¡Error!</b>
<b>Marcador no definido.</b>	
<i>Imagen 59: Punto de concentración de esfuerzos e inicio de las grietas.</i>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

# INTRODUCCIÓN

---

Los elevadores de cangilones como cualquier otro sistema mecánico se ve expuesto a una serie de problemas de ingeniería, en este caso el enfoque se concentra alrededor del análisis de falla en las uniones soldadas de las ruedas de los cangilones, y en uno de los rieles que se encuentra desgastado.

Se aborda el problema utilizando el análisis de causa raíz para determinar los factores que afectan principalmente a este sistema además de otros métodos de investigación como análisis metalográficos, herramientas computacionales para el análisis por elementos finitos que permiten determinar los estados tensionales presentes en dichas uniones y las probables tensiones residuales producto a distintos factores como son la soldadura y la geometría del equipo para determinar las causas de la falla y posteriormente proponer las soluciones más eficientes y con menor impacto económico.

## **1 JUSTIFICACIÓN**

El desarrollo de esta investigación será de vital importancia para el óptimo funcionamiento de este Elevador de Clínker ya que supondrá reducciones de costos por motivos de paradas de producción, reparaciones y tiempos de mantenimiento, así como también aumentará la confiabilidad de la línea de producción y la entrega a tiempo de todas las etapas de trabajo posteriores al elevador permitiendo así dirigir la atención y los recursos al mejoramiento de otros sistemas.

## 2 PROBLEMA CIENTÍFICO

Este sistema presenta fallas por fatiga en la base de apoyo del canjilón (cubos de acero al carbono dañados) a la rueda, además se presentan problemas de desgaste no uniforme en los rieles; se considera que es un problema crítico por el tipo de mecanismo de falla, el cual progresa con el tiempo y porque cada cubo dañado implica una parada. Los proveedores de este sistema transportador han suministrado una solución a la problemática la cual consiste en reforzar con un suplemento soldado por el interior del cubo. Se quiere determinar ¿Cuál es la causa raíz de la falla por fatiga que está limitando la vida útil y la operación continua de este sistema? para posteriormente verificar si la solución dada por el proveedor resuelve definitivamente este problema o si se requiere de otras acciones en cuanto al diseño de estos elementos.

### **3 OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar una investigación a fondo para la empresa ARGOS con el fin de determinar la causa - raíz del deterioro prematuro en diferentes elementos del Transportador de Clínker en la línea seca de la planta de Cartagena.

### 3.1 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Evaluar de forma integral las causas que han provocado las fallas por fatiga de la lámina del fondo del cangilón, tomando en cuenta el efecto del desnivel en la estructura, los materiales del cubo y del riel y los posibles errores de diseño a través de un análisis de los estados tensionales aplicando el método de los Elementos Finitos (MEF)
- Determinar las causas del desgaste y deformación plástica en uno de los rieles en la zona de contacto con la rueda.

## 4 ESTADO DEL ARTE

### 4.1 Sistemas de Transporte

Uno de los atributos principales para distinguir al hombre actual de épocas anteriores, es la habilidad de utilizar los medios mecánicos para realizar las tareas o trabajos que antes se realizaban a mano. La evolución que han sufrido los medios de transportación y manejo de los materiales, es tan antigua como la humanidad. Anteriormente y por mucho tiempo el hombre dependía de su propia fuerza física; siendo por muchos siglos la palanca y el plano inclinado los únicos medios que utilizó el hombre para mover y cambiar de lugares grandes pesos. Luego se descubrió la rueda, que permitió al hombre emplear su fuerza más fácilmente; a partir de ahí la humanidad fue evolucionando y descubriendo nuevos mecanismos para el movimientos de cargas.

Hasta hace poco tiempo, la fuerza humana era más barata, pero en la actualidad, dicho costo es muy elevado, y cuando los volúmenes de material a manejar son grandes, es mucho más conveniente desde el punto de vista económico el uso de modernas maquinarias específicas, en las que la intervención del hombre se enfoca el manejo de las mismas. Lógicamente, para el caso de movimiento de pequeñas cantidades de material, podría no llegar a justificarse la utilización de maquinaria de transporte complejas y de costo elevado.

Para el desarrollo de nuestra investigación es necesario saber que “Los transportadores son máquinas de diseño horizontal, vertical o en pendiente que se usan para el transporte continuado de materiales en una trayectoria determinada, hasta el punto final o de descarga, algunos de ellos son accionados por gravedad y otros por una fuerza motriz como los transportadores de banda, tablillas, arrastre, neumáticos, vibratorios, rodillos, tornillos y elevadores de cangilones” <sup>[1]</sup>

**El transporte de materiales tiene 5 importantes aspectos que considerar:**

- Movimiento
- Velocidad de desplazamiento
- Lugar
- Cantidad de material
- Espacio

“El transporte de productos consiste, en el movimiento de la forma más eficiente al tiempo más adecuado, hacia y desde el lugar correcto, en la cantidad requerida, con la máxima economía de espacio ya que el desplazamiento no añade nada al valor del producto. Por ello, es de gran importancia asegurar una eficiencia máxima del transporte durante los movimientos de la materia prima desde el lugar de suministro hasta el punto de procesamiento, como producto en elaboración en las etapas de procesamiento y posteriormente como producto terminado hacia el área de embalaje y envío o almacenamiento. <sup>[2]</sup>”

### **Clasificación de los transportadores.**

Los equipos de elevación del transporte tienen diferentes clasificaciones, las mismas están condicionadas por:

- ✓ El medio que actúan, que puede ser: aéreo, terrestre, fluvial y marítimo.
- ✓ Según la procedencia de la energía que los accionan: manual, mecánico, hidráulico, eléctrico, neumático y combinado.
- ✓ Según la dirección de traslación de cargas, que puede ser: horizontal o vertical (ascendente o descendente), e inclinado.
- ✓ Según el estado físico del producto que puede ser: transporte de sólidos, transporte de líquidos.
- ✓ Según la prestación del servicio: continuos o discontinuos.
- ✓ Según la forma de transporte: transportadores de cintas o bandas, de cadenas (cangilones o rasquetas), vibratorios, transportadores de tornillo sin fin, transportadores neumáticos.

La selección de estos equipos en lo que concierne a la forma de transporte es muy amplia y difícil de concretar en un estudio teórico. Debido a esto se torna complicado dar normas específicas, para la adopción y montaje de un transportador en una determinada planta. Sin embargo, no ha de omitirse la mención de algunas variables que son tomadas como referencia para dicha adopción. <sup>[3]</sup>

“Aunque de uno a otro tipo de transportador existen diferencias en su configuración, son imprescindibles ciertos datos para el diseño y selección de los elementos que lo componen”<sup>[3]</sup>, como son:

- ✓ **Capacidad a transportar (toneladas por hora).** De acuerdo al material y sus características físicas serán parámetros prefijados el tonelaje, velocidad y volumen de material transportado.
- ✓ **Características físicas del material.** Se deben tener en cuenta las siguientes: granulometría en cuanto a tamaños en pulgadas o milímetros, fluidez, abrasividad, humedad, fragilidad, temperatura y otras muy específicas como toxicidad, pureza, facilidad de tomar humedad del ambiente (materiales higroscópicos), pegajoso, pulverulento, tóxico, facilidad de ignición entre otras. Si se trata de manejar materiales de gránulos muy grandes o a temperaturas elevadas, puede recomendarse los transportadores por bandejas
- ✓ **Distancia por cubrir:** Tanto en dirección horizontal, como vertical o en forma inclinada, subiendo o bajando el material, y por tanto la diferencia de niveles entre los puntos inicial y final. De dicho análisis llegamos a adoptar un solo tipo de transportador, o una combinación de dos o más de ellos, según más convenga desde el punto de vista técnico y económico. Cuando las distancias son más o menos grandes y la capacidad es elevada (toneladas por hora) las bandas transportadora son el medio de transporte más adecuado, sin embargo su uso está limitado por la temperatura del material
- ✓ **Continuidad de la operación.** Se debe tratar en cuanto sea posible, que los elementos de transporte tengan la menor posibilidad de parada, para evitar costos adicionales por materiales estancados.
- ✓ **Condiciones de trabajo y duración prevista de la instalación:** Según las condiciones en las que se encuentre el equipo: a la intemperie, bajo cubierta, en clima frío o cálido y según la duración: ocasional o permanente.
- ✓ **Disposición de planta física:** La planta física se dispondrá teniendo en cuenta tanto la distribución en planta como el espacio disponible. Si el espacio en la planta es restringido y las capacidades no son elevadas, puede recomendarse el uso de elevadores de cangilones; en espacios limitados en donde se exija gran limpieza, y cuyos recorridos sean medianos pueden emplearse los transportadores de tipo tornillo.

“Con los datos anteriores ya definidos se entra a ejecutar el cálculo, diseño y selección de los diferentes equipos, teniendo en cuenta cada uno de los siguientes parámetros por recomendación o adopción de tablas ya establecidas por las casas de fabricantes”.<sup>[3]</sup>

- ✓ **Velocidad:** Por tablas se da la máxima permisible, según la clase y tamaño de material, de acuerdo a códigos establecidos en los catálogos o según el tipo de material, uniforme o no uniforme.
- ✓ **Potencia:** Por norma se calcula de acuerdo a fórmulas clasificándola así:
  - Potencia para mover la carga horizontalmente.
  - Potencia para mover la carga verticalmente.
  - Potencia para mover el transportador vacío.
  - Potencia para mover mecanismos auxiliares tales como descargador, limpiadores de banda, dosificadores, etc.
- ✓ **Dimensiones de elementos del transportador:** También definidas en tablas y que vienen a determinar la magnitud de ciertos elementos tales como: ancho de banda y espesor de la misma en función de tensiones y esfuerzo admisible del material, tipo de cadena si es transportador metálico; longitud, anchura y proyección, si se trata de elevadores de cangilones; diámetro de hélice y paso, si es tornillo transportador; o diámetro de tubería si se trata de transporte neumático.

Así mismo entran en este punto las dimensiones de accesorios tales como: tambores y rodillos soportes de banda, tensores, dosificadores y tolvas de almacenamiento y otros especiales para cada sistema en particular, al igual que los elementos estructurales soportes como bastidor de todo el conjunto.<sup>[3]</sup>

Además de las consideraciones anteriores y de la clasificación general según si son de órgano de tracción flexible o no, los transportadores también reciben una clasificación más específica según los elementos que lo componen, algunas de ellas son:

- **Transportador de tornillo helicoidal** <sup>[4]</sup>. (Anexo 7.1)
- **Transportador de banda** <sup>[5]</sup> <sup>[6]</sup>. (Anexo 7.2)
- **Transportador de cadena** <sup>[5]</sup>. (Anexo 7.3)
- **Transportador de rodillos**. (Anexo 7.4)
- **Transportadores vibratorios u oscilantes** <sup>[3]</sup> <sup>[7]</sup>. (Anexo 7.5)
- **Transportadores neumáticos** <sup>[3]</sup> <sup>[7]</sup>. (Anexo 7.6)
- **Transportadores de banda cerrada** <sup>[3]</sup>. (Anexo 7.7)
- **Transportadores de paletas** <sup>[3]</sup>. (Anexo 7.8)

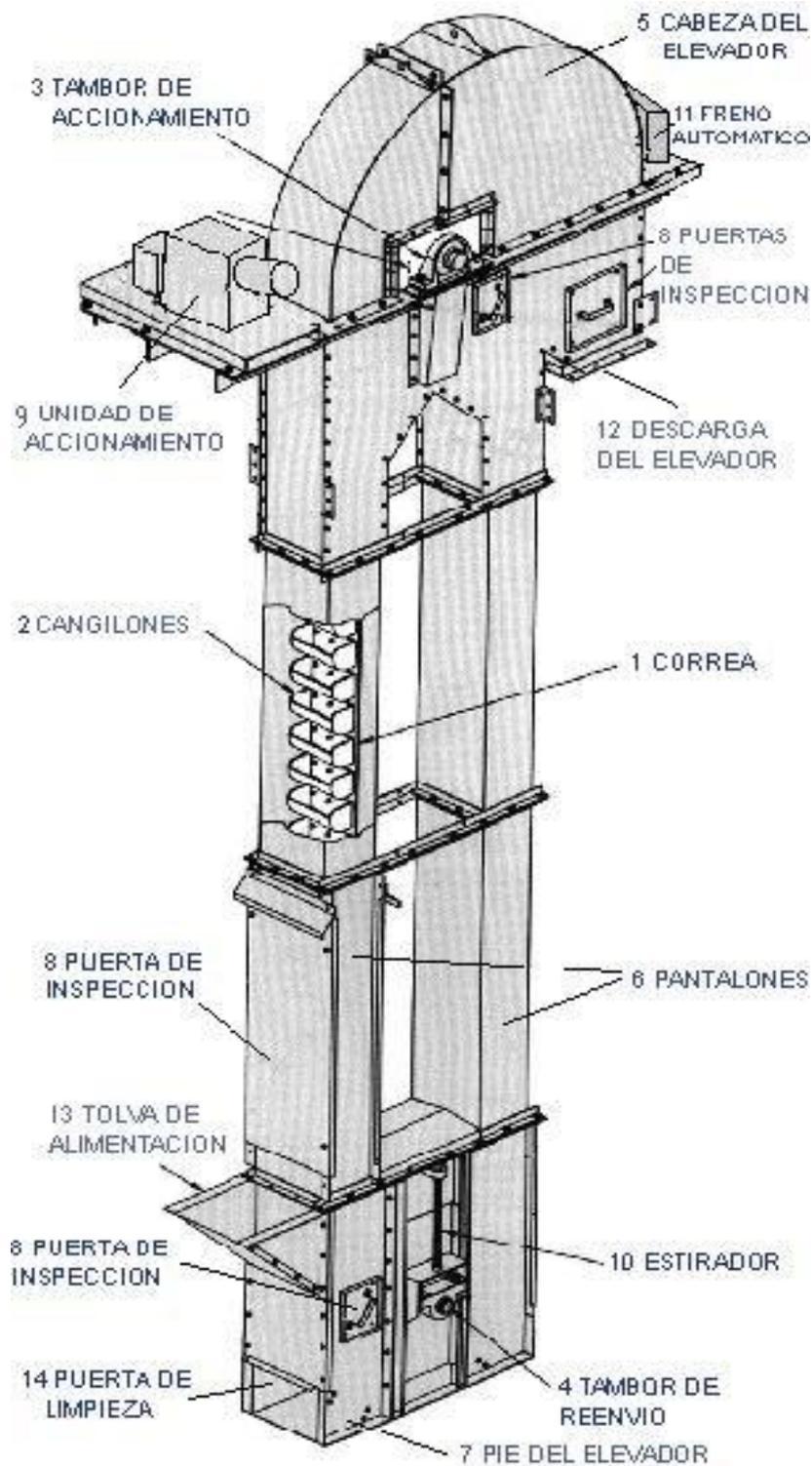
Finalmente se encuentran los **Elevadores por cangilones** que son el centro del desarrollo de este trabajo de investigación, por esta razón su descripción será mucho más detallada y extensa.

#### 4.2 Elevadores por cangilones:

Los elevadores de cangilones son las unidades más sencillas y seguras para desplazamientos verticales, son utilizados en la industria para el transporte de materiales de la más variada clase, ya sea a granel, secos, húmedos e inclusive líquidos. Están compuestos por un órgano de tracción que puede ser de banda o cadenas, en el cual se fijan los cangilones. Todo el conjunto se moverá alrededor de la tambora motriz y de atezado, colocado en el extremo superior e inferior respectivamente, en el caso de emplearse cadenas como órgano de tracción, el lugar de tamboras se emplearán catarinas. Todo lo anterior va encerrado una armadura metálica compuesto de tres partes: superior, intermedia e inferior.

En la parte superior se coloca el sistema propulsor compuesto por reductor, el freno y el motor eléctrico; en la parte inferior se sitúa el sistema de atezado. Estos se construyen estacionarios e inmóviles. <sup>[9]</sup>

En ocasiones además de elevar la carga, garantizan un determinado proceso tecnológico, por ejemplo la extracción del material sumergido en el fluido como una especie de “draga” en donde se remueve material del fondo. Solamente pueden transportar la carga desde un punto inferior hasta el final del elevador sin entradas o salidas de este entre puntos intermedios.



*Imagen 1: Partes que componen un elevador por cangilones*

<http://dim.usal.es/areaim/guia%20P.%20I/PAGINA%20CANGILONES.HTM>

#### 4.2.1 Unidad de Accionamiento:

Es la encargada de dar movimiento a la tambora o catalina motriz en dependencia del sistema de transmisión que se utilice. Suele ocupar muy poco espacio, se sitúa en la parte superior del equipo. Para prevenir accidentes siempre se coloca un freno que evita la reversión del movimiento de las partes móviles y la caída de la carga nuevamente en el fondo del equipo.

Está constituida por un motor y un reductor que puede estar ligado directamente al eje del tambor de accionamiento o a través de un acople elástico. Toda la unidad se sustenta por una plataforma construida a tal fin. <sup>[3][8]</sup>  
El motor y el reductor aparecen en azul en la imagen.

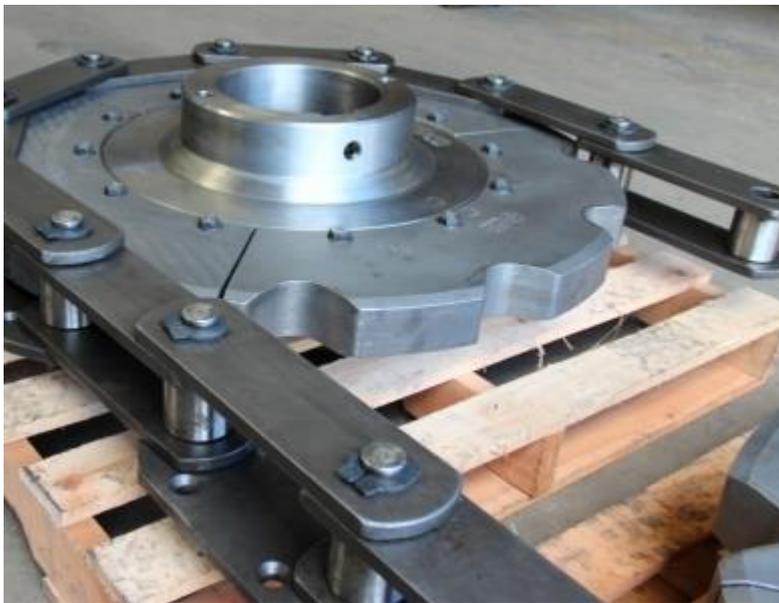


Imagen 2: Sistema de accionamiento de un elevador de cangilones

<http://www.forjasbolivar.com/productos/elevadores-de-cangilones/11/68/6/>

#### 4.2.2 Tambor/catarinas de Accionamiento:

Es el encargado de transmitir el movimiento a la correa o cadena, normalmente fabricado en fundición o chapa de acero. Pueden tener una pequeña biconicidad a los efectos de centrar la correa, de ser este el caso, y siempre y cuando el cangilón lo permita. Es altamente recomendable el recubrimiento del mismo con caucho a los efectos de protegerlo del desgaste producido por la gran cantidad de polvo que genera el sistema. Este recubrimiento evita también el desgaste prematuro de la correa y hace uso eficiente de la potencia ahorrando energía. También aumenta el coeficiente de rozamiento haciendo más difícil un eventual deslizamiento. El diámetro del mismo se calcula en función de la descarga y la velocidad para lograr una operación eficiente. <sup>[9]</sup>



*Imagen 3: Catarina de accionamiento de un elevador por cangilones*

<http://www.forjasbolivar.com/productos/partes-y-accesorios-para-sistemas-de-transporte/11/75/6/>

#### 4.2.3 Freno:

Es un sistema ligado al eje del tambor de accionamiento. Permite el libre movimiento en el sentido de elevación. Cuando por cualquier motivo el elevador se detiene con los cangilones cargados, este sistema impide el retroceso de la correa, evitando así que el material contenido en los mismos sea descargado en el fondo del elevador. Los dispositivos más usados son: el de malacate o el de cinta. <sup>[8]</sup>

#### 4.2.4 Órgano de tracción:

El órgano de tracción puede ser banda o cadena en dependencias de la capacidad, altura del elevador y naturaleza del material transportado. Una banda sostiene los cangilones con menor rigidez y soporta por lo tanto menos esfuerzos que las cadenas. Sin embargo la banda se comporta muy bien para altas velocidades y se desgasta menor que las cadenas cuando se manipulan materiales abrasivos.<sup>[9]</sup>

Las bandas se utilizan para elevadores de alta velocidad y de baja y media capacidad (hasta 80 metros cúbicos/h). Las velocidades de la banda están en un rango de 0.8 a 2.5 m/s.

Las cadenas se emplean preferentemente en elevadores de alta capacidad (hasta 160 metros cúbicos/h), donde se manipulan materiales muy pesados y que se elevan a gran altura. También suelen emplearse para manipular materiales muy calientes u otros materiales que afecten la banda al entrar en contacto con ella. Las velocidades de las cadenas oscilan entre 0.4 y 1.25 m/s.



Imagen 4: Cadena (órgano de tracción de un Elevador por cangilones).

<http://www.forjasbolivar.com/productos/elevadores-de-cangilones/elevador-de-cangilones-11/68/359/7/>



Imagen 5: Cadena (órgano de tracción de un Elevador por cangilones).

<http://www.forjasbolivar.com/productos/elevadores-de-cangilones/elevador-de-cangilones-11/68/359/7/>

Los Transportadores de cangilones reciben una clasificación principal que se define por el órgano de tracción que tengan, pueden ser de banda, donde los cangilones van atornillados a una banda flexible, estos son más livianos y si las temperaturas de operación y las cargas no son muy altas un sistema que utilice una banda como un órgano de tracción es la mejor elección, además de que ofrece mayores velocidades de transporte. <sup>[8]</sup>



Imagen 6: Elevador de cangilones con banda como órgano de tracción

<http://www.forjasbolivar.com/productos/elevadores-de-cangilones/11/68/6/>

Los transportadores de cangilones que usan cadena como órgano de tracción son más robustos y pesados, por ende más lentos, sin embargo pueden transportar cargas muy elevadas, en ambientes agresivos y a altas temperaturas, muy utilizados en la industria cementera y como veremos más adelante este tipo de transportador es del que se trata la investigación.



*Imagen 7: Elevador de cangilones con cadenas como órgano de tracción*

<http://www.forjasbolivar.com/productos/elevadores-de-cangilones/elevadores-de-cangilones-con-cadena-ovalada/11/68/190/7/>

#### 4.2.5 **Dispositivo de Estiramiento:**

Como su nombre lo indica este dispositivo permite el tensado de la banda o cadena para lograr un perfecto funcionamiento del sistema. Este dispositivo puede ser de dos tipos: a tornillo (el más usual) o automático (para elevadores de grandes capacidades).

#### 4.2.6 Cangilones:

Dentro del sistema de elevación son los elementos que alojan a la carga en su carrera ascendente. Según su construcción, pueden ser metálicos de chapa soldada o estampados, de material plástico, de fibra, de acero inoxidable o de fundición. Existen infinidad de formatos y dimensiones, cada fabricante de elevadores normalmente cuenta con un diseño particular. Existen también grandes fábricas de cangilones de diferentes materiales y con diseño estandarizado.<sup>[9]</sup>



Imagen 8: Cangilones

[http://www.aplicasa.es/producto\\_303\\_bandas-de-caucho-fabricacion-especial.html](http://www.aplicasa.es/producto_303_bandas-de-caucho-fabricacion-especial.html)

Las medidas básicas con las cuales se define un cangilón, son tres: Largo, profundidad y proyección (ver imagen 25). En el proceso de selección de los mismos, se aconseja seguir las indicaciones del fabricante respecto a la velocidad de la correa y al diseño del capot o sombrero del elevador, fundamentalmente en los elevadores centrífugos donde el "momento" de descarga del cangilón es factor determinante de la eficiencia del sistema y está íntimamente ligado a la velocidad de la correa/cadena.

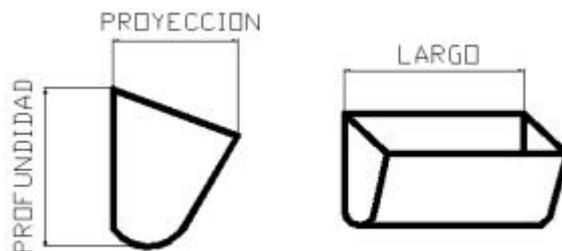


Imagen 9: Dimensiones de los cangilones

<http://dim.usal.es/areaim/guia%20P.%20I/PAGINA%20CANGILONES.HTM>

#### 4.2.7 Tambor de reenvío

Se localiza en la parte inferior del elevador. Sobre el eje del mismo se encuentra montado normalmente el dispositivo de estiramiento. Su construcción se recomienda que sea aleteada o tipo "jaula de ardilla" para evitar que el material derramado se introduzca entre el tambor y la correa provocando daños a la misma. Su diámetro es generalmente igual al tambor de accionamiento o menor que el mismo.<sup>[9]</sup>

#### 4.2.8 Estructura:

Es la encargada de encerrar y sostener todo conjunto. Generalmente está hecha de planchas de acero de 2 a 4 mm terminando su borde en angulares para poder unir sus diferentes partes entre sí. Las sesiones se hacen de 2 a 2.5 m.

Esta a su vez se puede definir como 3 secciones principales.

##### 4.2.8.1 Cabeza del Elevador:

También localizada en la parte superior del elevador y es una estructura metálica que contiene al tambor de accionamiento, formando parte de la misma la unidad de accionamiento, el freno y la boca de descarga. El capot de la cabeza o sombrero debe tener el perfil adecuado para adaptarse lo más posible a la trayectoria del material elevado en el momento de producirse la descarga. Esta trayectoria depende de varios factores como ser el tipo de cangilón, la velocidad de la correa y el diámetro del tambor de accionamiento.<sup>[9]</sup>



Imagen 10: Cabeza del elevador

[http://www.fabrimac.com.ar/elevadores\\_a\\_cangilones](http://www.fabrimac.com.ar/elevadores_a_cangilones)

#### 4.2.8.2 *Ramal de Subida y bajada:*

Junto con el ramal de bajada une la cabeza con el pie del elevador. Normalmente fabricado en chapa plegada y soldada de construcción modular. Cada cuerpo se une al siguiente con bulones.

Su largo depende de la altura del elevador. Sus dimensiones deben ser tales que permitan el paso de la correa y los cangilones con holgura. Este ramal (también denominado "pantalón") contiene a la banda o cadena y cangilones cargados en su movimiento ascendente y descendente. Sobre el mismo normalmente se encuentra ubicada la puerta de inspección.<sup>[9]</sup>



Imagen 11: Ramales de subida y bajada

[http://www.fabrimac.com.ar/elevadores\\_a\\_cangilones](http://www.fabrimac.com.ar/elevadores_a_cangilones)

#### 4.2.8.3 *Pie del Elevador:*

Se encuentra ubicado en la parte inferior del elevador y contiene al tambor de reenvío. Son partes integrantes del mismo la tolva de alimentación y el dispositivo de estiramiento. Esta parte de la estructura se encuentra regularmente provista de puertas de inspección y de limpieza.<sup>[9]</sup>



Imagen 12: Pie del elevador

[http://www.fabrimac.com.ar/elevadores\\_a\\_cangilones](http://www.fabrimac.com.ar/elevadores_a_cangilones)

#### 4.2.9 **Rieles:**

No todos los elevadores por cangilones usan rieles, pero son necesarios cuando la carga a transportar es muy elevada. Así, además del órgano de tracción los cangilones van apoyados sobre rieles que guían y sostienen su trayecto, este tipo de transportadores suelen ser en ángulo inclinado, alrededor de 40°.

Los rieles usualmente son fabricados de aceros de alto carbono con tratamientos térmicos de fortalecimiento para afrontar las duras condiciones de operación.

Así mismo existen distintos tipos de Transportadores de Cangilones según la forma en que son cargados y también de que manera en que descargan su contenido.

Cuando el material que se va a cargar es polvo o de granos finos (que no ofrece mucha resistencia a la extracción o a ser dragado) puede extraerse del fondo del elevador como se observa en la imagen (a), si el material se compone de partes más grandes o abrasivos entonces se vierte la carga directamente dentro del cangilón (b).<sup>[9]</sup>

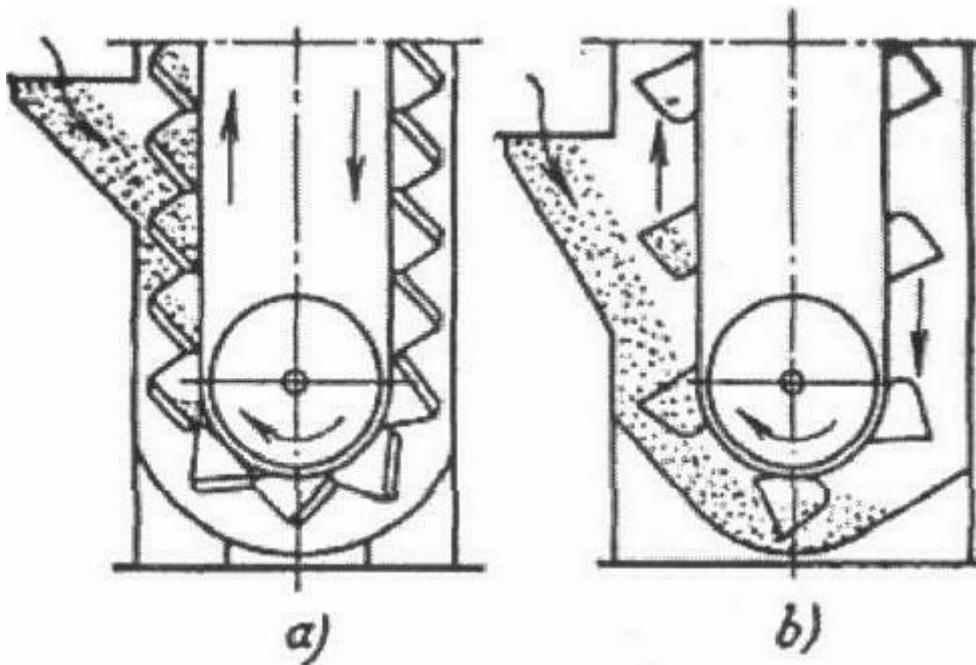


Imagen 13: Tipos de carga de los cangilones

<http://datateca.unad.edu.co/contenidos/211618/EXELARNING/image075.png>

Dependiendo de la forma en que se realice la descarga del material, podemos describir tres tipos principales en que los transportadores por cangilones vierten su contenido.

1) “Cangilones montados sobre banda o cadena con descarga centrífuga: En este tipo de elevadores la descarga de los cangilones cuyo órgano de tracción se mueve a grandes velocidades el derramado o lanzado de la carga se efectúa en el punto superior del elevador bajo la acción de la fuerza centrífuga, como se muestra en la primera imagen.

Este tipo de elevadores se utiliza generalmente para manipular materiales de grano fino que no requiere un especial cuidado y se salen fácilmente de los cangilones. Los

cangilones están montados sobre o dobles de cadena o sobre banda de goma, distanciados entre sí a intervalos regulares. <sup>[9]</sup>”

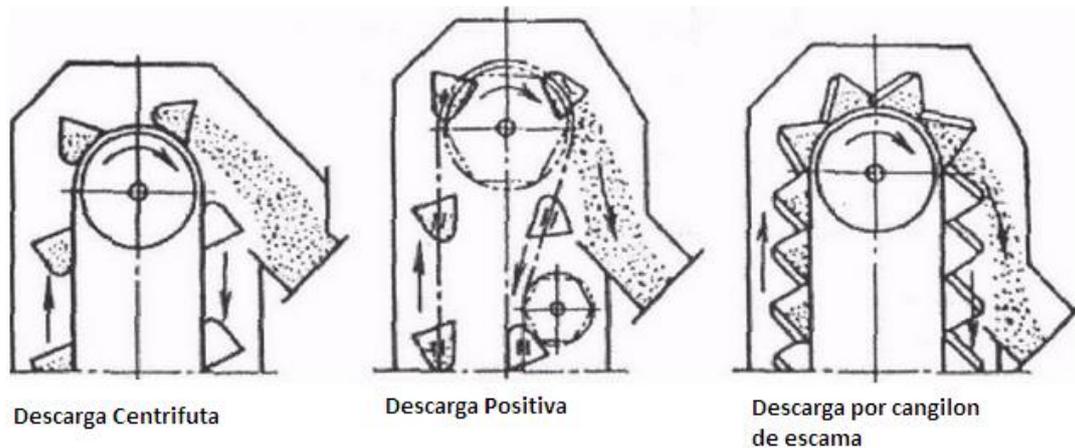


Imagen 14: Tipos de descarga del producto en los elevadores por cangilones

[http://datateca.unad.edu.co/contenidos/211618/EXELARNING/leccin\\_14\\_elevadores\\_de\\_cangilones.html](http://datateca.unad.edu.co/contenidos/211618/EXELARNING/leccin_14_elevadores_de_cangilones.html)

2) “Cangilones montados sobre cadena o descarga positiva: A menores velocidades, cuando el lanzamiento de la carga no tiene lugar la descarga de los materiales se efectúa, derramando el material al recorrer éstos el piñón de la cadena superior. En este caso es necesario desviar el ramal libre del elevador, para que sea posible ubicar un recipiente receptor bajo la carga desprendida debajo la descarga del elevador inclinado.

Debido a la reducida velocidad de la cadena, la descarga se realiza vaciándose los cangilones por gravedad a su paso sobre las ruedas motrices, facilitada por la inversión forzada que provocan las ruedas ceñidoras.

Estos elevadores son apropiados para manipular materiales pulverulentos, ligeros y frágiles o para aquellos otros de naturaleza pegajosa que fluyen con dificultad. <sup>[9]</sup>”

3) “Cangilones de escama montados sobre banda o cadena: Si es necesario efectuar la descarga derramando el material desde el elevador vertical sin inclinar los cangilones, se pueden emplear cangilones de escama cuya pared anterior sirve de canalón para la carga que se derrama desde el siguiente cangilón. Este tipo de descarga se aplica en los elevadores de marcha lenta, a una velocidad de movimiento menor o igual a 0,8 m/s. <sup>[8]</sup>”

[http://datateca.unad.edu.co/contenidos/211618/EXELARNING/leccin\\_14\\_elevadores\\_de\\_cangilones.html](http://datateca.unad.edu.co/contenidos/211618/EXELARNING/leccin_14_elevadores_de_cangilones.html)

### 4.3 Principales modos de falla en transportadores por cangilones.

Por ser un equipo de transporte de carga que en un ciclo completo esta la mitad del ciclo cargado al máximo y la segunda mitad descargado es especialmente sensible a las fallas por fatiga, además de las exigencias propias que implica el transporte de carga. Estos ciclos de carga afectan a ciertos componentes del sistema con mayor frecuencia a continuación se presentan los modos de falla en los elementos más comunes.

- ✓ Fallas en el órgano de tracción, (banda o eslabones de la cadena) distensión por fluencia, desgaste o rotura.
- ✓ Fallas en los cubos, en los apoyos en las ruedas y las juntas con el órgano de tracción (ver imagen 31).



Imagen 15: Cangilones con señales de falla en el fondo de los cubos

- ✓ Desgaste en la superficie de rodadura de los sprockets (ver imágenes 32, 33 y 34).



*Imagen 16: Sprocket con falla por fluencia en superficie de contacto*



*Imagen 17: Sprocket con falla por fluencia en superficie de contacto*



*Imagen 18: Detalle de la fluencia en la superficie de contacto del Sprocket.*

- ✓ Desgaste en la superficie de rodadura de los rieles producto de los ciclos de carga (ver imagen 35).



*Imagen 19: Riel desgastado producto de los ciclos de carga.*

#### 4.4 Problema latente en el sistema.

#### 4.5 Fatiga Mecánica.

“Cuando un material está sometido a cargas cíclicas aun cuando estas se encuentren por debajo de los valores de resistencia máxima necesaria para la falla del material empieza a desarrollarse un comportamiento característico degenerativo del material que empieza a comprometer la integridad de mismo hasta que ocurre la catastrófica ruptura sin que se alcancen nunca esfuerzos que excedan su resistencia última.

*“La fuente principal de Fatiga son las heterogeneidades de los materiales. Todos los materiales, aún los cristales más perfectos, están llenos de imperfecciones de muchos tipos, de modo tal que ningún material puede ser considerado perfectamente homogéneo. Bajo cargas repetidas el efecto de las heterogeneidades se ve enfatizado.”*

Este proceso empieza a manifestarse en esas pequeñas grietas o imperfecciones del material que actúan como propagadores del fenómeno, en este punto empiezan a crecer esas grietas o defectos, lo cual, si bien no reduce la resistencia mecánica del material si compromete el área resistente disponible hasta el punto en que ya dicha pieza no es capaz de soportar los esfuerzos que en principio eran insuficientes para provocar la falla. <sup>[10]”</sup>

##### 4.5.1 Manifestación y Proceso de Falla:

“Un material sometido a tensiones repetidas o fluctuantes fallará a una tensión mucho más baja que la necesaria para producir la fractura bajo carga constante. Es decir: la aplicación repetida de una tensión ocasiona el deterioro progresivo de un material, siendo que la misma tensión aplicada estáticamente no tiene ningún efecto permanente. Este deterioro se manifiesta a través de la formación de fisuras en el material, que eventualmente pueden llevar a la rotura.

Cabe recalcar que la fatiga ocurre bajo toda clase de cargas y a tensiones tanto altas como bajas; pero este fenómeno solo afecta a las piezas cuando están sometidas a sollicitaciones repetidas de una cierta amplitud.

Describiremos el proceso que ocurre en los metales al estar sometidos a fatiga simple (la forma más sencilla de fatiga), que tiene lugar bajo tensiones de tracción y compresión alternadas (siempre dentro del rango elástico) sobre miembros libres de discontinuidades. Su progreso puede explicarse de la siguiente manera: a los pocos ciclos de acción de la carga repetida comienzan a producirse cambios aislados en la estructura atómica en puntos dispersos del material; estos rápidamente comienzan a desarrollar fisuras submicroscópicas que crecen a medida que los ciclos continúan, hasta tener proporciones microscópicas y eventualmente llegan a ser visibles;

finalmente, cuando la fisura llega a un tamaño tal que debilita la pieza, se produce su rotura. <sup>[10]</sup>

Si bien no existe un cambio notable en la estructura del metal que falló por fatiga, en general, se puede dividir el proceso de evolución de la falla en tres etapas denominadas: nucleación (a), propagación o crecimiento de la fisura (b y c) y rotura (d). (Ver Imagen 36)

**Nucleación (a):** se produce en los metales cuando el nivel de tensión aplicada es menor que el límite elástico estático. Aparece una deformación masiva generalizada, hasta que el metal endurece lo suficiente como para resistir la tensión aplicada (Acritud Total) en un punto determinado denominado Punto de Iniciación, que suele estar situado en zonas de concentración de tensiones como ser entallas, cantos vivos, rayas superficiales o bien en inclusiones y poros.

**Propagación (b y c):** abarca la mayor parte de la duración del proceso fatiga y se extiende desde el momento en que se produjo el endurecimiento por deformación generalizada (acritud total) hasta la formación de una grieta visible.

**Rotura (d):** es la propagación de la grieta hasta que es lo suficientemente grande como para producir la rotura. <sup>[10]</sup>

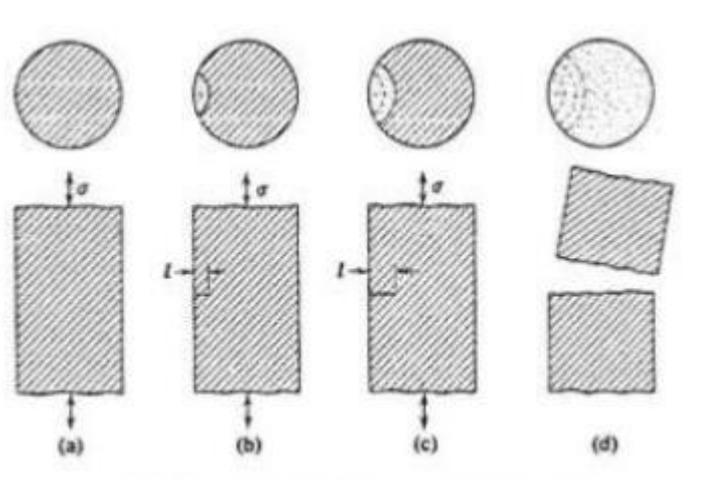


Imagen 20: Evolución de la falla por fatiga

<http://www.itescam.edu.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r43463.PDF>

**La superficie de la fractura tiene dos zonas características:**

**Zona Lisa:** aparece debido al roce por la propagación de la grieta a través de la sección. Esta propagación se indica con una serie de marcas anulares (llamadas líneas de parada o de reposo, similares a las marcas que dejan las olas sobre la playa), que se generan a partir del Punto de Nucleación (punto de concentración de tensiones).<sup>[10]</sup> A su vez, podemos distinguir:

- **-Marcas de Playa:** se forman en el frente de la fisura al producirse un reposo en el funcionamiento de la pieza. Consecuentemente no aparecerán en el caso de probetas, que generalmente se ensayan sin interrupción.
- **-Líneas Radiales:** a veces las fisuras que se generan en la superficie (que es el lugar más frecuente) progresan según frentes a niveles levemente escalonados; en un dado momento de su desarrollo, sin embargo, coalescen quedando estas líneas radiales como huellas de las diferencias de nivel iniciales.

**Zona Rugosa:** Aparece al romper la pieza por disminución de la sección efectiva sana ante el mismo valor de carga actuante. La rotura final, contrariamente a la zona con marcas de playa que es lisa y suave, presenta una superficie fibrosa y de relieve muy accidentado. Se trata de la zona remanente sana, demasiado pequeña para aguantar un ciclo más de sollicitación, que termina rompiéndose frágilmente.<sup>[10]</sup>

<http://www.itescam.edu.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r43463.PDF>

#### 4.5.2 Análisis del origen de las Fallas por Fatiga.

##### 1) Cómo se origina la fisura, Nucleación:

“Las fisuras se originan debido al endurecimiento producido en las regiones donde ha habido fluencia. Sabemos que en metales policristalinos sometidos a tensión simple, algunos cristales siempre estarán orientados de tal forma que deslizarán fácilmente (ver imagen 37). La nucleación se produce a partir esta fluencia altamente localizada.<sup>[10]</sup>”

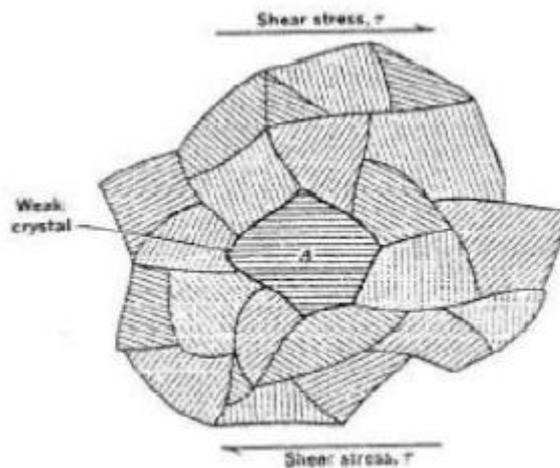


Imagen 21: Ilustración de cristales débiles dentro de la estructura cristalina.

<http://www.itescam.edu.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r43463.PDF>

A medida que la tensión (o carga) aumenta, estos cristales "débiles" fluirán primero, pero como están rodeados por material elástico, no afectan apreciablemente el diagrama de tensión-deformación estático. No obstante ha habido fluencia, y a una tensión nominal que generalmente no sobrepasa el límite elástico. Si el material se carga solo una vez, este efecto es completamente insignificante. Pero si la carga se repite, cada repetición produce una fluencia localizada adicional que eventualmente resulta en la formación de fisuras de fatiga en las regiones en fluencia.

El proceso es el siguiente: un cristal débil está rodeado enteramente por cristales más fuertes que se orientan de forma tal que permanecen completamente elásticos a la tensión más alta que ocurre durante el proceso de carga. A medida que la tensión sube a su máximo durante el primer cuarto de ciclo, el cristal débil (A) fluye una cantidad pequeña. Durante la fluencia, la tensión en (A) aumenta mucho más lentamente que la tensión total (Ver imagen 38). El cristal A se comporta más o menos como un cristal único, y sus propiedades son por lo tanto bastantes diferentes de las del conjunto.<sup>[10]</sup>

En el próximo medio ciclo la tensión disminuye a cero y se invierte, subiendo al máximo en la dirección opuesta. Durante esta inversión la deformación en el cristal débil, A, se determina casi enteramente por la rigidez del material elástico circundante, comparada con la cual el cristal A es muy pequeño. La deformación negativa que acompaña la tensión negativa máxima es igual que la deformación positiva que acompañó la tensión positiva máxima. El primer efecto de la descarga es simplemente permitir que los átomos en todos los cristales regresen elásticamente a sus posiciones de equilibrio. Sin embargo, el cristal A alcanza su configuración de equilibrio primero, antes que la deformación de la totalidad haya llegado a cero. A medida que la deformación continúa disminuyendo, el cristal A comienza a deformarse en la dirección opuesta.

Este proceso se repite con cada subsiguiente medio ciclo de deformación. Cada vez que la tensión se invierte, el cristal A fluye un poco más, y cada vez que fluye, se endurece por deformación un poco más. Recordemos que el endurecimiento por deformación (strainhardening) es aditivo porque sólo involucra la interacción de dislocaciones durante el proceso, que casi no son afectadas por la dirección. <sup>[10]</sup>

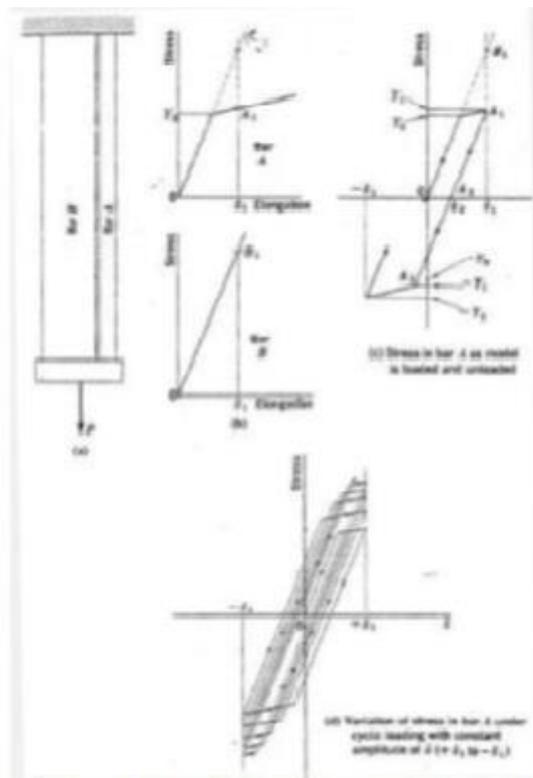


Imagen 22: Modelo mecánico, que ilustra el progresivo endurecimiento por deformación de un cristal débil.

<http://www.itescam.edu.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r43463.PDF>

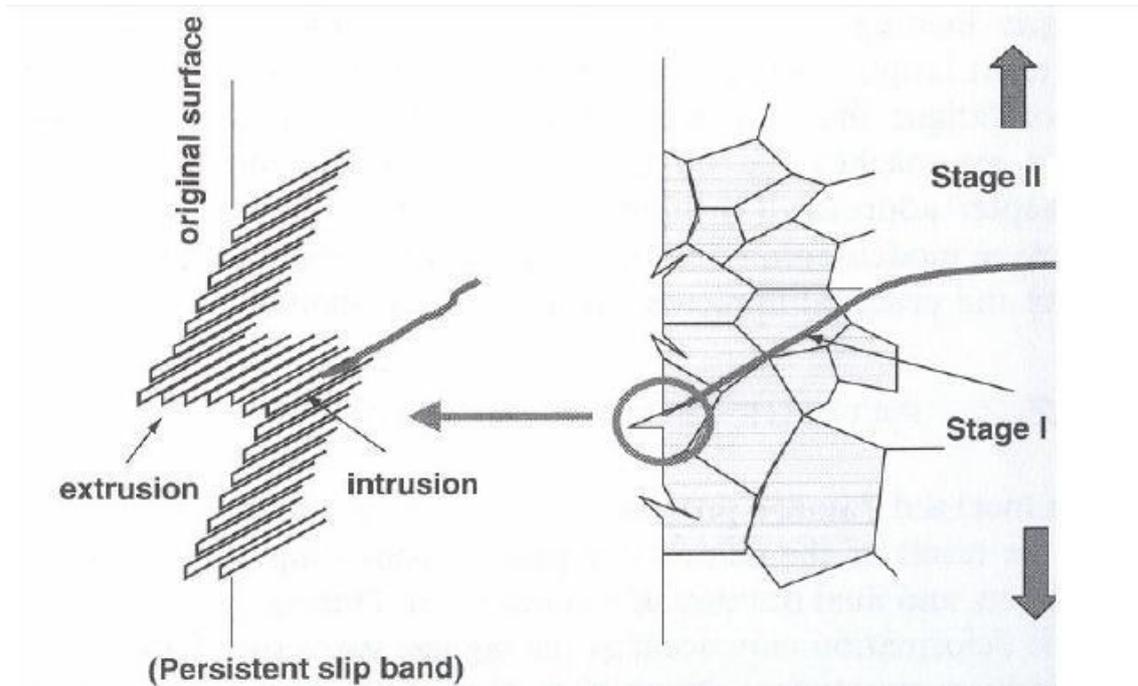


Imagen 23: Ilustración de cómo la grieta crece en la dirección de los planos de deslizamiento.

Intrusiones y Extrusiones provocadas por el deslizamiento de las bandas.

<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4089/fichero/4.pdf>

“Esto explica aproximadamente lo que sucede durante las primeras etapas de fatiga en metales: la aplicación repetida de una tensión pequeña puede ocasionar el deterioro progresivo de un material aun cuando la misma tensión aplicada estáticamente no tiene ningún efecto permanente perceptible.”<sup>[11]</sup>

En resumen, el primer efecto de la fatiga en metales es la formación de bandas de deslizamiento altamente localizado en cristales individuales durante los primeros pocos ciclos. A medida que continúan los ciclos, se forman nuevas bandas de deslizamiento, por lo que la deformación permanece altamente localizada. Como los grupos de las bandas de deslizamiento crecen formando estrías, el material entre ellas pasa a ser progresivamente más duro a causa de la acumulación de endurecimiento por deformación. En algún punto del proceso el material en las estrías llega a ser tan duro que se fisura (en escala submicroscópica). El momento exacto cuando esto sucede es aún desconocido pues la primera evidencia real de la grieta es la aparición de fisuras microscópicas. Sin embargo, se sabe que sucede dentro de los primeros ciclos de carga. Las fisuras submicroscópicas comienzan a formarse en las mismas direcciones que las bandas de deslizamiento. Las grietas individuales crecen, y los grupos de fisuras se unen hasta que el total alcanza un tamaño microscópico.”<sup>[11]</sup>

Probablemente los cristales adyacentes a la superficie están menos restringidos que los cristales circundantes, y por eso los cristales "más débiles" suelen encontrarse próximos a la superficie. Aquí, la fluencia inicial es ocasionada no por un cristal desfavorablemente orientado sino por un aumento local en la tensión provocado por una concentración de tensiones. La nucleación sigue siendo altamente localizada. Los puntos débiles ahora son las pequeñas regiones afectadas por la concentración de tensiones.

En otro tipo de materiales (metales unicristalinos y sólidos amorfos), los cristales débiles desfavorablemente orientados son reemplazados por otras heterogeneidades que actúan como puntos débiles. Una vez que las fisuras de fatiga comienzan, la propagación y la fractura son igual que antes.<sup>[11]</sup>

Pese a estas pequeñas discrepancias, podemos considerar que en la nucleación todas las formas de fatiga son básicamente similares; solo en etapas posteriores aparecen diferencias."

## 2) Crecimiento de la fisura, Propagación:

"Ahora analizaremos como progresan las fisuras en fatiga simple. Algunos materiales más resistentes y de mayor dureza se caracterizan por propagar las fisuras más rápido y fácilmente que otros materiales. Este factor da un indicio de la superioridad de un material sobre otro en la fatiga. Otros materiales menos resistentes pero más "tenaces" originan fisuras que se propagan lo suficientemente lento, que frecuentemente pueden ser detectadas a tiempo y remediadas antes que lleguen a ser suficientemente grandes como para ocasionar fallas.<sup>[2]</sup>

Las primeras fisuras microscópicas aparecen en las bandas de deslizamiento, en cristales desfavorablemente orientados cuya orientación es tal que las bandas de deslizamiento coinciden con los planos de corte máximos. Las fisuras microscópicas crecen en estos planos que incluyen todos los planos a 45° al eje de la pieza. Las fisuras comúnmente se originan en más de uno de estos planos. La intersección y unión de varias de estas fisuras produce una fisura en zigzag, cuya dirección es a ángulos rectos al eje de la pieza. A medida que cada fisura crece es precedida por un proceso de nucleación parecido al que la originó. El deslizamiento localizado tiene lugar a causa de la concentración de tensiones en el borde de la fisura, y las fisuras submicroscópicas se desarrollan en las bandas de deslizamiento, ocasionando una extensión gradual de la fisura. Cuando el área de la sección transversal remanente llega a ser lo suficientemente pequeña, ocurre la fractura final. La falla resulta así de naturaleza frágil.<sup>[11]</sup>

La propagación de la fisura engendrada por la fatiga involucra muchos factores. A veces la grieta comienza, pero no se propaga. Un factor importante es el gradiente de tensiones: las fisuras se nuclean en zonas de alta tensión, pero si crecen en la dirección de las tensiones decrecientes, la propagación tenderá a hacerse más lenta y aún parar. (Además bajo flexión alternada por ejemplo, la vida es mayor que en tracción o compresión simple pulsátil). La velocidad de la grieta depende también del material y de las condiciones ambientales. <sup>[10]</sup>

Si analizamos de sollicitaciones a diferentes niveles de tensión resulta lógico, por ejemplo, que una fisura producida a alta tensión no se propague si a la misma le sigue otra de nivel significativamente inferior. En cambio, una tensión de bajo nivel puede propagarse muy rápidamente bajo una siguiente mayor. A todo esto debe agregarse el endurecimiento por deformación (consolidación) que se produce en forma diferente bajo diferentes niveles, y que puede modificar sustancialmente los resultados. <sup>[2]</sup>

Si las piezas están sometidas a tensiones máximas altas, puede tener lugar la fluencia completa de la pieza. Aquí el endurecimiento por deformación es general en vez de localizado. Aun así, heterogeneidad natural del material, más cualquier concentrador de tensiones que pueda estar presente, produce diferencias localizadas en el endurecimiento por deformación. El resultado final es casi igual que a tensiones bajas: las fisuras se nuclean en puntos aislados y se propagan a través de la pieza. Al estar involucrada la fluencia generalizada, el mecanismo no es tan altamente localizado como en la fatiga simple. Además, la repetición de deformación plástica en la pieza ocasiona que grandes cantidades de energía sean disipadas en forma del calor y se pueden producir efectos térmicos. Estos efectos son especialmente importantes en plásticos y goma. La fractura final es similar a la fractura bajo tensiones estáticas, aunque quedan evidencias de la reducción de ductilidad. <sup>[1]”</sup>

#### 4.5.3 Cargas que originan fatiga mecánica.

“El tipo más simple: de carga repetida es una tensión alternada (las tensiones de flexión en un eje rotativo varían de esta manera). La amplitud de tensión es igual a la tensión máxima, y la tensión media o promedio es cero.

Una pieza que es deformada alternativamente sobre cada lado de su configuración de equilibrio, está también sujeta a tensión simple alternada. Si la pieza lleva además una carga constante (como el peso de una máquina), la tensión alternada se superpone a una tensión constante que resulta de la carga constante. La tensión media no es más cero, es igual al valor de la tensión constante; la tensión máxima es igual al valor de la suma de la tensión media y la amplitud de tensión. <sup>[10]</sup>

Las variaciones sinusoidales simples de tensión como las descritas arriba ocurren en muchas partes de máquinas rotativas. Sin embargo, hay numerosos otros ejemplos de cargas de fatiga en que la variación está lejos de ser regular, como por ejemplo en una aeronave, donde la variación de tensión durante el vuelo es aleatoria. Cuando la variación de tensión es irregular, el espectro real de carga es de poco uso en el diseño para la fatiga y debe reducirse a una forma más simple. El procedimiento usual es separar el espectro de carga en varios grupos de oscilaciones simples, y cada grupo que representa el número de oscilaciones reales debe ser de aproximadamente la misma amplitud y tensión media. La imagen 39 es un espectro real de carga de una aeronave registrado por un acelerómetro y una versión simplificada consiste de varios grupos de oscilaciones sinusoidales. <sup>[10]</sup>

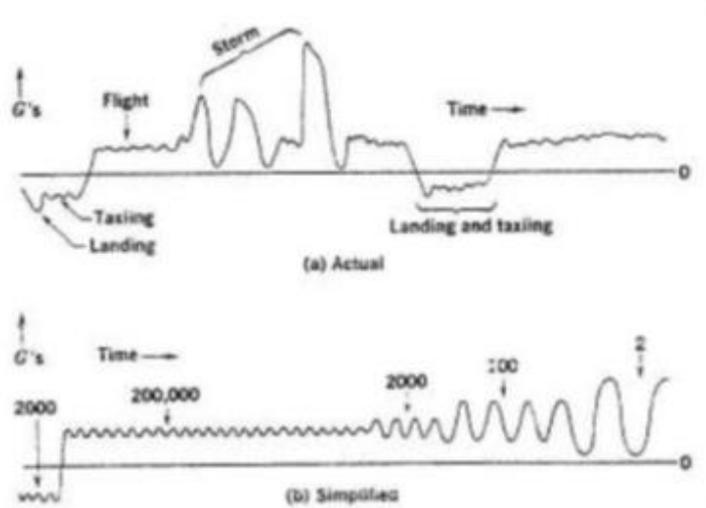


Imagen 24: espectro de carga de una aeronave (a) Real, (b) simplificado.

<http://www.itescam.edu.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r43463.PDF>

“El espectro simplificado se asume equivalente al espectro real, y se usa en el análisis. De esta manera cualquier forma de carga de fatiga puede ser representada por variaciones simples sinusoidales. <sup>[10]</sup>”

#### 4.5.4 Naturaleza probabilística de la fatiga mecánica.

“Como resultado de investigaciones empíricas se observó que piezas de igual dimensión, material, tratamiento y trabajando bajo las mismas condiciones de carga fallan por fatiga a distintos valores de tensión.

Esto indica una dispersión en los valores de Límite de Fatiga de una pieza que hace imposible el uso de un valor para diseño, más allá del coeficiente de seguridad usado. La solución es aplicar métodos estadísticos a los resultados de los ensayos para obtener valores coherentes y reales, y así obtener la probabilidad de falla por fatiga (P). Se ha enfatizado la naturaleza localizada de los mecanismos de fatiga. Las fisuras de fatiga comienzan en unos puntos débiles, y el proceso entero se restringe a la vecindad de estos puntos. <sup>[1]</sup>

El material a una distancia corta de las fisuras permanece totalmente elástico. Hay una gran similitud entre la fatiga y la fractura de materiales frágiles. Recordemos que la resistencia a la fractura de los materiales frágiles depende de una distribución aleatoria de imperfecciones o puntos débiles; y la fractura ocurre cuando la tensión en uno o más de estos puntos alcanza la resistencia de cohesión (una condición altamente localizada). También en la fatiga la fractura depende de una distribución aleatoria de puntos débiles. Además, la cadena entera de sucesos que preceden a la fractura de fatiga depende de una serie de procesos aleatorios y varía ampliamente de un miembro a otro.

Ningún material tiene un único valor de vida en fatiga para una tensión determinada, aún bajo las más cuidadosamente controladas condiciones. En fatiga (como en la fractura frágil), la variabilidad o distribución de valores observados es muy grande. Por lo tanto la vida en fatiga de un material puede solo ser tratada como una distribución de valores para especímenes individuales.

Entonces, no hay una vida definida en fatiga, solo una distribución. Para poder diseñar necesitamos tener valores para las propiedades que podamos manejar, aplicando un factor apropiado de seguridad. Pero para la fatiga tendremos que trabajar con distribuciones de muchos valores, mediante el uso de métodos estadísticos. El factor de seguridad frecuentemente ha sido llamado un "factor de ignorancia", pues comúnmente ignoramos la posible variación de las propiedades de los materiales y sus distribuciones.

Si contamos con información confiable sobre las distribuciones de propiedades podemos desechar este factor de ignorancia y en su lugar podemos diseñar para un porcentaje bajo de fallas, o dicho de otra manera, un porcentaje alto de supervivencia. Por ejemplo, si sabemos que el 99 % de todos los especímenes de una aleación de aluminio se espera que resistan una tensión de 60,000 psi sin falla, podríamos usar esta tensión como punto de partida. El factor de seguridad necesitaría entonces compensar solo posibles variaciones en las condiciones de uso, tal como métodos de fabricación y magnitud de cargas aplicadas. Cuando hablamos de la distribución de vidas en fatiga para un material nos referimos a las vidas en fatiga de todos los

especímenes posibles que pueden hacerse de este material (población). Una estimación de la distribución y sus características pueden hacerse con muestreos de la población. <sup>[10]</sup>

Un muestreo consiste de un número de especímenes hechos de un material determinado según algún plano específico.

Cuanto más grande sea el muestreo, más estrechamente su distribución se aproxima a la de la población. Mediante el uso de métodos estadísticos podemos estudiar las características de distribuciones en muestreos e inferir de ellos las características de la distribución en la población.

Las propiedades de un muestreo son medidas por estadísticas; las propiedades de la población se llaman parámetros. Los parámetros no son ordinariamente medibles, pero son estimados por estadísticas. <sup>[10]</sup>”

#### 4.5.5 Factores que afectan la fatiga mecánica.

“Diversos factores afectan el valor de la resistencia a la fatiga de un elemento mecánico, como ser: el tipo de material, su grado de aleación, método de fabricación, condiciones y atmósfera de trabajo, presencia de entallas, etc.

Todos estos factores son tenidos en cuenta con coeficientes de corrección que se aplican al valor de resistencia a la fatiga obtenido para la pieza ensayada en condiciones de laboratorio. <sup>[10]</sup>

##### Algunos de estos factores son:

- Factor de carga: considera si la carga es axial, corte, torsión o combinación.
- Concentración de tensión o presencia de entallas: se usa ante la presencia de entallas, agujeros o grietas en el material.
- Factor de tamaño: influye la forma y tamaño de la pieza.
- Factor de temperatura: dado que la temperatura de operación puede generar problemas de fragilización del material o por el contrario, las altas temperaturas afectan cuando la tensión se aproxima a la de fluencia.
- Factor de superficie: debido a que la pieza no tiene el grado de pulido y acabado de la pieza de laboratorio.

#### 4.5.6 Remedio y prevención de fallas; mantenimiento; normas de diseño y especificaciones.

“Ya hemos visto que la fisuración es la manifestación de la falla por fatiga. El remedio a la fisuración consiste en remover el material adyacente a la fisura sin dejar concentración de tensiones, y proceder eventualmente a rellenarlo con material de aporte. Este procedimiento, si bien utilizado frecuentemente, es raramente válido. Antes de utilizarlo debe tenerse en cuenta las siguientes observaciones:

- Cuando aparece la fisura la pieza ya está dañada por fatiga. En efecto, la fisura no es en estos casos una causa, sino un efecto. Si se elimina la fisura, la fatiga no desaparece de las zonas adyacentes que pueden estar afectadas.
- La limpieza de la fisura debe consistir en quitar suficiente material como para eliminar una posterior propagación por un fondo de grieta no eliminado.
- El relleno de la cavidad con soldadura por ejemplo, puede llevar a más fisuración si no se observan cuidadosamente las reglas, especialmente con relación a la eliminación de tensiones residuales.
- En todos los casos, la pieza reparada debe ser objeto de controles periódicos, especialmente frecuentes en los primeros momentos.

El mantenimiento preventivo es una de las medidas más efectivas para evitar los desastres que pueden acarrear las roturas por fatiga. Consiste en la aplicación de métodos no destructivos como los ya mencionados en la vigilancia de los elementos, en especial en sus zonas críticas tendientes a la detección temprana de fisuras: es decir antes que tienda a alcanzar su longitud crítica. <sup>[10]</sup>

La programación de este mantenimiento deberá efectuarse teniendo en cuenta el mecanismo de crecimiento de fisuras, que depende del número de ciclos aplicados.

En cuanto al diseño, podemos mencionar las siguientes consideraciones:

- Evitar marcas de herramientas en las zonas críticas
- Evitar los bordes agudos
- Dentro de lo posible, efectuar ensayos a escala y en condiciones tan reales como sea posible.”

## 4.6 Método de los Elementos Finitos:

El método de los elementos finitos constituye un método numérico que trata de resolver sistemas de ecuaciones diferenciales que describen un fenómeno o escenario científico.

Es de gran utilidad ya que permite resolver casos que por medios matemáticos tradicionales resultaba prácticamente imposible, esto significa que los fabricantes e investigadores estaban obligados a fabricar prototipos y hacerles sucesivas pruebas en dependencia de los resultados obtenidos del ensayo anterior para así implementar las modificaciones necesarias, un proceso largo y costoso.

El método de los elementos finitos (FEM por sus siglas en inglés) permite modelar matemáticamente el escenario o problema a tratar de modo que podamos calcular las variables del sistema real, de forma más fácil, rápida y económica. Sin embargo es importante tener en cuenta que el FEM es un método que discretiza funciones que en la realidad son continuas, por tanto, los resultados obtenidos por este método siempre serán valores aproximados a sus pares reales.

Este método es ampliamente utilizado en distintas áreas del conocimiento, desde la medicina hasta la arquitectura e ingeniería, para determinar valores de fuerzas y tensiones en diferentes piezas de máquinas y estructuras como para modelar diferentes procesos de fabricación.

Las computadoras han aportado una herramienta eficiente para resolver la gran cantidad de ecuaciones que se plantean en el Método de los Elementos Finitos, cuyo desarrollo práctico ha ido avanzando junto con las innovaciones obtenidas en el campo de la arquitectura de los ordenadores. Ha contribuido a favorecer su uso a través de sofisticados paquetes gráficos que facilitan el modelado y la síntesis de resultados.

Hoy en día existe una moderna metodología en investigación denominada **Diseño Asistido por computadora** (CAD por sus siglas en inglés) que basa su eficacia en la implementación de softwares que permiten el modelado de piezas y su posterior análisis por medio del FEM.

### 4.6.1 Análisis de elementos Finitos:

“El análisis de elementos finitos (**FEA** por sus siglas en inglés) Es el modelado de productos y sistemas en un entorno virtual, con el propósito de encontrar y resolver potenciales (o actuales) problemas estructurales o de rendimiento. FEA es la aplicación práctica del método de elementos finitos (FEM), que es utilizado por ingenieros y científicos para matemáticamente modelar y resolver numéricamente problemas de complejas estructuras, fluidos y de multifísica. El software FEA puede ser utilizado en una amplia gama de industrias, pero es más comúnmente utilizado en las industrias aeronáutica, biomecánica y de automoción.”<sup>[12]</sup>

Uno de los modelos de elementos finitos (FE) cuenta con un sistema de puntos, llamados "nodos", que constituyen la forma del diseño. Conectados a estos nodos están los mismos elementos finitos que forman la malla de elementos finitos y contienen el material y las propiedades estructurales del modelo, la definición de cómo va a reaccionar a ciertas condiciones. La densidad de la malla de los elementos finitos puede variar a través del material, en función del cambio esperado en los niveles de estrés de un área en particular. Partes que experimentan grandes cambios en stress por lo general requieren una densidad de malla superiores a los que la experiencia de variación supone poco o ningún esfuerzo. Los puntos de interés pueden incluir los puntos de fractura del material previamente probado, filetes, esquinas, detalles complejos, y áreas de alto estrés. <sup>[12]</sup>

Los modelos FE pueden ser creados usando elementos en una dimensión (1D haz), dos dimensiones (2D shell) o tridimensionales (3D sólido). Mediante el uso de vigas y conchas en lugar de elementos sólidos, un modelo representativo se puede crear con menos nodos sin comprometer la precisión. Cada combinación de modelos requiere una diversa gama de propiedades que se definen como:

- Áreas de la sección
- Momentos de inercia
- Torsión constante
- Espesor de la chapa
- Resistencia a la flexión
- Corte transversal

Para simular los efectos de los entornos reales de trabajo en la FEA, los distintos tipos de carga se pueden aplicar a la modelo de elementos finitos, incluyendo:

- nodal: fuerzas, momentos, los desplazamientos, velocidades, aceleraciones, temperatura y flujo de calor
- Elemental: carga distribuida, presión, temperatura y flujo de calor
- Las cargas de aceleración del cuerpo

Los resultados típicos calculados por el programa incluyen:

- Nodal desplazamientos, velocidades y aceleraciones.
- Las fuerzas elementales, deformaciones y tensiones. <sup>[12]</sup>”

Por medio del modelo de este soporte (ver imagen 41) se ilustra la forma en que se obtienen los resultados de un análisis de esfuerzo y deformación.

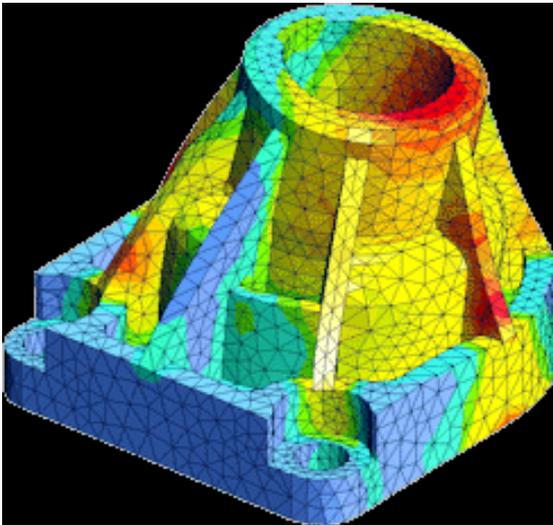


Imagen 25: Ilustración de los estados tensionales y deformación.

[https://ingenierodelacrisis.files.wordpress.com/2012/09/pumpe\\_fem.gif](https://ingenierodelacrisis.files.wordpress.com/2012/09/pumpe_fem.gif)

## 5 Análisis de causa raíz de falla en elevador por cangilones planta Argos Cartagena.

El elevador de Clinker (Transportador por cangilones) está incurriendo en sucesivas fallas en el último año, estas fallas son críticas ya que causan paradas inesperadas que interrumpen la producción y generan grandes pérdidas de tiempo y dinero. Las fallas más significativas aparecen en el fondo de los cubos donde se encuentra soldada una “U” de apoyo para los ejes de las ruedas, pero también hay un riel muy dañado.

### 5.1 Antecedentes:

Nuestro caso de estudio se centra en el transportador de Clinker KZB-Q 45344 de la empresa alemana AUMUND, el Clinker es un material que sale a altas temperaturas del horno y por ser un material demasiado caliente se utilizan transportadores de cangilones de cadena inclinados, los cuales se encargan de transportarlo hacia el almacenaje. Los cangilones, debido al tipo de trabajo y a las condiciones a las cuales están sometidos se fabrican de acero laminado. Debido a la agresividad del Clinker en las industrias cementeras estos equipos fallan con reiterada frecuencia en las uniones atornilladas de los cangilones con las bandas o cadenas, rupturas en algunos engranajes, fracturas de los cangilones debido a causas que pueden estar desde elevadas cargas, fallas por fatiga, sobreapriete de los tornillos, geometría errónea del cangilón o desalineaciones en las poleas tensoras entre otras.

A partir de Julio del 2013 comienzan a aparecer fallos en el soporte porta rodillos del transportador siendo la fatiga una de las razones fundamentales de las mismas. En los meses de diciembre 2013 y Enero 2014 se realizó una inspección al transportador pero fue un tiempo muy corto para obtener las soluciones definitivas a los problemas de diseño por lo que se emitieron algunas recomendaciones como mejoras de alineación y reforzamiento de la estructura basados en un análisis estructural realizado por AUMUND pero con resultados no concluyentes. Dentro de las recomendaciones se encontraban soldar un refuerzo al fondo del cangilón (ver imagen 31).

## 5.2 Evidencias:

### 5.2.1 Aparición de grietas y rotura en la unión entre el eje de la rueda y la "U" soldada a la base de los cangilones.

Configuración de montaje del conjunto de piezas que presenta falla (ver imágenes 42 y 43) conformado por la "U" soldada en el fondo del cangilón el eje y la rueda y un detalle de la fijación de la "U" (ver imagen 44).



*Imagen 26: Soldadura de la "U" de soporte del eje al fondo del cubo.*



*Imagen 27: La "U" va abierta hacia el frente.*



*Imagen 28: Detalle de la manera en que se suelda al fondo del cubo.*



*Imagen 29: Evidencia de la manifestación de la grieta.*

Podemos apreciar la zona en la cual crecen las grietas y deformaciones puesto que los esfuerzos, en el contorno de la soldadura de la “U” en que se apoya la rueda, son mayores (ver imagen 45 y 46).



*Imagen 30: Evidencia de Cubo que falló, desprendimiento del fondo.*



*Imagen 31: Propuesta de solución del fabricante, refuerzo del fondo del cubo.*

Este refuerzo (ver imagen 47) fue propuesto por el fabricante como solución temporal a la falla, sin embargo se observa que la zona de alta concentración de esfuerzo se encuentra por fuera del área reforzada.



*Imagen 32: Soldadura del refuerzo.*

De esta forma se intenta rigidizar la zona y aportar material a la sección resistente, pero parte de la zona de falla queda fuera del área reforzada.

### 5.2.2 Desgaste y deformación en la superficie de rodadura de uno de los rieles.

Se evidencia desgaste en la superficie de rodadura de uno de los rieles (ver imágenes 49, 50 y 51) mientras que el otro mantiene su integridad.



*Imagen 33: Evidencia de fluencia en la superficie de rodadura del riel.*



*Imagen 34: Detalle de la fluencia del riel desgastado.*



*Imagen 35: Detalle del riel Desgastado.*

El riel desgastado contrasta contra el segundo riel que no muestra deformaciones como se muestra en la figura 52.



*Imagen 36: Ilustración del riel no deformado.*

### **5.3 Hipótesis:**

- 1.** Posible sobre carga de Clinker en los cangilones podría estar causando las fallas en la unión soldada entre la “U” de apoyo de las ruedas y los cangilones.
- 2.** Es posible que la carga de los cangilones no este igualmente distribuida entre los dos rieles y que esto sea la causa del desgaste desigual entre ambos rieles.
- 3.** Es posible que el acero de los cubos no tenga las características mecánicas necesarias para resistir las tenciones existentes.
- 4.** Posible incurrancia en fallas de diseño debido a la escasa sección resistente de la “U” soldada.
- 5.** Es posible que haga falta un proceso de fortalecimiento en las superficies de contacto de los rieles.

#### 5.4 Pruebas y justificación de hipótesis:

1. Se desestima la sobre carga del sistema como causa de la falla ya que se demostró que existe control por parte de los responsables del funcionamiento del equipo y que las cargas no superan los valores de operación normal.
2. Existe un desnivel entre los rieles debido a una circunstancia topográfica que está causando un sobre esfuerzo en uno de ellos, razón por la cual se presenta el desgaste y deformación de uno de ellos mientras que el otro no presenta fallas.

Este desnivel provoca que uno de los rieles esté sobrecargado, la diferencia de carga viene descrita por el siguiente código, se usó Scilab como hoja de cálculo.

Según los planos analizados el peso de los elementos móviles del transportador tienen un valor de 4,84 kN/m, y el peso del material depositado en el transportador para máxima carga es de 3,1 kN/m; si tenemos en cuenta que la distancia entre las secciones de cangilones es de 1,5 metros tenemos que los valores de la carga radial máxima serían de:

Los cálculos se realizarán sobre el tramo inicial del transportador (horizontal) puesto que es el más crítico para las cargas radiales donde el cangilón se encuentra cargado con el Clinker.

$W$  = peso de las unidades móviles del elevador, cangilones, tornillería, segmento de cadena + el peso del Clinker en el tramo de 1.5 mts entre los apoyos.

$$w = 11,91 \text{ kN}$$

**Nota:** Se realiza el cambio de grados a radianes, puesto que Scilab trabaja de esa forma los ángulos.

**El código en principio establece los datos de entrada como carga aplicada “ $w$ ”, distancia vertical entre el centro del cangilón y el centro de la rueda “ $Y$ ” y por último la distancia entre las ruedas de apoyo.**

--> // datos de entrada

-->  $w = 11910$  // peso del cubo cargado en Newtons

-->  $a_1 = (2 * \pi) / 180$  //  $2^\circ$ , ángulo de inclinación entre rieles

$$a_1 = 0.0349066$$

-->  $a_2 = (3 * \pi) / 180$  //  $3^\circ$ , ángulo de inclinación entre rieles

$$a_2 = 0.0523599$$

-->  $a_3 = (4 * \pi) / 180$  //  $4^\circ$ , ángulo de inclinación entre rieles

$$a_3 = 0.0698132$$

-->  $a_4 = (5 * \pi) / 180$  //  $5^\circ$ , ángulo de inclinación entre rieles

$$a_4 = 0.0872665$$

-->  $w_{y1} = w * \cos(a_1)$  // componente "Y" de la carga para  $2^\circ$

$$w_{y1} = 11902.745$$

-->  $w_{x1} = w * \sin(a_1)$  // componente "X" de la carga para  $2^\circ$

$$w_{x1} = 415.65301$$

-->  $w_{y2} = w * \cos(a_2)$  // componente "Y" de la carga para  $3^\circ$

$$w_{y2} = 11893.678$$

-->  $w_{x2} = w * \sin(a_2)$  // componente "X" de la carga para  $3^\circ$

$$w_{x2} = 623.32124$$

-->  $w_{y3} = w * \cos(a_3)$  // componente "Y" de la carga para  $4^\circ$

$$w_{y3} = 11880.988$$

-->  $w_{x3} = w * \sin(a_3)$  // componente "X" de la carga para  $4^\circ$

$$w_{x3} = 830.7996$$

-->  $w_{y4} = w * \cos(a_4)$  // componente "Y" de la carga para  $5^\circ$

$$w_{y4} = 11864.679$$

-->  $w_{x4} = w * \sin(a_4)$  // componente "X" de la carga para  $5^\circ$

$$wx4 = 1038.0249$$

-->  $y = 0.260$  // distancia vertical (metros) entre el centro del cangilón y el centro de la rueda

$$\text{-->} L = 0.950 \text{ // longitud entre ruedas}$$

**La segunda parte del código calcula las reacciones en el eje "X" y "Y" para ángulos desde 2° hasta 5° en los dos apoyos.**

--> // cálculo de reacciones para 2º

$$\text{-->} r_{iy\_2\text{grados}} = (((w * \cos(a1)) * (l/2)) - (wx1 * y)) / l$$

$$r_{iy\_2\text{grados}} = 5837.6147$$

$$\text{-->} r_{dy\_2\text{grados}} = (((w * \cos(a1)) * (l/2)) + (wx1 * y)) / l$$

$$r_{dy\_2\text{grados}} = 6065.13$$

--> // cálculo de reacciones para 3º

$$\text{-->} r_{iy\_3\text{grados}} = (((w * \cos(a2)) * (l/2)) - (wx2 * y)) / l$$

$$r_{iy\_3\text{grados}} = 5776.2457$$

$$\text{-->} r_{dy\_3\text{grados}} = (((w * \cos(a2)) * (l/2)) + (wx2 * y)) / l$$

$$r_{dy\_3\text{grados}} = 6117.4321$$

--> // cálculo de reacciones para 4º

$$\text{-->} r_{iy\_4\text{grados}} = (((w * \cos(a3)) * (l/2)) - (wx3 * y)) / l$$

$$r_{iy\_4\text{grados}} = 5713.1172$$

$$\text{-->} r_{dy\_4\text{grados}} = (((w * \cos(a3)) * (l/2)) + (wx3 * y)) / l$$

$$r_{dy\_4\text{grados}} = 6167.8707$$

--> // cálculo de reacciones para 5º

$$\text{-->} r_{iy\_5\text{grados}} = (((w * \cos(a4)) * (l/2)) - (wx4 * y)) / l$$

$$r_{iy\_5\text{grados}} = 5648.2484$$

$$\text{-->} r_{dy\_5\text{grados}} = (((w * \cos(a4)) * (l/2)) + (wx4 * y)) / l$$

$$r_{dy\_5\text{grados}} = 6216.4305$$

Grados de inclinación	Reacciones en el riel más alto (N)	Reacciones en el riel más bajo (N)
2º	5837,61	6065,13
3º	5776,25	6117,43
4º	5713,12	6167,88
5º	5648,25	6216,43

Tabla de resultados de las reacciones en los rieles donde se ilustran los valores para cada uno de los grados de inclinación, es evidente el salto de carga para el riel que está apoyado en la zona que presenta depresión topográfica.

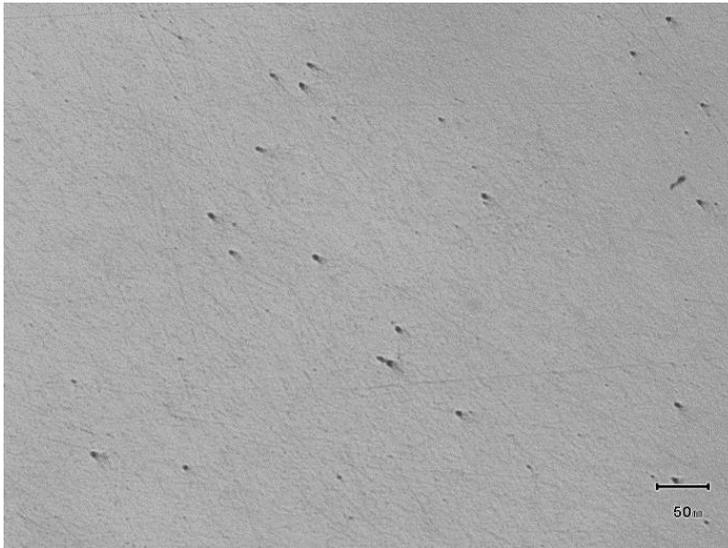
Se determinó por medio de un ensayo de metalografía que el acero de del Riel es un **AISI 1060**, 0.6% de carbono, con dureza Vickers promedio de 218hv la cual corresponde aproximadamente a 735Mpa de resistencia.



*Imagen 37: Probeta para ensayos de dureza del riel.*

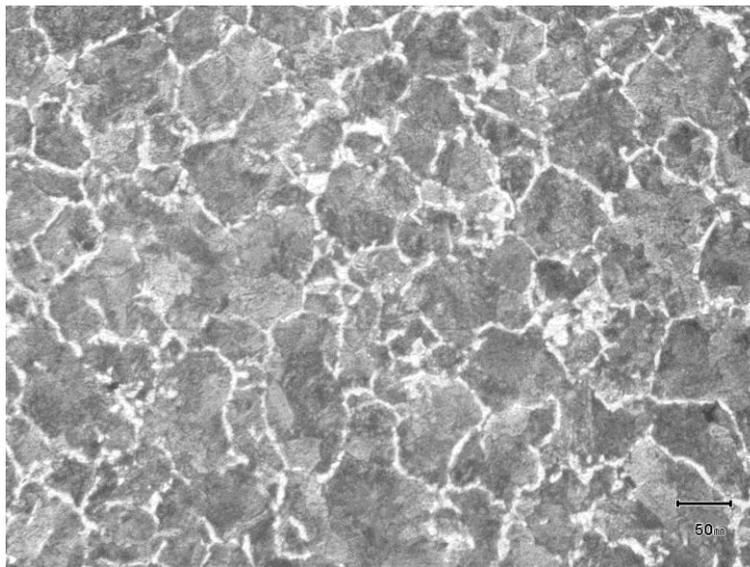
La probeta del riel muestra las muescas del ensayo de dureza (ver imagen 53).

Una vez que se analizó en el microscopio se pudo observar la micro estructura del riel, sin ataque químico. Se presenta un acero al carbono con pocas inclusiones no metálicas (ver imagen 54).



*Imagen 38: Micro estructura del riel sin ataque.*

Cuando se atacó la superficie se observó la micro estructura de la matriz ferrítico-perlítica. Probeta de riel con ataque 200X. Micro estructura propia de aceros con medio-alto carbono con una concentración de 0.6%. (Ver imagen 55)



*Imagen 39: Micro estructura del riel con ataque, aumento de 200x.*

3. Se determinó por medio de un ensayo de metalografía que el acero de los cangilones es un **AISI 1010 – AISI 1015**, con porcentaje de carbono entre el 0.1% y 0.15%. Por ser un acero de bajo carbono tiene buena soldabilidad pero muy baja resistencia mecánica con valores aproximados de entre 180MPa y 190MPa para su **límite de fluencia**, un valor en su **límite de fatiga  $\sigma_{-1} = 144$  MPa** y un valor de **resistencia a la rotura de 320 MPa**.

En la micro estructura del acero de los cubos, se observan muchas inclusiones no metálicas (Óxidos e impurezas) que contribuyen a una limitada resistencia del material y lo hacen más susceptible a la fatiga (ver imagen 56).



Imagen 40: Micro estructura del fondo del cangilón Sin ataque.

Después del ataque químico a la superficie de la probeta del fondo del cubo se observa la matriz mayormente ferrítica con poca perlita en los límites de grano propia de aceros de bajo carbono lo que implica una baja resistencia mecánica (ver figura 57).



Imagen 41: Micro estructura del fondo del cangilón con ataque, aumento 100x.

Según los planos analizados el peso de los elementos móviles del transportador tienen un valor de 4,84 kN/m, y el peso del material depositado en el transportador para máxima carga es de 3,1 kN/m; si tenemos en cuenta que la distancia entre las secciones de cangilones es de 1,5 metros tenemos que los valores de la carga radial máxima serían de:

- ✓ Tramo recto de la subida que es el más crítico para las cargas radiales donde el cangilón se encuentra cargado con el Clinker.

$$PT = [(PPM + PM) \cdot 1.5]$$

$$PT = 11,91 \text{ kN}$$

Con este valor de carga y al sistema ser simétrico respecto a los apoyos tendríamos por lo tanto en cada apoyo una reacción igual a la mitad de este valor es decir 5,95 KN.

Para determinar el valor máximo de las reacciones en el retorno cuando el transportador está vacío se tomaron los valores dados en el estudio por AUMUND, este valor es de 2,4 KN lo cual está en correspondencia con el valor de las partes móviles que es de 4,84 KN, si dividiéramos estas entre los 2 apoyos nos daría este mismo valor.

Con estos valores de la carga máxima tanto en la subida como en el retorno podemos determinar los valores máximos y mínimos del momento flector en el fondo del cangilón y con ellos realizar el análisis de resistencia a la fatiga para esta lámina. El mayor valor del momento se obtiene para el punto más alejado de la U con respecto a la rueda de apoyo. La distancia hasta ese punto tiene un valor de 177 mm.

#### ✓ Valores de los momentos flectores

Tramo horizontal lleno de Clinker

$$M_{flec} = F \cdot d = 5.95KN \cdot 0,177m = 1,053 KNm$$

Retorno

$$M_{flec} = F \cdot d = -2,5KN \cdot 0,177m = -0,442 KNm$$

Obtenidos los valores del momento en esos puntos se procede a calcular el valor de las tensiones máximas y mínimas.

$$\sigma_{max} = \frac{M_{flec} \cdot Y_{m\acute{a}x}}{I_x}$$

Donde  $Y_{m\acute{a}x}$  es la distancia entre el punto más alejado y la línea neutra y  $I_x$  momento de inercia de la sección respecto al eje x.

La pieza analizada tiene un contorno muy complejo como se muestra en la figura, por lo que se dificulta determinar estos valores, para resolver esta problemática se determinan los mismos utilizando un programa de diseño en este caso el Mechanical Desktop 6.0 obteniéndose los valores de:

$$Y_{max} = 39mm$$

$$I_x = 400mm^4$$

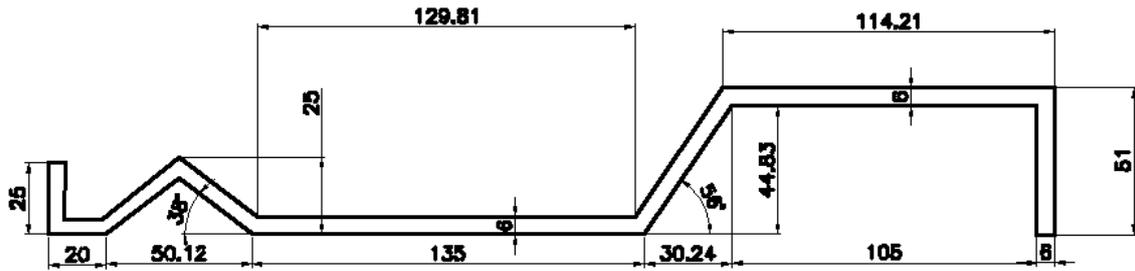


Imagen 42: vista lateral de la lámina del fondo de los cubos.

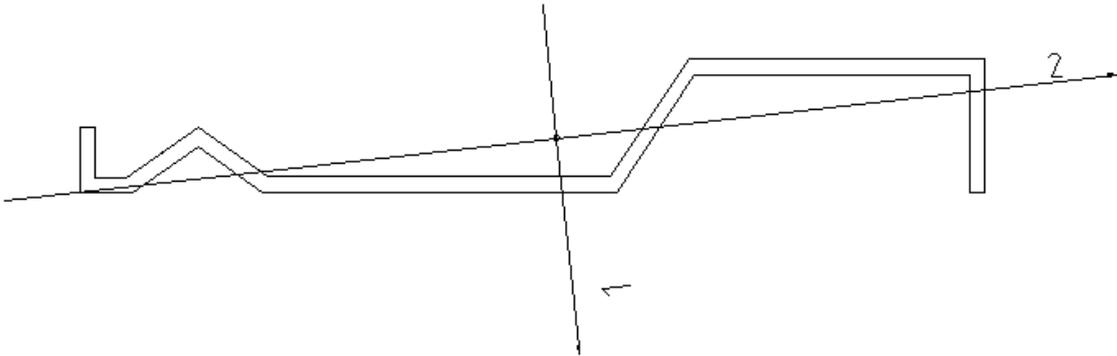


Imagen 43: ejes de inercia de la lámina del fondo de los cubos.

Valores del momento de inercia y distancia máxima a la línea neutra.

$I_1$ [mm <sup>4</sup> ]	33 100 000
$I_2$ [mm <sup>4</sup> ]	525 400
$Sc$ [mm]	39
$A$ [mm <sup>2</sup> ]	2 625,50

✓ **Valores de tensiones.**

$$\sigma_{max} = \frac{M_{flec} \cdot Y_{m\acute{a}x}}{I_x} = \frac{1053 \text{ N}\cdot\text{m} \cdot 0.039 \text{ m}}{0,52 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4} = 78,9 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m\acute{i}n} = \frac{M_{flec} \cdot Y_{m\acute{a}x}}{I_x} = \frac{-442 \text{ N}\cdot\text{m} \cdot 0.039 \text{ m}}{0,52 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4} = -33,15 \text{ MPa}$$

**Coefficiente de asimetría para el fondo cangilón:**

$$r = \frac{\sigma_{m\acute{i}n}}{\sigma_{m\acute{a}x}} = \frac{-33,15 \text{ MPa}}{78,9 \text{ MPa}} = -0,42$$

$$\sigma_{med} = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{m\acute{i}n}}{2} = \frac{78,9 \text{ MPa} - 33,15 \text{ MPa}}{2} = 22,87 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{ampl} = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n}}{2} = \frac{77,4 \text{ MPa} + 30,9 \text{ MPa}}{2} = 56,02 \text{ MPa}$$

Con todos los datos obtenidos se procede a determinar el coeficiente de seguridad a la fatiga, para ello es necesario obtener primero los siguientes coeficientes brindados por Fedosiev<sup>[13]</sup>. Coeficiente de concentración de tensiones igual a 1,7, este es un valor discreto ya que con la configuración del fondo este valor puede llegar a ser superior; para el acero AISI 1010 el límite de rotura es 320 MPa; según Fedosiev para un acero con ese límite de rotura y una superficie con acabado de laminado el coeficiente de calidad superficial es de 0,68, según ese mismo autor como factor de escala para este caso se puede tomar un valor de 0,72 por lo que planteando la ecuación del coeficiente de seguridad a la fatiga obtenemos el siguiente valor:

$$n_r = \frac{\sigma_{-1}}{\frac{k_{-1}}{e_s \cdot e_e} \cdot \sigma_a - \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{rt}} \cdot \sigma_m}$$

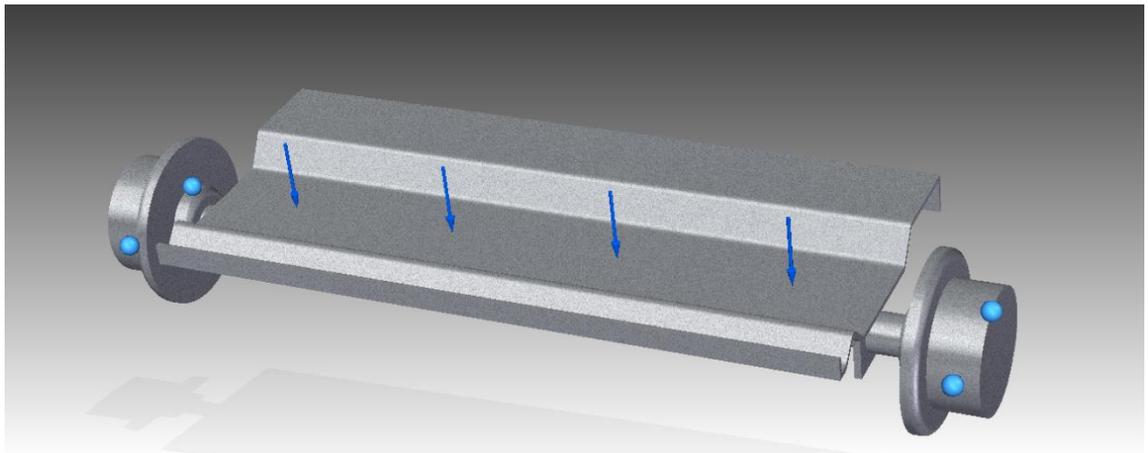
$$n_r = \frac{144 \text{ MPa}}{\frac{1,7}{0,68 \cdot 0,72} \cdot 56,02 \text{ MPa} - \frac{144 \text{ MPa}}{320} \cdot 22,87} = 0,78$$

Se espera que este coeficiente alcance valores entre 1 y 1,3, al tener tan solo un valor de 0,78 sin dudas la lámina del fondo del cangilón tendrá un fallo por fatiga como ha venido sucediendo.

#### **Modelado y simulación:**

Se Utilizó el FEM, para determinar los estados tensionales en el área donde se suelda la U, para esto la herramienta seleccionada fue SolidEdge ST6.

Al realizar este análisis se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones: el material que se utiliza es el (AISI 1010) un acero de bajo contenido de carbono muy común en estructuras laminadas, las dos condiciones de operación definidas como cargado y descargado con valores de 11.91 KN y 7.26 KN respectivamente, y por ultimo las condiciones de entorno de simulación fueron las fuerzas aplicadas sobre la cara superior de los cangilones y una restricción radial en las ruedas (ver imagen 44).



*Imagen 44: concepto de aplicación de carga y restricciones.*

Para la primera corrida de la simulación se estableció el valor de la carga distribuida para el nivel máximo, es decir, cuando el transportador va cargado con el Clinker (ver imagen 45).

$$F = 11.91 \text{ KN}$$

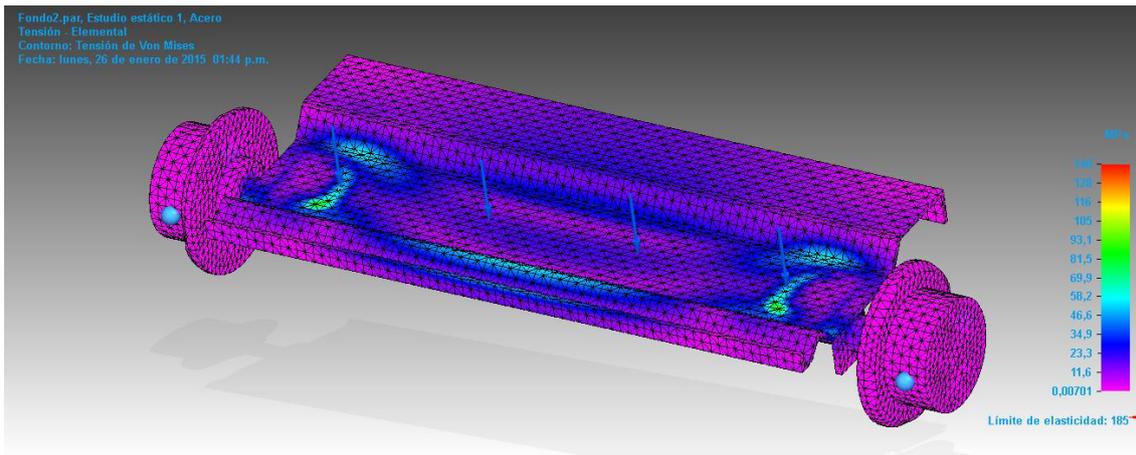


Imagen 45: simulación de estados tensionales máximos (Cangilón cargado).

Para la segunda corrida de la simulación se estableció el valor de la carga distribuida para el nivel mínimo, es decir, cuando el transportador va descargado con el Clinker (ver imagen 46).

$$F = 7.26 \text{ KN}$$

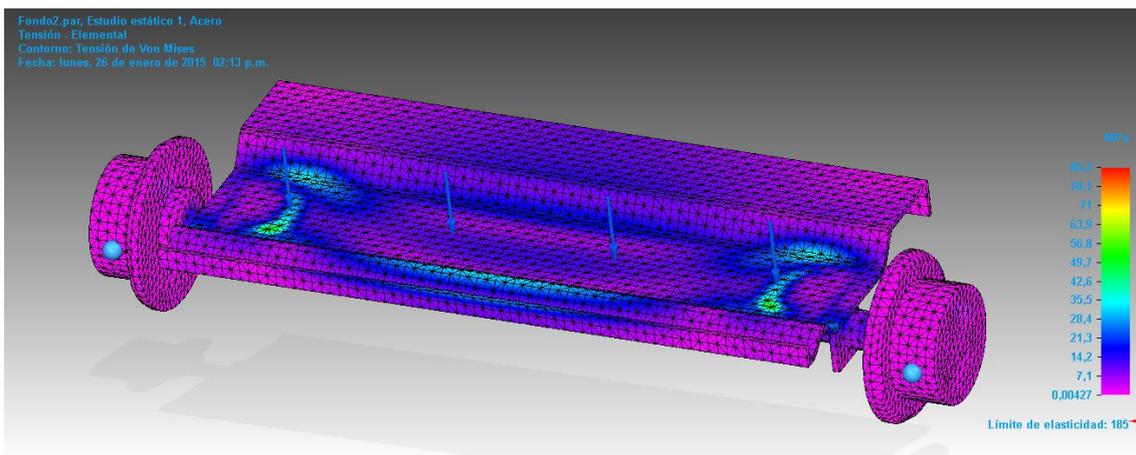


Imagen 46: simulación de estados tensionales mínimos (Cangilón descargado).

Los valores de las tensiones obtenidos con anterioridad son más bajos que los encontrados a partir de la simulación, lo cual es algo esperado debido al factor de concentración de tensiones que no se había tomado en cuenta; las tensiones según el MEF toman un valor máximo y mínimo de 140 y 85.2 MPa respectivamente (además de cómo se especificó antes su límite de fatiga  $\sigma_{-1} = 144$  MPa) para los cuales tendríamos un factor de seguridad a la fatiga de:

$$\sigma_{max} = 140 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{min} = -85.2 \text{ MPa}$$

**Coefficiente de asimetría para el fondo cangilón.**

$$r = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = \frac{-85,2 \text{ MPa}}{140 \text{ MPa}} = -0,608$$

$$\sigma_{med} = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} = \frac{140 \text{ MPa} - 85,2 \text{ MPa}}{2} = 27.4 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{ampl} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} = \frac{140 \text{ MPa} + 85.2 \text{ MPa}}{2} = 112.6 \text{ MPa}$$

$$n_r = \frac{\sigma_{-1}}{\frac{k_{-1}}{e_s \cdot e_e} \cdot \sigma_a - \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{rt}} \cdot \sigma_m}$$

$$n_r = \frac{144 \text{ MPa}}{\frac{1,7}{0,68 \cdot 0,72} \cdot 112.6 \text{ MPa} - \frac{144 \text{ MPa}}{320 \text{ MPa}} \cdot 27.4 \text{ MPa}} = 0.334$$

Un valor de seguridad inferior al obtenido analíticamente lo que evidencia la posibilidad de la ocurrencia del fallo por fatiga en la lámina del fondo del transportador.

4. Se observan valores promedio de esfuerzo inferiores a la resistencia del acero AISI 1010, sin embargo un valor pico de 140 MPa en la unión soldada de la "U". La forma de la "U" Favorece la concentración de esfuerzo, sobre todo en el extremo de inicio y final de la "U" como se aprecia en la figura, esto es prueba clara del lugar de inicio de las grietas que dan lugar a la falla de los cangilones (ver imagen 47).

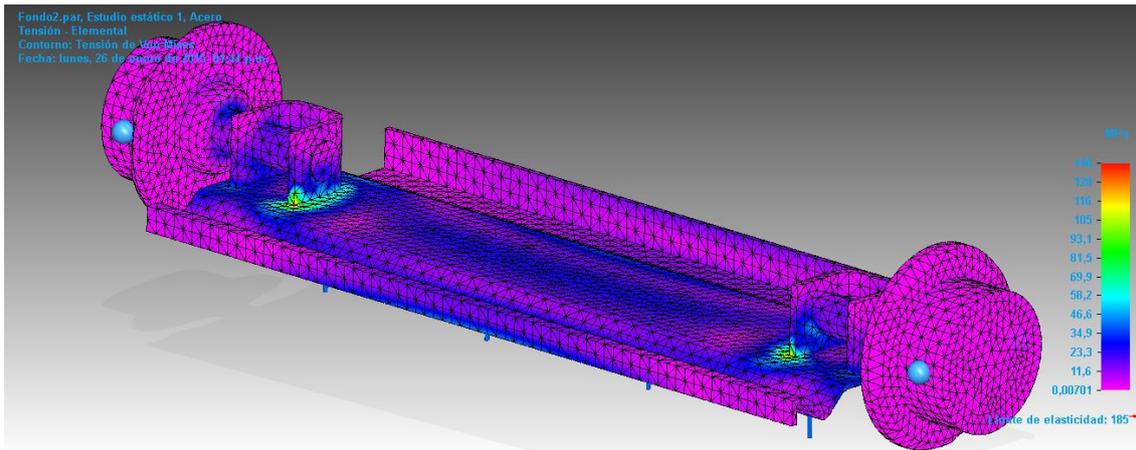


Imagen 47: fondo de cangilón invertido, concentrador de esfuerzo en "U" soldada.

El detalle de esta imagen permite apreciar el punto de aparición del concentrador de esfuerzo, como es de esperarse este se manifiesta en la esquina aguda de soldadura de la "U" en el extremo más alejado de la rueda de apoyo, lugar donde las tensiones son mayores y donde físicamente aparecen las grietas (ver imagen 48).

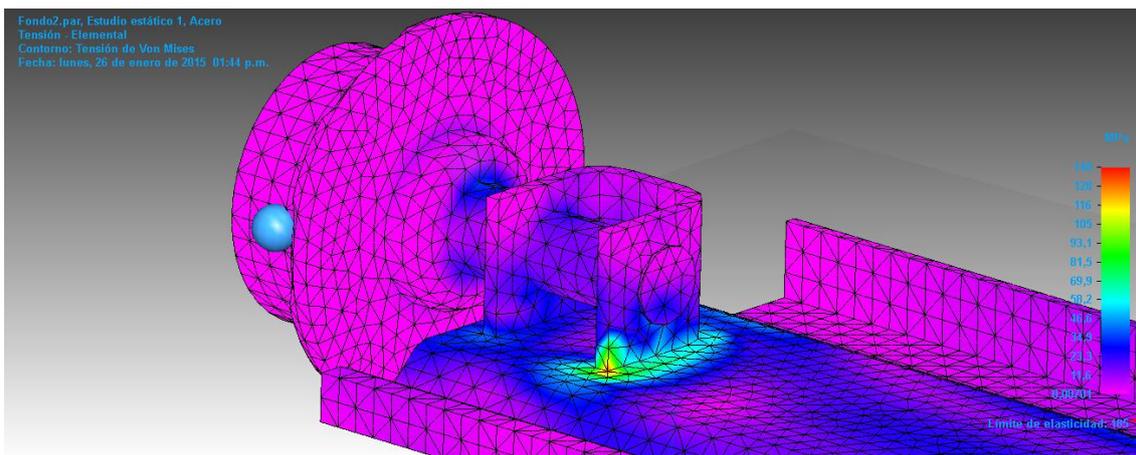


Imagen 48: detalle del punto de aparición e inicio de las grietas en la "U" soldada.

## 6 Conclusiones y sugerencias.

5. Es de vital importancia para el óptimo funcionamiento del elevador de cangilones que se solucione el problema del desnivel que hay en la topografía de la zona, puesto que se han demostrado las significativas consecuencias de esta condición en los modos de falla de rieles y cangilones.
6. El acero de los rieles podría tener un tratamiento térmico de endurecimiento que lo haga más resistente a las condiciones de trabajo atípicas como el desnivel en cuestión, de esta forma aunque se presenten esas sobrecargas indeseadas podría soportar el esfuerzo.
7. El acero de los cangilones presenta muchas fallas tanto en la resistencia mecánica como en la calidad de su micro estructura, no cumple con las características necesarias para este trabajo, su pobre calidad favorece la aparición y progreso de grietas y su baja resistencia mecánica no soporta los estados tensionales que provocan la falla, se recomienda un acero más resistente o una lámina más gruesa en los fondos.
8. La “U” soldada donde se apoyan los ejes de las ruedas podría ser más robusta lo que reduciría los esfuerzos en la zona de fractura, además se recomienda utilizar una geometría diferente para dichos apoyos que no favorezcan la concentración de esfuerzo.

## Referencias Bibliográficas.

- [1] <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/795/3/CAPITULO%20II.pdf>
- [2] “Curso operación de montacargas: Principios para el desplazamiento eficiente de materiales” <http://cursomaquinariapesada.blogspot.com/2013/05/principios-para-el-desplazamiento.html>
- [3] “Sistema vibratorio para transporte y clasificación de material granular. Edith Pineda Arguello – Eliana Subani Rojas Estupiñan.”  
<http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/5933/2/114273.pdf>
- [4] “SOFTWARE PARA DISEÑO DE TRANSPORTADORES DE TORNILLO - Eduardo Pino Salazar, Federico Camacho B”  
<https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/2490/1/4924.pdf>
- [5] <http://www.criba.edu.ar/cinetica/solidos/Capitulo12.pdf>
- [6] “NTP 89: Cinta transportadora de materiales a granel”  
[http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/001a100/ntp\\_089.pdf](http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/001a100/ntp_089.pdf)
- [7] “TEMA II - MAQUINARIA DE ELEVACION Y TRANSPORTE DE MATERIALES SOLIDOS - Ing. María Elena Tovar Moya”: [http://docentes.uto.edu.bo/mtovarm/wp-content/uploads/temaii\\_prq3630.pdf](http://docentes.uto.edu.bo/mtovarm/wp-content/uploads/temaii_prq3630.pdf)
- [8] [http://www.ecured.cu/index.php/Transportador\\_de\\_cangilones](http://www.ecured.cu/index.php/Transportador_de_cangilones)
- [9] <http://dim.usal.es/areaim/guia%20P.%20/PAGINA%20CANGILONES.HTM>
- [10] <http://www.itescam.edu.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r43463.PDF>
- [11] <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4089/fichero/4.pdf>
- [12] [http://www.plm.automation.siemens.com/es\\_es/plm/fea.shtml](http://www.plm.automation.siemens.com/es_es/plm/fea.shtml)
- [13] Feodosiev V.I. Diez conferencias sobre Resistencia de Materiales.  
Moscú: Editorial MIR, 1993.-179 p.
- [14] <http://www.aumund.com/>
- [15] Norma ASTM A 370 07 - E-23 07, para ensayos de dureza
- [16] Norma ASTM A 370 07 - Dureza Vickers E 92
- [17] “Análisis causa raíz (RCA) – Pequeñas charlas para gestión en mantenimiento. Fernando Espinoza Fuentes.”
- [18] FICHA DIVULGATIVA. FD-19/2011 -  
[http://www.carm.es/web/pagina?IDCONTENIDO=160&IDTIPO=140&RASTRO=c\\$m120,128](http://www.carm.es/web/pagina?IDCONTENIDO=160&IDTIPO=140&RASTRO=c$m120,128)
- [19] “Implementación de un software y equipos para su operatividad para el cálculo y diseño de transportadores de tornillo sinfín y cangilones para el laboratorio de dibujo mecánico asistido por computador de la carrera de ingeniería mecánica de la UTM. - 5.1.2 Transportador de tornillo sinfín” - DAVILA INTRIAGO ALEX XAVIER - VELASQUEZ ALVAREZ ROSENDO RAFAEL - ZAMBRANO AYON KELVIN ANTONIO  
<http://repositorio.utm.edu.ec/bitstream/123456789/5242/1/4.-TESIS%20SINFIN%20Y%20CANGILONES%20COMPLETA.pdf>

## 7 Anexos

### 7.1 Transportador de Tornillo Helicoidal:

El transportador de tornillo helicoidal, sinfín o de gusano es uno de los tipos de transportadores más antiguos y versátiles. Consiste en un sistema de aspas helicoidales que giran, con un juego mínimo en una artesa, y se ponen en funcionamiento a través de un motor acoplado a un reductor que le suministra el movimiento al tornillo sinfín, este va montado en cojinetes y chumaceras, (en dependencia de la longitud del mismo hasta 50 m máxima), tendrá cojinetes intermedios que funcionarán como puntos de apoyo para evitar flexiones o la distorsión de la espiral.

Los transportadores de Tornillo Sinfín pueden operar sobre un plano horizontal o inclinado, con múltiples entradas y salidas. Con ellos se moviliza una amplia gama de materiales que tienen tendencia a fluir tales como granos, polvos e incluso algunos líquidos. <sup>[4]</sup>

El sinfín está definido en función de las características de trabajo como puede ser el caudal, cantidad de sólido a transportar, velocidad de transporte, inclinación del equipo, agresividad del material a transportar, dimensiones del canal y en función de ello tiene diferentes clasificaciones

- A. Transportador Helicoidal.
- B. Componentes de acople como tornillos, tuercas de seguridad y flechas.
- C. Colgantes de bujes.
- D. Tapas y extremos.
- E. Artesas, cubiertas y limitadores de carga.
- F. Bridas.
- G. Bocas de descarga y alimentación.
- H. Pie de soporte atornillable y/o soldable.

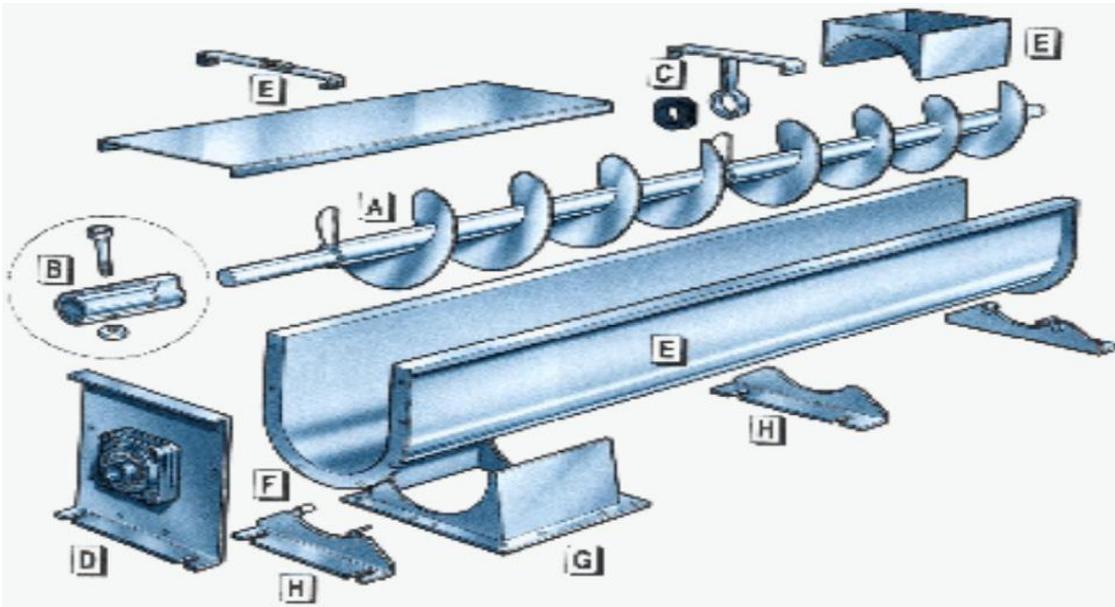


Imagen 49: partes que conforman un transportador helicoidal:

<http://dim.usal.es/areaim/guia%20P.%20/rosca%20helicodal.htm>

Algunas clasificaciones según la forma del tornillo sinfín:

- Tornillo sinfín de hélice helicoidal



Imagen 50: Tornillo sinfín helicoidal:

<http://www.inagromecanica.com/actividad-comercial/transportadores-tipo-tornillo-sin-fin-fabricante-de-bandas-transportadoras>

- Tornillo sinfín de paletas tipo cintas



Imagen 51: Tornillo sinfín de paletas tipo cintas

[http://metaline.de/wSpanisch/einsatzgebiete/pumpen\\_foerdertechnik/15.php](http://metaline.de/wSpanisch/einsatzgebiete/pumpen_foerdertechnik/15.php)

- Tornillo sinfín de paletas con palas



Imagen 52: Tornillo sinfín de paletas con palas: <http://micesa.net/productos.htm>

- Tornillo sinfín de paso escalonado
- Tornillo sinfín de paso largo
- Tornillo sinfín mixto

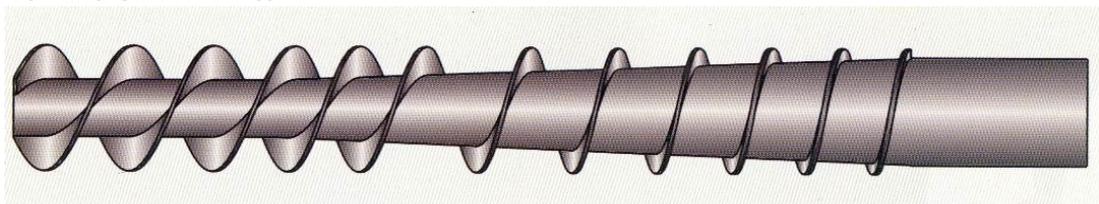


Imagen 53: Tornillo sinfín con diámetros variables

<http://dim.usal.es/areaim/guia%20P.%20I/rosca%20helicodal.htm>

### **Ventajas.**

- ✓ Son compactos.
- ✓ Diseño modular fácil instalación.
- ✓ Soportes y apoyos similares.
- ✓ Soportan altas temperaturas.
- ✓ Fácil hermeticidad.
- ✓ Extremadamente versátiles.
- ✓ Varias zonas de carga y descarga.
- ✓ El uso de aspas de caucho permite manejar materiales pegajosos.
- ✓ Utilidad como mezclador y transportador al mismo tiempo.
- ✓ Costo inicial y mantenimiento bajo.
- ✓ Se pueden convertir en herméticos con facilidad.
- ✓ Se pueden utilizar en operaciones de secado.

### **Desventajas**

- ✓ No poseen grandes dimensiones (hasta 50 m).
- ✓ No pueden transportar materiales frágiles delicados o abrasivos.
- ✓ Mayores requerimientos de potencia.
- ✓ Al quedar resto de materiales transportados con anterioridad existen riesgos de contaminación.
- ✓ Volumen de material bajo.
- ✓ Elevados costos de mantenimiento.

## 7.2 Transportadores de Banda.

Los transportadores de banda se utilizan de manera universal, quizás sean los equipos que más estamos acostumbrados a observar en la vida cotidiana: cintas transportadoras en las cajas de supermercado, cintas de transporte de valijas en aeropuertos, transporte de bultos, etc.

Pueden recorrer grandes distancias desde metros hasta kilómetros a velocidades de 5 m/s y manejar hasta 5000 ton/h. También pueden funcionar en distancias cortas a velocidades suficientemente lentas para la recolección manual.

Las cintas transportadoras suelen operarse de manera horizontal, sin embargo puede asignárseles algún grado de inclinación generalmente limitado por ángulos de 15 a 20 grados. El límite del ángulo de inclinación se define para evitar el movimiento del material durante el transporte. Si se requieren cambios de pendiente de mayor magnitud, el diseño debe incluir laterales corrugados que eviten la pérdida de material o bultos. Si las cintas son diseñadas y mantenidas adecuadamente tienen un alto tiempo de servicio. <sup>[5]</sup>



Imagen 54: Transportador de Banda

<http://www.dmet.com.mx/transportador%20movil%20de%20banda%20plana.html>

Las cintas transportadoras están constituidas básicamente por una banda sinfín flexible que se desplaza apoyada sobre unos rodillos de trabajos y libres. El desplazamiento de la banda se realiza por la acción de arrastre que le transmite uno de los tambores extremos, generalmente el situado en la "cabeza", presentan una estación tensora con un dispositivo tensor. Todos los componentes y accesorios del conjunto se disponen sobre un bastidor, casi siempre metálico, que les da soporte y cohesión. <sup>[6]</sup>

**Banda o Cinta:** debe ser flexible para adaptarse a la forma del transporte, lo suficientemente ancha como para transportar la cantidad de material deseado, poseer una resistencia adecuada para sostener la carga y la tensión que se le aplica a la misma. Pueden ser de goma o de tela (éstas últimas suelen ser impregnadas con un material a prueba de agua). Existen transportadoras que no poseen cintas sino directamente rodillos o tablillas de transporte por las exigencias de los productos (altas temperaturas, abrasivos, grandes dimensiones y pesos y el movimientos de los mismos se logra a través de transmisiones por cadena. <sup>[5]</sup>



Imagen 55: Banda transportadora (1900-260 High Capacity Mass Flow Spiral. De Ryson)

<http://www.elempaque.com/guia-de-proveedores/empresas/Ryson-International,-Inc+290480>  
<http://www.tecnicaindustrial.es/tifrontal/a-3470-Cinta-transportadora-modular-posible-dise%C3%B1ar-rutas-flexibles.aspx>

### **Ventajas y desventajas de transportadores de banda:**

#### **Ventajas**

- ✓ Permiten el transporte de materiales a gran distancia.
- ✓ Tienen una gran capacidad de transporte.
- ✓ No altera el producto transportado.
- ✓ Es posible la carga y la descarga en cualquier punto del trazado.
- ✓ Permiten transportar una variedad grande de materiales.
- ✓ Construcción y montaje simple.

#### **Desventajas**

- ✓ No pueden transportar cargas en grandes pedazos y a elevadas temperaturas.
- ✓ Pendientes limitadas.

### 7.3 Transportadores de cadena:

Si los transportadores de cadena se comparan con los de cinta, tienen características que los distinguen; barata construcción, operación ruidosa e ineficiencia mecánica. Sin embargo, en ciertas situaciones se adaptan correctamente al proceso.

Los principales componentes de estos transportes son: las cadenas, los elementos de movimiento y los motores. Dentro de este grupo podemos encontrar los rascadores como su muestran en la figura. <sup>[5]</sup>



Imagen 56: Transportador de cadena

<http://www.casp.com.br/produtos-int.php?id=7&idioma=E>

#### Ventajas y Desventajas de Transportadores de Tablillas:

##### Ventajas.

- ✓ Pueden transportar cargas pesadas a elevadas temperaturas.
- ✓ Admiten una amplia gama de trazas con diferentes radios de curvatura, menores que los transportadores de banda.

##### Desventajas.

- ✓ Elevado peso, propio de las tablillas y las cadenas.
- ✓ Elevado costo por la complejidad de su fabricación.
- ✓ Mantenimiento complejo debido al gran número de articulaciones.

#### 7.4 Transportadores de rodillos:

En este caso la banda es remplazada por una serie de rodillos consecutivos que pueden girar al unísono por una cadena de tracción que les daría la fuerza motriz para desplazar el material, o bien pueden ser rodillos libres de girar en su eje sin mayor esfuerzo para el caso de los sistemas sin cadena de tracción impulsados por gravedad.

Su clasificación sería la siguiente:

- ✓ Por gravedad: Como su nombre indica, este dispositivo se apoya en la fuerza de gravedad del objeto para que se deslice entre los rodillos.
- ✓ De rodillos por banda: En este tipo de transportadores, los rodillos son accionados por medio de una banda, se utilizan para mover objetos de pequeño y mediano peso
- ✓ De rodillos accionados por cadena: En este tipo de transportadores los rodillos son accionados por medio de una cadena que transmite el movimiento de rodillo a rodillo; este tipo de transportadores se utiliza para mover equipos pesados producto a la resistencia de la cadena.



Imagen 57: Transportador de rodillos

<http://www.penaycia.com/sistemas-de-transportadores/transportadores-de-rodillos.aspx>

Así mismo, los rodillos por ser un elemento presente en varios tipos de transportadores, en algunos como pieza intermedia entre el órgano de tracción y el elemento transportador como puede ser en transportadores de banda, bandejas, tablillas o bien puede transportarse el producto directamente sobre los rodillos tienen ciertas características especiales que los diferencian.

- **Rodillos de Alineación:** Sirven para alinear la banda dentro de la propia instalación.
- **Rodillos de Impacto:** Están recubiertos de discos de goma para absorber los golpes provocados por la caída de bloques en las tolvas de recepción.
- **Rodillos de Retorno:** Están formados con discos de goma.
- **Rodillo Cilíndrico:** Tienen la superficie exterior lisa, tal como la obtenida mediante el empleo de tubos de acero; es el más empleado.
- **Rodillo Cilíndrico con Aros de Goma:** Son adecuados para soportar los fuertes impactos del material en las zonas de carga, mientras que si se montan en los rodillos de retorno, deben ser adecuados para facilitar la limpieza de la banda

### **Ventajas y Desventajas de Transportadores de Rodillos:**

#### **Ventajas**

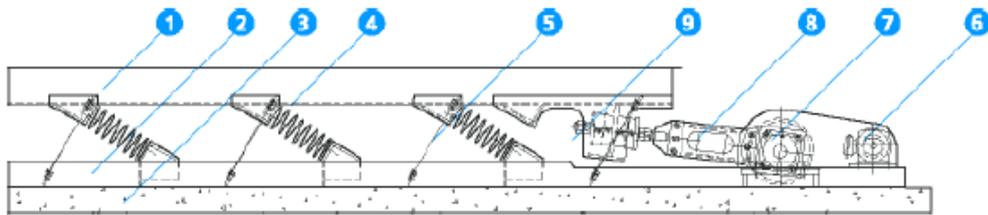
- ✓ Desgaste mínimo y fácil mantenimiento.
- ✓ Bajo consumo de energía.
- ✓ Bajos niveles de ruido.
- ✓ Construcción y montaje simple comparado con otros transportadores.
- ✓ Se mueven con gran suavidad y sin ruido.

#### **Desventajas.**

- ✓ Elevado peso, propio de los rodillos y las cadenas.
- ✓ No admiten una amplia gama de trazas diferentes con radios de curvatura
- ✓ No pueden transportar cargas pesadas, en grandes pedazos y a elevadas temperaturas.
- ✓ La carga debe estar en correspondencia con el espaciado de los rodillos.

## 7.5 Transportadores Vibratorios u Oscilantes también llamados de sacudidas o de Inercia:

La mayoría de los transportadores vibratorios son esencialmente de impulso direccional y constan de una placa horizontal sobre resortes, que vibran gracias a un brazo excéntrico de conexión directa, pesos excéntricos giratorios, electroimán o un cilindro neumático o hidráulico. El movimiento impartido a las partículas de material puede variar, pero su finalidad es la de impulsar el material hacia arriba y hacia adelante, de modo que se desplace a lo largo de la trayectoria del transportador en una serie de saltos cortos. <sup>[3]</sup>



- |                                                 |                            |
|-------------------------------------------------|----------------------------|
| ① Bandeja transportadora                        | ⑥ Motor                    |
| ② Contrapeso                                    | ⑦ Transmisión reductora    |
| ③ Composición de las fundaciones                | ⑧ Sistema biela – manivela |
| ④ Material a transportar                        | ⑨ Muelas de acoplamiento   |
| ⑤ Flejes planos laterales (guía del movimiento) |                            |

*Imagen 58: Elementos que componen un transportador vibratorio.*

Mavi máquinas vibratorias LTDA. Principio de funcionamiento del transportador vibratorio Revitran. Brasil, noviembre 2002. <http://Mavi.com.br/brasil/revitran/funcio.htm/>

**La capacidad de estos transportadores está determinada por:**

- ✓ Magnitud de desplazamiento de la artesa.
- ✓ Ángulo de impulsión.
- ✓ Frecuencia del desplazamiento.
- ✓ Pendiente del canal.
- ✓ Impulso direccional de la artesa.



Imagen 59: Transportador vibratorio

<http://www.teknamotor.es/index.php?tekna=transp2a>

Para tener un transporte adecuado, se debe tener en cuenta un factor muy importante: el material, debe tener un elevado factor de fricción interna, para que la acción del transporte se transmita a lo largo de toda la profundidad.

También debe ser lo suficientemente denso, para minimizar los efectos de la resistencia que opone el aire en su trayectoria. Las pruebas han demostrado que se manejan mejor los materiales granulares que los pulverizados y mejor las formas planas o irregulares que las esféricas. <sup>[3]</sup>

### Clasificación de los transportadores vibratorios.

#### 1. Según la forma de contacto entre el material y el canal.

- ✓ De presión adherente constante.
- ✓ De presión adherente variable.

#### 2. Según el origen de la vibración.

- ✓ Por vibraciones eléctricas.
- ✓ Por motores desequilibrados.
- ✓ Por vibraciones mecánicas
- ✓ Por vibraciones causadas por medios hidráulicos y neumáticos.

### 7.5.1 Transportadores por Vibraciones Eléctricas:

Se caracterizan por el hecho de que no hay contacto entre la unidad motriz y el medio de transporte. Funcionan según un ciclo de impulso y liberación o impulso y empuje, utilizando corriente continua y electroimanes pulsantes o una corriente alterna combinada con imanes permanentes y electroimanes. <sup>[3]</sup>

### 7.5.2 Transportadores Vibratorios por motores desequilibrados:

“Estos transportadores pueden manejar una amplia gama de materiales, desde tamaños gruesos hasta pulverulentos y la longitud máxima de transporte recomendada es de 5 metros.

El transportador se acciona mediante un motor desequilibrado (forma especial del motor eléctrico); se monta directamente sobre el dispositivo de trabajo (canal). No requiere de transmisión por correa, engranaje o levas. Los movimientos vibratorios elípticos, circulares o lineales del dispositivo de trabajo pueden ser producidos dependiendo del arreglo del motor. Por ejemplo, cuando se usan unidades de impulsión dobles, donde los motores rotan en direcciones opuestas, se produce un movimiento vibratorio lineal según lo requerido para transportadores longitudinal”. <sup>[3]</sup>

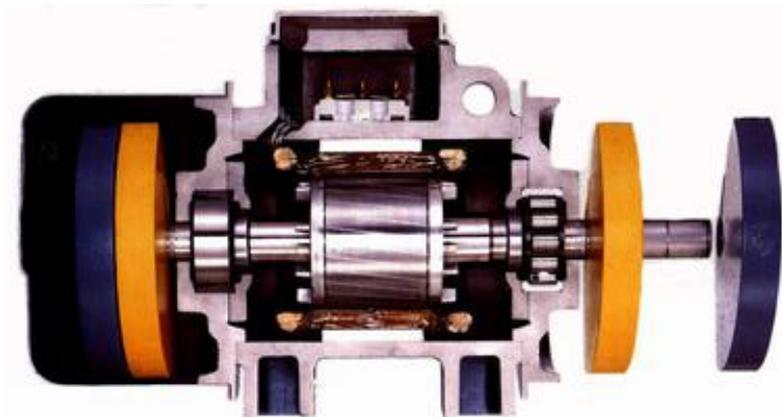


Imagen 60: Motor desequilibrado

[http://www.aviteq.de/en/products/drives/unbalanced\\_motors.html](http://www.aviteq.de/en/products/drives/unbalanced_motors.html)

### 7.5.3 Transportadores por vibraciones mecánicas:

Estos transportadores fueron diseñados para manipular materiales con las mismas características que los transportados en vibradores eléctricos, sobre grandes distancias pero con más bajo costo que estos.

Una unidad de este tipo ofrece ventajas en auto limpieza, transporte de abrasivos y materiales desmenuzados.

Generalmente es una excéntrica simple, conectada directamente a la plataforma. Este generador es diseñado de acuerdo al peso y longitud de la bandeja. Cuando las distancias son grandes se deben utilizar dos excéntricas. <sup>[3]</sup>

### 7.5.4 Transportadores por vibraciones causadas por medios hidráulicos y neumáticos:

Son adecuados para trabajar en ambientes donde haya disponibilidad de aceite, agua o aire a presión, pueden ser extremadamente prácticos, puesto que su diseño de unidad motriz es relativamente simple y se pueden usar válvulas de control de presión para hacer variar la capacidad, ya sea en forma manual o automática.

### 7.5.5 Aplicación especial para transportadores vibratorios:

Además de la transportación de materiales los transportadores vibratorios pueden tener otras aplicaciones, una de las más utilizadas es la clasificación de material granular por vibraciones. En estos sistemas la vibración se logra por cualquiera de los métodos estudiados hasta ahora pero tiene la particularidad que los productos se mueven por una serie de tamices que pueden tener como objetivos:

- ✓ Retirar las partículas finas o degradadas del material antes de someterlo a un proceso posterior como reducción de tamaño en filtradores.
- ✓ Obtener un producto de grado comercial que satisfaga los límites específicos de tamaño de partículas.
- ✓ Eliminar los materiales atrapados o de tamaño excesivo.



Imagen 61: Separador vibratorio

<http://www.refinaciondeaceites.com/planta-de-procesamiento-de-aceite/separador-vibratorio.html>

## 7.6 Transportadores Neumáticos.

Los transportadores neumáticos llevan material seco, granulado, de libre circulación en suspensión dentro de un tubo o conducto por medio de una corriente de aire con alta velocidad. En la mezcla con aire se transportan, materiales en polvo, fibrosos finos o granulados y su desplazamiento se basa en imprimir velocidad a la carga por el flujo de aire motriz. Los aparatos neumáticos para transportar carga en mezcla con aire tienen una productividad hasta 400 t/h, la longitud de transportación hasta 2.14 km y la altura de transportación hasta 100 m. Según sea el procedimiento de crear el movimiento del aire por las tuberías, las instalaciones neumáticas se dividen en las aspiradoras, las compresoras y las mixtas. <sup>[3]</sup>

### Sus usos principales son:

- ✓ Recolección de polvo.
- ✓ Transporte de materiales blandos (granos, alimentos secos, productos químicos, astilla de madera, etc.).
- ✓ Transporte de materiales duros (ceniza volátil, cemento, minerales metálicos, etc.).

### La capacidad de un sistema neumático de transporte depende de:

- ✓ La densidad de masa del producto (además de la forma y tamaño de las partículas).
- ✓ El contenido de energía del aire de transporte a lo largo de todo el sistema.
- ✓ El diámetro de la línea de transporte.
- ✓ La longitud equivalente de la línea de transporte.

### 7.6.1 Componentes de un sistema neumático.

Los sistemas de vacío o de succión, tiene amplias aplicaciones. Este sistema consta, en general, de los siguientes componentes: Un ventilador de presión positiva, un sistema de tubería y un colector o separador, donde el material es separado del aire de conducción.



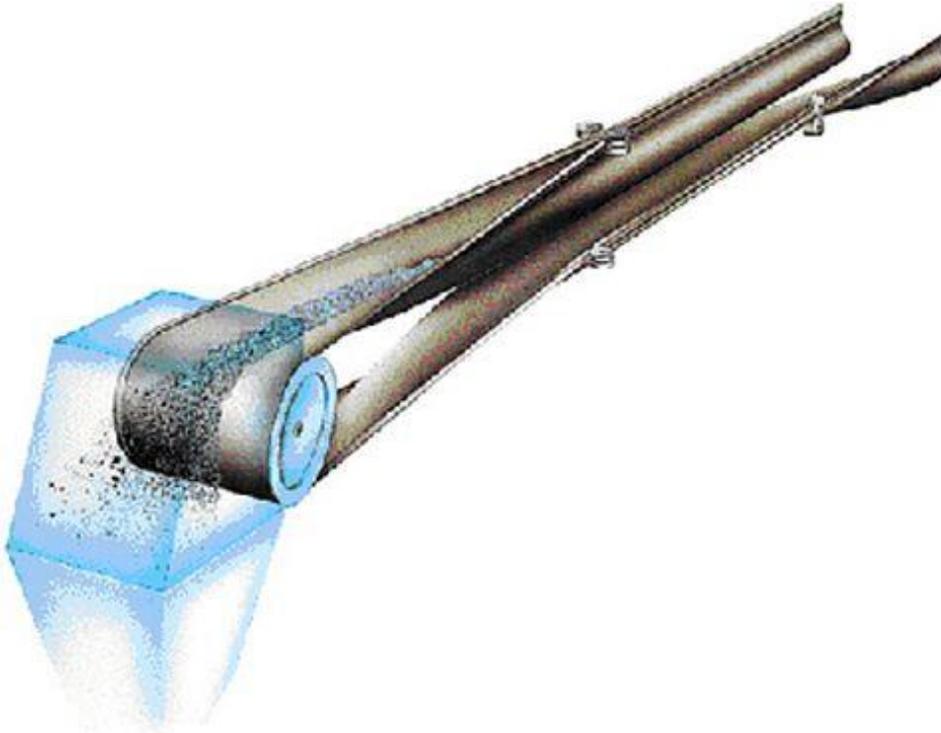
Imagen 62: Transportador Neumático

[http://www.innovacionesoleicolas.com/io\\_10.html](http://www.innovacionesoleicolas.com/io_10.html)

Las ventajas del transporte neumático residen en la posibilidad de desplazar a grandes distancias, sin transbordos, por una línea compleja con ascensiones bajo cualquier ángulo y por la vertical, la productividad, sin necesidad de equipo mecánico en la línea de la tubería, la sencillez de explotación y la posibilidad de automatización completa. Sin embargo, la limitación por la naturaleza y características de los materiales a desplazar según su tamaño, el intensivo desgaste de las tuberías y el elevado consumo de energía disminuyen la esfera de aplicación de este tipo de transporte. <sup>[7]</sup>

### 7.7 Transportador de banda cerrada:

Este dispositivo, con cremallera cuyos dientes se engranan para formar un tubo cerrado, es particularmente adaptable para el problema de manejo de materiales frágiles que no pueden sufrir degradaciones. Puesto que la banda envuelve firmemente al material, este último se desplaza con ella y no se ve sujeto a ninguna forma de movimiento interno, excepto en los puntos de alimentación y descarga. Además, la banda puede funcionar en muchos planos, con torsiones y vueltas para afrontar casi cualquier condición de disposición dentro de los límites fijos de curvatura de la banda cargada. Puede transportar y elevar con una sola unidad motriz y es fácil disponer puntos múltiples de alimentación y descarga. <sup>[3]</sup>



*Imagen 63: Transportador de banda cerrada*

<http://www.cintasa.com/productos/cerrada.php>

La nueva banda transportadora cerrada presenta todas las ventajas de las bandas transportadoras convencionales, a la vez que aporta otros beneficios que la transforman en un sistema de transporte técnica y económicamente óptimo. La banda transportadora cerrada consta de componentes de eficacia probada, lo que garantiza la misma confiabilidad de los sistemas de banda transportadora más antiguos.

#### **Ventajas:**

- ✓ Diseño compacto
- ✓ Protección para los materiales de los efectos externos. (Lluvia, nieve, viento).
- ✓ Inclinación de hasta 30 grados (dependiendo del material que se esté transportando).
- ✓ Configuración flexible del sistema con curvas horizontales cerradas y radios verticales cerrados lo que le permite adaptarse bien a distintos tipos de terrenos.
- ✓ Se logra proteger el medioambiente durante el transporte de materiales peligrosos, contaminados, sucios o que generen fuertes olores.

- ✓ Se reduce la volatilidad de los materiales y se evita la falsificación resultado de la sustracción o adición de partes del material.
- ✓ Requisitos mínimos de espacio gracias a su diseño compacto.
- ✓ El sistema de banda transportadora cerrada presenta una gran fortaleza, y permite el transporte a largas distancias sin necesidad de estaciones de transferencia intermedias.
- ✓ La configuración especial de los tensores en la banda asegura una operación estable de la misma y un buen sellado de la zona de superposición.

### 7.8 Transportadores de paleta:

Los transportadores de paletas se utilizan para mover materiales granulares, en terrones o pulverizados, a lo largo de una trayectoria horizontal o sobre un plano inclinado (generalmente no superior 45°). Consisten básicamente de una cadena, en cuyos eslabones van unidas las paletas que se encargan de arrastrar el material, son auto cargables, es decir, no requieren de un alimentador. La mayoría de las aplicaciones de los transportadores de paleta son diseños abiertos para operaciones de transporte en bruto, pero algunos se construyen con cubiertas totalmente cerradas. [3]



Imagen 64: Transportador de paletas

<http://www.abc-pack.com/productos/transportador-de-paletas-tipo-redler/>