



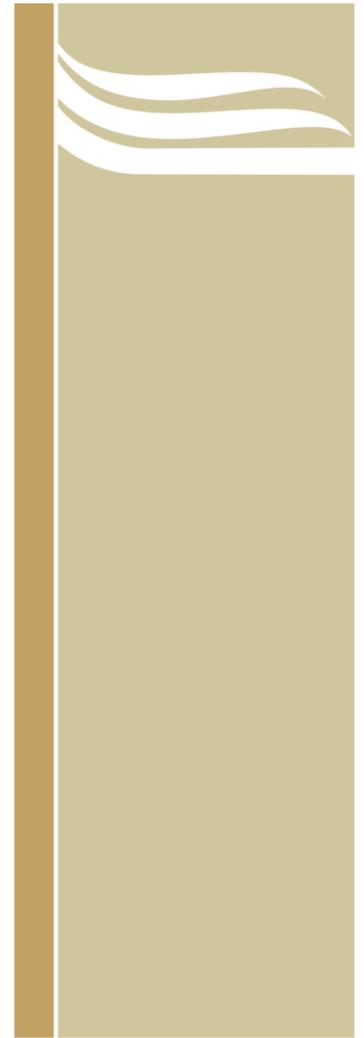
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería
Mecánica

Trabajo de Diploma

**Título: Análisis de la rotura del árbol de transmisión
delantero del autocarril TD5M**

Autor: Javier Castillo Camilo

Tutor: M.Sc. Gilberto Israel Gurri Villafruela



Tipo de curso: CRD

Curso: 2016-2017

Resumen

El presente trabajo fue realizado en el Taller de Mantenimiento de la Empresa de ferrocarriles de Holguín, el mismo consiste en determinar las causas de falla por rotura del árbol de transmisión delantero del motor de vía o autocarril TD5M, el cual se fractura durante el servicio por el lado derecho, entre el rodamiento alojado en la chumacera y el núcleo de rueda. Para la realización de este estudio se partió de la caracterización del material empleando para ello distintos métodos de análisis, tales como, el análisis químico y fractográfico y se realizaron además los cálculos de las cargas que intervienen en el sistema de transmisión de fuerzas para el posterior análisis de simulación de tensiones a torsión por el método de elementos finitos, para lo cual se empleó el software de diseño Solidworks 2016. Finalmente se muestran los resultados del estudio y se establecen las causas que se estiman produjeron la falla por rotura de esta pieza, así como, se proponen posibles soluciones para evitar la rotura y elevar la fiabilidad y durabilidad del mismo.

Abstract

The current work was carried out in the Maintenance Shop of the railroads Company of Holguín, which involves the basic in fracture study modes, as well as, the mechanisms of failure process in order to determine the fracture causes in the transmission axle of the auto-lane motor TD5M, which breaks during the service on the right side, housed between the ball bearing and the nucleus of the wheel. The study started by the characterization of the material using for it several analysis methods for the study, such as, the chemical composition and Fractography analysis, as well as, the calculations of the loads of the transmission system of forces for the next simulation analysis of tension and torsion by the finite-element method, using for it the design software of Solidworks 2016. Finally the investigation shows the studies results and establish the estimated failure causes produced by fracture in the axle, as well as, the possible solutions that are intended to avoid the breaking of these and the same time to increase the reliability and durability during their exploitation.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Pág.

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DEL AUTOCARRIL TD5M.	5
1.1. El transporte Ferroviario	5
1.2. El autocarril TD5M	6
1.3. Principales elementos del sistema de transmisión del autocarril con remolque	9
1.3.1. Transmisión de fuerzas	9
1.3.1.1. Embrague	10
1.3.1.2. Caja de velocidad	10
1.4. Conjunto de ruedas	13
1.4.1. Características generales del par de ruedas	13
1.4.1.1. Requisitos y exigencias técnicas para las ruedas	13
1.4.1.2. Defectos más frecuentes de las ruedas de los vagones	14
1.5. Árboles de transmisión	15
1.5.1. Árboles y ejes	15
1.5.2. Elementos que acoplan con los árboles	15
1.6. Transmisión por cadenas. Generalidades	17
1.7. Árboles de transmisión del autocarril TD5M	19
1.8. Materiales utilizados para la fabricación de los árboles del autocarril	21
1.9. Tratamientos térmicos aplicados a los árboles	22
1.9.1. Ejemplos de tratamientos térmicos aplicados a los árboles del autocarril	25

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	Pág.
1.10. Fallos más frecuentes en los árboles de transmisión	25
1.10.1. Árboles sometidos a esfuerzos combinados	26
1.10.2. Efecto de los chaveteros sobre los ejes y árboles	
1.11. Defectos más frecuentes de los árboles de transmisión del autocarril	26
1.11.1. Requisitos de calidad de los árboles de transmisión del autocarril TD5M	27
1.12. Estudios que se realizan a los árboles y ejes de transmisión	27
1.12.1. Análisis químicos	28
1.12.2. Análisis fractográficos	28
1.12.2.1. Características de las fracturas	29
1.12.2.2. Zona de propagación de la fisura	31
1.12.3. Ensayos de dureza	33
1.12.4. Estudios por el método de elementos finitos	34
 CAPÍTULO 2. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS. ANÁLISIS DE FALLAS, CÁLCULOS DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA Y SIMULACIÓN POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	 37
2.1 Resultados del análisis físico - químico	37
2.1.1 Análisis químico	37
2.1.2 Análisis de dureza	37
2.1.3 Análisis fractográfico	37
2.2 Análisis de las fuerzas que actúan sobre el árbol tractivo del autocarril TR5M	39
2.3 Cálculo de las fuerzas que intervienen en la transmisión de potencia	40

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Pág.

2.3.1	Cálculo de la eficiencia de la transmisión de potencia	40
2.3.2	Cálculo de la eficiencia de la caja de velocidad (η_2) para la marcha	41
2.3.3	Cálculo de la eficiencia del reenvío (η_4) del autocarril TD5M	42
2.3.4	Cálculo del momento torsor que llega al árbol de transmisión del autocarril TD5M	43
2.3.4.1	Cálculo de la potencia que llega al árbol de transmisión del autocarril TD5M	43
2.4	Resultados obtenidos del análisis estático del árbol de transmisión del autocarril TD5M. Acero AISI 1045	44
2.4.1	Modelado, cargas y restricciones aplicadas al árbol.	45
2.4.2	Valoración de los resultados obtenidos del análisis estático. Acero AISI 1045	47
2.5	Propuesta de un nuevo material para la fabricación del árbol del autocarril TD5M	49
2.5.1	Régimen tecnológico de tratamiento térmico a aplicar al árbol de transmisión delantero del autocarril TD5M	51
2.6	Resultados obtenidos del análisis estático del árbol de transmisión del autocarril TD5M. Acero AISI 5140	52
2.6.1	Estudio tensional	52
	CONCLUSIONES	56
	RECOMENDACIONES	57
	BIBLIOGRAFÍA	58
	ANEXO	60

Introducción

El origen del autocarril también conocido por motor de vía o autovía nace con el surgimiento del ferrocarril que podría remontar a la civilización egipcia y época grecorromana. La primera noticia de un sistema de transporte sobre carriles fue una línea de 3 kilómetros que seguía el camino que se utilizaba para transportar botes sobre plataformas a lo largo del Istmo de Corinto la franja que une la península del Peloponeso con la Hélade, la parte de la Grecia continental durante el siglo VI a. c. La línea se mantuvo funcionando durante 600 años.

En el siglo XVI los mineros alemanes realizaban el traslado del mineral empleando el transporte subterráneo utilizando para ello vagones que se deslizaban sobre dos maderas planas en series, método que empezó a dar forma al nacimiento del ferrocarril actual. En el siglo XVIII, los trabajadores de diversas zonas mineras de Europa descubrieron que las vagonetas cargadas se desplazaban con más facilidad si las ruedas giraban guiadas por un carril hecho con planchas de metal, ya que de esa forma se reducía el rozamiento. Los carriles para las vagonetas sólo servían para trasladar los productos hasta la vía fluvial más cercana, que por entonces era la principal forma de transporte de grandes volúmenes.

Después del descubrimiento de la máquina de vapor por parte de Watt en 1770 se construye la primera locomotora de vapor por medio de Richard Trevithick el 13 de abril de 1771 en Inglaterra, cuyo cometido fue el del transporte de embralos (por primera vez en el mundo) a una velocidad superior al paso del hombre.

Transcurrieron dos décadas durante las cuales se desarrollaron los raíles de hierro fundido que soportaban el peso de una locomotora de vapor y mas tarde en lugar de uno o dos vagones se desarrollaron locomotoras con potencia para arrastrar trenes, lo cual se aseguró colocando en la locomotora de vapor dos o más árboles unidos a las ruedas mediante bielas. (1)

La historia del ferrocarril en Cuba comenzó cuando María Cristina de Borbón, reina de España de 1829 a 1833 y regente desde 1833 a 1840, autorizó a la Junta de Fomento el 12 de diciembre de 1834 a hipotecar sus rentas para amortizar un préstamo con Inglaterra, lo que permitió el comienzo y la realización de la construcción de la primera línea de ferrocarril en la Isla. La responsabilidad estuvo a cargo de la empresa Compañía de Caminos de Hierro de La Habana, en la cual construyó los 27,5 kilómetros entre San Cristóbal de La Habana y Santiago de Bejucal, el 19 de noviembre de 1837, convirtiéndose en el primer ferrocarril de Latinoamérica y predecesor del de España. Cuba, la colonia caribeña, se le adelantó a la metrópoli en 11 años. La Real Junta de Fomento inauguró solemnemente el primer ferrocarril de Cuba. (2)

El presente trabajo fue realizado en el Taller de Mantenimiento de la Empresa de Ferrocarriles de Cuba de la provincia de Holguín, donde el autocarril, también conocido como motor de vía o Autocarril con Remolques, es el vehículo utilizado para el mantenimiento y reparación de las líneas férreas, que en reiteradas ocasiones ha presentado roturas en los árboles de las ruedas incurriendo así en lamentables accidentes, tales como, los ocurridos en el kilómetro 714,500 de la Línea Central, el día 4 de junio del 2012 a las 15.00 horas en el tren extra motor de vías No. 96667 perteneciente al servicio de Vías y Obras, el cual circulaba entre las estaciones de Cacocúm y Mir y posteriormente el ocurrido el día 12 de agosto del 2016, a las 10.40 horas en el kilómetro 38,0 en el ramal Antilla, donde en ambos casos se produce el descarrilamiento completo del autocarril al partirse el lado derecho del árbol de transmisión delantero, donde se encuentra ubicado el núcleo de rueda y la zona de alojamiento del rodamiento en el árbol. Por lo que se hace necesario realizar un estudio para determinar las causas que originan los fallos por roturas en los árboles de transmisión delantero del autocarril TD5M y proponer soluciones al mismo.

Situación problemática

El árbol de transmisión delantero del autocarril TD5M ha presentado problemas en su funcionamiento, provocando reiterados accidentes por roturas, afectando así la durabilidad y fiabilidad durante su explotación.

Problema de científico de la Investigación

Las frecuentes fallas por rotura del árbol de transmisión delantero del autocarril TD5M afecta la durabilidad, eficiencia y fiabilidad durante su funcionamiento.

Objeto de estudio

Autocarril TD5M.

Campo de estudio

Las roturas en el árbol de transmisión delantero del autocarril TD5M.

Hipótesis

Si se determinan las posibles causas que originan las fallas en los árboles de transmisión delantero del autocarril TD5M, entonces se podrá influir en la fiabilidad, durabilidad y eficiencia durante su explotación.

Objetivos de la investigación

1. Determinar posibles causas de roturas que provocan las fallas en los árboles de ruedas del autocarril TD5M empleando métodos de investigación físico - químicos y fractográficos.
2. Realizar estudios de simulación tensionales por el método de elementos finitos aplicando para ello el software de diseño SolidWorks 2016.
3. Plantear soluciones técnicas para evitar las fallas durante el funcionamiento del árbol de transmisión del autocarril TD5M.

Tareas:

1. Realizar una búsqueda bibliográfica sobre las irregularidades presentadas en los árboles y pares de ruedas de los vagones de ferrocarril.
2. Realizar estudios químicos y fractográficos para determinar las posibles causas de roturas de los árboles.
3. Realizar la modelación y estudio tensional por el método de elementos finitos (FEM, Finite Element Method) del árbol de transmisión del autocarril TD5M.
4. Elaborar el informe final.

Métodos de investigación:

Empíricos:

- **Consultas a expertos:** nos permite que la investigación tenga en cuenta los conocimientos más actualizados y usados.
- **Observación:** se realiza para detectar y analizar las características de trabajo de la pieza y posibles fallos que pueda presentar.
- **Revisión y análisis de documentos:** se realiza para la recopilación y análisis de la información sobre el problema, antecedentes y estado actual.

Teóricos:

- **Análisis y síntesis:** se utiliza para identificar los factores principales y necesarios de cada una de las bibliografías consultadas.
- **Histórico-lógico:** se emplea para la búsqueda y análisis de los antecedentes del objeto de estudio.

Resultados esperados: Con la realización de este trabajo se podrá contar con información altamente valiosa para la toma de decisiones en función de la mejora de la explotación del autocarril TD5M

CAPÍTULO 1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO Y CARACTERÍSTICAS DEL AUTOCARRIL TD5M.

1.1 El transporte ferroviario.

Desde tiempos antiguos, los medios de transporte han sido una condición indispensable para el desarrollo de las sociedades humanas y es tan necesario su uso, que hoy no es posible concebir la sociedad moderna sin su participación. Para realizar las transportaciones el hombre utiliza desde tiempos antiguos las vías terrestres, fluviales y marítimas, a partir del siglo XX se comienza a emplear la vía aérea; las características de estas vías de comunicación determinan a su vez las características propias de los medios de transporte, y con ello su gran diversidad.

Los medios de transporte terrestres se presentan en una gran variedad, pero de forma genérica se subdividen en los conocidos: transporte automotor y transporte ferroviario

A partir de la diversificación de los medios de transporte, el hombre ha tenido que decidir qué vehículo o medio de transporte usa, cuántos viajes necesita efectuar, qué esfuerzo realizará, qué tiempo empleará para realizar la actividad, qué consumo de recursos materiales, humanos y financieros tendrá, para hacer más productivas y organizadas sus transportaciones (3).

El ferrocarril puede considerarse sin error el medio de transporte que acumula más vasta experiencia, porque si bien es cierto que el transporte marítimo y aún más el terrestre por rueda con tracción animal tienen más antigüedad, no puede hablarse de industrialización del transporte hasta el momento del surgimiento y desarrollo de la máquina de vapor y con ello el inicio del ferrocarril, en el contexto histórico de la Revolución Industrial en el Siglo XVIII. (1)

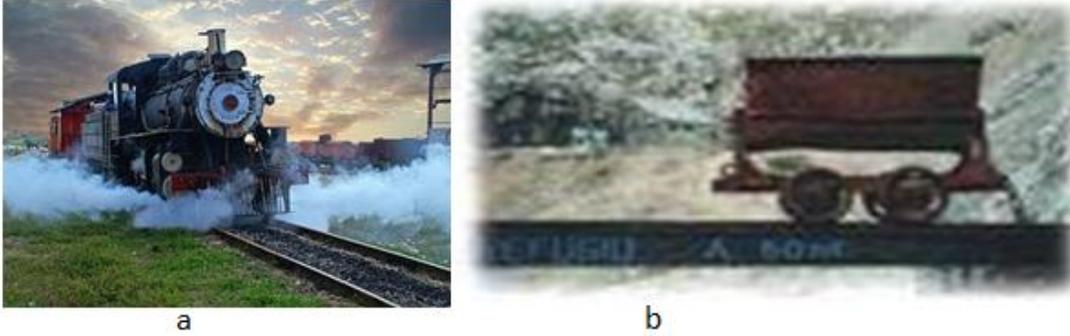


Figura 1.1 Explotación ferroviaria. (1)

Es por ello que el ferrocarril ha desarrollado a través de muchos años una técnica ferroviaria cada vez más perfecta dirigida en varias direcciones, haciendo cada vez más económica la operación ferroviaria, el desarrollo de cada vez más altas velocidades en la búsqueda de niveles óptimos de eficiencia.

El ferrocarril (del latín: ferrum, hierro, y carril) o transporte ferroviario es un sistema de transporte de personas y mercancías guiado sobre una vía férrea.

La vía férrea forma parte de la infraestructura ferroviaria estas son el elemento esencial de la infraestructura ferroviaria y constan, básicamente, de carriles apoyados sobre traviesas que se disponen dentro de una capa de balasto. Para su construcción es necesario realizar movimiento de suelos y obras complementarias (puentes, alcantarillas, muros de contención, drenajes).

Aunque normalmente se entiende que los carriles o rieles son de acero o hierro, que hacen el camino o vía férrea sobre la cual circulan los trenes.

1.2 El Autocarril TD5M.

El Autocarril TD5M (4) (ver figura 2) es un medio desmontable de las vías de ferrocarril, consta de dos remolques y se utiliza para la transportación de trabajadores, instrumentos, diferentes materiales y mecanismos hasta el lugar del trabajo en la vía.

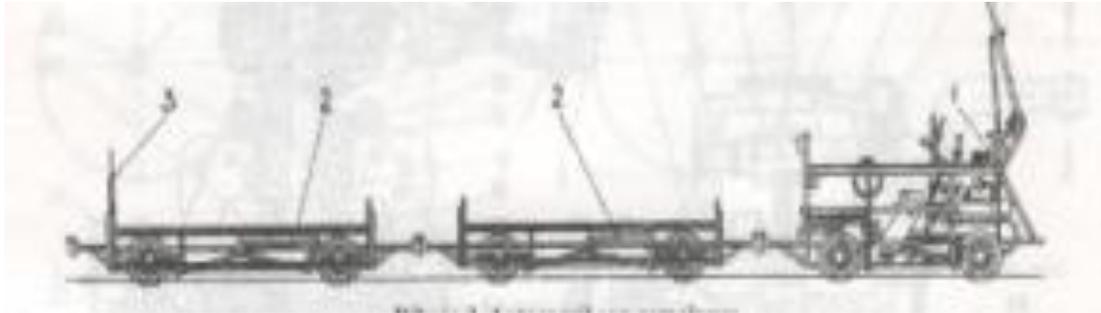


Figura 1.2 Autocarril TD5M desmontable con dos remolques (4)
1-autovia, 2-remolque, 3-disco de señales.

Los remolques se utilizan para la transportación de elementos de largas longitudes. Estos se unen entre sí mediante las barras de unión; así como: el Autocarril a los remolques. Como se muestra en la figura 1.2 y 1.3.

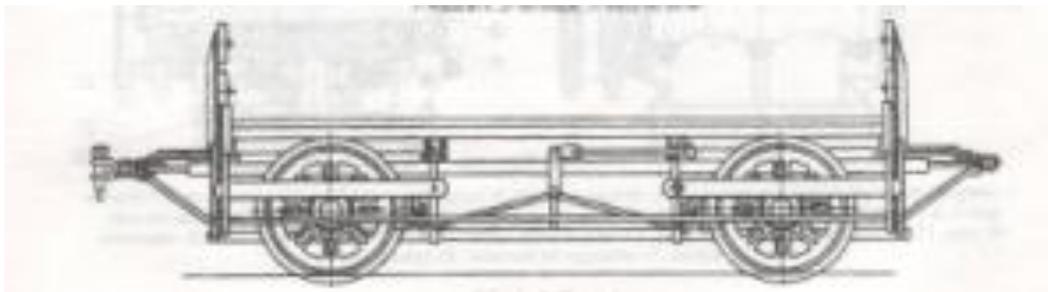


Figura 1.3 Remolque del autocarril (4)

En la figura 1.4 a) y b) se presenta una foto del Autocarril TD5M con motor INZ-8.103-00011-01 y sus partes componentes y en la tabla 1.1; 1.2 y 1.3 se exponen las principales características y requisitos técnicos dados por el fabricante.

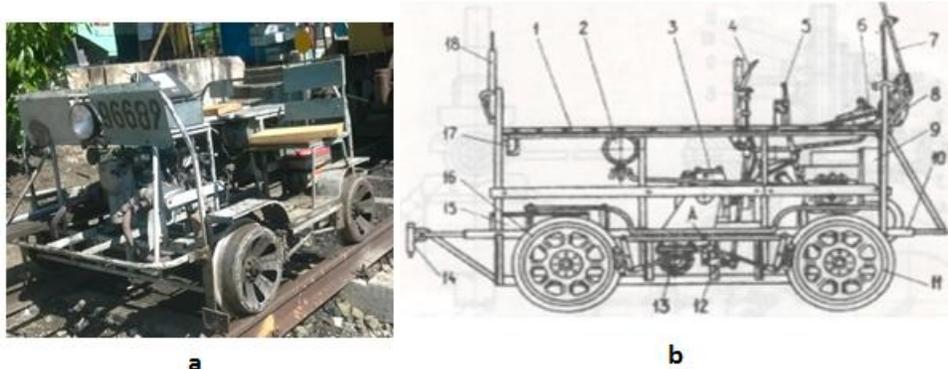


Figura 1.4 Autocarril TD5M

a) Autocarril en la vía férrea; b) Partes componentes. (4)

1 - revestimiento de asiento, 2 - depósito de gasolina, 3 - contra marcha, 4 - palanca de mano del embrague, 5- manilla de mano de mariposas del gas de los carburadores, 6 - tablero instrumentos, 7- parabrisas, 8 - faro, 9 - motor, 10 - bastidor, 11 - par de ruedas delanteras, 12- sistema de frenado, 13 - reenvío, 14 - enganche, 15 -portaequipajes, 16 - par de ruedas trasera, 17 - luz trasera, 18 - disco de señales, A - orificio de control.

Tabla 1.1. Características tractiva del autocarril TD-5 (4)

PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS AUTOCARRIL TD5M CON REMOLQUES	
Ancho entre árboles, mm.	1520 (1435) +-3
Capacidad de carga permisible, kg.	500 (o 6 personas incluyendo el conductor)
Un Remolque	1000 (o 10 personas)
Dos Remolques	2000 (o 20 personas)
Velocidad máxima permisible, km/h	50
Gasto controlado de combustible en 100 km.	8
Cantidad de árboles motores	2

Tabla 1.2. Características técnicas del remolque. (4)

PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS AUTOCARRIL TD5M CON REMOLQUES	
Recorrido de frenado a 50 km con carga 2000 kg, no mayor, m	45
Autocarril, Medidas, mm <ul style="list-style-type: none"> • Largo • Ancho • Altura: con parabrisas <li style="padding-left: 40px;">sin parabrisas • Masa, kg 	2188 1590 (1680) 1685 1040 342 (332)
Remolque, Medidas, mm <ul style="list-style-type: none"> • Largo • Ancho • Altura • Masa, kg 	2788 2077 (2166) 675 247 (237)

Tabla 1.3. Requisitos técnicos del motor. (4)

Motor	4 tiempos, carburador de 2 cilindros con válvulas superiores.
Potencia máxima, kW	26,5
Frecuencia de giro del árbol de levas, en correspondencia con la potencia, min^{-1} , no mayor.	5900
Momento de torsión máximo, Nm	47
Frecuencia de rotación del cigüeñal, correspondiente al momento torsional máximo, min^{-1} , no mayor de	5200

1.3 Principales elementos del sistema de transmisión del Autocarril TD5M con remolque.

1.3.1 Transmisión de fuerzas.

Al sistema de transmisión de fuerza pertenecen: el embrague, la caja de velocidades, la contramarcha, la transmisión por cadena entre los dos árboles y el reenvío. (4)

La transmisión de la autovía consta de grupos unidos entre sí, los cuales están destinados a transmitir el momento de torsión del cigüeñal del motor a la contramarcha, asimismo como a variar el esfuerzo de tracción sobre las ruedas motrices.

1.3.1.1 Embrague.

El embrague cuenta con dos accionamientos de mando: la palanca de mando del embrague (mando manual) y el pedal de cambio de velocidades (accionamiento con el pie). El embrague seco consta de dos discos el cual está destinado a transmitir el momento torsional del motor a la caja de velocidades, desembragar el motor de la caja de velocidades durante el cambio de velocidades y para el embrague suave al comenzar la marcha el motor de vía. El embrague consta también de piezas conducidas y conductoras y de un mecanismo de desembrague. Dentro de las piezas fundamentales del embrague se encuentran el volante y los discos. Un empleo correcto del embrague eleva considerablemente su plazo de servicio. Un embrague brusco a elevada frecuencia de rotación del cigüeñal del motor trae, no solo el rápido desgaste de las guarniciones de fricción de los discos, sino que sobrecarga las piezas de la transmisión elevando así el desgaste de la rueda. (4)

1.3.1.2 Caja de velocidad.

La caja de velocidad consta de dos árboles, cuatro tapas, con transmisión de marcha atrás y mecanismo de embrague automático durante el cambio de velocidades. La estructura de la caja de velocidades se muestra en la figura 1.5

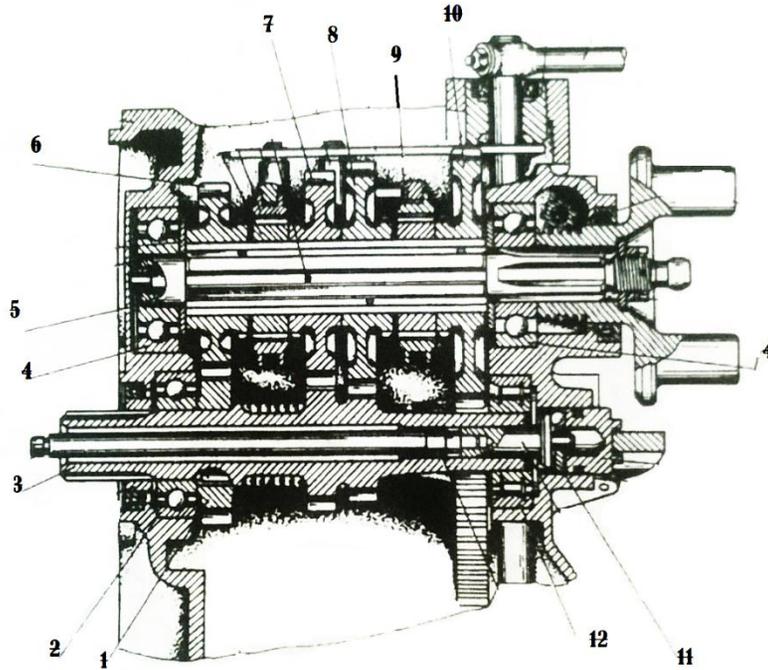


Figura 1.5 Caja de velocidad (4)

1 - Piñón de 4^{ta} velocidad del árbol primario; 2 - Rodamiento del árbol primario; 3 - Árbol primario; 4 - Rodamiento del árbol secundario; 5 - Árbol secundario; 6 - Piñón de la 4^{ta} velocidad del árbol secundario; 7. Piñón de la 3^{ra} velocidad del árbol secundario; 8 - Piñón de la 2^{da} velocidad; 9 - Sector de cambio de las velocidades; 10 - Piñón de la 1^{ra} velocidad del árbol secundario; 11. Rodamiento de empuje; 12 - Cojinete de rodillos.

Árboles. El árbol primario descansa sobre dos cojinetes de bolas, su estructura es enteriza y consta de las coronas de las ruedas dentadas de marcha atrás y las transmisiones I y II. Las ruedas dentadas de las transmisiones III y IV son acoplables y el piñón de la IV velocidad esta montado en el chavetero semicircular.

El árbol secundario descansa también sobre dos cojinetes de bolas, tiene una corona dentada deslizante de marcha atrás. Los piñones o ruedas dentadas de las velocidades 1^{ra}, 2^{da}, 3^{ra} y 4^{ta} giran libremente sobre la superficie externa de la ranuras.

Tabla 1.4. Relación de transmisión de engranaje de la caja de velocidad (4)

1ra velocidad	3,60
2da velocidad	2,28
3ra velocidad	1,74
4ta velocidad	1,30
Transmisión principal	Espiral cónica
Relación de engranaje de la transmisión principal	4,62

Contramarcha

La contramarcha está destinada para cambiar el sentido de marcha de la autovía y transmitir el esfuerzo de tracción de la caja de velocidad al reenvío.

Reenvío

El reenvío sirve para transmitir la tracción de la contramarcha al árbol flotante y este a su vez a los árboles de transmisión de las ruedas del autocarril. Para regular el tensado de la cadena entre la contramarcha y el reenvío, y los pares de ruedas. Ver figura 1.6

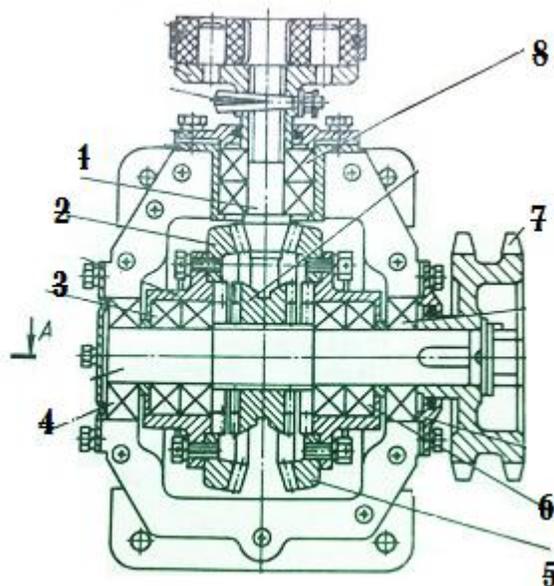


Figura 1.6 Reversible o contramarcha del autocarril TD5M (4)

1 - Rueda dentada conductora, 2 - Rueda dentada de marcha atrás, 3 - Cojinetes de bolas, 4 - Cojinete de rodillos, 5 - Rueda dentada de marcha adelante, 6 - Cojinetes de bolas, 7 - Rueda de estrella, 8 - Cojinete de rodillos.

1.4 Conjunto de ruedas.

1.4.1 Características generales del par de ruedas.

El conjunto par de ruedas está compuesto por dos ruedas acopladas a un árbol por medio de chaveta y chavetero, ver figura 1.7. El par de ruedas constituye uno de los elementos más importantes del vagón, capaz de soportar toda su masa y recibir los esfuerzos que actúan sobre las vías, así como los esfuerzos de la vía que actúan sobre él, sirviendo, además, de guía durante su movimiento sobre ellas. (5)

La seguridad del movimiento de los trenes y autocarriles depende en gran medida de la estructura, tecnología de fabricación y reparación, así como del mantenimiento de los pares de ruedas. La construcción y mantenimiento de los pares de ruedas influyen en la marcha suave del movimiento, en las magnitudes de las fuerzas producidas por el contacto del vagón con la vía y en la resistencia al movimiento.

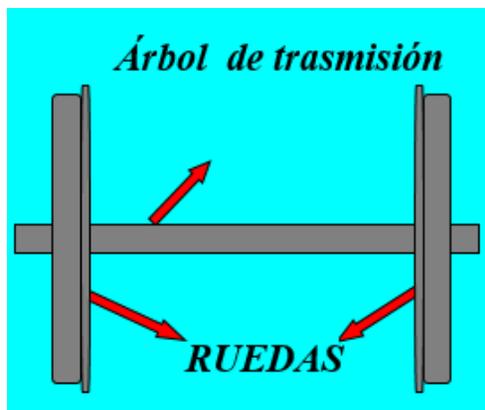


Figura 1.7 Conjunto de rueda y árbol (6)

1.4.1.1 Requisitos y exigencias técnicas para las ruedas

Para asegurar el movimiento del vagón a grandes velocidades y evitar la destrucción de la vía férrea, los pares de ruedas deben satisfacer determinadas exigencias. (5)

Deben ser resistentes y estables al desgaste.

1. Deben tener poco peso
2. Deben poseer alguna elasticidad para disminuir el ruido y reducir los golpes que

recibe el vagón en su movimiento.

Las ruedas pueden ser enterizas o enzunchadas y están compuestas por un núcleo o centro, unido al contorno de rodamiento por medio de la llanta, ver figura 1.8

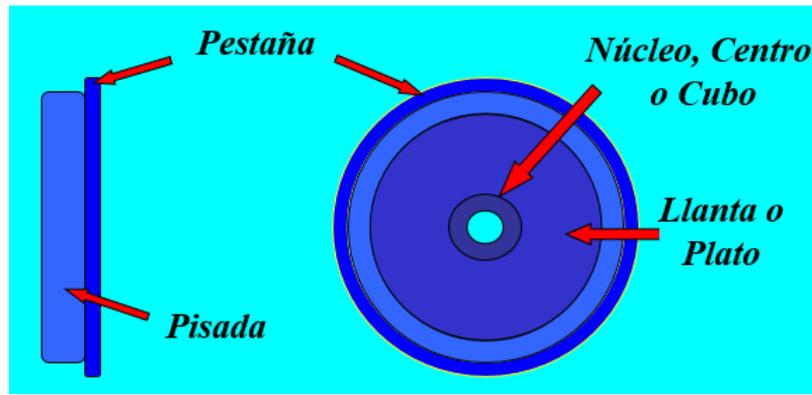


Figura 1.8 Rueda del autocarril (5)

1.4.1.2 Defectos más frecuentes de las ruedas de los vagones.

Los defectos en las ruedas pueden clasificarse en dos grupos:

1. Operación
2. Fabricación

Los defectos de Operación son producidos por la interacción rueda-raíl y se desglosan de la manera siguiente:

- ❖ Planos en las ruedas
- ❖ Pestaña delgada.
- ❖ Pestaña alta.
- ❖ Llanta delgada.
- ❖ Pisada con metal amontonado.
- ❖ Grietas por calentamiento.
- ❖ Ruedas flojas.

1.5 Árboles de transmisión.

1.5.1 Árboles y ejes

Los árboles y ejes, ver figura 1.9, son elementos de máquinas, generalmente de sección transversal circular, usados para sostener piezas que giran solidariamente o entorno a ellos. Algunos elementos que se montan sobre árboles y ejes son ruedas dentadas, poleas, piñones para cadena, acoples y rotores. Los ejes no transmiten potencia y pueden ser giratorios o fijos. Por otro lado, los árboles o flechas son elementos que giran soportando pares de torsión y transmitiendo potencia. (7)

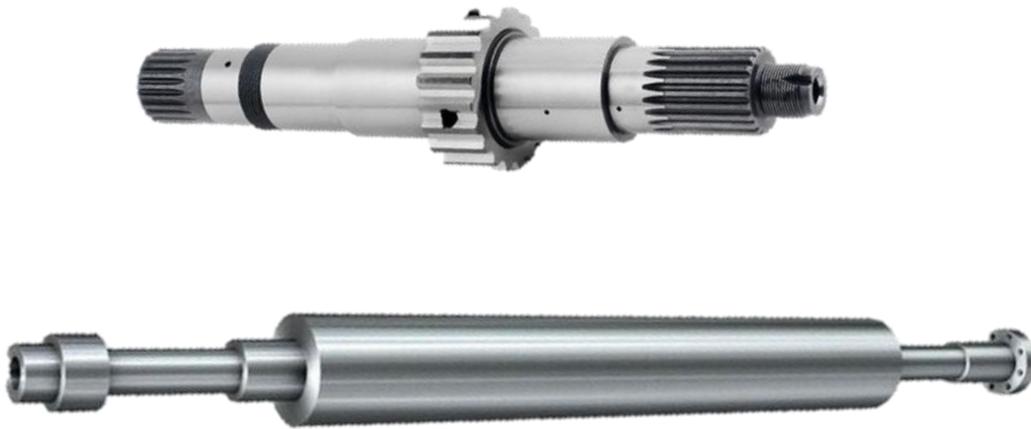


Figura 1.9 Árboles y ejes (8)

1.5.2 Elementos que acoplan con los árboles

Usualmente, los árboles son cilindros escalonados (figura 1.10.b), con el fin de que los hombros o resaltos sirvan para ubicar axialmente los diferentes elementos. Además, los hombros sirven para transmitir cargas axiales. En los árboles se usan diferentes elementos para la transmisión de potencia o para posicionar o fijar las piezas que se montan sobre éstos. Algunos métodos utilizados para transmitir pares de torsión y potencia son las cuñas o chavetas (figura 1.11.a), árboles estriados, espigas o pasadores (figura 1.10 a), ajustes a presión, ajustes ahusados (con superficies cónicas) y conectores ranurados. Para evitar movimientos axiales de las piezas se usan, por ejemplo, hombros, tornillos de fijación o prisioneros (figura 1.11 b), anillos de retención

(figura 1.11.b), pasadores (figura 1.10 a), collarines de fijación, tornillos (figura 1.10.b) y manguitos (figura 1.10. b). Algunos métodos sirven tanto para fijar axialmente las piezas, como para transmitir par de torsión (por ejemplo, los pasadores). Las chavetas y los pasadores actúan como fusibles, es decir, son elementos „débiles“ (y baratos) que tienden a fallar en caso de una sobrecarga, protegiendo así las piezas más caras.

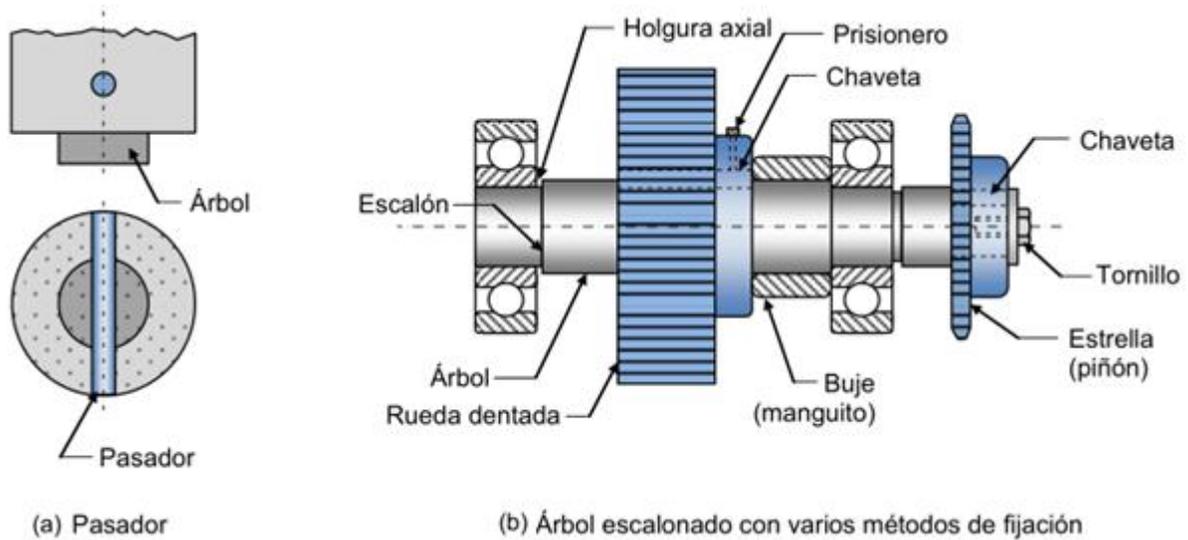


Figura 1.10 Métodos de transmisión de potencia (9)

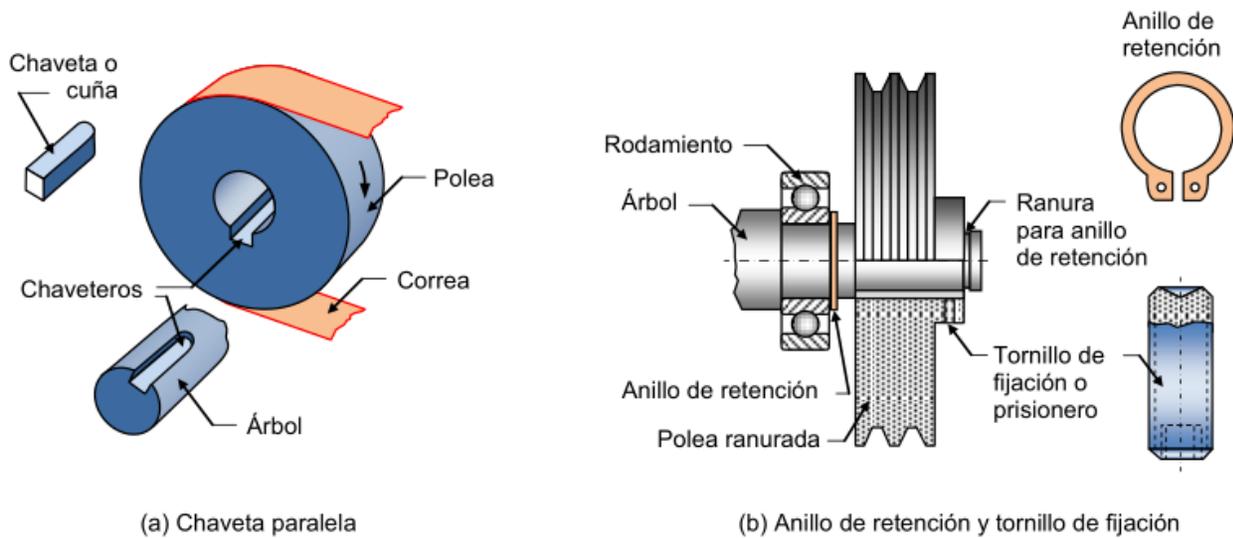


Figura 1.11 Métodos para transmitir par de torsión y para fijar piezas sobre árboles. (9)

1.6 Transmisión por cadenas. Generalidades.

Este tipo de transmisiones trabaja de acuerdo con el principio de engranaje. La transmisión por cadena consta de la rueda conductora, de la rueda conducida y de la cadena que abraza las ruedas y engrana con sus dientes (Figura 1.12) Se emplean también las transmisiones por cadenas con varias ruedas de cadena conducidas. Además de los principales elementos citados, estas transmisiones tienen los dispositivos tensores, los de lubricación y los protectores. (10)

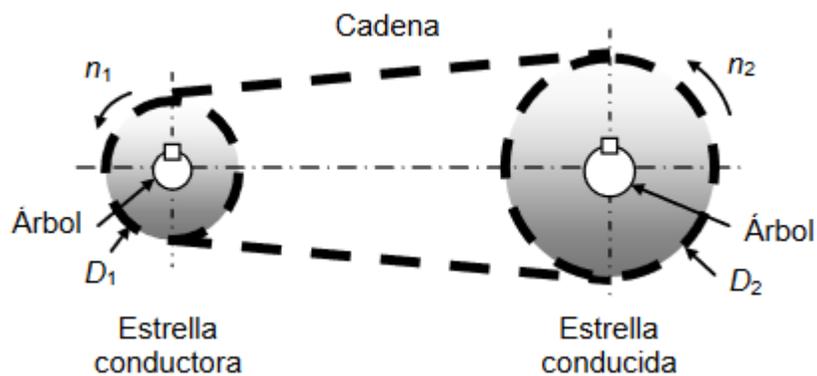


Figura 1.12 Transmisión por cadenas (10)

Las transmisiones por cadenas a su vez pueden transmitir potencia por correas y por ruedas dentadas, ver figura 1.13, en las cuales la transmisión de potencia se lleva a cabo mediante árboles, poleas, correas, ruedas dentadas, estrellas cadenas, entre otros elementos.

La cadena consta de eslabones unidos por pasadores, que permiten asegurar la movilidad o flexibilidad de la cadena. Es el elemento principal de la transmisión que define la seguridad y duración de su trabajo. Las características geométrica principales de las cadenas son el paso (P) y la anchura (D).

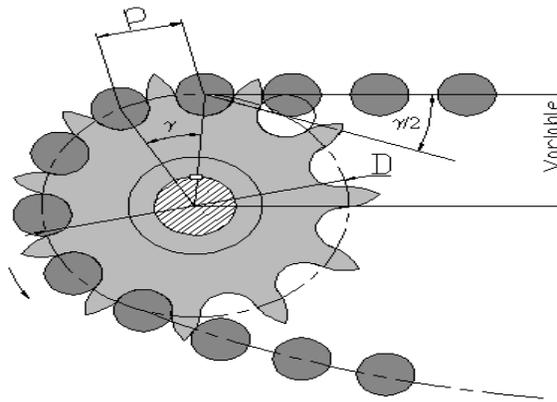


Figura 1.13. Conexión entre una cadena y una rueda dentada. (10)

Las transmisiones flexibles por cadena se emplean en las máquinas de transporte, por ejemplo: bicicletas, motocicletas, automóviles, transportadores, etc. También se emplean en las máquinas motrices, ya sean agrícolas, perforadoras petrolíferas u otras, y se utilizan en los accionamientos de las máquinas herramienta y otras máquinas. Estas debido a la ausencia de deslizamiento presentan un rendimiento de hasta un 98 %. En la tabla 1.5 se muestran algunos ejemplos de aplicación, rango y cargas límites de las transmisiones por cadenas

Tabla 1.5. Campos de aplicación de las transmisiones con cadenas de rodillos. (11)

Aplicación	Rango del paso (mm)	Rango de carga límite de la cadena (N)
Motocicletas y bicicletas	12,7 – 15,875	7500 - 20000
Máquinas agrícolas	15,875 – 41,300	2000 - 160000
Máquinas para la industria del petróleo	19,050 – 63,500	38000 – 43000
Maquinaria general	8,000 – 50,800	2000 - 160000

1.7 Árboles de transmisión del autocarril TD5M.

El árbol de transmisión de los pares de rueda del autocarril TD5M (ver figura 1.14) esta conformado por una barra de sección transversal circular maciza de 1160 mm de largo, con secciones escalonadas de diámetros variables, en el mismo se ubica axialmente los elementos que le acoplan.



Figura 1.14 Árbol de la transmisión delantero del autocarril TD5M

En el extremo derecho de $\varnothing 44$ mm acopla la rueda dentada por medio de una unión chaveta - chavetero, seguido de esto, en el escalón de $\varnothing 40$ mm, en ambos extremos se encuentra acoplado el rodamiento, el cual va alojado en la chumacera que une el árbol con el chasis del autocarril y seguido en el $\varnothing 32$ mm se encuentra ensamblado por medio de una unión chaveta y chavetero el núcleo de rueda con el árbol cuyo extremo es roscado con el fin de fijar las ruedas a través de una tuerca de castillo y un pasador, ver figura 1.15 a) y b), (12)



Figura 1.15 Transmisión por cadena del autocarril TD5M.

a) Transmisión del árbol de rueda; b) Acople de la rueda con tuerca castillo

La transmisión de potencia en el autocarril TD5M se efectúa a través del cigüeñal, la caja de velocidad y el reverso, que transfieren por medio de una transmisión por doble cadena al árbol flotante (ver figura 1.16 a y b) y de este a ambos arboles de rueda.



a)



b)

Figura 1.16 Sistema de transmisión del autocarril TD5M

a) Árbol flotante del autocarril TD5M; b) Transmisión por cadena del reversor al árbol flotante

En la tabla 1.6 se muestran las relaciones de transmisión por cadenas presentes en el autocarril.

Tabla 1.6 Relación de transmisión de la cadena (4)

1ra velocidad	10,65
2da velocidad	6,75
3ra velocidad	5,03
4ta velocidad	3,85

1.8 Materiales utilizados para la fabricación de los árboles del autocarril.

El árbol por estar sometido durante su trabajo a cargas transversales, esfuerzos dinámicos verticales y momentos de torsión se construyen de un material resistente que garantice su solidez. De acuerdo con estas características, por lo general, se fabrican de acero al carbono perteneciente a los aceros de construcción.

El material del árbol de transmisión delantera del autocarril TD5M, según el fabricante, es de acero 45 (según norma GOST) AISI 1045, el cual es un acero al carbono, que pertenece a los aceros de construcción, del grupo I, en el subgrupo de los aceros termomejorables, poseen buenas propiedades tecnológicas y mecánicas, en estado de termomejoramiento presenta una alta resistencia y una resiliencia aceptable. (4)

Los aceros de construcción poseen una composición química entre (0,08-0,7) %C, los cuales se emplean en la fabricación de elem.mentos de máquinas, estructuras de construcción, y otras instalaciones por lo que deben poseer buenas propiedades mecánicas, como son: tenacidad, alto límite de fluencia y resistencia al desgaste. Se destina a fabricar piezas que han de sufrir grandes cargas y a la vez de una alta resistencia, debe poseer tenacidad, para poder aguantar los efectos dinámicos y de choque (13). En otras palabras, el material debe ser resistente y seguro. Estos aceros se dividen en tres subgrupos dependiendo del porcentaje de carbono que posea: bajo % de carbono (0,08 – 0,25) %, termomejorables (0,3 – 0,5) % y para muelles (0,5 – 0,7) %.

Dentro de los aceros termomejorables encontramos aceros con características diferentes en cuanto a sus elementos de aleación como son el C (0,3 – 0,5) %, Cr (0,8-1,5) %, Ni (1-3,4) %, W (0,5- 0,8) %, V (0,1-0,2) %, Mn (0,5- 1,2) %, Si (0,17-1,2) % que sumados no son más del 3,5% y frecuentemente cerca de 0,1% de afinadores de grano (vanadio, titanio, circonio). También cuentan con impurezas constantes como son el Mn (0,60-0,90) %, P (0,040) % y el S (0,050) %, pueden ser al carbono o aleados. Estos aceros son muy utilizados en la fabricación de elementos de máquinas (ruedas dentadas, árboles de transmisiones dentadas, husillos, pasadores) y se dividen en 5 grupos, ver tabla 1.7.

Tabla 1.7 Marcados de los aceros según (13).

Grupo	Marcado	Diámetro crítico de temple (mm)	Clasificación
1	Acero (30,35,40,45,50)	10-12	Aceros al carbono
2	40Cr, 45Cr, 50Cr	15-20	Aceros aleados al cromo
3	30CrMo, 40CrMn, 30CrMnTi, 30CrMnSi	25-30	Aceros aleados. (Si, Mn)
4	40CrNi,40CrNiMoA,42CrMoV	30-40	Aleados con 1% de níquel
5	30CrNi3,30CrNi2WV	50-100	Aleados (2 - 3%) de níquel

El acero AISI 1045 es muy usado en la construcción de elementos de máquinas, tales como ejes, árboles y elementos de máquinas, como es el caso de cilindros de motores de explosión y transmisiones por lo que deben poseer una buena tenacidad, dureza, resistencia a la fatiga y al desgaste (13). Tiene una resistencia mecánica de (620-700) MPa, un límite de fluencia 360 MPa, una elongación de (24 – 36) % y una dureza de (180 – 240) HB que alcanza con un tratamiento térmico de recocido a una temperatura entre (660– 700) °C con enfriamiento en el horno. El acero 45 presenta la siguiente composición química sin tratamiento térmico según la tabla 1.8

Tabla 1.8 Composición química del acero 45 (AISI 1045), (14)

Acero		Composición Química en %						
Marca	Norma Internacional	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni
1045	AISI	0,42	0,17	0,50	Hasta 0,040	Hasta 0,035	0,25	0,30
45	GOST	- 0,50	- 0,37	- 0,80				
Temperatura de los puntos críticos: $Ac_1 = 730$, $Ac_3 = 755$, $Ar_1 = 690$ $Ar_3 = 780$								

1.9 Tratamientos térmicos aplicados a los árboles.

El tratamiento térmico es un conjunto de operaciones de calentamiento y enfriamiento, bajo condiciones controladas de temperatura, tiempo de permanencia, velocidad y presión de los metales o las aleaciones en estado sólido, con el fin de mejorar sus

propiedades mecánicas, especialmente la dureza, la resistencia y la elasticidad. Los materiales a los que se aplica el tratamiento térmico son, básicamente, el acero y la fundición, formados por hierro y carbono. (13)

Para mejorar las propiedades de los aceros a casi todos en particular se aplican tratamientos térmicos, de los cuales existen varios tipos como:

El Recocido: es un tratamiento térmico en el cual se calienta el acero hasta temperaturas superiores a A_3 (o solo mayores que A_1 , si el recocido es incompleto) y después se enfría lentamente. El calentamiento superior a A_3 asegura la recristalización completa del acero. El enfriamiento lento de recocido debe ocasionar necesariamente la descomposición de la austenita y su transformación en estructuras perlíticas el recocido puede darse de tres formas completo, incompleto, isotérmico según la estructura que se desee obtener.

Objetivos del Recocido:

- Eliminar un sobrecalentamiento que haya provocado la aparición de estructuras indeseables.
- Homogenizar la estructura.
- Esferoidizar la cementita.
- Mejorar un acero deformado en frío o propiciar la maquinabilidad de un acero.
- Reducir tensiones internas.
- Disminuir dureza.
- Trabajar en la organización del grano, forma y tamaño y reduce o elimina la acritud.

El Temple: se llama así a la operación que consiste en calentar el acero a una temperatura superior a A_3 (si es hipoeutectoide) y superior a A_1 (si es hipereutectoide), un mantenimiento a esa temperatura y posterior enfriamiento con una velocidad (crítica) tal que garantice la transformación martensítica en el material. Después del temple cambia significativamente la microestructura, las propiedades mecánicas (resistencia y tenacidad), las propiedades químicas (homogeneidad, resistencia a la corrosión) y las

propiedades físicas (permeabilidad magnética, fuerza coercitiva) del acero. Es inestable y cargado de tensiones internas, se obtiene una estructura final martensítica, la cual tiene alta resistencia y gran dureza. El enfriamiento después de temple, por lo general es rápido; puede ser aceite para los aceros aleados porque el aumento del contenido de aleación hace que aumente la estabilidad de la austenita subenfriada y en agua para los aceros al carbono (13).

Objetivos fundamentales del temple:

- Obtener una alta dureza
- Homogeneidad microestructural
- Resistencia mecánica

Existen varios tipos de temples según su enfriamiento como son:

En un medio, en dos medios, interrumpido, escalonado, isotérmico, a chorro y con auto revenido.

Revenido: Se llama así al tratamiento térmico que consiste en calentar un acero templado a las temperaturas inferiores a A_{c1} mantener el mismo a esa temperatura y enfriarlo al aire (siempre que el acero no presente tendencia a la fragilidad de revenido en cuyo caso se enfriará en un medio más enérgico). Se aplica con el objetivo de definir propiedades mecánicas, eliminar tensiones internas y estabilizar estructuras. Este puede ser alto, medio o bajo (13).

Existen tres tipos de revenido en las cual se obtiene diferente estructura como son:

- Revenido bajo (150 - 250) °C y se obtiene martensita.
- Revenido medio a (300 - 450) °C y se obtiene troostita esta tiene alto límite de fluencia (elasticidad).
- Revenido alto a (500 - 600) °C donde se obtiene como estructura final sorbita, esta es dúctil, resistente a la rotura y tiene buena tenacidad.

1.9.1 Ejemplos de tratamientos térmicos aplicados a los árboles del autocarril.

1. Recocido + Temple (por encima del punto crítico A_3) + Revenido alto. Se obtiene una estructura final sorbítica con las siguientes propiedades: resistencia a la rotura, dúctil y buena tenacidad.
2. Recocido + Temple (por encima del punto crítico A_3) + Revenido alto (se obtiene en el núcleo sorbita, tenaz) + TAF (Temple por Alta Frecuencia) + Revenido bajo (se obtiene en la superficie martensita, alta dureza).
3. Recocido + Temple (por encima del punto crítico A_3) + Revenido bajo (se obtiene una estructura final martensítica, esta posee alta dureza y resistente al desgaste). (13)

Entre las principales propiedades mecánicas que presentan estos materiales cabe destacar la dureza, que es la oposición que ofrecen los materiales a alteraciones como la penetración, la abrasión, el rayado, la cortadura, las deformaciones permanentes, entre otras.

1.10 Fallos más frecuentes en los árboles de transmisión.

Al comienzo de la vida operativa de cualquier sistema, este es funcional, pero a pesar de todo el usuario debe estar consciente de que, independientemente de la perfección del diseño de un sistema, de la tecnología de su producción o de los materiales usados en su fabricación, a lo largo de su operación se producirán ciertos cambios irreversibles. Estos cambios son resultado de procesos tales como corrosión, abrasión, acumulación de deformaciones, distorsión, sobrecalentamientos, fatiga y difusión de un material en otro. A menudo estos procesos se superponen e interactúan los unos con los otros y causan un cambio en el sistema, con lo cual cambiarán sus características de actuación. La desviación de esas características respecto a los valores especificados es lo que se considera como fallo del sistema. Los fallos también pueden ser causados por sobrecargas bruscas, errores de los operadores, reparaciones incorrectas, etc. (15)

El fallo del sistema puede ser definido como un suceso cuya realización provoca, o bien la pérdida de capacidad para realizar las funciones requeridas, o bien la pérdida de capacidad para satisfacer los requisitos especificados. Independientemente de las

razones de su aparición, un fallo causará la transición del sistema desde su estado satisfactorio a un nuevo estado insatisfactorio, conocido como estado de fallo.

1.10.1 Árboles sometidos a esfuerzos combinados.

Los árboles están sometidos a torsión, flexión, carga axial y fuerzas cortantes, y al menos alguna de estas cargas es variable (en un árbol girando sometido a un momento flector constante, actúan esfuerzos normales variables). Como los esfuerzos en los árboles son combinados y variables, debe aplicarse la teoría de fatiga para esfuerzos combinados.

1.10.2 Efecto de los chaveteros sobre los ejes y árboles.

El chavetero tallado en el árbol afecta materialmente su resistencia o capacidad de carga ya que se generan tensiones altamente localizadas en las zonas que forman ángulos rectos y sus proximidades, siendo los efectos más pronunciados cuando prevalecen los estados de choque y de fatiga. El “Code for Transmisión Shafting” recomienda el uso de una eficiencia de un 75 % para árboles con chaveteros. La alta concentración de tensiones en las zonas críticas del chavetero puede reducirse proveyéndolos de ángulos redondeados. Un radio de curvatura igual a la mitad de la profundidad del chavetero se considera una buena práctica. (15)

1.11 Defectos más frecuentes de los árboles de transmisión del autocarril TD5M.

Los árboles y pares de ruedas deben garantizar un funcionamiento adecuado (16). Las irregularidades principales con las que los árboles de transmisión no se permiten circular son:

- ❖ Grietas.
- ❖ Desgastes excesivos.
- ❖ Deformaciones.
- ❖ Dobleces.
- ❖ Roturas.
- ❖ Requemados etc.

1.11.1 Requisitos de calidad de los árboles de transmisión del autocarril TD5M.

Los árboles no deben poseer rajaduras en los asientos de ruedas y en los muñones de cojinetes, así como otros defectos tales como: ondulaciones, depresiones, rayas circunferenciales, corrugaciones, ralladuras, huellas continuas y oxidación

Los árboles además no deben poseer mellas, marcas de punzón o cinceles y estampados en el cuerpo del mismo. No debe existir presencia de doblados y falta de excentricidad mayores a 9 mm en el centro del árbol tractivo. En el árbol no se admiten vestigios de sobrecalentamiento, soldaduras, ovalamiento y conicidad. En caso la variación en el cuerpo del árbol por ovalamiento y conicidad deberá estar dentro de las dimensiones recogidas en la tabla 1.9, (17)

Tabla 1.9 - Límites de errores de forma y posición por conicidad y ovalamientos en árboles. (17)

Parámetros	TIPO DE EJES							
	COJINETE DE ROLLETES				COJINETES PLANOS			
	Muñón de cojinete		Asiento de rueda		Muñón de cojinete		Asiento de rueda	
Unidad de medida	mm	in	mm	in	mm	in	mm	in
CONICIDAD	0,025	0,001	0,050	0,002	0,254	0,010	0,050	0,002
OVALAMIENTO	0,020	0,0008	0,050	0,002	0,127	0,005	0,050	0,002

1.12 Estudios que se realizan a los árboles y ejes de transmisión.

En los análisis de roturas los elementos concurrentes son muchos y variados en los que se tienen en cuenta varios aspectos del punto de vista metalográfico tales como: (18)

- Determinación de la calidad del acero. Análisis químico
- Análisis macroscópicos. Análisis Fractográficos
- Análisis microscópicos. Análisis Metalográficos
- Determinaciones de Dureza

Por otra parte, dado que los ejes y árboles de transmisión sirven primariamente para transmitir potencia por torsión y están por lo tanto sometidos principalmente a tensiones tangenciales. Las poleas engranajes, piñones de cadenas y órganos similares que lleva

el árbol, introducen esfuerzos de flexión que en general no pueden ser determinados. Por lo que se tiende a analizar aspectos tales como:

- Material original del árbol
- Tratamientos térmicos
- Soldadura
- Esfuerzos de torsión
- Flexión y corte
- Vibraciones
- Períodos transitorios de carga
- Períodos de cargas constantes
- Comportamiento de otros componentes como son los rodamientos
- Alineación de los árboles de los equipos
- Vibraciones.

1.12.1 Análisis químicos.

Los análisis químicos nos sirven para determinar la composición en por ciento de masa de los elementos que componen el acero y así determinar su marca o denominación.

Los análisis químicos pueden realizarse aplicando diferentes técnicas de análisis, una por análisis espectral por emisión óptica, el cual es semicuantitativo y permite determinar aquellos elementos tales como: Mn, Cr, Ti, W, V, Mo, por vía fotolorimétrica el cual nos permite determinar el (Si y el P) o por vía gasovolumétrica para determinar el (C y S).

También en los últimos tiempos se utilizan métodos y equipos más modernos como son los cuantómetros atómicos, por medio de los cuales es posible obtener la composición química de los materiales de hasta 16 elementos y para materiales ferrosos y no ferrosos.

1.12.2 Análisis Fractográfico.

El estudio consiste en aplicar técnicas de análisis por fractografía con el objetivo de conocer la posible causa de rotura del árbol de tracción delantero del autocarril. Donde se analizará principalmente la zona donde ensambla el núcleo de la rueda con el árbol y

en el escalón antes del acoplamiento de dicho árbol con el rodamiento, como muestra la figura 1.17 y 1.18.



Figura 1.17 Sección del árbol fracturada que ensambla con el núcleo de la rueda



Figura 1.18 Árbol de transmisión delantero del autocarril TD5M.

a) Vista de la fractura; b) Árbol de transmisión fracturado

1.12.2.1 Características de las fracturas.

La superficie de fractura de una probeta o componente sometido a cargas de tracción, torsión, fatiga, contiene una serie de marcas, las cuales en general son fácilmente identificables y caracterizan el tipo de rotura. En las superficies de la muestra, en la

zona de propagación de la fisura es posible distinguir la extensión de rotura de alta energía (dúctil) y la parte correspondiente a baja energía de rotura (frágil), (19).

El objeto de un análisis de falla es la determinación de las causas de rotura de un componente en servicio y la manera de evitarla, ya sea mediante un nuevo diseño de la pieza o reemplazo del material utilizado. Aunque la causa principal de casi todas las roturas es la tensión excesiva aplicada al componente, esta sobrecarga se produce como consecuencia de otros factores que son justamente los que deben ser tenidos en cuenta en el análisis de falla. Así por ejemplo la sobrecarga final puede ser resultado de la disminución de la sección efectiva del componente por un proceso de fatiga o corrosión.

La observación de la superficie de fractura puede proporcionar información sobre los siguientes parámetros, que caracterizan la rotura del componente o probeta de laboratorio:

- Mecanismo de propagación de la fisura
- Fractoténacidad del material
- Configuración de tensiones: distribución y magnitud
- Medio químico
- Origen de la fractura

El análisis fractográfico comienza con una observación visual de las características macroscópicas de la superficie de fractura, de la cual puede obtenerse los primeros indicios acerca de las causas de nucleación de la fisura, mecanismo y dirección de propagación y magnitud de las cargas actuantes. (18)

El posterior análisis bajo la lupa estereoscópica o a través de una macrografía de bajo aumento permite la confirmación de las observaciones realizadas en primera instancia, mediante el análisis cuidadoso de las distintas zonas delimitadas en la primera observación. El análisis a mayores aumentos mediante un microscopio electrónico de barrido (o transmisión) permite finalmente la caracterización del proceso microscópico de propagación de fractura identificando así facetas de clivaje, cavidades o 'dimples' de

fractura transgranular, zonas afectadas de fractura intergranular, morfología de los límites de grano, estrías de fatiga, superficies de corrosión bajo tensiones o imágenes características como cavidades o porosidades de solidificación. Las técnicas fractográficas pueden aportar también información sobre la fractoténacidad del material del componente fracturado, la fragilidad o la ductilidad, las que quedan en general reveladas en la superficie de fractura en proporción relativa a los distintos tipos de fractura y las que pueden ser tomadas como punto de partida para el análisis de las propiedades fractomecánicas del material. Observaciones a mayores aumentos pueden proporcionar información adicional sobre la microestructura referente a la presencia de inclusiones, segregación de fases, poros, etc.

Una observación fractográfica también permite estimar cualitativamente la magnitud de las tensiones actuantes. En efecto, existen rasgos fractográficos que indican si las cargas que condujeron a la rotura fueron altas o bajas.

La observación de una superficie de fractura a bajos aumentos, ya sea a simple vista, bajo una lupa, a través de una macrografía óptica, o en una micrografía electrónica de barrido de bajos aumentos, puede proporcionar información muy valiosa acerca de parámetros específicos que gobernaron el proceso de rotura. El análisis crítico de estos parámetros permite en la mayoría de los casos la determinación de las posibles causas de la falla.

1.12.2.2 Zona de propagación de la fisura.

La zona fibrosa es la región que se forma alrededor del punto origen de propagación de la fisura. En el caso de probetas y componentes de sección circular, sin entallar, el origen corresponde a una inclusión o imperfección próxima al árbol de tracción. Esta zona puede presentar un aspecto fibroso o puede estar compuesto por pequeños anillos concéntricos perpendiculares a la dirección de propagación de la fisura. Las zonas fibrosas aparecen en componentes de aceros al carbono o hierro puro comercial, (18). En cambio, la superficie de fractura de aceros de baja aleación o metales puros, muestra marcas circunferenciales concéntricas. La zona fibrosa central corresponde a un mecanismo de nucleación y propagación de la fisura por formación y coalescencia de microcavidades. Es un proceso de alta energía y gran deformación plástica. El

centro de la zona contiene al origen de la fractura, que es generalmente alguna imperfección del material.

La zona radial corresponde a la etapa de propagación rápida de la fractura ya bajo condiciones de inestabilidad. Las marcas radiales coinciden con la dirección de propagación de la fisura. Se originan en la periferia de la zona fibrosa central, o en su ausencia en el mismo origen de la fractura. Ver figura 1.19

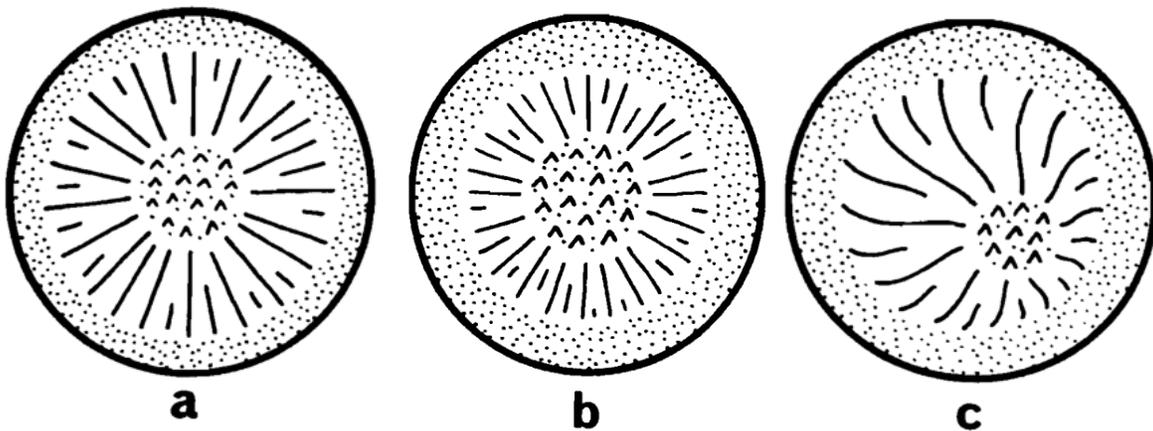


Figura 1.19 a), b) y c). Variación de la zona radial de la superficie de fractura en muestras cilíndricas sin entalla. (18)

- a) Marcas radiales finas: son características de los aceros de alta resistencia, y de las roturas a bajas temperaturas. La zona fibrosa es muy reducida, e incluso puede no aparecer en casos extremos de fragilidad del material.
- b) Marcas radiales gruesas: se observan en la rotura de aceros de mediana resistencia, y en ensayos a temperaturas superiores al ambiente.
- c) Marcas radiales curvas: Si el origen de la fractura se ubica dentro del centro geométrico de la sección, las marcas radiales no son rectas y pueden curvarse apreciablemente.

Según la microestructura del componente y la temperatura de trabajo, las marcas

pueden ser finas o más gruesas, según el siguiente esquema:

- Marcas radiales finas: aceros de alta resistencia, estructuras martensíticas, bajas temperaturas.
- Marcas radiales gruesas: aceros de mediana resistencia, temperatura igualo superior al ambiente.

Normalmente las marcas radiales son rectas, pero si el origen de la fractura se ubica a una cierta distancia del centro de la muestra, pueden desviarse de la linealidad y curvarse apreciablemente. Lo mismo puede ocurrir si la zona fibrosa central es pequeña.

Como la zona radial corresponde a la proporción rápida de la fractura, es menor aquí la cantidad de deformación plástica y la fisura sigue los planos más débiles de la estructura de cada grano. Entonces en el microscopio electrónico se observa una superficie de clivaje transgranular, con las facetas características.

En algunos casos también se suele observar una fractura intergranular. En casos extremos las líneas radiales constituyen el único rasgo fractográfico presente y ocupan toda la sección del componente fracturado.

1.12.3 Ensayos de dureza.

La dureza es la resistencia de un material a ser rayado o perforado por un agente penetrante. Existen diversos dispositivos, procedimientos y agentes penetrantes para medir la dureza. En el caso de los aceros para medir la dureza en escala Brinell se utiliza como agente penetrante una punta de acero endurecido de 10 mm de diámetro bajo una carga de 3000 Kg fuerza. La carga genera una penetración permanente en el material y el diámetro de la huella se relaciona con el número de dureza Brinell, el cual se expresa de forma abreviada en HB. La cantidad real que se mide es la carga dividida entre el área de contacto de la huella. Para los aceros recocidos de bajo contenido de carbono el valor de la dureza varía y se encuentra alrededor de los 100 HB y para los aceros de alta aleación y de alta resistencia de 700 HB. (20)

El instrumento para realizar el ensayo de dureza Rockwell a metales blandos utiliza una punta de acero endurecido cuyo diámetro es de 1/16". El ensayo se realiza bajo una carga de 100 kgf y la dureza resultante se abrevia como Rockwell B, R_B , o HRB. Para metales más duros, como aceros que contienen aleaciones con tratamiento térmico, se utiliza la escala Rockwell C, para ello como agente penetrante se utiliza un penetrador con punta de diamante (penetrador brale) en forma esferocónica y se aplica una carga de 150 kgf como se observa en la figura 1.18, en ocasiones se hace mención de la dureza Rockwell C como Rc o HRC.

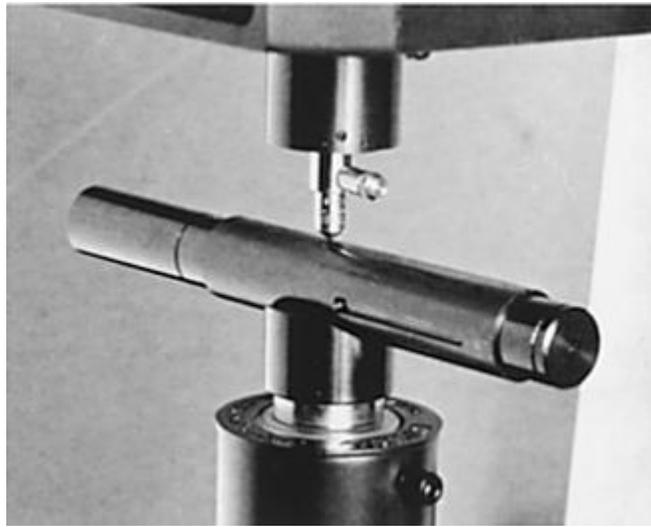


Figura 1.18 Penetrador con punta diamante (21)

1.12.4 Estudios por el método elementos finitos.

SolidWorks es un software CAD (diseño asistido por computadora) para modelado mecánico en 3D, desarrollado en la actualidad por SolidWorks Corp., una filial de Dassault Systèmes, S.A. (Suresnes, Francia), para el sistema operativo Microsoft Windows. Su primera versión fue lanzada al mercado en 1995 con el propósito de hacer la tecnología CAD más accesible.

El programa permite modelar piezas y conjuntos y extraer de ellos tanto planos técnicos como otro tipo de información necesaria para la producción. Es un programa que funciona con base en las nuevas técnicas de modelado con sistemas CAD. El proceso

consiste en traspasar la idea mental del diseñador al sistema ADC, "construyendo virtualmente" la pieza o conjunto. Posteriormente todas las extracciones (planos y ficheros de intercambio) se realizan de manera bastante automatizada. (22)

El ciclo del análisis por elementos finitos incluye cinco etapas diferenciadas, como se puede observar en la figura 1.19 En la etapa denominada concepto, se debe tener en cuenta los requisitos del problema a analizar. Hay que definir el modelo a incluir para el correcto análisis. La etapa de modelación, es también llamada pre-procesamiento. En este punto se diseña el objeto a analizar, así como las condiciones de contorno.

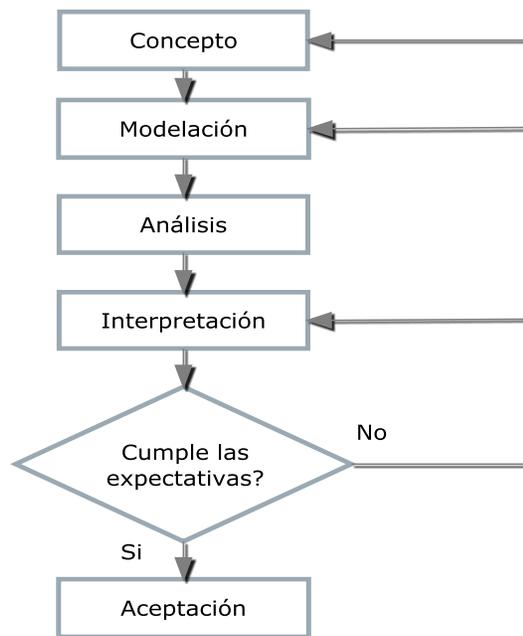


Figura 1.19 Ciclo del análisis por elementos finitos (22) .

La etapa de análisis es donde se ejecuta el verdadero cálculo numérico del modelo de elementos finitos. La interpretación es en realidad la etapa más importante, pues es donde se les da forma a los datos obtenidos, se interpreta su significado y se decide si el análisis es admisible o si por el contrario se debe proceder a realizar algún cambio.

Desde esta etapa se puede retornar hasta el concepto, la modelización o incluso hasta una nueva interpretación de los mismos datos. La aceptación es el momento donde se

realizan las conclusiones finales obtenidas del análisis e interpretación de los datos obtenidos.

El MEF se implementa a través de un software que minimiza los tiempos dedicados a las iteraciones. En este caso los programas informáticos usados para estos análisis incluyen tres pasos o módulos principales, el pre-procesado, el análisis y el post-procesado. (22)

En el pre-procesado se incluye la definición del problema o el concepto y la modelación. Esta es una parte fundamental, ya que cuantos más parámetros se definan, más veraces serán los resultados obtenidos, pero a su vez el tiempo de cálculo también se incrementa de manera considerable. Dentro del módulo de pre-procesado se incluyen entre otros: diseño de geometrías y mallado, propiedades del material, contactos o rozamientos, condiciones iniciales, condiciones de contorno y adaptación de mallado.

En el análisis o cálculo por elementos finitos, módulo también denominado como solver o “solucionador” es el que realmente realiza la parte iterativa y matemática en la que se basa el Método de Elementos Finitos, pudiéndose hacer los demás pasos mediante otros programas menos especializados (sistemas CAD) o incluso manualmente. En la fase de post-procesado, se procede al estudio de los datos y resultados obtenidos. La mayoría de los programas informáticos basados en el MEF actuales incluyen un postprocesador en el que se muestran gráficamente los resultados, siendo de esta forma más sencilla su interpretación

CAPÍTULO 2: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS. ANÁLISIS DE FALLAS, CÁLCULOS DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA Y SIMULACIÓN POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.

2.1 Resultados del análisis físico – químico.

2.1.1. Análisis Químico.

Para el análisis químico se tomaron muestras del material fracturado y se determinó la composición química del material, obteniéndose el siguiente resultado. (14)

Tabla 2.1 Composición del árbol de transmisión delantero del autocarril TD5M.

Composición Química en % de masa							
Muestra 05	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni
	0,45	0,32	0,68	0,027	0,025	0,15	0,20

Del análisis realizado se puede concluir que según su composición química el material se corresponde con un acero AISI 1045, el cual pertenece al grupo de los aceros para construcción.

2.1.2. Análisis de Dureza.

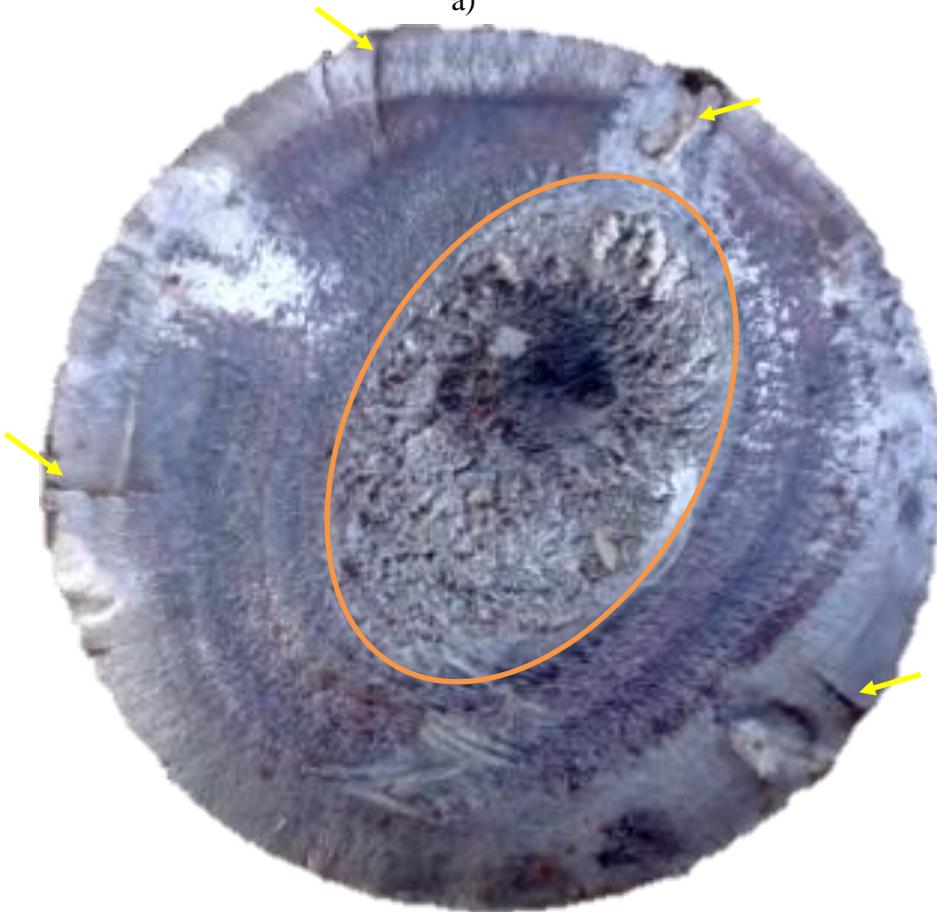
Para el análisis de medición de la dureza se utilizó un durómetro Rockwell, para lo cual se realizaron cinco mediciones arrojando una dureza promedio de 40 - 45 HRC.

2.1.3 Análisis Fractográfico.

El análisis fractográfico se realizó utilizando el método de microscopía óptica 40^x, para el cual se tomó una muestra de la zona de rotura del árbol (23), (24), ver figura 2.1. Como se puede apreciar la rotura ocurrió por fatiga dado a un estado básico tensional originado por fuerzas de torsión y flexión. El origen de la fractura es por agrietamiento y se localiza en diferentes puntos de la periferia, en zonas de alta concentración de tensiones, o sea, en los límites de transición del cambio de sección en presencia de un ángulo recto (90°), ver figura 2.1 b). En la micrografía se puede observar que el árbol en su superficie posee una elevada dureza ~ 40 HRC que va disminuyendo gradualmente



a)



b)

Figura 2.1 Zona de fractura en el árbol de transmisión delantero del autocarril

a) Árbol fracturado; b) Probeta fractográfica

hacia el centro y no es homogénea en todo su perímetro. La forma ovalada en la región central, figura 2.1 b), nos muestra la zona de fractura final rápida y nos indica que existieron dos cargas tensionales de torsión y flexión mutuamente desiguales y paralelas. Se aprecian también en las cercanías de la superficie inconsistencias metalúrgicas tales como porosidades.

2.2 Análisis de las fuerzas que actúan sobre el árbol tractivo del autocarril TD5M.

Para proceder al estudio de simulación por el método de elementos finitos debemos primeramente partir de la determinación de las fuerzas que actúan sobre el conjunto cinemático del autocarril (ver figura 2.2 y la eficiencia del sistema de transmisión de fuerzas (ver figura 2.3).

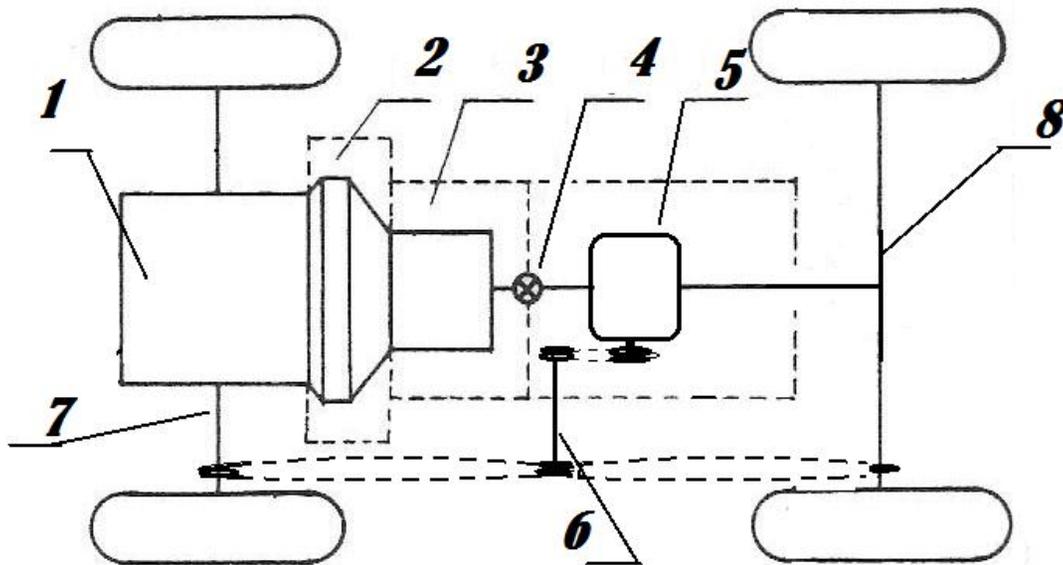


Figura 2.2 Esquema cinemático del autocarril TD5M.

- | | |
|-------------------------|-----------------------------------|
| 1. Motor | 5. Reenvío |
| 2. Embrague de fricción | 6. Arbol flotante |
| 3. Caja de velocidad | 7. Arbol de transmisión delantero |
| 4. Unión universal | 8. Arbol de transmisión trasero |

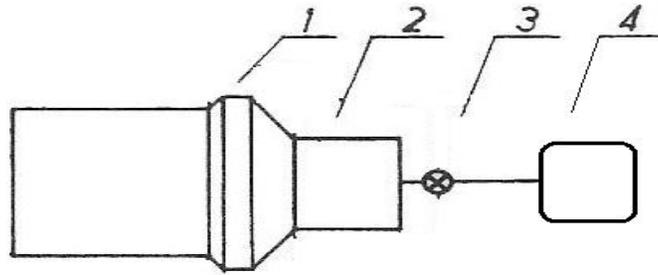


Figura 2.3 Sistema de transmisión

Diagrama en bloques de los sistemas de transmisión del autocarril TD5.

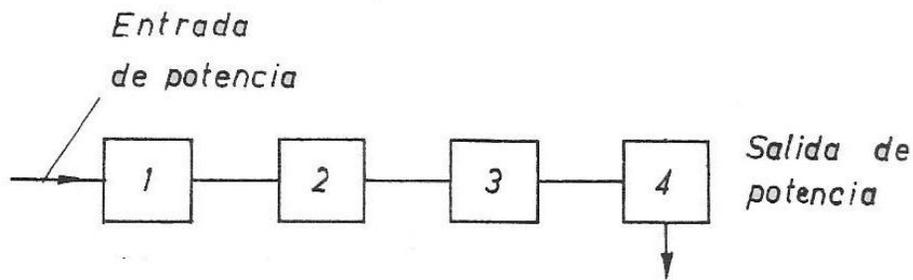


Figura .Diagrama en bloque del sistema de transmisión de fuerzas

1. Embrague de fricción
2. Caja de velocidad
3. Unión universal
4. Reenvío

2.3 Cálculo de las fuerzas que intervienen en la transmisión de potencia.

2.3.1 Cálculo de la eficiencia de la transmisión de potencia.

$$\eta_0 = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4$$

donde:

η_0 : eficiencia de la transmisión

η_3 : eficiencia de la unión universal

η_1 : eficiencia del embrague de fricción

η_4 : eficiencia del reenvío

η_2 : eficiencia de la caja de velocidad

En la tabla 2.2 se indica la eficiencia de los elementos del sistema de transmisión del autocarril TD5M.

Tabla 2.2 Eficiencia de los elementos del sistema de transmisión del autocarril TD5M.
(25)

Conjunto o elemento	Eficiencia
Embrague de fricción	0,995
Pareja de ruedas (externas)	0,980
(internas)	0,985
Cojinetes de rodamientos	0,995
Unión cardán	0,995
Par cónico (normal)	De 0,92 a 0,95
(hipoidal)	De 0,96 a 0,98

2.3.2 Cálculo de la eficiencia de la caja de velocidad (η_2) para la 1ra marcha.

Como los elementos de la caja de velocidad trabajan en serie, la eficiencia será:

$$\eta_{sbl} = \eta_{coj}^m \cdot \eta_{pr}^n$$

Donde:

η_{coj} : eficiencia de los cojinetes (0,995).

η_{pr} : eficiencia de una pareja de ruedas dentadas (0,985).

m: cantidad de cojinetes que trabajan en la caja de velocidad para la marcha dada.

n: cantidad de parejas de ruedas que trabajan en la caja de velocidad para la marcha dada.

η_{sbl} : eficiencia de la caja de velocidades en la primera marcha.

Donde:

$$m=4 \quad y \quad n=1$$

$$\eta_{sbl} = \eta_{sbl}$$

$$\eta_{sbl} = \eta_{coj}^4 \cdot \eta_{pr}$$

$$\eta_{sbl} = (0,995)^4 \cdot (0,985)$$

$$\eta_{sbl} = 0,965$$

2.3.3 Cálculo de la eficiencia del reenvío (η_4) del autocarril TD5M.

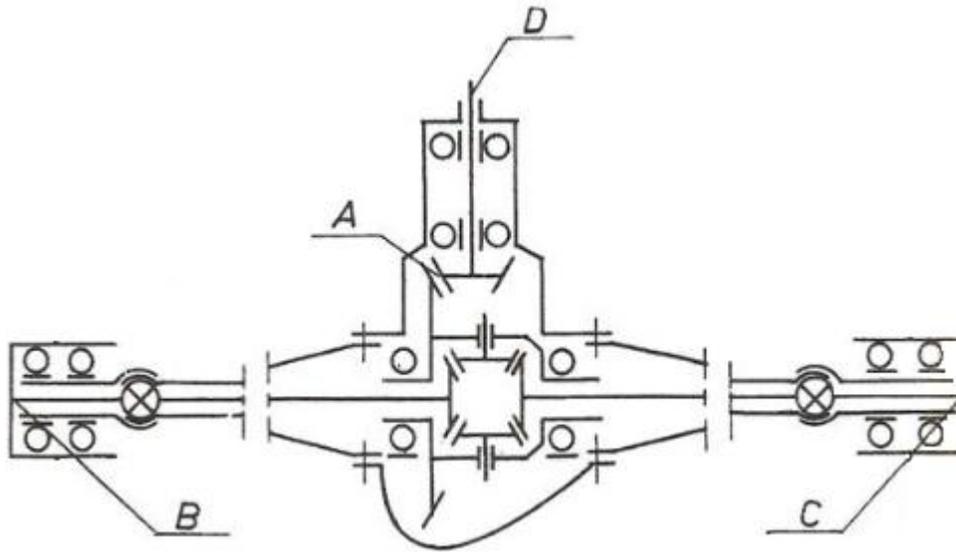


Figura 2.4 Esquema cinemático del reenvío

Para el reenvío (η_4)

$$\eta_4 = \eta_{DA} \frac{2\eta_{AB} \cdot \eta_{AC}}{\eta_{AB} + \eta_{AC}}$$

Donde:

$$\eta_{AD} = \eta_{coj}^2 \cdot \eta_{pr} \quad \eta_{AB} = \eta_{coj}^3 \cdot \eta_c \quad \eta_{AC} = \eta_{coj}^3 \cdot \eta_c$$

$$\eta_{AD} = \eta_{coj}^2 \cdot \eta_{pr}$$

$$\eta_{AD} = (0,995)^2 \cdot 0,985$$

$$\eta_{AD} = 0,975$$

$$\eta_{AB} = \eta_{coj}^3 \cdot \eta_n$$

$$\eta_{AB} = (0,995)^3 \cdot (0,93)$$

$$\eta_{AB} = 0,916$$

$$\eta_{AC} = \eta_{coj}^3 \cdot \eta_n$$

$$\eta_{AC} = (0,995)^3 \cdot (0,93)$$

η_n : eficiencia del par cónico normal

$$\eta_{AC} = 0,916$$

$$\text{como: } \eta_4 = \eta_{AD} \frac{2\eta_{AB} \cdot \eta_{AC}}{\eta_{AB} + \eta_{AC}}$$

$$\eta_4 = 0,8931$$

Para la eficiencia de la transmisión del autocarril

$$\eta_0 = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4$$

$$\eta_0 = 0,995 \cdot 0,9865 \cdot 0,995 \cdot 0,8931$$

$$\eta_0 = 0,853$$

2.3.4 Cálculo del momento torsor que llega al árbol de transmisión del autocarril TD5M.

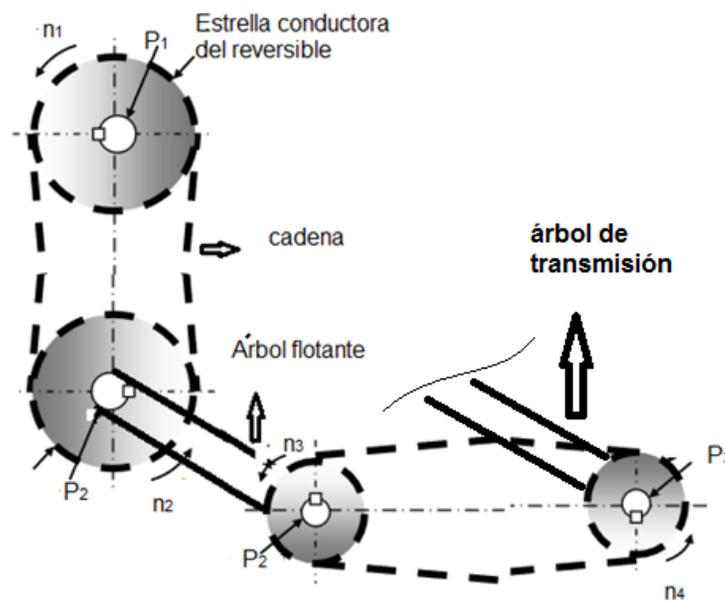


Figura 2.6 Esquema tribológico del sistema de transmisión

2.3.4.1 Cálculo de la potencia que le llega al árbol de transmisión del autocarril TD5M

$$Mt = 9555 \cdot \frac{N_{\varepsilon(p)}}{n_x}$$

$N_{\varepsilon(p)}$: Potencia que llega al árbol de transmisión del autocarril TD5M.

n_x : Revoluciones Potencia que llega al árbol de transmisión del autocarril TD5M

$$P_1 = P_0 \cdot \eta_{tras}$$

P_1 : potencia que llega a la estrella del reenvío

$$P_1 = 26,5 \text{ kW} \cdot 0,853$$

$$P_1 = 22,61 \text{ kW}$$

P_0 : potencia que entrega el motor

η_{tras} : eficiencia de la transmisión

$$P_2 = \eta_{est} \cdot P_1$$

$$P_2 = 0,98 \cdot 22,61 \text{ kW}$$

$$P_2 = 22,16 \text{ kW}$$

P_2 : potencia que le llega al árbol flotante

η_{est} : eficiencia de la transmisión por cadena (0,98)

$$P_2 = P_2'$$

$$P_3 = P_2' \cdot \eta_{est}$$

$$P_3 = 22,16 \text{ kW} \cdot 0,98$$

$$P_3 = 21,72 \text{ kW}$$

P_3 : potencia que le llega al árbol de transmisión

$$\eta_1 = \eta_m \cdot i_{mj} \cdot i_{mr}$$

n_m : revoluciones del motor

i_{mj} : relación de transmisión de la caja de velocidad

$$\eta_1 = 5900 \cdot (1/3,6) \cdot (1/4,62)$$

i_{mr} : relación de transmisión de la caja del reenvío

$$\eta_1 = 354,74 \text{ r/min}$$

donde:

$$\eta_1 = \eta_2 = \eta_3 = \eta_4$$

Momento torsor

$$M_t = 9555 \cdot (21,72 / 354,74)$$

$$M_t = 585,03 \text{ N}\cdot\text{m}$$

2.4 Resultados obtenidos del análisis estático del árbol de transmisión del autocarril TD5M. Acero AISI 1045.

El análisis estático del árbol de transmisión del autocarril TD5M consiste en verificar que éste no fallará inmediatamente después de aplicar determinadas cargas. Donde se comprobará su resistencia “estática” a las cargas nominales verificándose la resistencia a la fatiga, la resistencia estática a las cargas dinámicas (cargas pico) a que es

sometido el árbol de transmisión ya que normalmente en los arranques o cuando hay sobrecargas, los árboles están sometidos a esfuerzos mayores a los nominales. Como se prevé que estas cargas se repiten un número muy pequeño de veces, éstas no tenderían a producir falla por fatiga.

2.4.1 Modelado, cargas y restricciones aplicadas al árbol.

Para el análisis estático del árbol de transmisión del autocarril TD5M por el método de elemento finito se utilizó el software SolidWorks Corporation y para ello se partió del modelado físico del árbol (ver figura 2.7), (26)



Figura 2.7 Modelado del árbol de transmisión

Luego se procede a determinar las sujeciones, que para este caso en ambos extremos del árbol de transmisión este se encuentra acoplado con el núcleo de rueda donde se aplican restricciones fijas y móviles donde acoplan los rodamientos de bolas (ver figura 2.8).

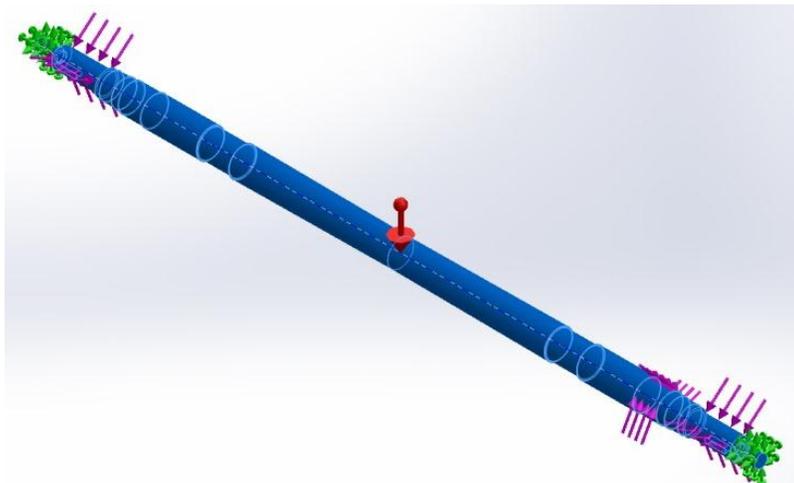


Figura 2.8 Aplicación de las sujeciones al árbol de transmisión TD5M.

Una vez ya definidas las restricciones se aplican las cargas externas a que está sometido el mismo, que para nuestro caso, dado el tipo de transmisión tomaremos en cuenta solamente el momento torsor el cual tiene un valor de $585,03 \text{ N}\cdot\text{m}$, (ver figura 2.9)

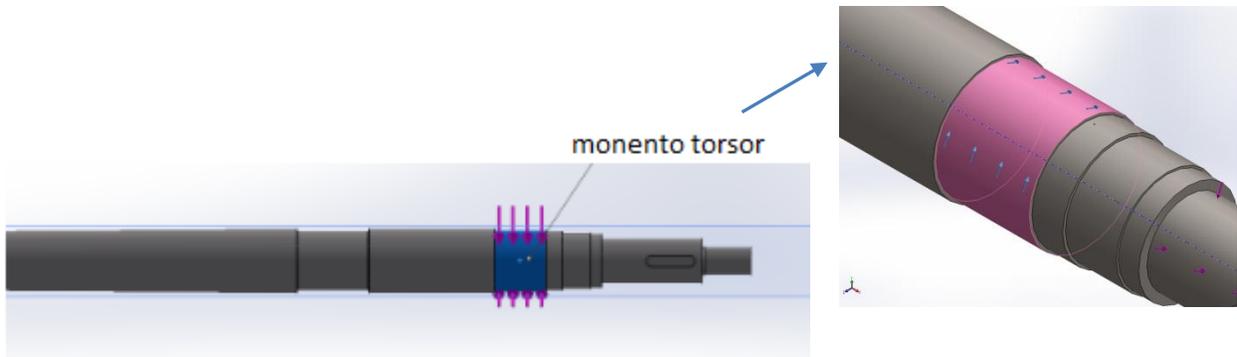


Figura 2.9 Aplicación de las restricciones de torsión para el estudio tensional

Seguido a esto ya definido el material y los anteriores aspectos se procede al mallado de la pieza definiendo el tipo de mallado.

Para el mallado de la del árbol de transmisión se utilizó una malla sólida con elementos cuadráticos de alto orden, el modelo dispone de un mallado más denso en la zona escalonada del árbol con un mínimo de tamaño de 4.64473 mm , mientras que en el resto de la pieza es mucho menos denso con un tamaño máximo de 23.2372 mm , ver figura 2.10.



Figura 2.10 Mallado del árbol de transmisión

Después de determinado el mallado de la pieza se procedió a correr el estudio

2.4.2 Valoración de los resultados obtenidos del análisis estático. Acero AISI 1045

Dadas las gráficas obtenidas en este tipo de estudio podemos comprobar la correlación existente entre las reacciones Von Mises máximas y el límite elástico del material del árbol, acero AISI 1045, las que deben ser inferiores al límite elástico aún multiplicado por el coeficiente de seguridad y al mismo tiempo ser inferior al valor máximo obtenido en el gráfico.

Del estudio estático realizado se puede concluir que la carga aplicada de 585,03 N·m produce un estado tensional en el árbol (ver figura 2.8), cuyas tensiones nominales se encuentran muy cercanas al límite elástico del acero AISI 1045 y que se localizan en el escalón donde acopla el rodamiento, lugar donde se establecen el peso del autocarril, los accesorios e instrumentos de trabajo, más el personal de abordaje en un momento dado, (ver figura 2.12 y 2.14), por lo que este material no posee la resistencia necesaria para las condiciones de explotación impuestas por el estado tensional.

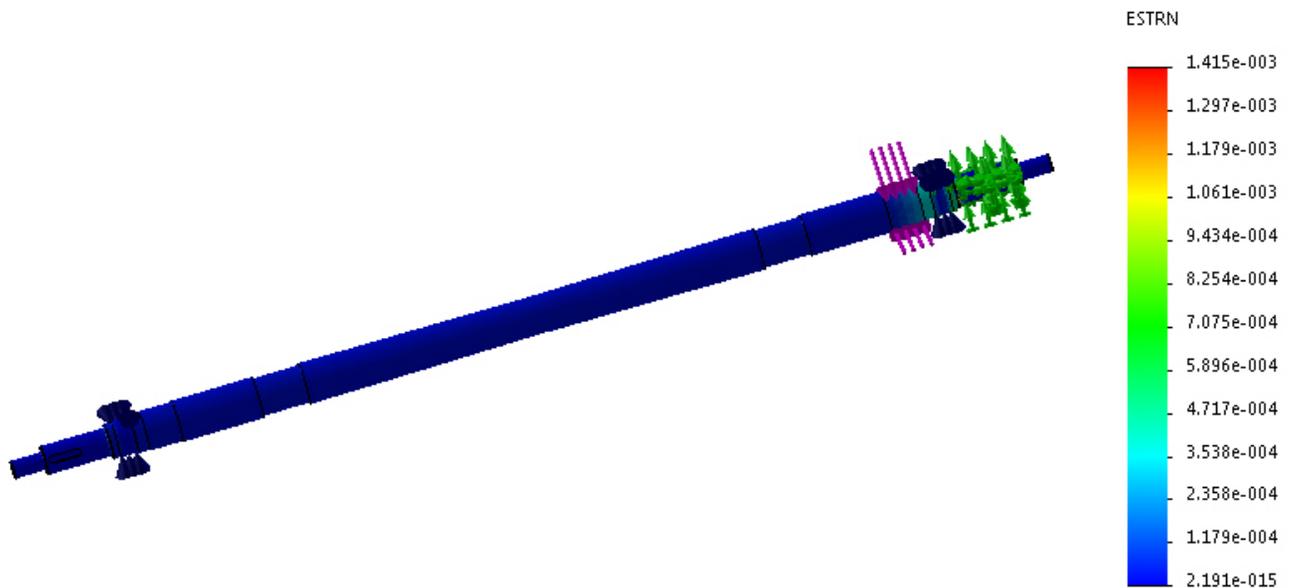


Figura 2.11 Deformación unitaria que se produce en el árbol de transmisión

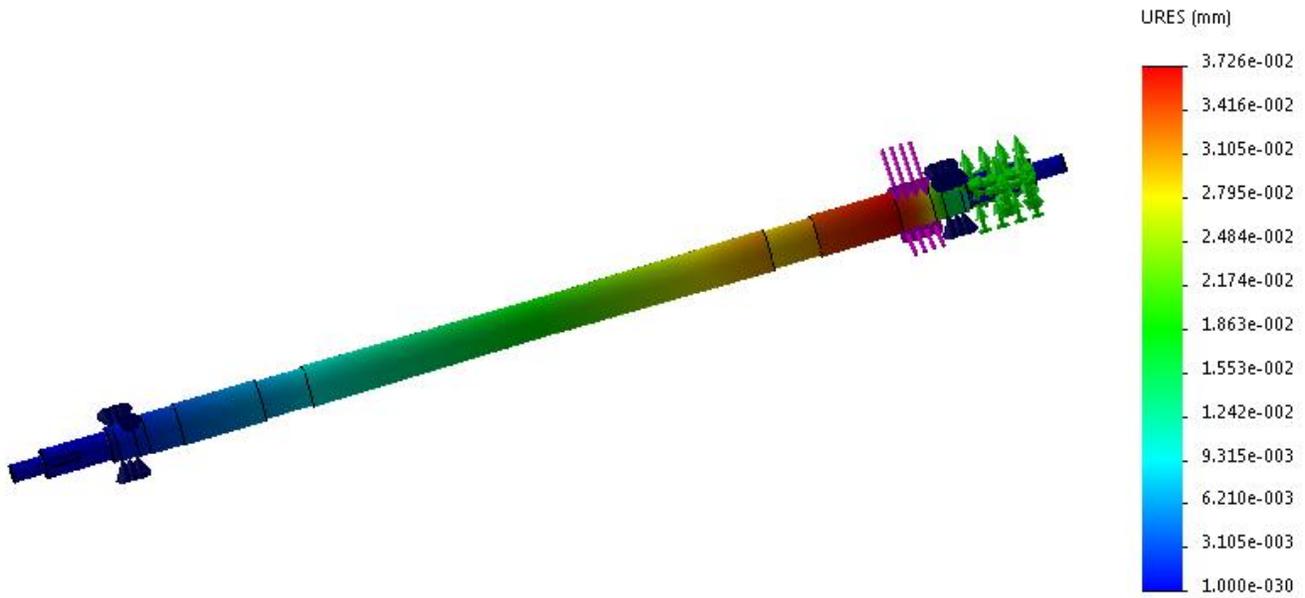


Figura 2.12 Desplazamiento que se produce en el árbol de transmisión

Nombre del modelo: arbol del autocarril
 Nombre de estudio: simulación del árbol{-Predeterminado-}
 Tipo de resultado: Factor de seguridad Factor de seguridad1
 Criterio: Automático
 Distribución de factor de seguridad: FDS mín = 1.1

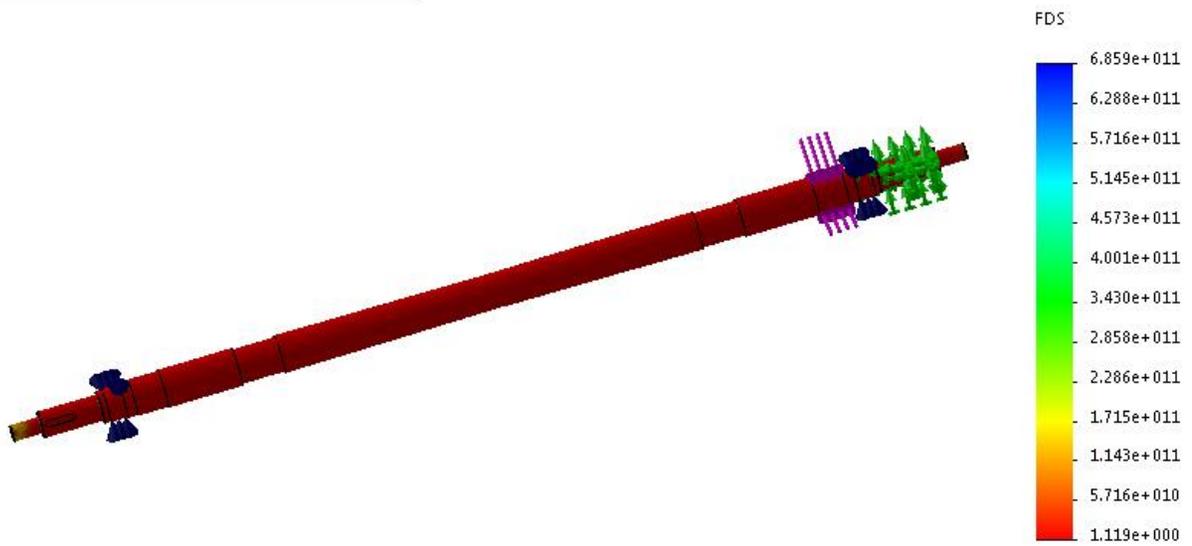


Figura 2.13 Gráfico de factor de seguridad en el árbol de transmisión

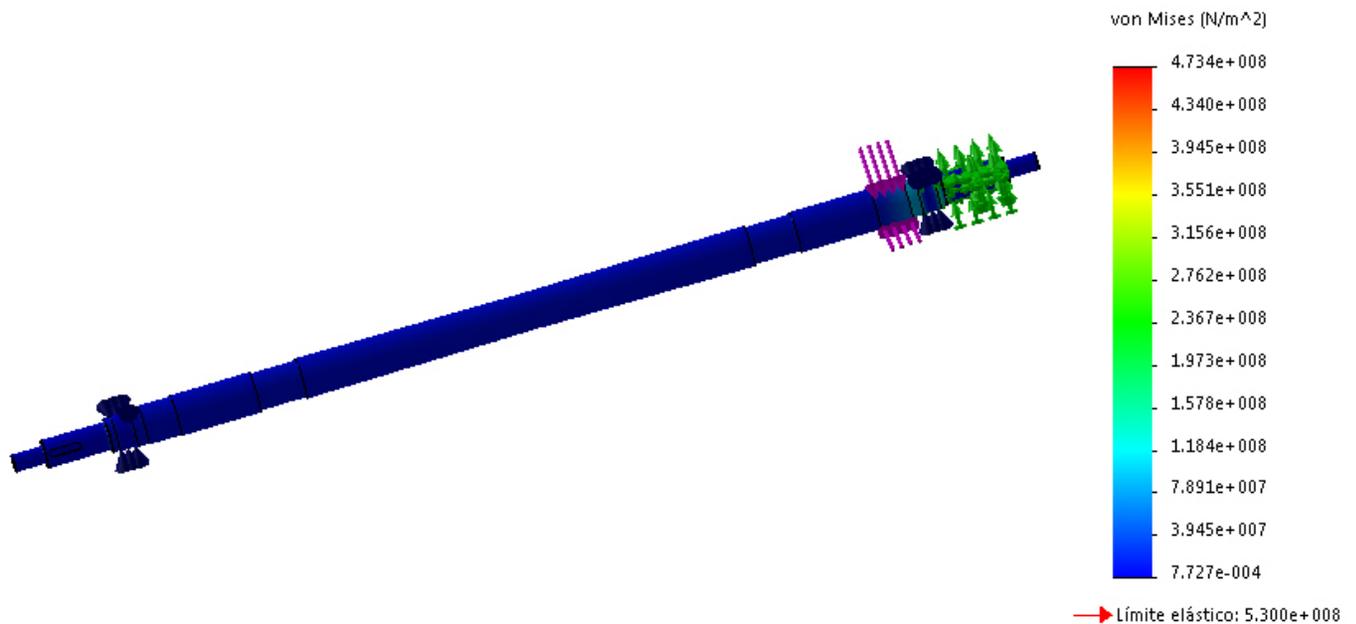


Figura 2.14 Estado tensional que se produce en el árbol de transmisión

2.5 Propuesta de un nuevo material para la fabricación del árbol del autocarril TD5M.

Según los resultados obtenidos en el análisis estático del árbol de transmisión se pudo comprobar que la utilización del acero AISI 1045 no garantiza los niveles de propiedades necesarios para su buen funcionamiento y explotación y con el objetivo de mejorar sus propiedades mecánicas y alcanzar una mayor resistencia a la fatiga, a la flexión y a las cargas dinámicas, proponemos para su fabricación un nuevo material perteneciente al segundo grupo de los aceros de construcción de baja aleación cuyas propiedades y composición se muestran en las tablas 2.3 y 2.4.

La indisponibilidad del acero AISI 1045 viene dada por su baja templabilidad (diámetro crítico de temple 10 - 12 mm) lo que como se corrobora por los análisis de simulación tensionales y por el análisis fractográfico no se obtiene un temple a corazón en las zonas de cargas críticas, escalón de Ø 40 mm (zona de acople del rodamiento con el árbol) y también por su tendencia a la fragilidad de revenido aspecto este que es peligroso para las piezas de configuraciones complejas y de secciones transversales gruesas, (13).

Tabla 2.3 Composición química del acero AISI 5140 y sus equivalencias internacionales. (14).

Acero		Composición Química en %								
Marca	Norma Internacional	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Fe
5140	AISI	0,38 -	0,15 -	0,70 -	Hasta 0,04	Hasta 0,035	0,7 -	Hasta 0,030	Hasta 0,030	97,4 -
41 Cr4	DIN									
37 Cr4	EN									
SCr 440	JIS									
40X (40 Ch)	GOST	0,43	0.30	0.90			0,9			98,1
Temperatura de los puntos críticos: $Ac_1 = 743$, $Ac_3 = 815$, $Ar_1 = 693$, $Ar_3 = 730$										

Tabla 2.4 Principales propiedades mecánicas del acero AISI 5140, (14)

Acero		Propiedades mecánicas			
Marca	Norma Internacional	σ_f	σ_t	δ	σ_B
5140	AISI	Min 660	900	min 12	Min 980
40X (40 Ch)	GOST		- 1100		
σ_f - Resistencia a la flexión , MPa σ_t – Resistencia a la tracción, MPa δ – Elongación, % σ_B – Resistencia a la rotura, MPa					

La selección del acero AISI 5140 obedece en primer lugar a su buena templabilidad, ya que cuando se enfría en aceite permite obtener una templabilidad total entre (20 y 25) mm de diámetro (13). Para la selección de este material nos basamos además en varios criterios, entre los que se encuentran los siguientes; para la selección de:

- La marca del acero - Se seleccionó por las dimensiones de la pieza bruta que se ha de tratar térmicamente.
- La composición química – Por la existencia de concentradores de tensiones y de cargas dinámicas, dada la necesidad de bajar la temperatura de transición al estado de fragilidad.
- El nivel de resistencia – Se determinó seleccionando una adecuada temperatura de revenido.

Por lo anteriormente expuesto se propone el siguiente régimen tecnológico de tratamiento térmico.

2.5.1 Régimen tecnológico de tratamiento térmico a aplicar al árbol de transmisión delantero del autocarril TD5M.

La tecnología de tratamiento térmico a aplicar para alcanzar las propiedades y estructura adecuadas para soportar las cargas tensionales a que es sometido el árbol de transmisión delantero se muestra en la gráfica de la figura 2.15 y consta de tres operaciones tecnológicas: recocido, temple y revenido.

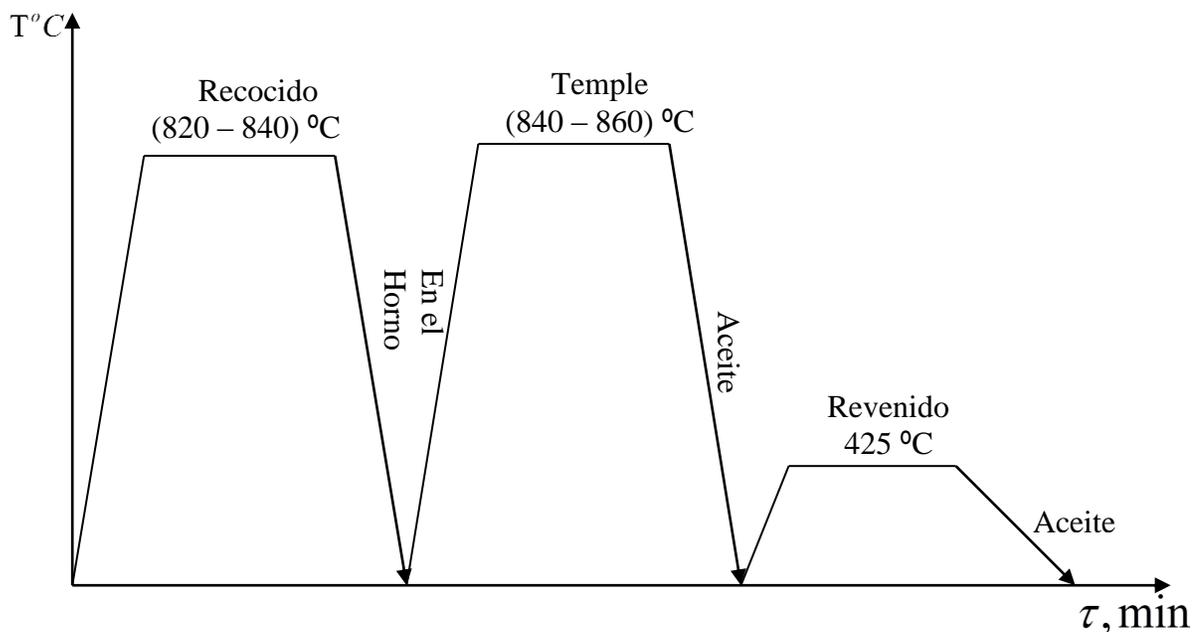


Figura 2.15 Gráfico del proceso tecnológico de tratamiento térmico del árbol de transmisión del autocarril TD5M. (27)

Con este régimen de tratamiento térmico se obtienen el siguiente conjunto de propiedades mecánicas, tabla 2.5

Tabla 2.5 Principales propiedades mecánicas obtenidas después del tratamiento térmico. (27)

Acero		Propiedades mecánicas					
Marca	Norma Internacional	$\sigma_{0,2}$	σ_t	δ	σ_B	Dureza	K1C
5140	AISI	1,05e3	1,18e3	10 - 16	1,05e3	35 - 40	36 - 63
40X (40 Ch)	GOST	- 1,3e3	- 1,44e3		- 1,3e3		
$\sigma_{0,2}$ - Límite elástico , MPa		Dureza - HRC					
σ_t – Resistencia a la tracción, MPa		K1C – Tenacidad a la fractura, MPa.m ^{0,5}					
δ – Elongación %							
σ_B – Resistencia a la rotura, MPa							

Una vez seleccionado el material y propuesto el régimen de tratamiento térmico adecuado a aplicar al árbol del autocarril procedemos a la simulación de las cargas y tensiones a que será sometido este empleando para ello el mismo método y condiciones de estudio que para el acero AISI 1045, salvo que se hicieron modificaciones en las zonas de alta concentración de tensiones sustituyendo los ángulos rectos por ángulos con un radio de acuerdo en los cambios de secciones.

2.6 Resultados obtenidos del análisis estático del árbol de transmisión del autocarril TD5M. Acero AISI 5140. (26)

2.6.1 Estudio tensional.

En las tablas 2.6 y 2.7 y desde las figuras 2.16 hasta la 2.20 se muestran los resultados obtenidos del análisis estático tensional aplicado al árbol de transmisión utilizando el acero AISI 5140, pudiéndose observar que el material resiste las cargas y condiciones de explotación.



Figura 2.16 Mallado del árbol de transmisión

Tabla 2.6 Control de mallado.

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado:	Malla basada en curvatura
Puntos jacobianos	4 Puntos
Tamaño máximo de elemento	23,2372 mm
Tamaño mínimo del elemento	4,64473 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden

Tabla 2.7 Información de malla – Detalles

Número total de nodos	41136
Número total de elementos	25922
Cociente máximo de aspecto	82,718
% de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3	83,1
% de elementos cuyo cociente de aspecto es > 10	3,12
% de elementos distorsionados (Jacobiana)	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:02
Nombre de computadora:	DISEÑO

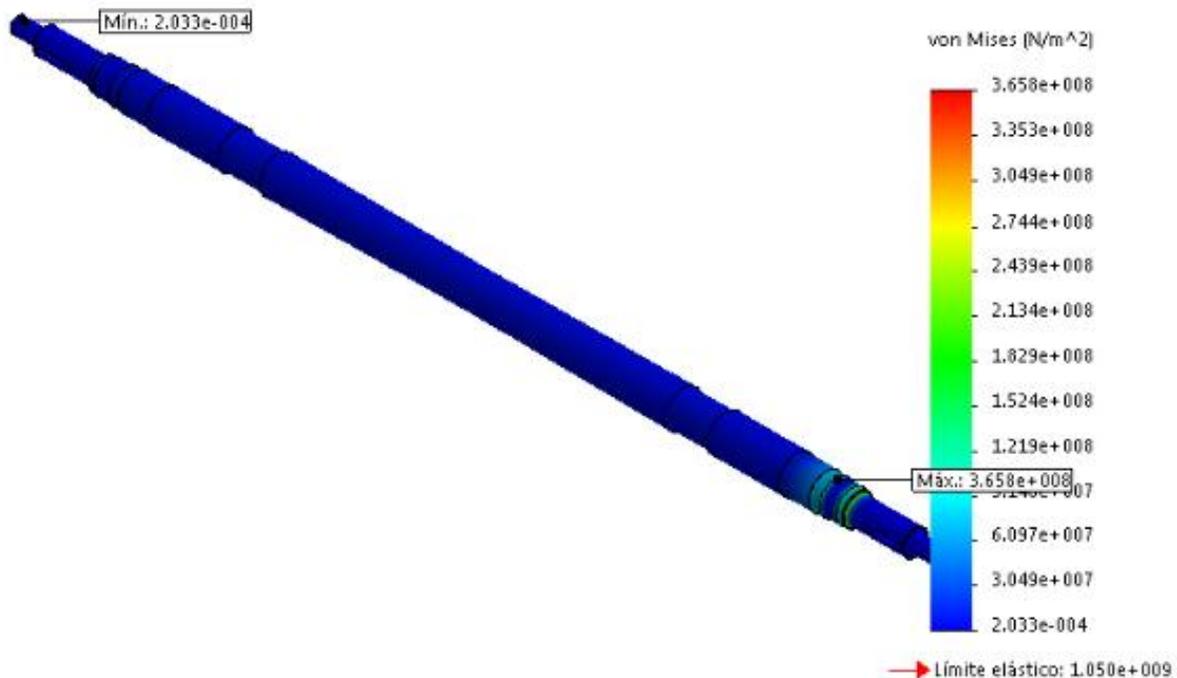


Figura 2.17 Estado tensional que se produce en el árbol de transmisión.

Nombre del modelo: arbol del autocarril
Nombre de estudio: simulación del árbol(-Predeterminado-)
Tipo de resultado: Análisis estático tensión nodal Tensiones1

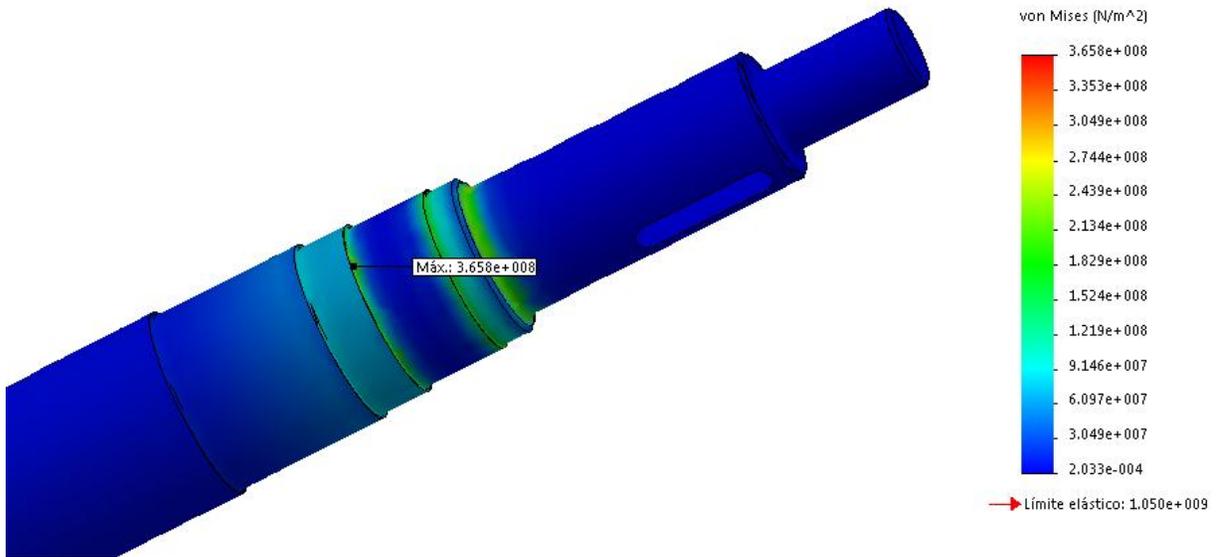


Figura 2.18 Punto de mayor tensión del árbol de transmisión.

Nombre del modelo: arbol del autocarril
Nombre de estudio: simulación del árbol(-Predeterminado-)
Tipo de resultado: Desplazamiento estático Desplazamientos1

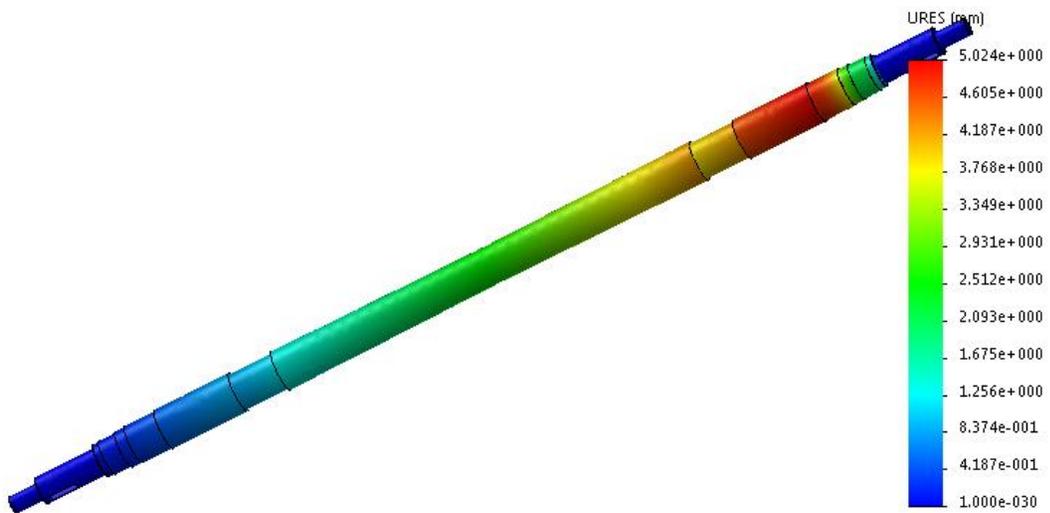
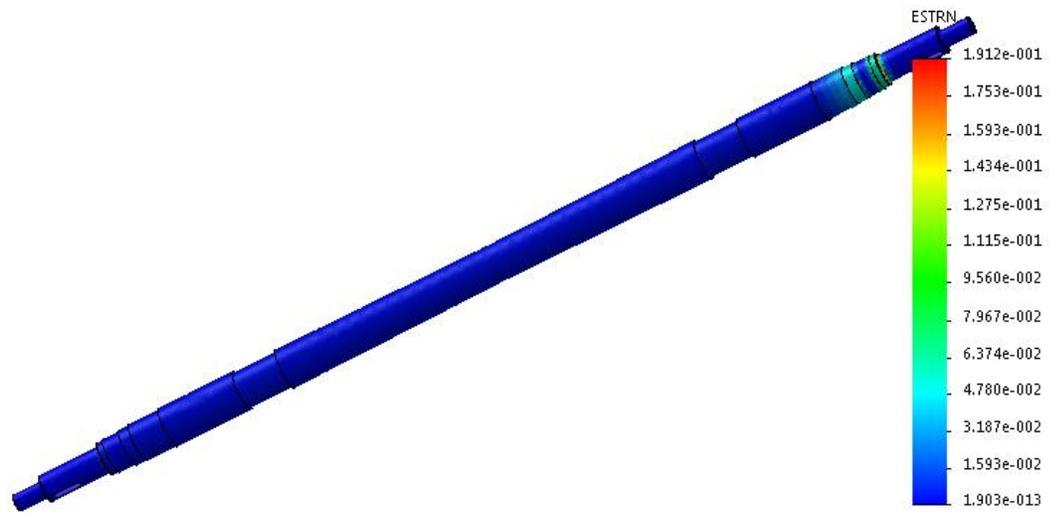


Figura 2.19 Desplazamiento que se produce en el árbol de transmisión

Nombre del modelo: arbol del autocarril
Nombre de estudio: simulación del árbol(-Predeterminado-)
Tipo de resultado: Deformación unitaria estática Deformaciones unitarias1



Nombre del modelo: arbol del autocarril
Nombre de estudio: simulación del árbol(-Predeterminado-)
Tipo de resultado: Factor de seguridad Factor de seguridad1
Criterio: Automático
Distribución de factor de seguridad: FDS mín = 2.9



Figura 2.21 Gráfico de factor de seguridad en el árbol de transmisión

CONCLUSIONES

1. De los análisis realizados en la presente investigación se determinó que la causa de rotura del árbol de transmisión delantero del autocarril TD5M fabricado de acero AISI 1045 se encuentra relacionada con heterogeneidades estructurales, las cuales dadas las condiciones reales de explotación poseen un bajo nivel de propiedades mecánicas, provocado por un agrietamiento múltiple localizado en zonas de alta concentración de tensiones (ángulos rectos) y un mecanismo predominante de falla por rotura por fatiga y flexión.
2. Los estudios tensionales realizados por el M.E.F demuestran que el acero seleccionado AISI 5140, su tecnología de tratamiento térmico y la configuración geométrica en las zonas de alta tensión proporcionan niveles adecuados de resistencia a la fatiga, a la flexión y a las cargas dinámicas observándose además altos valores de resistencia a la rotura y tenacidad a la fractura.

RECOMENDACIONES

1. Presentar los resultados obtenidos en esta investigación al taller de mantenimiento y dirección provincial de la Empresa de ferrocarriles de Holguín para la introducción de esta nueva propuesta en su proceso productivo.
2. Estimular la práctica y el uso de los estudios fractográficos como un método de investigación para determinar las posibles causas de roturas de distintas partes y piezas ya que son de fácil aplicación, bajos costos y proporcionan información valiosa y especializada para la toma de decisiones de las fallas ocurridas en los sistemas mecánicos.
3. Proponer el estudio de la Fractometalografía como curso optativo en la carrera de Ingeniería mecánica.

BIBLIOGRAFÍA

1. Ferrocarriles. Introducción Histórica. Orígenes del Ferrocarril. [En línea]
([http://gitel.unizar.es/contenidos/cursos/FTE/Web_Ferrocarriles/INTRODUCCION_HISTORICA\(Origenes_del_ferrocarril\).html](http://gitel.unizar.es/contenidos/cursos/FTE/Web_Ferrocarriles/INTRODUCCION_HISTORICA(Origenes_del_ferrocarril).html)).
2. Historia del Ferrocarril en Cuba. [En línea] (<https://www.hicuba.com/ferrocarril.htm>).
3. Manual de mecánica de coches, tomado de:. [En línea]
<http://moodle.uho.edu.cu/Ingeniería-Mecánica/Máquinas-automotrices/Conferencias>.
4. Manual de instrucción de explotación del autocarril TD-5 IMZ-8.103-00011-01.
5. **GOST 10791-64**. Requisitos técnicos para ruedas de acero.
6. **ISO 1005-7-82**. Pares de ruedas.
7. Árboles y Ejes. [En línea]
(http://frq.cvg.utn.edu.ar/pluginfile.php/5153/mod_resource/content/1/dise%C3%B1o%20de%20árboles%20y%20ejes.pdf).
8. Imágenes de árboles y ejes. [En línea]
9. Diseño de Árboles. [En línea]
10. **Shigley, Joseph**. Diseño en ingeniería mecánica.
11. **Dobrovolski**. Elementos de máquina.
12. **NC 18-15:1983**.
13. **Guliaev A.P**. Metalografía. 1986. Vol. I y II.
14. **INI.Internaional**. Key to Steell (Llave de los aceros). 2006.

15. **Knezevic 1996.** Mecánica - Electrica. árbol. [En línea]
https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/quimica/3_anio/mecanica_electrica/arb.pdf.
16. **Manual del revisor.** Irregularidades de los ejes y pares de ruedas con las cuales los vagones no se permiten en explotación. 1985.
17. Reglamento de Vagones. 1980.
18. **M, Ipohorski y Acuña R. J.** FRACTOGRAFIA. Aplicaciones al análisis de Fallas. Benos Aires, Argentina : s.n., 1988. ISSN 0325 - 1403.
19. **W. Callister J.** Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los materiales. s.l. : Reverté S.A, 2000. Versión digital.
20. **Askeland.D.R.** Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Tercera. 1998. ISBN 0-534-93433-4.
21. **International, ASM.** ASM Metals Handbook - Mechanical Testing & Evaluations. 2000. Vol. 8. ISBN 0-87170-389-0.
22. SolidWorks. [En línea] <https://es.wikipedia.org/wiki/SolidWorks>.
23. **GOST 10243 -75.** Methods of test estimation of macrostructure.
24. **ASM Handbook.** Fractography . s.l. : ASM International, ASM Handbook. Vol. 12. ISBN 0-87170-007-7 (v. 1).
25. **Departamento de Mecánica Aplicada.** Máquinas-automotrices.Conferencias. Universidad de Holguín. Holguín : s.n., 2016.
26. **SolidWorks Co.** Software SolidWorks. 2016.
27. **Granta Design Ltd.** CESEdupack.Software de Selección de Materiales. [Electrónico] s.l. : Cambridge, United Kingdom , 2010.

